



**SÜRTÜNME Lİ MEKANİK KAPLAMA
CİHAZI TASARIMI**

Abdulkadir VAROL

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Teknolojileri Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Vedat SAVAŞ**

AĞUSTOS 2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜRTÜNMELİ MEKANİK KAPLAMA CİHAZI TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulkadir VAROL

(161143109)

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Teknolojileri

Programı: Mekanik

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 02 Temmuz 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 02 Ağustos 2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Vedat SAVAŞ (F.Ü.)
Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Faruk KARACA (F.Ü.)
Dr. Öğr. Üye Aydın GÜLLÜ (T.Ü.)

AĞUSTOS 2019

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinin oluşmasında, yürütülmesinde değerli bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren, destekleyen kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Vedat SAVAŞ'a, çalışmalarım esnasında her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü araştırma görevlileri Salih AĞAR, Cihad FİDAN, Aybars MAHMAT, Volkan TUĞAN ve atölye sorumlusu Ali YURT'a, çalışmalarım esnasında değerli görüş, öneri ve bilgilerini benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU, Dr. Öğr. Üyesi Yakup SAY ve Arş. Gör. Naim ASLAN'a, projenin gerçekleştirilmesi için sağladığı tüm imkanlar ve emeği için Sadettin AKKAYA'ya, yüksek lisans eğitimimin başından bu tezin ortaya çıkartılmasına kadar her türlü konuda yardımlarını esirgemeyen yakın dostum Muhammed GÜR'e ve diğer tüm yakın dostlarıma katkılarından ve vermiş oldukları destekten dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın yürütülmesi için gerekli maddi desteği sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) birimine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren ve her zaman yanımda olan değerli aileme şükranlarımı sunarım.

Abdulkadir VAROL
ELAZIĞ – 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	IX
KISALTMALAR LİSTESİ	X
1.GİRİŞ	1
2.YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ	17
2.1.Sıcak Daldırma	18
2.2.Termal Püskürtme	20
2.2.1. Yanma İşlemleri.....	21
2.2.1.1.Alev Püskürtme	21
2.2.1.2.Tel Alev Püskürtme	22
2.2.1.3.Toz Alev Püskürtme	22
2.2.1.4.Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme.....	22
2.2.1.5.Patlama Alev Püskürtme	23
2.2.2.Elektrik İşlemleri.....	23
2.2.2.1.Ark Püskürtme	23
2.2.2.2.Plazma Püskürtme	24
2.3.Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	25
2.4.Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (CVD)	26
2.5.Sol-Jel Yöntemi.....	27
2.6.Elektrolitik Kaplama Yöntemi	28

2.7.Gaz Alüminyum Kaplama Yöntemi.....	28
2.8.Elektroforez.....	29
2.9.Vakum ile Kaplama Yöntemi.....	29
2.10.Giydirme (Cladding) Yöntemi.....	29
2.11.Kutu Yöntemi.....	30
3.SÜRTÜNME Lİ BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİ.....	31
3.1.Sürtünme Kaynağı (Friction Welding).....	31
3.2.Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding).....	32
3.3.Sürtünme Yüzey Kaplaması (Friction Surfacing).....	33
4.MATERYAL ve METOT.....	38
4.1.Sürtünmeli Mekanik Kaplama Yöntemi.....	38
4.2.Sürtünmeli Mekanik Kaplama Cihazı.....	42
4.3.Sürtünmeli Mekanik Kaplama İşleminin Gerçekleştirilmesi.....	47
4.4.Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	50
4.5.Numune Hazırlama İşlemleri.....	52
4.6.Mikroyapı İncelemeleri.....	54
4.7.Mikrosertlik Deneyi.....	55
4.8.XRD (X-Işını Kırınımı) Analizi.....	56
5.BULGULAR.....	57
5.1.Optik Mikroskop Analizleri ve Kaplama Kalınlığı Ölçümleri.....	57
5.2.SEM – EDS Analizleri.....	63
5.3.Mikrosertlik Ölçümleri.....	89
5.4.XRD (X-Işını Kırınımı) Analizi.....	91
6.SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	100

ÖZET

Metal teknolojilerinde, yüzey kaplama işlemleri önemli bir yer tutmaktadır. Literatüre bakıldığında metal kaplama ile ilgili çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, geleneksel metal kaplama yöntemlerinden farklı olarak katı bir şekilde, sürtünme yoluyla mekanik olarak kaplama işleminin gerçekleştirilmesi işlenmiştir. Bu çalışmayı gerçekleştirmek üzere deneysel çalışmalar için kullanılacak olan bir sürtünmeli mekanik kaplama cihazı tasarlanarak imal edilmiştir. Cihazın deneysel uygulamaları için altlık malzeme olarak St37-2 çelik ve kaplama malzemesi olarak AA 7075-T6 alüminyum alaşımı kullanılmıştır.

Yapılan kaplama deneyleri sonucunda bu yöntemin başlıca parametreleri olan; basınç, dönme devri ve ilerleme hızının kaplamaya olan etkileri araştırılmıştır. Kaplanmış olan malzeme yüzeylerinden kesitler halinde numuneler alınarak, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ve X-ışınları kırınımı (XRD) analizleri yapılarak kaplanmış numuneler ile ilgili mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde kalınlık ve mikrosertlik ölçümleri yapılarak bu yöntemle imal edilmiş olan alüminyum ve çelik malzeme çifti için optimum kaplama parametreleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaplama Yöntemleri, Sürtünmeli Mekanik Kaplama, Alüminyum Kaplama

SUMMARY

Design of Friction Mechanical Coating Device

In metal technologies, surface coating processes play an important role. In the literature, a wide variety of methods for metal coating are used. In this study, unlike conventional metal coating methods, the process of mechanical coating by friction is carried out in a solid manner. In order to realize this study, a friction mechanical coating device which will be used for experimental studies is designed and manufactured. St 37-2 steel was used as the substrate material and AA 7075-T6 aluminum alloy was used as the coating material for experimental applications of the device.

As a result of the coating tests, the main parameters of this method; The effects of pressure, rotational speed and feed rate on the coating were investigated. Samples were taken from the surfaces of the coated materials, optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM), energy distribution spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) analyzes were performed to investigate the microstructure properties of the coated samples. Furthermore, thickness and microhardness measurements were made on the samples and optimum coating parameters were determined for the aluminum and steel material pair produced by this method.

Key Words: Coating Methods, Friction Mechanic Coating, Aluminum Coating

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1.	Kaplama Yöntemleri	18
Şekil 2.2.	Galvanizleme ile kaplama yönteminin işlem basamakları şeması	19
Şekil 2.3.	Termal Püskürtme ile Kaplama Yönteminin Uygulanması	21
Şekil 2.4.	Yüksek hızda oksijen-yakıt püskürtme termal püskürtme yöntemi kullanılarak yapılan karbür kaplama işlemi	23
Şekil 2.5.	Bir CVD ünitesinin şeması, reaksiyon: $A + B \rightarrow C + D$	26
Şekil 3.1.	Sürtünme Kaynağı aşamaları: (a): Dönme başlangıcı, (b): Yüzeylerin temas etmesi, (c): Sürtünmenin gerçekleşmesi, (d): Durma aşaması	31
Şekil 3.2.	Sürtünme Karıştırma Kaynağı İşlemi	33
Şekil 3.3.	Sürtünme yüzey kaplaması işlem süreci (a) Dönme başlangıcı, (b) ilk temas, (c) ilk deformasyon aşaması ve (d) biriktirme aşaması	34
Şekil 3.4.	Sürtünmeli yüzey kaplama yöntemi ile dört katmanlı kaplama oluşturulması (a) Art arda kaplama, (b) art arda gelen dört işlemle üretilen kaplama, (c) elde edilen son kalınlığın ölçülmesi ve (d) frezeleme işlemi sonrası son geometri	36
Şekil 4.1.	Sürtünmeli mekanik kaplama işleminin uygulama şeması.....	39
Şekil 4.2.	Sürtünmeli mekanik kaplama yönteminin işlem adımları, (a) Kaplama işlemine başlangıç ve ilk temas, (b) yüzeyde kaplamanın oluşması, (c) kaplamanın ilerleme ile numune yüzeyi boyunca uygulanması, (d) Kaplama işleminin sonlanması	40
Şekil 4.3.	Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı.....	42
Şekil 4.4.	Sürtünmeli mekanik kaplama cihazının torna tezgahı üzerinde yer alan tablaya yerleştirildiği bölüm	43
Şekil 4.5.	Sürtünmeli mekanik kaplama cihazına ait hidrolik şeması	44
Şekil 4.6.	Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı üç boyutlu tasarım görüntüsü.....	46
Şekil 4.7.	Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı tasarımı ön kesit görüntüsü	46
Şekil 4.8.	Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı tasarımı üst kesit görüntüsü	47
Şekil 4.9.	Kaplama deney düzeneği.....	50
Şekil 4.10.	Kaplama işleminin gerçekleştirilmesi	50

Şekil 4.11.	Kaplama öncesinde hazırlanan alüminyum numuneler.....	51
Şekil 4.12.	Numune Kesme Cihazı.....	52
Şekil 4.13.	Numune zımparalama ve parlatma cihazı	53
Şekil 4.14.	Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop	54
Şekil 4.15.	Mikrosertlik Deney Cihazı	55
Şekil 4.16.	X-Işını Kırınımı (XRD) Cihazı	56
Şekil 5.1.	Alüminyum kaplı çelik çubuklar	57
Şekil 5.2.	Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler.....	57
Şekil 5.3.	Numunelere ait optik mikroskop görüntüleri	61
Şekil 5.4.	Basınç – Kaplama kalınlığı grafiği.....	62
Şekil 5.5.	Dönme devri – Kaplama kalınlığı grafiği.....	62
Şekil 5.6.	İlerleme hızı – Kaplama kalınlığı grafiği	63
Şekil 5.7.	1 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	64
Şekil 5.8.	2 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	65
Şekil 5.9.	3 numaralı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü	66
Şekil 5.10.	4 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	66
Şekil 5.11.	5 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	67
Şekil 5.12.	6 numaralı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü	68
Şekil 5.13.	7 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	69
Şekil 5.14.	8 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	70
Şekil 5.15.	9 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	71
Şekil 5.16.	10 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	72
Şekil 5.17.	11 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	73
Şekil 5.18.	12 numaralı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü	74
Şekil 5.19.	13 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	74
Şekil 5.20.	14 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	75
Şekil 5.21.	15 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	76
Şekil 5.22.	16 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	77
Şekil 5.23.	17 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	78
Şekil 5.24.	18 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	79
Şekil 5.25.	19 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	80
Şekil 5.26.	20 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	81
Şekil 5.27.	21 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	82

Şekil 5.28.	22 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	83
Şekil 5.29.	23 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	84
Şekil 5.30.	24 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	85
Şekil 5.31.	25 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	86
Şekil 5.32.	26 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	87
Şekil 5.33.	27 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü	88
Şekil 5.34.	Alüminyum kaplama bölgesinin Sertlik – Kaplama kalınlığı grafiği.....	91
Şekil 5.35.	2 numaralı numuneye ait XRD analizi	92
Şekil 5.36.	13 numaralı numuneye ait XRD analizi	92



TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. DeneYlerde kullanılan parametreler.....	48
Tablo 4.2. Tam faktöriyel metodu ile belirlenen kaplama deneyleri.....	49
Tablo 4.3. AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi	51
Tablo 4.4. St37-2 çeliğinin kimyasal bileşimi	52
Tablo 5.1. Numunelerin kaplama kalınlıkları.....	58
Tablo 5.2. 1 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	64
Tablo 5.3. 2 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	65
Tablo 5.4. 4 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	67
Tablo 5.5. 5 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	68
Tablo 5.6. 7 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	69
Tablo 5.7. 8 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	70
Tablo 5.8. 9 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	71
Tablo 5.9. 10 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	72
Tablo 5.10. 11 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	73
Tablo 5.11. 13 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	75
Tablo 5.12. 14 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	76
Tablo 5.13. 15 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	77
Tablo 5.14. 16 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	78
Tablo 5.15. 17 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	79
Tablo 5.16. 18 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	80
Tablo 5.17. 19 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	81
Tablo 5.18. 20 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	82
Tablo 5.19. 21 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	83
Tablo 5.20. 22 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	84
Tablo 5.21. 23 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	85
Tablo 5.22. 24 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	86
Tablo 5.23. 25 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	87
Tablo 5.24. 26 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	88
Tablo 5.25. 27 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu	89
Tablo 5.26. Mikrosertlik HV Ölçüm Sonuçları	90

KISALTMALAR LİSTESİ

SEM	: Scanning electron microscopy
EDS	: Energy distribution spectroscopy
XRD	: X-Ray diffraction
PVD	: Physical vapor deposition
DVD	: Directly vapor deposition
CVD	: Chemical vapor deposition
LR	: Laser Remelting
HSS	: High-speed steel
FS	: Friction surfacing
EIS	: Electrochemical impedance spectroscopy

1. GİRİŞ

Teknolojinin sürekli olarak hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte, birçok alanda yeni ve kullanım alanı bir hayli geniş olan makine ve cihazlar insanlığın kullanımına sunulmuştur. Makine teknolojisinin ilk zamanlardaki hedefi, insan ihtiyaçlarını giderme ve yaşamı kolaylaştırma olmuştur. Günümüzde ise makine teknolojisindeki gelişmeler yaşamın temel ihtiyacı haline gelmiştir.

Sanayi devriminin yapılmasıyla birlikte iş gücüne duyulan ihtiyaçta artmıştır. O dönemlerde ihtiyaç olan gücün büyük bir kısmı insanlarla karşılanmaya çalışılmıştır. Fakat sanayinin ilerlemesiyle birlikte ihtiyaç duyulan güç daha da artmıştır. Sanayi devrimiyle birlikte açılan birçok fabrika ve işletmede tamamen makineli üretime geçilmeye başlanmıştır. Makinelerin zaman içerisindeki bu hızlı gelişmesinin bir sonucu olarak makinelerden istenilen özellikler de giderek artmıştır. Bütün bu gelişmeler ve teknolojinin durdurulamaz ilerleyişi hayatı büyük ölçüde makinelere bağımlı bir hale getirmiştir. Bu gelişmelerin ve makinelere olan bu bağılılığın bir sonucu olarak makinelerin kullanım alanının arttırılması, daha fazla iş yapabilmesi ve daha zor şartlar altında çalışmaya uygun olması istenilmektedir.

Birçok endüstriyel uygulamada, özellikle yüksek statik ve dinamik yüklerin bulunduğu sistemlerde, makine parçalarının bu ağır yüklere dayanıklı olmasının yanında başta korozyon olmak üzere aşınma ve yorulma gibi malzemeyi zorlayacak çevre şartlarından da etkilenmemesi gerekir. Bunun için birçok gelişen sektörün giderek artan ihtiyaçları göz önünde bulundurularak üstün performanslı, ağır çalışma şartlarına dayanıklı yeni malzemelerin geliştirilmesi zorunlu hale gelmiştir. Üstün özelliklere sahip bu malzemeleri imal edebilmek için birkaç farklı malzemenin ihtiyaç duyulan en iyi özelliklerinin tek bir malzemedeki toplanması gerekmektedir.

Malzeme bilimi alanında ortaya çıkan ihtiyaçların neticesinde üstün özellikli malzemeler üreterek makine parçalarının özelliklerini iyileştirmek ve daha dayanıklı hale getirmek için günümüzde sanayinin birçok dalında metal kaplama teknolojileri kullanılmaktadır. Metal kaplama teknolojileri, bir metal malzeme yüzeyinin, daha üstün özelliklere sahip ikinci bir metalle fiziksel yada kimyasal yöntemler ile kaplanarak yüzeysel özelliklerinin geliştirilmesi esasına dayanmaktadır.

Metal kaplamanın temelleri 18.yy'a kadar dayanmaktadır. İtalyan asıllı bilim adamı Giovanni Galvani elektrik akımı kullanılarak iyonların hareket ettirebildiğini bulmuş ve bu metotla metal iyonlarını iki elektrot arasında transfer etmeyi başarmıştır. Bu yüzden metal kaplamanın temellerini bulduğu herkes tarafından kabul edilmiş ve metal kaplama sanayisinde birçok yerde kullanılan galvaniz kelimesi bu bilim adamının soyadından gelmiştir. Sonrasında bu alanda çalışan çok sayıda bilim adamı olmuş ancak 19.yy'da Faraday uygulanan akım değerleri ile iyonlar arasındaki bağlantıları formülize ederek metal kaplamanın kullanılmaya başlanmasına öncülük etmiştir [1].

Günümüzde demir, çelik, bakır, pirinç gibi metalleri korumak, aşınmayı ve yıpranmayı azaltmak için krom, nikel, çinko, kobalt, alüminyum, gibi metallerle kaplanması çok yaygın hale gelmiştir. Bu kaplamaların yapılabilmesi için çok çeşitli kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Metallerde uygulanacak kaplama yönteminin seçimi, metal ürününün kullanım amacına göre belirlenir. Bazı metal kaplama türleri metali pas, korozyon, kir ve kalıntılardan korumak için tasarlanmıştır. Makineler kullanıldığı amaca göre su, yakıt, yağ, yağlayıcılar, yüksek sıcaklık ve kir gibi çeşitli olumsuz çalışma ortamı faktörlerine maruz kalabilmektedir. Koruyucu bir kaplama olmadan bu makineler, düzenli olarak maruz kaldığı bu olumsuz çevre şartlarından dolayı hızla zarar görecektir. Başta oksidasyon ve paslanma olmak üzere malzeme yüzeyinde çok çeşitli kusurlar oluşacaktır. Metalin kaplanması onu bu faktörlerden korur, böylece paslanmaya, oksidasyona ve aşınmaya karşı daha dayanıklı ve uzun ömürlü bir malzeme olmasını sağlar. Bazı kaplama çeşitleri ise metal malzemenin sürtünme sırasında yağlayıcılık özelliklerini iyileştirerek malzemenin daha uzun ömürlü olmasını sağlamak için kullanılır. Ayrıca tüm bu iyileştirmelerin haricinde dekoratif olarak daha estetik bir görüntü oluşturması amacıyla da metal kaplama yapılmaktadır.

Metal kaplamaların uygulanması için çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kaplanacak malzeme ana metalin üzerine sıvı veya toz formunda püskürtülebilir, ana metal sıvı formdaki kaplama malzemesine daldırılabilir veya elektrolizle de yapılabilir. Metal kaplama için hangi uygulama metodunun en iyi olduğunu belirleyen çeşitli faktörler vardır. Bu temel faktörler; kullanım amacı, kaplamanın iyileştiriciliği, istenilen kaplama kalınlığı, üretim maliyeti, üretim süresi, ürünün son halinin görüntüsü, ana malzemeye olan etkisidir.

Mühendislik alanındaki çalışma koşullarına uyum sağlayacak şekilde yüksek dayanıklılığa sahip olan malzemelerin imalatında kullanılan ham maddelerin rezervleri

gün geçtikçe azalmaktadır. Bu sebeple malzemenin tamamı yerine sadece dış yüzeyinin değiştirilerek veya iyileştirilerek, ağır çevre koşullarına karşı dayanıklı olması ve malzemenin ömrünün arttırılması sağlanmaktadır. Bu amaçla yüzey mühendisliği alanında popülerliği giderek artan yüzey kaplama teknolojisi geliştirilmiştir. Yüzey kaplama teknolojisini uygulayan için bir çok farklı kaplama yöntem geliştirilmiştir. Kaplama işlemlerini birbirinden ayıran noktalar; uygulama sıcaklığı, işlemin kolaylığı, istenilen kaplama kalınlığı, kaplamanın yapışma oranı, kaplanacak parçanın geometrik özellikleri, kaplama malzemesinin fiziksel hali ve uygulamanın ekonomikliği gibi faktörlerdir. Literatüre bakıldığında endüstride sıklıkla kullanılan çeşitli kaplama yöntemlerini incelemek ve geliştirmek için birçok çalışma yapılmıştır.

Wang vd. [2] sıcak daldırma ile kaplama yöntemini kullanarak paslanmaz çeliğin (1Cr18Ni9) saf alüminyum içerisine batırılarak kaplanmasını incelemiştir. Kaplama işleminin ardından malzeme yüzeyinde bir oksit tabakası oluşturmuşlardır. Çelik malzeme üzerindeki alüminyumun kalınlığının, kaplama süresi ile doğru orantılı olarak arttığı, ancak içine daldırılan alüminyumun sıcaklığındaki artışla azaldığı belirlenmiştir. Daha düşük sıcaklık ve daha uzun süre ile çelik malzeme üzerinde daha kalın bir alüminyum tabakası elde edilmiştir. Alüminyum kaplanmış çeliğin 800°C'de yapılan oksidasyon işlemi sırasında ise çelik yüzey üzerinde alümina, Al₄Cr ve Al₁₇Cr₉'dan oluşan bir oksit tabakasının oluşumu gerçekleşmiştir.

Deqing vd. [3] yapmış oldukları çalışmada, çelik malzeme yüzeyine sıcak daldırma yöntemini kullanarak saf alüminyum ile kaplama işlemini ve ardından oksidasyon işlemi uygulanmasını incelemiştir. Kaplamanın aşınmaya dirençli bir yüzey olması için kaplama yüzeyinde alüminyum oksit tabakası oluşturulması amaçlanmıştır. Çelik üzerinde oluşan saf alüminyum tabakanın kalınlığı, kaplama işlemi sırasında çalışılan sıcaklık ve zamandaki artışla azalmıştır. Çelik malzeme yüzeyinde oluşan Fe-Al intermetalik tabakanın kalınlığı ise, banyo sıcaklığı ve sıcak daldırma süresinin artmasıyla artış göstermiştir. Deneysel verilere ve geliştirilen matematik modele göre, daldırma sıcaklıklarının değişimi, Fe-Al intermetalik tabakasının kalınlığında oldukça fazla değişime sebep olmuştur. X-ışını kırınımı (XRD) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizi, çelik tabakasının üst kısmında önce ince bir Al₂O₃ tabakası, ardından daha ince bir FeAl₃ ve daha sonra ise Fe₂Al₅ tabakası oluştuğunu ortaya koymuştur.

Kobayashi vd. [4] yaptıkları çalışmada, sıcak daldırma yöntemi kullanılarak karbon çeliğinin alüminyum ile kaplanması işlemi sonucu oluşan Fe-Al intermetalik bileşik tabakanın tokluğunu incelemiştir. Sonrasında karbon çeliği yüzeyindeki Fe-Al intermetalik bileşik katmanlarının büyüme mekanizması, morfolojisi ve mekanik özellikleri, 873 ila 1323 K arasındaki sıcaklıklarda yapılan kaplama uygulamalarında difüzyonun olduğu numuneler incelemiştir. Fe_2Al_5 katmanları 873-923 K sıcaklıklarda difüzyon ile oluşmuştur. Bununla birlikte, nispeten daha yüksek kırılma ve oksidasyon direncine sahip FeAl ve Fe_3Al katmanları, 1273 K° den daha yüksek sıcaklıklarda difüzyon işlemi ile oluşturulmuştur. FeAl ve Fe_3Al katmanlarının büyümesi için gereken aktivasyon enerjileri, sırasıyla $Q(FeAl)=180$ ve $Q(Fe_3Al)=260$ kJ/mol olarak bulunmuştur. Fe-Al intermetalik bileşik katmanlarının oluşumu ve büyümesinin, Fe atomlarının intermetalik bileşik katmanlarına difüzyonu ile sağlandığı tespit edilmiştir.

Koçanoğulları vd. [5] toz metalürjisi ile elde edilmiş demir esaslı numunelere sıcak daldırma ile kaplama yöntemi uygulayarak bu malzemelerin yüzeylerinin alüminyum ile kaplanmasını incelemiştir. Numuneler, ergime sıcaklıkları 700 °C ve 750 °C olan Al-Si12CuFe alaşımı içerisine, 30 s ve 300 s süre ile argon koruyucu gaz ortamında daldırılarak, kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Alüminyum ile çelik arasında bir arayüzey tabakası oluşmuştur. Numunelerin korozyon dayanımını belirlemek için, kaplamalı numuneler için 90 gün ve kaplamasız numuneler 7 gün süre boyunca aynı yoğun tuz ortamında korozyon testi uygulanarak test edilmiştir. Ayrıca numunelerdeki kütle değişimleri ve metalografik yöntemlerle yapılan analizler değerlendirilmiştir. Numunelerin içerdiği kimyasal bileşimin, korozyon oluşumuna önemli sayılabilecek bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca alüminyum ile kaplanan numunelerin korozyona karşı yoğun tuz ortamında çok daha iyi bir direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır. Korozyon oluşumu kaplamasız numunelerin yüzeyinde çukurcuk tipi şeklinde iken, kaplamalı numunelerin yüzeyinde ise sert ve beyaz renkli bir alüminyumoksit tabakası şeklinde oluşmuştur. Test sonucunda yapılan mikroskobik incelemelerin sonucuna göre, kaplama yüzeyinde oluşan pitting tipi korozyonun, oluşan alüminyum kaplama tabakasının içerisine doğru kılcal çatlaklar halinde nüfuz ettiği ve bazı yerlerde korozyonun oluşturduğu bu çatlakların arayüzey tabakasına kadar ilerlediği gözlemlenmiştir.

Awan vd. [6] tarafından yapılan çalışmada, sıcak daldırma yöntemi ile alüminyumla kaplanan çeliğin kaplama kalınlığının, şekillendirilebilirlik ve süneklik üzerindeki etkisi, 3 nokta eğme testi ve metalografik analizler kullanılarak araştırılmıştır. Alüminize edici eriyikteki silikon miktarının kademeli olarak arttığında, kaplama tabakasında ölçülen sünekliğin de arttığı gözlenmiştir. Metalografik inceleme sonucunda alüminize edici eriyikteki silikon miktarı arttıkça, alüminyum kaplama ile çeliğin arasında oluşan ara bileşik tabakanın kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan araştırma sonucunda çelik ve alüminyum kaplama tabakası arasında oluşan arayüzey tabakasının kalınlığının artması ile şekillendirilebilirliğinin ve sünekliğinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Pasinli vd. [7] genel yapı çeliği (Ç1020) ve paslanmaz çelik (AISI316) malzemelerin yüzeylerine sıcak daldırma yöntemi kullanılarak alüminyum kaplama işleminin gerçekleştirilmesini incelemiştir. Çelik malzemelerin yüzeyinde oluşan alüminyum kaplamanın yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı gösterdiği direnç ve oluşan kaplamanın mikroyapısı araştırılmıştır. Numuneler 750°C' deki sıvı alüminyum içerisinde 10 dakika süreyle bekletilerek yüzeylerinin alüminyum ile kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numunelere 800°C sıcaklıkta 1 saat ve 6 saat süre ile nötr ortamda difüzyon tavlama uygulanmıştır. Elementlerin oksitlenmeye karşı gösterdiği direnç, difüzyonu ve difüzyon tabakası kalınlığı incelenmiştir. Alüminyum kaplamalı ve kaplamasız numuneler 900°C sıcaklıkta ve farklı sürelerde yüksek sıcaklık oksidasyonuna maruz bırakılarak numunelerde oluşan ağırlık değişimleri ölçülmüştür. Alüminyum kaplanan çelik numunelerde önemli miktarda ağırlık değişimi olmamıştır. Bu sonuca bağlı olarak, alüminyum kaplamanın çeliği oksitlenmeden koruduğunu belirtilmiştir. Malzemelerin bileşimindeki Ni, Cr, Fe, C ve Al elementlerinin difüzyon tabakası ve alüminyum kaplamadaki değişimleri mikroprob analizi ile incelenmiştir.

Boulestex vd. [8] yapmış oldukları çalışmada, sıvı alüminyumun IN-800HT ve HR3C östenitik paslanmaz çelik ve P92 ferritik-martensitik çelikler yüzeyinde kaplanmasını incelemiştir. Yapılan kaplamalarda aynı anda, çelik matrisi içerisine doğru alüminyumun iç difüzyonu ve her iki çelik malzeme yüzeyinde de dışa difüzyon oluşmuştur. Sonuç olarak, kaplamalar Çelik için bir B2-Al fazı ve P92 için B2-FeAl fazı sergilemiştir. Çelik için tavlama işleminden sonra tane büyüklüğünde bir azalma fark edilmiş, ancak mikroyapı incelendiğinde çoğunlukla östenitik kaldığı ortaya çıkmıştır.

Bununla birlikte, P92 çeliğinde martensitik yapıdan östenitik bir yapıya dönüşümle birlikte tane büyüklüğünde önemli bir artış meydana gelmiştir. Çelik tabakanın mikrosertliği önemli ölçüde değişmemiş, ancak P92 için büyük bir artış meydana gelmiştir.

Esfahani vd. [9] ark püskürtme yoluyla hafif çelik üzerine düşük gözeneklilik seviyesine sahip bir alüminyum kaplamasını incelemiştir. Kaplamanın korozyon davranışını değerlendirmek için, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) ve % 3,5 NaCl çözeltisinde polarizasyon testleri yapılmıştır. Kaplanmış numuneler ayrıca 1500 saatlik bir tuz püskürtme testine tabi tutulmuştur. Polarizasyon testleri, alüminyum kaplamanın korozyon akımı yoğunluğunun dökme alüminyumdan daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu durumun, elektrolitin açık gözeneklerden girmesine bağlı olabileceği ve alüminyum korozyonunun hızlanmasına neden olabileceği belirtilmiştir. EIS ölçümleri, kaplamanın korozyon performansının, uzun süre daldırma ve tuz buğusu korozyon deneyi sırasında geliştiğini göstermiştir. Bu, elektrolitin kaplama içine daha fazla nüfuz etmesini engelleyen korozyon ürünleri tarafından gözeneklerin tıkanmasından kaynaklanabileceği belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar, ark püskürtmeli alüminyum kaplamaların, klor içeren sulu çözeltilerde çelik yapıları paslanmaya karşı güvenli bir şekilde koruyabildiğini göstermiştir.

Zhou vd. [10] P355NL1 çelik malzeme yüzeyinin, tel ile ark püskürtme yöntemi uygulanarak alüminyum kaplanmasını ve oluşan alüminyum kaplamaların farklı sıcaklıklarda tavlmasını incelemiştir. Tavlama sıcaklığının faz kompozisyonu, morfoloji ve element difüzyonuna etkisi, X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji dağıtıcı spektroskopisi (EDS) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, kaplama yüzeyindeki küçük gözeneklerin artan tavlama sıcaklığı ile yavaş yavaş kaybolduğunu göstermektedir. Arayüzdeki difüzyon tabakasının kalınlığının, tavlama sıcaklığı 600°C' den 900°C' ye yükseldiğinde 6 ila 113µm arasında arttığı belirlenmiştir. 700°C' de tavlanan kaplama, tek bir Fe₂Al₅ fazından oluşmaktadır. 800°C' de ve 900°C' de tavlanan kaplamalar ise gözenekli hale gelmekte olup gevşemektedir. Fe₂Al₅'in yanı sıra, Al fazı, Fe₃Al fazı ve 700°C'de çelik yüzeyi ve kaplama arayüzünde Cr-Al-Si intermetalik bileşiği oluşmaktadır. 800°C ve 900°C' de tavlanan kaplamalarda, alüminyum kaplama ve P355NL1 çelik yüzeyi arasındaki arayüzey bileşikler daha karmaşık hale gelerek üçlü bileşikler oluşturmuştur. Tavlama

sıcaklığı 700–800°C olduğunda ise kaplamaların nispeten daha mükemmel bir yapıya sahip olduğu belirtilmiştir.

Zhang vd. [11] S355 yapısal çelik üzerine, termal püskürtme yöntemi kullanılarak kaplanan alüminyum tabakasına, lazerle yeniden ergitme yöntemi (LR) işlemi uygulanmasını incelemişlerdir. Elde edilen Al kaplamanın yüzey ve arayüzey morfolojileri, kimyasal bileşimi ve fazları, bir elektronik alan mikroskobu (SEM), enerji dağıtıcı spektrometre (EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) kullanılarak analiz edilmiştir. Alüminyum kaplamanın korozyon davranışı, 720 saat boyunca % 3.5 NaCl çözeltisi içerisinde bekletilerek uygulanan bir daldırma korozyon testi ile incelenmiştir. Elektrokimyasal korozyon davranışı ise PS268A tipi bir elektrokimyasal iş istasyonunda test edilmiştir. Sonuçlar, püskürtme ile elde edilen alüminyum kaplama tabakası üzerindeki gözenekliliğin azaldığını ve LR' den sonra yoğunluğunun arttığını göstermektedir. LR' den sonra alüminyum kaplamanın artık gerilmesi 69.0 MP olarak ölçülmüştür. Bu da, püskürtme ile oluşan alüminyum tabakasına göre % 25 oranında arttığını, ve dolayısıyla LR' den sonra yapışma kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca püskürtme ile elde edilen alüminyum kaplamanın LR' den sonraki korozyon davranışının olumlu yönde olduğu, ayrıca elektrokimyasal korozyon direncinin de LR' den sonra artış gösterdiği belirtilmiştir.

Yüzey mühendisliği alanında, ülkemizde kullanılan uygulamalar içerisinde fiziksel buhar yöntemi (PVD) ile ince seramik kaplama üretimi önemli bir tutmaktadır. Ancak yüzey mühendisliği alanında, üstün özellikler sunan ve önemli yüzey teknolojileri arasında yer alan doğrudan buhar biriktirme (DVD) yöntemi uygulamaları bulunmamaktadır. Bu çalışmada Aytaç vd. [12] tarafından, PVD ve DVD yöntemlerinin kavramsal ve teknolojik özellikler bakımından temel farkları incelenerek, DVD uygulamalarının gelişmiş özelliklerine dikkat çekilmiştir. İki kaplama teknolojisinin uygulama farklılıkları da ortaya koyularak, DVD yönteminin ülkemizde uygulanabilirliği araştırılmıştır (Aytaç & Malayoğlu, 2018).

Buhl vd. [13] 500°C' nin altındaki sıcaklıklarda fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile yüksek hız çeliğinin TiN ile kaplanmasını incelemişlerdir. Malzeme sertliği, yüzey pürüzlülüğü ve kaplama yoğunluklarının neredeyse döküm halinde olan numuneler ile aynı değerlerde olduğu belirtilmiştir. Kaplama tabakasının çelik

malzemeye çok iyi bir şekilde yapışması sağlanmıştır. Bu uygulamanın en önemli kullanım alanı matkap gibi kesici takım uçlarıdır. Kaplamalı matkap uçlarının kaplamasız olanlara göre, takım ömründe belirgin bir artış olduğu ve daha yüksek yüzey kalitesine sahip delik oluşmasını sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca aşınma direncinin, kaplamasız matkap uçlarına göre çok daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Mohd vd. [14] yaptıkları çalışmada, Al-Si-Zn bazlı dolgu metalini kullanarak AR500 çeliğini AA7075 alüminyum alaşımıyla kaplamak için sert lehimleme yöntemini araştırmışlardır. Sert lehimleme işleminin arayüzey oluşumu ve oluşan bağların mekanik dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Arayüzeyde oluşan fazların, lehimli bağlantıların kayma mukavemetini azaltmasında önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, AA7075 ve AR500 metalleri kullanılarak yapılan sert lehimleme işleminin, bu iki farklı metalin birleştirilmesini kolaylaştırdığı ortaya çıkmıştır.

Zaba vd. [15] ısıtma işlemi görmüş alüminyum kaplı çelik çubuklar ve borularda korozyonun çevresel etkisini incelemişlerdir. Isıtma işlemi, 30, 180, 1440 dakika boyunca 250-700 °C aralığındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, kaplamalar tuz, kar ve çamurunun döngüsel etkisine maruz bırakılmıştır. Toplam işlem süresi 12 ay olarak belirlenerek dört aylık üç aşamaya ayrılmış ve her aşama sonunda korozyon faktörünün değerlendirilmesi yapılmıştır. Sonuçlar, makroskopik, mikroskopik gözlemler ve korozyona uğramış kaplamanın derecesi ve türü şeklinde değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, ısıtma işlemi ve korozyon ortamının korozyon direncine çok büyük etkisi olduğu belirtilmiştir. Isıtma işlemi uygulanmayan kaplama, aşındırıcı ortamın etkisine rağmen korozyona karşı yüksek bir dirence sahiptir. Isıtma işleminden sonra yapılan kaplamada yüzeyde herhangi bir değişiklik olmadığı yani korozyona karşı çok yüksek direnç gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Alüminyum ince filmler, optik, mikroelektronik, telekomünikasyon ve yapısal uygulamalar için uygun mükemmel kaplama özellikleri sergiler. İnce alüminyum film biriktirme, temel olarak farklı biriktirme koşullarında, farklı parametrelerde fiziksel veya kimyasal yöntemlerle gerçekleştirilir. Mwema vd. [16] yaptıkları çalışmada, kimyasal yöntemlere göre daha üstün özelliklere sahip ve yayınlanmış literatürde kapsamlı bir şekilde araştırılmış olan fiziksel yöntemler kullanılarak hazırlanan ince

alüminyum filmleri incelemiştir. İnce alüminyum filmlerin özelliklerini ve bunların işlem parametreleriyle ilgili karmaşık etkileşimlerini değerlendirmiştir. İnce filmlerin özellikleri, alt tabaka sıcaklığı, kaplama hızı, işlem basıncı ve kaplama için gerekli sıcaklık gibi kaplama parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, bu çalışma, ince film kaplama yöntemlerini optimize etmenin önemini vurgulamakta ve yayınlanan çalışmalardaki araştırma boşluklarını belirlemektedir.

Volynskii vd. [17] ince bir alüminyum kaplamanın mekanik özelliklerini ve yapısını incelemiştir. Ultra ince kaplamaların akma dayanımı, mukavemeti ve kırılma dayanımını ölçen deneysel yöntemler kullanmışlardır. Kaplama kalınlığı azaldıkça alüminyumun mukavemeti, akma ve kırılma dayanımının arttığı sonucuna varılmıştır. Akma gerilmesinin ve mukavemetinin artması, kristal boyutunun küçültülmesi ve metalin pekleşmesi ile açıklanmıştır.

Deyab vd. [18] yapmış oldukları çalışmada, % 3.5 NaCl çözeltisinde karbon çeliğinin korozyondan korunması için epoksi/metal ftalosiyanimler nanokompozitler (NiPc/Epoksi, CuPc/Epoxy ve ZnPc/Epoxy) kullanılmasını incelemiştir. Nanokompozit kaplamaların korozyon performansları elektrokimyasal empedans spektroskopisi, açık devre potansiyeli ve taramalı elektron mikroskobu analizleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Kaplamanın mekanik özellikleri nanoindentasyon tekniği kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, metal ftalosiyanim pigmentlerinin epoksi reçine kaplamaya dahil edilmesinin, epoksi kaplamaların sertliğinin yanı sıra korozyon direncini de önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Metal ftalosiyanimler pigmentlerinin, epoksi reçinesindeki bozukluğu iyileştirici olduğu ve aşındırıcı elektrolitin karbon çeliği tabakasına difüzyonunu önleyebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca NiPc/Epoxy nanokompozitin korozyona karşı diğerlerinden daha iyi koruma performansı verdiği tespit edilmiştir.

Metalik yüzeylerin korozyona karşı korunması için çevre dostu yeni bir kaplamanın geliştirilmesi fikri, geçtiğimiz birkaç yıl boyunca malzeme bilimine olan ilginin artmasını sağlamıştır. Akıllı, kendi kendini iyileştiren kaplamalar, koruyucu kaplamadaki çatlakların yayılmasını önlemek için kaplamanın aktif maddelerinin kontrol edilebilir bir şekilde serbest bırakılmasından dolayı, farklı teknolojik uygulamalarda metallerin ve alaşımların umut verici korozyon koruması sağladığını

göstermiştir. Bu kaplamalar pasif matris işlevselliğine sahiptir ve malzeme alanındaki bilim insanlarının büyük ilgisini çeken değişikliklere doğrudan yanıt vermektedir. Akıllı kaplamalar, benzersiz kimyasal, fiziksel, mekanik ve elektriksel özellikleri içeren duyarlı malzemelerden yapılmıştır. Bu akıllı kaplamalar, basınç, ısı ve kimyasal etkiler gibi farklı çevresel değişikliklerle tepki verir ve etkileşime girer. Akıllı kaplamalar genellikle hazırlama teknikleri, fonksiyonel ve reaktif bileşenler, bunların kullanımları ve uygulamaları şeklinde sınıflandırılırlar. Yaygın olarak kullanılan akıllı kaplamaların amaçları: kendi kendini iyileştirme, kendi kendini temizleme, mikro kapsül iyileştirme ve korozyon önleyici kaplamalar şeklindedir. Metal yüzeylerin korunması sürecinde, akıllı kaplamaların algılama, koruma ve iyileştirme gibi çok işlevi vardır. Nazeer vd. [19] kendini iyileştirme özelliklerine sahip akıllı kaplamalar hakkındaki en son gelişmeleri incelemişlerdir. Ayrıca farklı akıllı kaplamaların hazırlanması ve farklı alt tabakalara uygulanmasını araştırmışlardır.

Müller vd. [20] yüksek hız çeliği, çelik, alüminyum ve bakır yüzeyleri üzerindeki TiN ve alüminyum kaplamaların mekanik özelliklerini ve özellikle kaplamanın yapışma özelliklerini incelemişlerdir. Numuneler üzerinde x-ışını kırınımı (XRD) analizi, kazıma testi, mikrosertlik ölçümü ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Deney yöntemlerinin her biri, kaplama davranışlarının sadece belirli yönlerini ortaya koymaktadır. Elde edilen verilerin, kaplama malzemesinin, alt tabaka malzemesinin ve oluşan ara tabakanın özelliklerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Ön gerilmenin değiştirilmesinin, deney sonuçlarını oldukça farklı şekillerde sonuçlandırabileceği anlaşılmıştır. Ayrıca, kaplamanın yapışma mukavemeti ile üç nokta eğme testindeki davranışı arasındaki ilişkiler ele alınmıştır.

Alüminyum kaplı bir çelik sacın giydirme yöntemi kullanılarak kaplanması, bu tür levhaların üretiminde kullanılan diğer işlem türlerine kıyasla daha verimli ve ekonomik bir yaklaşım olabilmektedir. Bu işlemde, ara yüzeyler arasında bir bağ oluşturmak için alüminyum ve çelik olmak üzere iki metalin yüksek plastik deformasyonu gerekir. Bu nedenle, işlenerek sertleştirilmiş levha, yüksek bir şekillendirilebilirlik elde etmek için tavlmalıdır. Manesh vd. [21] yaptıkları çalışmada, giydirme tekniğini kullanarak çelik yüzeyleri alüminyumla kaplamışlardır. Sonrasında Erichsen çökertme test tekniğini kullanarak şekillendirilebilirliği ölçmüşlerdir. Ayrıca, Erichsen çökertme numunelerinin yüzeylerini makroskobik olarak

inceleyerek yapışma kuvvetini değerlendirmişlerdir. Yapılan araştırmalar ve deneyler sonucunda, yüksek yapışma mukavemetinin yanı sıra iyileştirilmiş şekillendirilebilirlik sağlayan optimum tavlama sıcaklığı ve zaman değerleri elde edilmiştir.

Akramifard vd. [22] yaptıkları çalışmada, AISI 304L paslanmaz çelik levhanın her iki yüzeyine AA1050 alüminyum alaşımının kaplanması için, 100 ve 23°C sıcaklıklarda giydirme yönteminin kullanılmasını incelemişlerdir. Uygulama sonucunda her iki yüzeyi alüminyum kaplı 304L paslanmaz çelik levha oluşturulmuştur. Numuneler kazıma testine tabi tutularak malzemeler arasında oluşan bağ yapısının özellikleri incelenmiştir. Daha sonra, 1 saat boyunca 200-600 °C' de tavlama işlemi yapılarak kaplanmış levhaların arayüzey oluşumu ve mekanik davranışları araştırılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), X-ışını difraksiyonu (XRD) ve optik mikroskop kullanılarak, ara yüzeyin özellikleri incelenmiştir. Tavlama işlemi sonrası ara yüzey kalitesinin bozulduğu tespit edilmiştir.

Deqinq vd. [23] giydirme yöntemini kullanarak 304L paslanmaz çelik/L2Y2 alüminyum alaşım ve 304L paslanmaz çelik/Q235A karbon çeliği levhaların oluşturulması için Al-Cu-Mg arayüzey alaşımı kullanılmasını araştırmışlardır. Kaplama işlemi sıcaklığı ve zaman parametrelerinin levhalar üzerinde oluşan arayüze etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, kaplamasız ve kaplanmış paslanmaz çeliğin arayüzey yapışmasının difüzyon katman kalınlığı ile doğrudan ilgili olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Sürtünme yüzey kaplaması, sabit bir alt tabakaya bastırılarak döndürme işlemi yapılan metalik sarf malzemesi çubuğunun plastik deformasyonuna dayanan yeni bir katı hal kaplama işlemidir. Daha çok alüminyum, hafif ve paslanmaz çelik malzemeler kullanılır. İşlemin katı hal niteliği sayesinde, benzer olmayan metal kombinasyonlarının kaplaması, örneğin; alüminyum-çelik, seramik veya demir dışı metallerin çeşitli kaplama kombinasyonları oluşturulur. Ayrıca, kaplamalar bir alt tabaka üzerinde sürekli ve ince taneli oluşmaktadır. Araştırmaların çoğu, belirli malzeme kombinasyonlarının uygulanabilirliğine ve biriken katman kalitesinin deney parametrelerine ilişkilendirilmesine odaklanmıştır. Swinnen vd. [24] ise yapmış oldukları çalışmada, oluşan kaplama katmanlarını ve özelliklerini değerlendirmek için metodik bir yaklaşımı incelemişlerdir. Bu yaklaşım, görsel değerlendirme, makrografik muayene ve

performans analizinden oluşarak, kaplanmış tabaka kalitesinin karşılaştırılmasını amaçlamaktadır.

Ravisekhar vd. [25] farklı malzeme kombinasyonları ile uygulanan sürtünme yüzey kaplama tekniklerinde bağlanma mekanizması, işlem parametrelerinin seçilmesi ve deneysel test sonuçlarının arasındaki ilişkileri belirleyen değişkenleri incelemiştir. İşlem parametrelerinin genişlik, yükseklik, yüzey pürüzlülüğü, gerilme dayanımı, kayma dayanımı gibi durumlara etkisi detaylı olarak tartışılmıştır. Potansiyel endüstriyel kullanım alanlarını tespit etmek için görsel inceleme, yapışma testi, mikroyapı ve sertlik gibi kalite değerlendirme testleri uygulanmıştır.

Liu vd. [26] işlem koşullarının sürtünme yüzey kaplama yapılan tabaka üzerindeki etkisi ve hem kaplamalı tabakanın hem de alt tabakanın mekanik özelliklerini incelemiştir. Ticari olarak saf alüminyumdan hazırlanan (yaklaşık olarak 0.2 mm kalınlığında ve 20 mm genişliğinde) ince tabakaların, çeşitli işlem koşullarında AA2024-T351 tabakasının üzerine başarıyla kaplanabilir olduğu belirtilmiştir. Oluşan katmanların kalitesinin, işlem sıcaklığı ile doğrudan ilgili olduğu gösterilmiştir. Homojen, iyi bağlanmış ve hatasız katmanlar 300–420°C sıcaklık aralığında oluşmuştur. Düşük işlem sıcaklıklarında sürekli tabakalar oluşturulamazken, daha yüksek işlem sıcaklıklarında ise kaplanmış malzemenin alt tabaka ile karışması gerçekleşmiştir. Termal simülasyonlar, işlem koşulları ile üretilen ısı miktarı arasındaki ilişkiyi doğrulamıştır. Karışımın oluşumunu tahmin etmek için ise bir analitik model geliştirilmiştir. Ek olarak eğme ve korozyon deneyleri de yapılarak kaplama tabakasının yüksek yapışma kalitesine sahip olduğu ve korozyona karşı yüksek koruma performansı sağladığı anlaşılmıştır.

Gandra vd. [27] sürtünme yüzey kaplama yöntemi ile üstün aşınma ve korozyon özellikleri gösteren ince taneli kaplamalar elde etmek için araştırmışlardır. Yığın bir erime meydana gelmediğinden, bu işlemin, ergitme temelli yöntemlere göre birbirleriyle uyumlu olmayan veya kaplanması zor olan malzemelerin birleştirilmesine imkan sağladığı belirtilmiştir. Diğer alternatif kaplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında enerji verimliliği ve çevreye olan olumsuz etkisi bakımından önemli avantajlar sağladığı vurgulanmıştır. Bu alanda yapılan uygulamalar incelendiğinde aşınmış ve çatlamış hasarlı yüzeylerin onarımı için bu yöntemin kullanıldığı

görülmüştür. Ayrıca, makine parçalarının imalatında belirli alanlarda yüzey özelliklerinin geliştiği belirtilmiştir. Özellikle alaşımlı ve paslanmaz çeliklere yapılan sürtünme yüzey kaplaması ile çok çeşitli malzeme türleri kaplanmıştır. Bu kaplama yönteminin, ileri endüstriyel uygulamalar için önemli bir potansiyele sahip olduğu ve geleneksel kaplama işlemlerine bir alternatif olduğu vurgulanmaktadır.

Sürtünme yüzey kaplaması işlemi henüz yaygın endüstriyel kullanıma sahip olmayan özel bir ekipmanda gerçekleştirilmektedir. Yeni uygulama olanaklarının keşfedilmesi amacıyla Da Silva vd. [28] yapmış oldukları bu çalışmada, bilgisayarlı sayısal kontrol ile bir işleme merkezinde sürtünme yüzey kaplaması işleminin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Bu amaçla, Ç1020 karbonlu çelik yüzeyi üzerine 6351 alüminyum alaşımı kaplanmasını işlemi gerçekleştirilmiştir. Uygulanabilir kaplama parametrelerinin belirlenmesi için yapılan ön deneylerden sonra, işlem değişkenlerinin (çubuk çapı, dönme ve ileri hız) kaplama geometrisi ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi deney metodolojisi tasarımı kullanılarak incelenmiştir. Kaplamaların yapışması, basit bir yöntem olan push-off testi uygulanarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, parametrelerin dikkatli bir şekilde ayarlanması gerektiğini, araştırmanın incelenen deneysel koşullar altında uygulanabileceğini ve maksimum 4250 N itme kuvveti değerinin elde edilebileceğini göstermiştir.

Badheka vd. [29] 6 mm kalınlığındaki çelik yüzeyler üzerine 8 mm, 12 mm, 16 mm ve 22 mm gibi çeşitli çaplarda 6351 T6 alüminyum metalinin kaplanmasını incelemiştirler. 22 mm çubuk kullanılarak üretilen metalik kaplamanın görsel görünümüne göre mükemmel olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, kaplamadan sonra çubuğun ucundaki halka formları da kaydedilmiştir. Sıcaklıklar, ilerleyen ve geri çekilen taraflardaki veri kaydedici kullanılarak ölçülmüştür. İlerleyen taraftaki (421°C) toplama sıcaklığının, geri çekilme tarafındaki sıcaklıktan (375°C) daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Daha sonra numune Vickers makro sertlik ölçümlerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlara göre, bu işlemin, metalleri korozyondan koruma alanında ticari olarak uygulanabilirliği tartışılmıştır.

Saw vd. [30] yapmış olduğu çalışma, farklı malzeme çiftlerinin sürtünme yüzey kaplama yöntemi kullanılarak kaplanmasından sonra yapılan mikroyapı değerlendirmesinin bir derlemesidir. Kaplama işlemi için kullanılan parametreler dönme

devri, uygulanan basınç veya kuvvet, eğim açısı ve sürtünme süresi olarak belirlenmiştir.

Chandrasekaran vd. [31] bir argon atmosferinde AA5083 metali üzerine AISI304 paslanmaz çelik ve AISI1020 yumuşak çelik malzemeleri ile sürtünme yüzey kaplaması işlemini gerçekleştirilmesini incelemiştir. Alüminyum ile iyi bir şekilde bağlanmış olan yumuşak çelik arasında arayüzey oluşumunun kanıtı varken, paslanmaz çelik ile alüminyumun karışımına kanıt bulunamadığı ve kaplamanın yüzeyde yuvarlanmış bir yapıya sahip olduğu bulunmuştur. Alüminyum üzerinde paslanmaz çelik için mekanik bir kilitlemeye rastlanmamıştır. Her iki durumda da iyi bir kaplama elde etmek için 21,8MPa kadar yüksek bir temas basıncının gerekli olduğu bulunmuştur. Sonuç olarak yumuşak çelik ile yapılan kaplama işleminde arayüzey oluşumu sağlanmıştır, ancak paslanmaz çelik ile bir arayüzey oluşumu sağlanamamıştır.

Chandrasekaran vd. [32] ilk olarak takım çeliği, inkonel, alüminyum ve titanyum çubukların sürtünme yüzey kaplama yöntemiyle düşük karbonlu çelik ve paslanmaz çelik üzerine kaplanması, ikinci olarak düşük karbonlu çelik ve inkonelin ise alüminyum yüzeyler üzerine sürtünme yüzey kaplaması işlemini incelemiştir. Kaplama kalitesi için yüzey, hız, yük ve sarf malzemesi gibi işlem parametreleri dikkatli bir şekilde kontrol edilerek uygulanmıştır. Yapılan ilk deneylerde takım çeliği ve inkonelin, yoğun kuvvetli bir kaplama oluşturmak için çelik üzerine etkili bir şekilde biriktirildiğini, alüminyumun ise sadece yüksek temas basınçlarında biriktirildiği tespit edilmiştir. Titanyum test edilen koşullar altında biriktirilememiştir. Yapılan ikinci deneylerde ise paslanmaz çelik, düşük karbonlu çelik ve inkonelin yoğun kuvvetli kaplamalar oluşturmak için alüminyum yüzeylerde biriktirilebilir olduğu, ancak paslanmaz çeliğin alüminyum ile arayüzeyde bir bileşik tabakası oluşturmadığını göstermiştir. Alüminyumun sürtünme ısı ile erimesi gözlemlenmiş ve bunun da, kaplama arayüzeyinde kırılma ve dolayısıyla istenmeyen arayüzey bileşiklerinin oluşumuna yol açtığı tespit edilmiştir. Kaplamaların X-ışını kırınımı (XRD) analizi incelemeleri, kaplama yapısının alt tabaka bölgesinde belirli bir açıyla eğimli şekilde yüzeyde kesintisiz bir dizi ayrı tabakanın oluştuğunu doğrulamıştır. Kaplamanın dış yüzeyine yakın bu katmanlar arasında çatlaklar bulunmuş ve en iyi kaliteyi elde etmek için üst katmanların kaplamadan çıkarılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Mikroskopik gözlemler, ilk yapılan deneylerde kaplama tabakası ile çelik arasında çok

az karışım olduğunu ancak çeliğin sürtünme yüzeyinde bazı pürüzlenmelerin olduğunu ve alt yüzeyde de deformasyonunun olduğunu ortaya koymuştur. Alüminyum alaşım, benzer şekilde ancak çok daha büyük bir ölçüde yüzey değişikliği göstermiştir.

Gandra vd. [33] yaptığı çalışmada, sürtünme yüzey kaplamasının karakterizasyonu için malzeme biriktirme oranı ve biriktirilen kütle birimi başına tüketilen enerji ile ilgili performans kriterleri belirlenmiştir. Bu kriterler, birçok işlem parametresi için yumuşak çeliğin sürtünme yüzeyinde test edilmiştir. Sürtünme işlemi için gerekli kuvvetin, eğim açısının, arayüzey yapışma özelliklerinin, hareket ve dönme hızlarının işlem verimliliğine etkisi incelenmiştir. Kaplama işlemi gerçekleştirilen numuneler optik mikroskop, görüntü işleme teknikleri ve sertlik testi ile incelenmiştir. Sarf malzemesi çubuğuna uygulanan yükün, kaplama verimliliğini ve biriktirme oranını arttırmak için gerekli olduğu bulunmuştur. Ancak yüksek dönme veya hareket hızları kaplama verimliliğini azaltmıştır. Sarf malzemesinin hareket yönü boyunca yatırılmasının, birleştirme verimliliğini% 5'e kadar arttırdığı kanıtlanmıştır. İncelenen deneylerde ki malzeme kaybı, tüketilen toplam çubuğun yaklaşık% 40 ila 60' ını oluşturmuştur. Yapılan kaplama işleminde 0,5-1,6 g/sn biriktirme oranları ile 2,5 ila 5 kJ/g tüketilen enerji aralıklarında oluşan kaplama üzerinde mekanik çalışma yapılması gerektiği düşünülmüştür. Biriktirme oranları bir çok kaplama yöntemine göre daha yüksektir. Enerji tüketiminin ise diğer kaplama yöntemlerine göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Nixon vd. [34] sürtünme yüzey kaplaması tekniği ile paslanmaz çeliğin yumuşak çelik üzerine kaplanması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Seçilen malzemeler ile başarılı kaplamalar elde edilmiştir. Kaplamanın yapışma dayanımının ram çekme testi ile maksimum 502 MPa' da olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara dayanarak, yüzey metodolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Sonuçların doğrulanması için, kaplanmış numune, korozyon testine tabi tutulmuştur. Oluşan bağın mikro yapısı, optik mikroskop ve X ışını kırınımı (XRD) kullanılarak karakterize edilmiştir. Kaplama yüzeyinin korozyon direncinin, kaplama malzemesinden daha düşük, kaplanan malzemedeki ise daha büyük olduğu belirtilmiştir.

Kumar vd. [35] IS2062 yumuşak çeliğin AA6063 alüminyum alaşımı ile sürtünme yüzey kaplama yöntemiyle birleştirilmesi için uygun işlem parametrelerini

belirlemeyi ve bu parametreler ile elde edilecek yeterli mukavemet ve süneklik değerleri arasındaki ilişkileri belirlemeyi amaçlamışlardır. Deneylerde kullanılacak parametre kombinasyonlarını araştırmak ve seçmek için faktöriyel deney tasarım tekniği kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda en önemli faktörlerin dönme devri, eksenel yük ve çeliği tutan traversin hızı olduğu görülmüştür. Sonuçlara dayanarak, ilk olarak düşük dönme devri, düşük eksenel yük ve düşük hareket hızıyla, ikinci olarak ise düşük dönme devri, yüksek eksenel yük ve yüksek hareket hızıyla kaplamalar üretilmiştir. Ayrıca, kaplama malzemeleri metalürjik olarak uyumsuz ve kırılğan bir arayüzey oluşturma eğiliminde olduğu için kaplamaların kısıtlı bir parametre aralığında elde edilebildiği gözlenmiştir.

Bu çalışmada ise metal kaplama sektöründe yaygın olarak kullanılan kaplama yöntemlerinden farklı bir yöntemle, sürtünmeli ve mekanik bir şekilde katı hal metal kaplama işlemine gerçekleştirecek, deneysel bir cihaz olan sürtünmeli mekanik kaplama cihazının tasarımı ve imalatı yapılmıştır. İmalatı yapılan sürtünmeli mekanik kaplama cihazı ile silindirik geometriye sahip elik malzeme yüzeyi üzerine alüminyum alaşımı kaplanmasını sağlayan bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu yapılan deneylerin sonuçlarını araştırmak için kaplama yapılan malzemedен kesit halinde numuneler alınarak, bu numunelerin mikroyapısı ve kaplama kalınlıkları optik mikroskop, taramalı elektron mikroskopu (SEM), enerji dağıtıcı spektroskopisi (EDS), X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile incelenmiştir. Ayrıca numunelerin sertlik özellikleri de mikrosertlik deneyleriyle incelenmiştir. Yapılan analizler ve deney sonuçları değerlendirilerek, sürtünmeli mekanik kaplama cihazı ile imal edilen alüminyum kaplı elik malzemeler için optimum kaplama parametreleri belirlenmiştir.

2. YÜZEY KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Yüzey, bir maddenin çevresinde ki ortam ile temas eden ve geometrisini oluşturan kısmıdır. Dış çevre ile malzeme arasındaki tüm etkileşim yüzey üzerinden gerçekleşir. Malzemenin tümüne mal edilen özellikleri çoğunlukla yüzey tarafından belirlenmektedir. Bu özellikler;

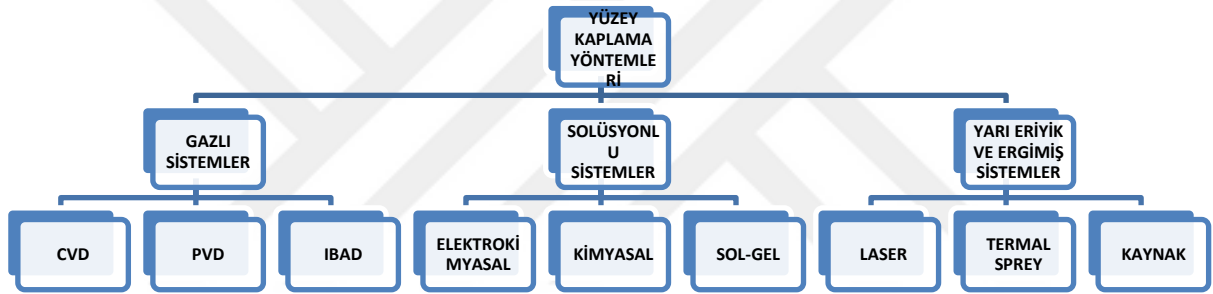
- ✓ Dış görüntüsü ve rengi,
- ✓ Dışındaki malzemeye olan difüzyon özellikleri,
- ✓ Sürtünme, aşınma, korozyon ve yorulma gibi mekanik özellikleri,
- ✓ Optik özellikleri
- ✓ Fotoelektrik özellikleri,
- ✓ Yapışma özellikleri
- ✓ İletkenlik vb özelliklerdir [36]

Malzeme yüzeyinin yukarıdaki özellikleri aslında malzemenin özellikleri olarak kabul edilir. Bu tür özelliklerin malzemede yetersiz olduğu durumlarda, sadece malzeme yüzeyini iyileştirerek malzemenin tamamını iyileştirmeye gerek kalmaz. Bu hammadde açısından büyük bir tasarruf ve ekonomiklik sağlar. Ancak bazı durumlarda malzemedeki istenilen yüzey özellikleri malzemenin tümünden beklenen özelliklerle tamamen farklı olabilmektedir. Örneğin dişlilerde aşınma dayanımının iyi olması ve sertliğinin yüksek olması istenmektedir. Fakat malzemenin sertliği, kırılma tokluğunun yüksek olması ile doğru orantılı olduğu için, sadece yüzey sertliğinin yükseltilmesiyle malzemenin tamamının da aşınma direncinin artırılması sağlanır. Bu sayede malzemenin iç kısmı, yüzeye göre daha yumuşak halde tutularak kırılma tokluğunun yüksek olması sağlanır. Yapılan çalışmalar sayesinde, sadece malzeme yüzeyinde yapılan iyileştirmelerin teknolojik ve ekonomik olarak ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Malzeme kesitinin çok küçük bir bölümünde yapılan bu işlemler sayesinde malzeme ömrü 10-100 kat arttırabilmektedir [36].

Demir ve çelik malzemelerin yüzeylerinin yüksek sıcaklık, korozyon ve aşınma gibi olumsuz etkilerden korunması amacı ile yüzeyleri plastik, boya, nikel, krom, bakır, çinko ve alüminyum gibi madde veya alaşım malzemeleri ile kaplanmaktadır. Malzeme

yüzeylerinin iyileştirilerek korozyon ve aşınma dayanımının artırılmasına ek olarak dekoratif açıdan da iyi bir görünüm elde edilmesi istenir. Bu amaçla metal malzemelerin ömrünü ve kalite standardını arttırmak, kullanılacağı ortam şartlarının olumsuz etkilerinden korumak ve bazı mekanik özelliklerinin iyileştirmesi amacıyla yüzeylerine kaplama işlemleri endüstride yaygın olarak uygulanmaktadır [37].

Metallerin kaplanması için literatüre bakıldığında kaplamada kullanılacak malzemeler, bu malzemelerin fiziksel halleri, elde edilen kaplamanın kalınlığı, kaplamanın özellikleri ve kaplama işlemin uygulanışı yönünden çok çeşitli metal kaplama tekniklerinin olduğu görülmüştür. Kaplama yöntemlerine yönelik genel bir sınıflandırma Şekil 2.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kaplama Yöntemleri [38]

Bu çalışmada çelik malzeme yüzeyine alüminyum kaplama işlemi gerçekleştirileceğinden dolayı literatürde yaygın olarak yer alan çelik üzerine alüminyum kaplama yöntemleri incelenmiştir.

2.1. Sıcak Daldırma

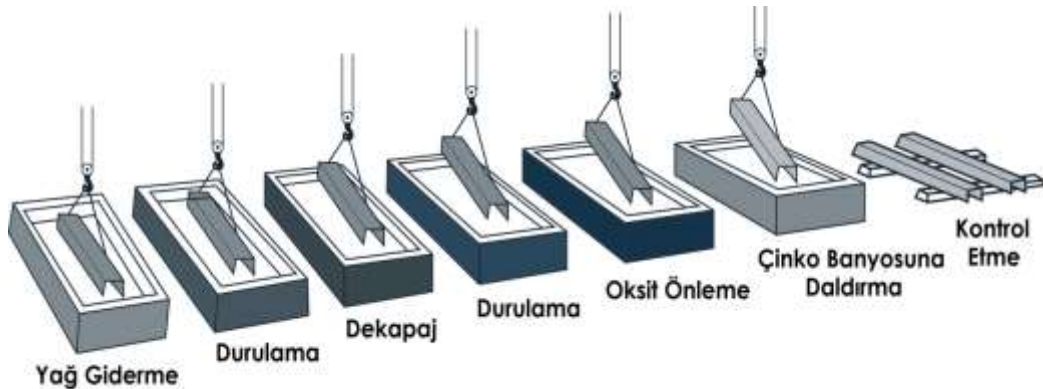
Sıcak daldırma ile kaplama temel olarak, kaplanacak parçanın eriyik halde bulunan başka bir malzeme içerisine daldırılarak belirli bir süre bekletilmesi ve işlem sonunda çıkartılarak soğutulması esasına dayanmaktadır. Bu kaplama işleminde çok büyük parçaların kaplanabilmesi ve seri üretime uygun olması üreticiye büyük avantajlar sağlamaktadır. Malzemenin bütün yüzeylerinin eksiksiz bir şekilde kaplanması sayesinde yüzeyde kaplanmamış hiçbir bölgenin kalmaması bu sebeple karışık şekilli parçaların kaplanması için de çok kullanılan bir kaplama metodudur.

Özellikle demir ve çelik malzeme yüzeylerinde çok yaygın bir şekilde bu yöntem kullanılmaktadır [37].

Günümüzde sıcak daldırma işlemi ASTM A-463, Euronorm 154, ISO 5000, NF A 36-340 gibi standartlara göre yapılmaktadır. Bu işlemin belirli standartlarla sınırlarının belirlenmesi ve oluşan alaşımların düzenlenmesi sayesinde, kaplanan malzeme yüzeylerinde paslanmaz çeliklere benzer yapılar ortaya çıkarılmaktadır [39].

Kaplama işlemini etkileyen en önemli parametreler; Banyo malzemesinin alaşımı, daldırma sıcaklığı ve sıcak daldırma süresidir. Bu üç parametre de üretim sırasında kontrol altında tutulmalı ve kaplama işlemi sırasında amaçlanan sonuçlara uygun değerler seçilmelidir. Kaplama süresinin artmasıyla birlikte kaplama kalınlığı da artmaktadır. Banyo sıcaklığının artması da kaplama süresi gibi kaplama kalınlığının artmasına sebep olmaktadır [39].

Sıcak daldırma yöntemi incelendiğinde yaygın olarak çinko ile yapılan galvanizleme işlemi öne çıkmaktadır. Galvanizleme ile kaplama yöntemine ait işlem süreci Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Galvanizleme, çelik malzeme 450°C deki eriyik çinko banyosuna daldırılması ile uygulanan yüzey kaplama işlemidir. Bu işlem sonrasında üretilen malzemenin ömrü, oluşan kaplamanın kalınlığı ve bulunduğu ortam şartlarına göre değişmektedir. Çelik malzemeler, çinko ile yüzeylerinin kaplanması işleminden sonra, iletkenliği yüksek olan deniz suyunda rahatlıkla kullanılmaktadır [37].



Şekil 2.2. Galvanizleme ile kaplama yönteminin işlem basamakları şeması [40]

Sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi ise farklı uygulama alanlarında kullanılabilir olması üreticiye birçok avantaj sağlamaktadır. Üretici açısından büyük kolaylık sağlayan bu işlemin genel amacı, kaplanan malzeme yüzeyinin aşınma ve korozyon dayanımının büyük ölçüde artırılmasıdır [37].

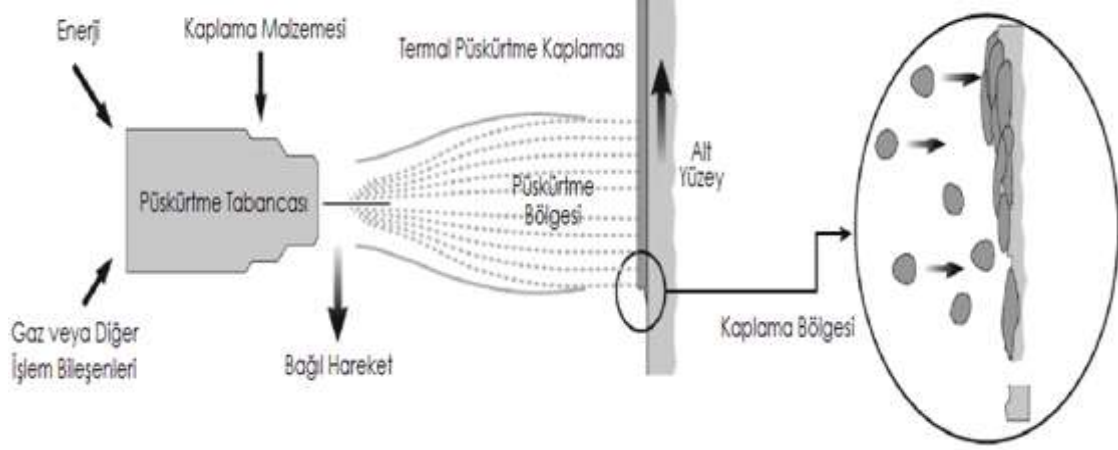
Çelik malzeme yüzeylerinin seri bir şekilde alüminyum ile kaplanması için kullanılan en yaygın yöntem sıcak daldırma ile kaplama yöntemidir. Esas olarak bu yöntem, kaplama yapılacak çelik malzemenin yüzeyi temizlenerek sıvı alüminyum veya alüminyum alaşımı içerisine daldırılıp belirli bir süre tutularak uygulanmaktadır. Bekleme işlemi gerçekleştirilirken malzeme yüzeyi alüminyum içerisinde çözünerek, ergimiş alüminyum ile reaksiyona girer. Malzeme yüzeyinin sıvı alüminyum ile girdiği reaksiyonlar sonucunda farklı yapılarda intermetalik fazlar oluşmaktadır. Sonrasında alüminyumun çelik malzeme içerisine difüzyonu gerçekleşmektedir. Reaksiyon ve difüzyon işlemlerinin oldukça hızlı bir şekilde gerçekleşmesinden dolayı diğer yöntemlere göre daha kalın kaplamalar elde edilebilmektedir [39].

Sıcak daldırma ile çelik malzeme yüzeylerinin kaplama işlemi ticari açıdan iki farklı şekilde (Tip 1 ve Tip 2) yapılmaktadır. Tip 1 sıcak daldırma alüminyum kaplama, ötektik bileşime yakın oranda Al-Si alaşımı kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu tür alüminize çelikler yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımı gereken durumlarda yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Tip 1 alüminize çelikler otomotiv sektöründe egzoz manifold sistemleri ile ocak, fırın, davlumbaz kurutucusu ve ısıtıcısı gibi alanlarda kullanılmaktadır. Sıcak daldırma ile kaplamada, çelik yüzeyinin kaplama malzemesi olarak ticari saflıktaki alüminyumun kullanıldığı işlemler ise Tip 2 olarak adlandırılmaktadır. Tip 2 alüminize çelikler, dış cephe kaplama sacları, klima ve havalandırma sistemlerinde kullanılmaktadır. Tip 1 alüminize çeliklerin kaplama kalınlığı 15-25 µm, Tip 2 alüminize çeliklerin ise 38-60 µm aralığındadır [39].

2.2. Termal Püskürtme

Termal püskürtme ile kaplama işlemi ekonomik ve geniş uygulama alanına sahip olmasından dolayı endüstride en yaygın şekilde kullanılan kaplama tekniğidir. Temel olarak yanma ve elektriksel püskürtme olarak iki farklı şekilde yapılmaktadır. Tüm püskürtme tekniklerinde küçük boyutlu sıvı damlacıkları şeklinde kaplama malzemesi, püskürtme tabancası kullanılarak kaplanacak malzeme yüzeyi üzerine gönderilir. Bu

işlemlerde kaplama yüzeyinin bağlanma mukavemetini arttırmak için yüzey pürüzlendirilmelidir. Bu kaplamaların yapısı ise yüzeye paralel şekilde oluşmaktadır. Termal püskürtme ile kaplama işleminin uygulaması Şekil 2.3’de gösterilmiştir. [37].



Şekil 2.3. Termal Püskürtme ile Kaplama Yönteminin Uygulanması [41]

2.2.1. Yanma İşlemleri

Yanma işlemleri alev püskürtme, tel alev püskürtme, toz alev püskürtme, yüksek hızda oksijen-yakıt püskürtme, patlama alev püskürtme olmak üzere 5 farklı başlık altında incelenmiştir.

2.2.1.1. Alev Püskürtme

En eski termal püskürtme şekli olan alev püskürtme, metal teller, seramik çubuklar, metalik ve metalik olmayan tozlar da dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeleri kaplamak için kullanılabilir. Alev püskürtme işleminde, kaplama malzemesi sürekli olarak bir takım gazların (asetilen, propan ve metil asetilen-propadien) akışıyla oluşan alevde eritilerek püskürtme tabancasının ucuna gönderilir. Hava ise genellikle atomizasyon gazı olarak kullanılır. Oksiasetilen alevleri, oluşturduğu yüksek sıcaklıklar nedeniyle, tel alev püskürtme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük sıcaklık propan alevi, alüminyum ve çinko gibi düşük erime noktalı metallerin yanı sıra polimer malzemelerin kaplaması için kullanılabilir. Bir alev püskürtme sisteminin temel elemanları alev püskürtme tabancası, hammadde malzemesi, besleme mekanizması, debimetre, basınç regülatörü ve hava kompresörüdür.

2.2.1.2. Tel Alev Püskürtme

Tel alev püskürtme tabancası, teli beslemek için motor ve tahrik silindirlerine sahip bir tahrik ünitesinden, alevi ve atomizasyon havasını kontrol eden valflerden, gaz nozulu, hava başlığı ve bir gaz başlığı içermektedir. Ark püskürtme ile karşılaştırıldığında, tel alev püskürtme oksijen-yakıcı gaz karışımının nispeten yüksek maliyeti nedeniyle daha maliyetlidir.

2.2.1.3. Toz Alev Püskürtme

Toz alev püskürtme yöntemi tel alev püskürtme yöntemiyle benzer şekilde çalışmaktadır. Ancak tel yerine toz besleme elemanları kullanılmaktadır. Erimiş kaplama malzemesi atomize edilir ve yanan gazın akışıyla yüzeye itilir. Toz alev püskürtme tabancaları, diğer termal püskürtme tabancası türlerine göre daha hafiftir ve daha küçüktür. Ancak toz alev spreji yöntemi kullanımı genellikle tel alev püskürtme veya ark püskürtme ile karşılaştırıldığında daha azdır. Parçacık hızları alev püskürtme yöntemine göre daha düşüktür ve uygulanan kaplamalar genellikle daha az yoğundur. Ayrıca kaplamanın malzeme yüzeyine olan yapışkanlığı diğer termal püskürtme yöntemlerine göre daha zayıftır.

2.2.1.4. Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme

En yeni termal püskürtme yöntemlerinden biri olan yüksek hızda oksijen-yakıt püskürtme, yüksek basınçta oksijen ve bir yakıt gazı kullanılmaktadır. Yaygın olarak propan, propilen ve hidrojen yakıt gazı olarak kullanılmaktadır. Yanan gaz karışımı süpersonik hızlara yükseltilir ve toz halinde bir hammadde alevi enjekte edilir. Proses, termal girişi en aza indirilerek parçacık kinetik enerjisini, düşük gözeneklilik ve yüksek yapışma mukavemeti ile çok yoğun olan kaplamalar üretmek için maksimize eder. Yüksek hızda oksijen-yakıt püskürtme, jet motor parçaları gibi parçalarda aşınmaya dayanıklı kaplamalar uygulamak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yüksek hızda oksijen-yakıt püskürtme yöntemi ile yapılan karbür kaplama işlemi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Yüksek hızda oksijen-yakıt püskürtme yöntemi kullanılarak yapılan karbür kaplama işlemi [42]

2.2.1.5. Patlama Alev Püskürtme

Patlama alev püskürtme metodunda oksijen, asetilen ve toz halindeki hammadde malzemesinin karışımı, bir tabanca haznesinde saniyede birkaç kez kıvılcımlarla patlatılmaktadır. Kaplama işlemi çok yoğun kaplamalar üretmek için çok yüksek hızlarda gerçekleştirilir. Yüksek sıcaklıkta kullanım için aşınmaya dayanıklı seramik kaplamaların kaplanmasında kullanılan bir yöntemdir.

2.2.2. Elektrik İşlemleri

Elektrik işlemleri ark püskürtme ve plazma püskürtme olmak üzere 2 farklı başlık altında incelenmiştir.

2.2.2.1. Ark Püskürtme

Ark püskürtme genellikle çinko, alüminyum ve alaşımları dahil olmak üzere korozyona dayanıklı metal kaplamaların uygulanması için en ekonomik termal püskürtme yöntemidir. Enerji maliyetleri daha düşüktür ve bu sebeple kullanım oranı tel alev spreysi gibi rakip yöntemlere daha yüksektir. Ark püskürtme, metaller, alaşımlar ve metal-metal oksit karışımları dahil elektriksel olarak iletken malzemeleri uygulamak

için kullanılabilir. Ark püskürtme, kaplama telini eritmek için iki tel arasında bir ark oluşturularak kullanılır. Erimiş malzemeyi kaplanacak malzeme yüzeyine püskürtmek ve itmek için genellikle içerisinde hava bulunan sıkıştırılmış gaz kullanılır. İki tel sürekli olarak tabancayı eşit hızda besler. Düşük voltajlı (18 ila 40 volt) doğru akım (DC) bir güç kaynağı kullanılır. Kaplama kalitesi ve özellikleri, atomizasyon basıncı, hava nozulu şekli, gücü, tel besleme hızı, hareket hızı ve uzaklaşma mesafesi değiştirilerek kontrol edilebilir. Ark püskürtme ile elde edilen kaplamalar diğer termal püskürtme yöntemlerine göre çok daha iyi yapışma özellikleri sergilemektedir.

2.2.2.2. Plazma Püskürtme

Plazma püskürtme, çok yüksek sıcaklıklarda eriyen yüzey kaplama malzemelerini uygulamak için kullanılır. Elektrot görevi gören püskürtme nozulları arasında bir ark oluşturulur. Hareketsiz şekilde bulunan gaz basınçlandırılarak, bir plazma gazı oluşturmak için elektrotlar arasından geçirilerek çok yüksek sıcaklıklara ulaşır. Daha sonra Toz haline getirilmiş kaplama malzemesi eritilerek ısıtılmış gazla birlikte kaplanacak yüzeye hızlı bir şekilde uygulanır. Plazma püskürtme sistemi, bir güç kaynağı, gaz kaynağı, tabanca ve toz besleme mekanizmasından oluşur. İşlem, zirkonyum dioksit ve alüminyum oksit ve krom oksit gibi aşınmaya dayanıklı kaplamaları uygulamak için kullanılmaktadır.

Termal püskürtme ile alüminyum kaplama işlemi, alüminyum ya da alüminyum alaşımlarının ergitilerek yüksek basınçlı (2–4 atm) hava akımı ile yüzeye püskürtülmesi ile gerçekleştirilmektedir. Termal püskürtme ile alüminyum kaplama işlemi için önceden temizlenmiş yüzeye püskürtme işlemi uygulanarak yapılır. Kaplanacak malzemenin yüzey pürüzlülüğü artırılarak, kaplama malzemesi ve kaplama tabakası arasında oluşacak zayıf bağın kuvvetlenmesi sağlanmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünü artırmak için kaplama öncesi fırçalama işlemi önerilmektedir. Fırçalama işlemi sonucunda kaplanacak olan malzemenin yüzeyi yüksek pürüzlülüğe sahip olmaktadır. Bu işlem sonucunda numunenin yüzey pürüzlülüğü yükseltip yapışmanın geliştirilmesine rağmen bağlanma dayanımı oldukça düşük olmaktadır. Ayrıca, kaplanacak malzeme ile kaplama tabakası arasında olan zayıf bağın dayanımını artırmak için 850 – 1250 °C sıcaklık aralığında uzun süre tavlama işlemi uygulanması tavsiye edilmektedir [39,43].

2.3. Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ile kaplama yöntemi 1800'lü yıllardan beri bilinmesine rağmen, ticari olarak ilk kez Balzers tarafından 1979 yılında uygulanmıştır. PVD kaplama işlemi ilk olarak bir HSS matkap ucu ve kılavuz takımına, daha sonra ise diğer takımlara da uygulanarak yaygınlaşmıştır. PVD kaplama, 1980'li yıllardan beri endüstride sıklıkla kullanılan bir kaplama yöntemi olmuştur. PVD ile kaplama yöntemi, uygulananın kolaylığı, kaplanacak olan malzemenin mikro yapısına zarar vermemesi, ölçüsel tolerans farklılığına ihtiyaç duymaması gibi avantajlarından dolayı geniş bir uygulama alanı bulmuştur [12].

PVD kaplama yöntemi, katı haldeki bir malzemenin yüksek vakum altında buharlaştırılması işleminden sonra, kaplama yapılacak olan malzeme yüzeyine doğru hızlıca ve yoğun bir şekilde biriktirilmesi işlemidir. İyonizasyon işlemi sayesinde daha yoğun ve daha sağlam bir kaplama elde edilebilir. Bu kaplama yöntemi mühendislik alanında oldukça fazla öneme sahip olan uçak iniş takımları gibi yüksek mukavemetli çelik parçaların korunması ve alüminyum gibi malzeme yapılarının içerisine yerleştirilen çelik bağlantı elemanlarında tercih edilmektedir. PVD yöntemi ile alüminyum kaplama işleminin diğer yöntemlere göre birtakım avantajları bulunmaktadır. Bunlar; alüminyum kaplama tabakasının, çelik malzeme yüzeyine çok güçlü bir şekilde yapışması, alüminyum kaplama tabakasının çelik malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz olarak etkilememesi ve farklı geometrilerdeki malzemelere istenilen kalınlıkta homojen bir kaplama yapılmasını sağlamaktadır [39].

PVD uygulamaları, düşük taban malzeme sıcaklıkları ve kaplama malzemesi olarak çoğunlukla refrakter malzemeler kullanılması nedeniyle yüksek iç gerilmeler oluşturmaktadır. Ayrıca yüksek enerji gerektiren iyon bombardımanının gerçekleşmesi sebebiyle de iç gerilmede artış oluşabilmektedir [12].

Cr, Ti, Zr gibi elementlerin ve TiSi, AlCr, AlTi gibi alaşımların nitrürler, karbürler ve karbonitridlerle birlikte kullanılarak oluşturulan kaplamalar, çok çeşitli malzemeler üzerine ince film kaplanması için kullanılır. PVD kaplama yöntemi uygulamaları genellikle 250 ile 450 ° C işlem sıcaklığı arasında gerçekleşmektedir. PVD kaplamalar; tekli, çoklu ve kademeli tabakalar şeklinde de oluşturulabilir. Tipik

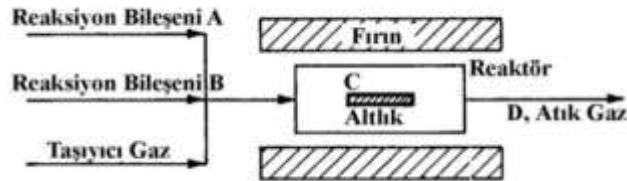
olarak 2-5 µm aralığında kaplama kalınlığı elde edilir. Fakat birkaç yüz nanometre kadar ince veya 25µm kadar kalın kaplamalar da elde edilebilir [12].

Buharlaştırma, sıçratma, plazma oluşturma gibi farklı PVD uygulama teknikleri vardır. Buharlaştırma işleminin farklı yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmesi, kaplama yapılacak malzemeye vakum odasına göre negatif potansiyel uygulama (BIAS) ve plazma kullanımı gibi uygulamalar bu teknikleri birbirinden ayıran noktalardır. Kullanılacak olan bu farklı uygulama teknikleri, kaplamanın özellikleri, yapısı ve kaplama hızı gibi parametreleri önemli derecede değiştirmektedir [12].

2.4. Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (CVD)

Kimyasal buhar biriktirme (PVD) ile kaplama yönteminin tarihçesi, 1915 yılında Langmiur'un sıcak bir tel yüzeyi üzerinde volfram kristallerini biriktirme işlemine dayanmaktadır. 1924 yılında Philips Laboratuvarlarında titanyum, hafniyum ve zirkonyum gibi metallerin de kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle kaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların çoğu araştırma amaçlı olup, ticari olarak ilk kullanımı 1971 yılında TiN ile kaplı kesici uçlar ile olmuştur [36].

Kimyasal buhar biriktirme yönteminin temel prensibi, buhar fazında bir taşıyıcı gazın kontrollü bir şekilde kimyasal reaksiyonlara sokularak, kapalı bir kap içerisinde ısıtılmış olan altlık malzeme yüzeyine katı bir şekilde biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Kimyasal buhar biriktirme işlemi reaksiyon şeması Şekil 2.5'te gösterilmiştir. İstenilen kaplamanın oluşması için, gerekli kimyasal reaksiyonlara girecek olan metal bileşiklerinin gaz fazında olması gerekmektedir. Bu yöntemde kullanılan en yaygın gaz fazındaki metal bileşikleri florür, klorür ve bromür olmuştur. Kimyasal buhar biriktirme yönteminde, kaplanacak olan yüzeylerin tümünün homojen bir şekilde ve eksiksiz kaplanması mümkündür [36].



Şekil 2.5. Bir CVD ünitesinin şeması, reaksiyon: $A + B \rightarrow C + D$ [36].

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) ile üretilen kaplamaların kalınlığı 10-30 µm aralığındadır. Kaplama işlemi yaygın olarak 900-1100°C sıcaklık aralığında ve uygulanan kaplamanın türüne göre değişmektedir. İstenilen kaplama kalınlığına göre işlem süresi 2-4 saat arasında değişmektedir [38].

Kaplanacak olan malzemelerin yüksek sıcaklık ve basınca dayanıklı olması gerekmektedir. Ayrıca yapılan kimyasal reaksiyonlar ve uygulama kaplama işlemi için yüksek enerji gerekmektedir. Bu sebeple kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD) ile elde edilen kaplamalar, benzer yöntem olan fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile üretilen kaplamalara göre daha dayanıklı kaplamalardır. Ancak yüksek enerji maliyeti ve pahalı malzemelerin kullanılmasından dolayı bu kaplama yöntemi, fiziksel buhar biriktirme yöntemine göre daha yüksek maliyet gerektirmektedir.

2.5. Sol-Jel Yöntemi

Sol jel işlemi, bir sıvı içerisinde bulunan nano boyuttaki katı parçacıklardan oluşan kolloidal süspansiyonların (sol) ve ardından üç boyutlu katı inorganik ağ yapılarının (jel) oluşturulması işlemidir. Aslında bu proses, çözelti formundan oluşturulup çeşitli kullanım alanlarına yönelik olan başta seramik ve cam olmak üzere kompozit malzemelerin de üretildiği bir tekniktir. Kolloidal olarak kullanılan katı parçacıkların tane boyutu 500 nm veya daha küçüktür. Bu sebeple optik mikroskop ile görüntülenemezler [38].

Sol-jel yöntemi ile kaplama işlemi cam, seramik, metal ve plastiklerin yüzey özelliklerini geliştirmek, bu malzemelere yeni özellikler kazandırmak (optik, elektronik, kimyasal ve mekanik gibi) amacıyla uygulanmaktadır. Sol-jel yöntemi ile kaplama işleminin uygulanması için; Daldırma, püskürtme, akış kaplama, döndürme, laminar, merdaneli ve baskı kaplama gibi birçok farklı metot vardır [38].

Cam üretimi ile kullanımı artan sol-jel yöntemi günümüzde film, fiber, monolit, toz, kompozit ve gözenekli malzemelerin kaplanması gibi bir çok farklı alanda kullanılmaktadır. Çelik malzeme yüzeylerinin de paslanmaya, çizilmeye ve oksidasyona karşı korunması için sol-jel yöntemi ile oluşturulan kaplamalar kullanılmaktadır [38].

2.6. Elektrolitik Kaplama Yöntemi

Elektrolitik kaplama yöntemi ile alüminyum kaplama işleminde, ergimiş alüminyum klorür tuzları ve alkali metal klorürlerden oluşan ergimiş elektrolitler ya da etil bromür ve benzen içerisinde alüminyum bileşiklerinden oluşan inorganik elektrolitler kullanılmaktadır [39].

Kaplama işleminden önce kaplanacak malzeme yüzeyi iyice temizlenir ve sonrasında yağdan arındırılarak HCl asit çözeltisinde temizlenir. Yüzeyde alüminyum kaplamanın oluşma hızı diğer yöntemlere göre oldukça yavaştır. Tipik olarak 30 dakikada yaklaşık 0,01mm kaplama kalınlığı elde edilir. Akım yoğunluğuna paralel olarak bu hız da artmaktadır. Literatürde 800°C’de ek olarak bir tavlama işlemi uygulanarak, daha homojen bir yapının elde edileceği öne sürülmektedir. Fakat tavlama işlemi, alüminyumun demir içerisine difüze olmasına ve kırılğan intermetalik bileşenlerin oluşmasına neden olmaktadır. Düşük sıcaklıklarda bu işlemin yapılmasının en önemli avantajı ise bu tür kırılğan yapıların oluşmamasıdır [39,43].

Genel anlamda bakılacak olursa bu yöntemin bir takım dezavantajları vardır. Alüminyum klorür gibi kolayca buharlaşabilen ve normal koşullarda dahi kolayca bozunabilen bir yapının kullanılması, yöntemin oldukça yavaş gerçekleşmesi ve uygulama maliyetinin yüksek olması üretici için en büyük dezavantajlardır [39].

2.7. Gaz Alüminyum Kaplama Yöntemi

Bu yöntemde, alüminyum klorür ($AlCl_3$) gaz fazı bulunan ortamda alüminyum (% 45) ve alüminyum oksit (% 45) ve amonyum klorür (% 10) içeren bir karışım kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Uygulamaya bakıldığında bu karışım gaz sızdırmayan bir fırına yerleştirilerek 600°C’ye kadar ısıtılır. Fırının diğer ucuna kaplama yapılacak numune yerleştirilir ve 900–1.000°C’ye ısıtılır. Kaplama işlemi sonucunda çelik yüzeyinde ince bir alüminyum tabakası oluşmaktadır. Yöntemin karmaşıklığı ve önemli enerji tüketiminden dolayı bu yöntem endüstride çok kullanılan bir yöntem değildir [44].

2.8. Elektroforez

Bu yöntemde alkol içerisinde bulunan küresel alüminyum parçacıklarının toz halinde, kaplama yapılacak numune yüzeyinde çöktürme işlemi uygulanarak kaplama gerçekleştirilmektedir. Ardından yüzeye kaplanan bu toz tabakası en az % 7 oranında haddelenerek pekiştirilir ve oldukça düşük hızda 500°C'ye ısıtılarak sinterlenir ve çeliğe bağlanması sağlanır [39,43].

2.9. Vakum ile Kaplama Yöntemi

Vakum ile kaplama, genel anlamda alüminyumun buharlaştırılması ve kaplama numunesi yüzeyinde yoğunlaştırılarak kaplanmasıyla yapılmaktadır. Püskürtme yöntemi ile benzerlik taşımaya rağmen daha kaliteli kaplamalar elde edilmektedir. Kaplanacak olan alüminyum, buhar basıncının atmosfer basıncından daha yüksek olduğu bir sıcaklığa (1400°C) kadar ısıtılır. Al buharı kaplanacak malzemeyle karşılaştığında soğuk yüzeyden dolayı alüminyum hemen yoğunlaşmaktadır. Bu işlemin gerçekleşmesi için düşük basınçlı (10^{-3} - 10^{-5} mm-Hg) vakum odaları kullanılır. Kaplama işleminin yavaş gerçekleşmesi kaplama yüzeyinin daha kaliteli olmasına sebep olmaktadır [39,43].

Bu yöntem kullanılarak 0,08-2,5 µm kalınlığında kaplama kalınlıkları elde edilmektedir. Makro boyutta kaplamanın kalitesinin, kullanılan çelik malzemenin yüzey kalitesiyle orantılı olduğu, mikro boyutta ise bu yöntemle elde edilen kaplamaların üniform olduğu, homojen olmadığı anlaşılmıştır. Ayrıca ferroalüminyum ara alaşım tabakasının oluşmadığı belirlenmiştir. Çelik ile alüminyum tabakası arasında güçlü bir bağ oluşturmak için kaplama numunesi yüzeyi önce dikkatli bir şekilde temizlenmeli, sonrasında 175-370°C sıcaklığına kadar ön ısıtma işlemi uygulanmalıdır. Kaplama kalitesinin yanı sıra kaplama numunesi ve kaplama tabakası arasında kuvvetli bağ oluşumundan dolayı kritik parçaların yüzey işlemlerinde bu yöntem tercih edilmektedir [39,43].

2.10. Giydirmeye (Cladding) Yöntemi

Bu yöntemde alüminyum ve çelik bantların beraber kullanılarak haddeleme yapılmasıyla alüminyum malzemenin çelik yüzeyine kaplanması gerçekleştirilir. Haddeleme işlemi sırasında iki malzeme arasında metalik bağ oluşumu gerçekleşir. Son

yıllarda paslanmaz çeliklerin yüzeylerinin bu yöntem kullanılarak alüminyum kaplanması yaygınlaşmaktadır. Bu yöntemle bant, levha ve boru üretimi gerçekleştirilmektedir [44].

2.11. Kutu Yöntemi

Kutu yöntemi ile alüminyum kaplama işleminde ilk olarak çelik malzeme yüzeyi oksit ve yabancı maddelerden temizlenir. Sonrasında çelik malzeme yüzeyi üzerinde bulunan alüminyum veya ferro-alüminyum toz parçacıkları ile birlikte karbürizasyon kutularına yerleştirilerek yüksek sıcaklıklara (900-1080°C) kadar 4 ile 30 saat işlem süresi boyunca ısıtılır ve kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olur. Kaplama kalınlığı 0,03-1,5 mm aralığında oluşmaktadır. İşlem sırasında sinterlenmenin önlenmesi amacıyla alümina veya öğütülmüş kil, oksitlenmenin engellenmesi amacıyla da alüminyum klorür veya amonyum klorür karışımı ilave edilmektedir. Uygulama sonrası kaplama yüzeyinde yüksek oranda alüminyum (%36-65) biriktiğinden oldukça kırılğan bir yapı oluşmaktadır. Bu sebeple kaplama sonrası 815-1000°C sıcaklığında tavlama işlemi uygulanmaktadır. Tavlama işlemi sonrası dış yüzeydeki alüminyum oranı %20-30 seviyelerine düşer ve toplam kaplama yoğunluğu artar.

İşlemin uygulanışının kolay olmaması ve pahalı olmasından dolayı genellikle karmaşık şekilli parçaların kaplanması için kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca yüksek sıcaklıktaki oksidasyon direncinin artırılması amacı ile endüstride nikel bazlı alaşımlara ve gaz tribünlerine uygulanan bir işlem olarak bilinmektedir [37, 44].

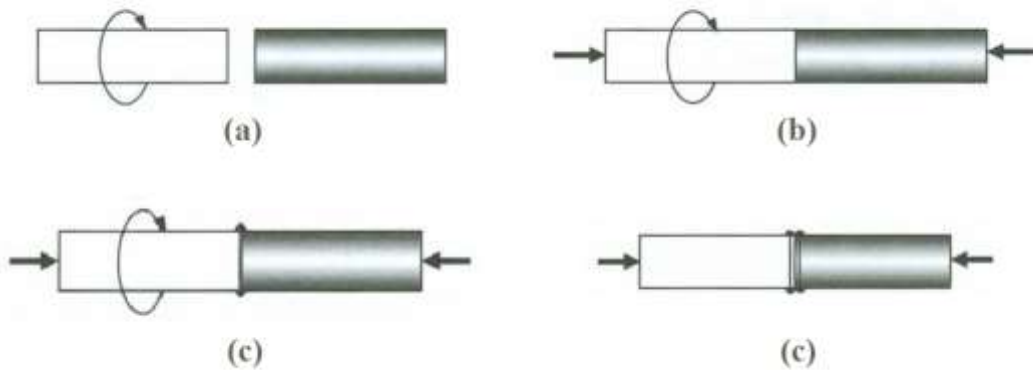
3. SÜRTÜNMELİ BİRLEŞTİRME TEKNİKLERİ

Sürtünmeli birleştirme teknikleri sürtünme kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı ve sürtünme yüzey kaplaması olmak üzere 3 başlıkta incelenmiştir.

3.1. Sürtünme Kaynağı (Friction Welding)

Sürtünme kaynağı işleminde ısı, elektrik veya diğer enerji kaynaklarından değil de biri sabit diğerine dönme hareketi verilen parçaların yüzeylerinde oluşan sürtünme ile gerçekleşmektedir. Isının, sürtünme yolu ile elde edilebilmesi için, parçalardan en az birine dönme hareketi verilmesi gerekmektedir. İki parçanın birbirine ters yönde döndürülmesi şeklinde uygulanan sürtünme kaynağı metotları da vardır.

Kaynak işlemi sırasında malzeme yüzeylerinin karşılıklı olarak uyguladığı basınç sabit veya belirli oranda artırılarak uygulanmaktadır. Malzemeler arasında oluşan arayüzey kaynak sıcaklığına ulaşana kadar dönme işlemi belirli bir basınç altında devam etmektedir. Arayüzeyin kaynak sıcaklığına ulaşması sonrasında dönen parçanın hareketi durdurularak kaynak işlemi bitirilir. Bu işlem sayesinde sadece aynı tür değil, farklı türden metallerin birleştirilmesi de sağlanabilmektedir. Endüstride sıklıkla kullanılan sürtünme kaynağı seri üretime ve otomasyona uygun bir kaynak işlemidir. Sürtünme kaynağı işlem basamakları Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sürtünme Kaynağı aşamaları: (a): Dönme başlangıcı, (b): Yüzeylerin temas etmesi, (c): Sürtünmenin gerçekleşmesi, (d): Durma aşaması

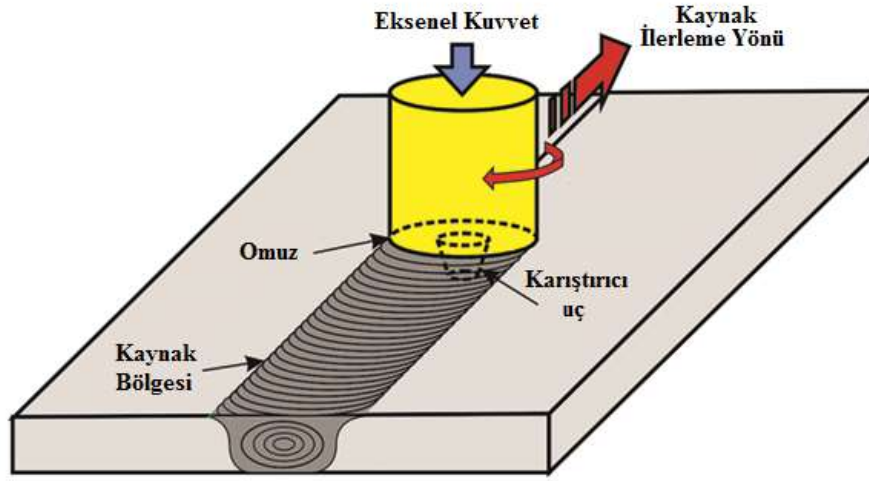
Isının, harici bir enerji kaynağı gerekmeden sürtünme ile oluşturulması, diğer birleştirme yöntemlerine göre enerji tasarrufu sağlar. Bu, aynı zamanda diğer birleştirme yöntemlerine göre daha fazla ekonomiklik demektir. Fakat, birleştirilen parçaların çoğunlukla silindirik geometriye sahip olması geniş bir kullanım alanı sunmamaktadır. Ayrıca kaynak işlemi sırasında, kaynaklanacak parçaların basıncın etkisi ile boylarının kısılması da malzeme sarfiyatına neden olmaktadır.

Sürtünme kaynağı işlemi ile ilgili parametreler; dönme devri, sürtünme basıncı, sürtünme süresi, frenleme süresi, yığma basıncı ve süresidir. Bu parametreler kaynak işleminin kalitesini belirleyen en önemli faktörlerdir.

3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding)

Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünmeli birleştirme tekniklerinden biri olan sürtünme kaynağı işleminin uygulamasının geliştirilmiş başka bir çeşididir. Sürtünme kaynağında çoğunlukla silindirik geometrideki parçalar kaynatılırken, sürtünme karıştırma kaynağında ise alın altına getirilen levha ve boru tipi malzemelerin kaynatılması işlemi gerçekleştirilir. Bu kaynak tekniğinde, kaynak kabiliyeti zor olan malzemelerin birleştirilmesi, kaynak süresinin kısa olması, duman ve ışın oluşmaması, toz ve ilave metale ihtiyaç olmaması ve otomasyon için uygun bir yöntem olması gibi bir çok avantajından dolayı diğer geleneksel ergitme kaynak yöntemleri için alternatif olarak kabul edilen bir kaynak yöntemidir [45].

Bu işlemde, karıştırıcı ucun, alın altına getirilerek sabitlenmiş olan parçalara temas ederek sürtünmesi sonucunda sürtünen bölgelerde ısı açığa çıkmaktadır. Karıştırıcı ucun temas ettiği malzemeler ile arasında gerçekleşen sürtünmeden dolayı malzemenin kaynak yapılacak bölgesi yumuşar ve plastik şekil değişimine uğrar. Karıştırıcı uç, kaynaklanacak olan parçaların alın altına getirildiği bu bölgeye daldırılarak, birleştirmenin gerçekleşeceği uzunluk boyunca ilerletilir. Bu işlem sonucunda karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç altında soğuyarak katılaştır ve kaynak işlemi gerçekleştirilmiş olur. Kaynakla birleştirilmesi istenilen parçalara yada karıştırıcı uca dönme ve ilerleme hareketi verilerek iki farklı şekilde malzemeleri birleştirme işlemi uygulanabilir. Sürtünme karıştırma kaynağının uygulama şeması Şekil 3.2 'de gösterilmiştir [45].

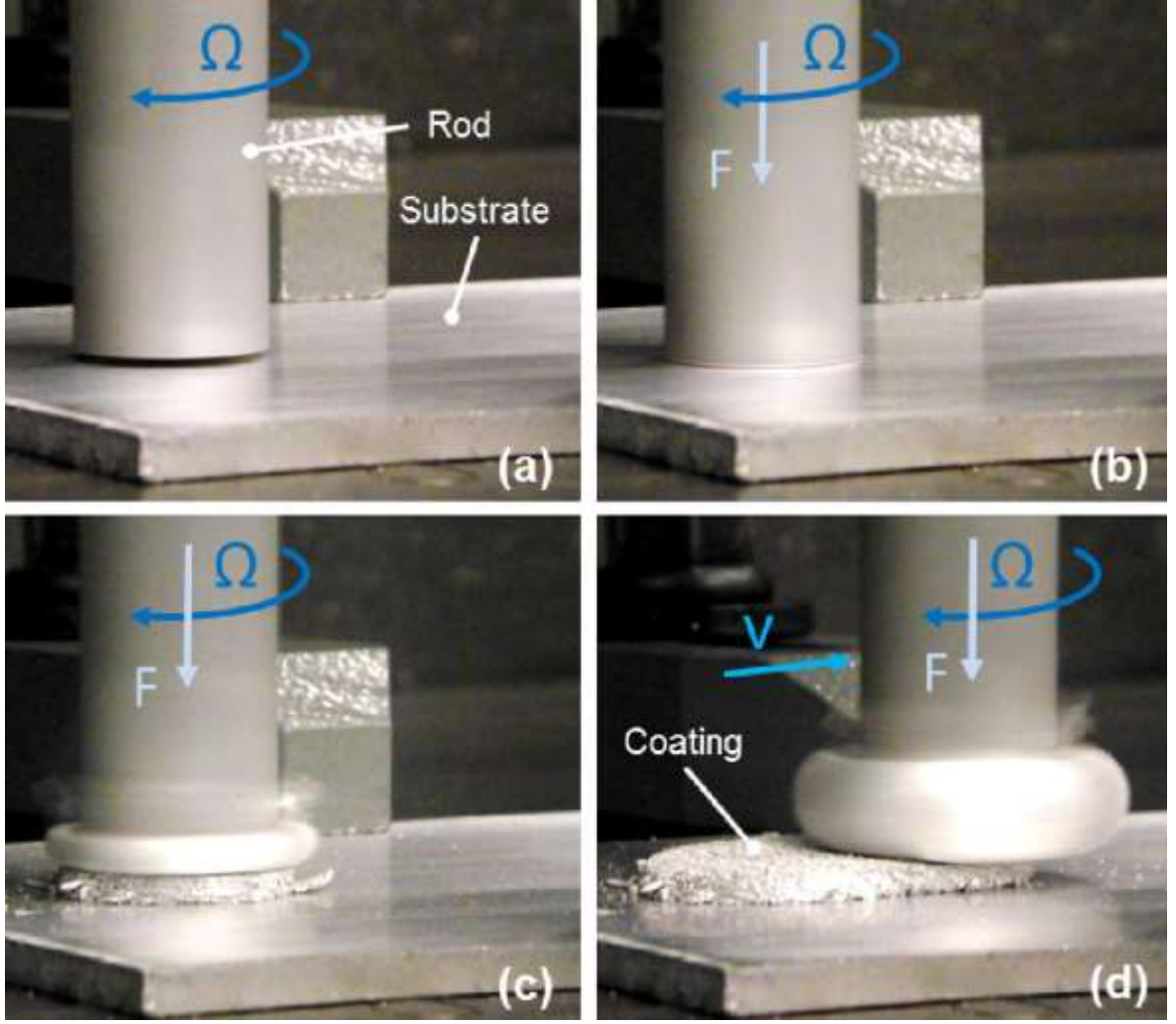


Şekil 3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı İşlemi

3.3. Sürtünme Yüzey Kaplaması (Friction Surfacing)

Sürtünme yüzey kaplaması (FS), kendi eksenini etrafında dönen metal çubuğun, sabit bir başka metal levha yüzeyine belirli bir basınçla bastırılarak sürtünmesi ve yüzey üzerinde ilerlemesi şeklinde uygulanan bir katı hal metal kaplama yöntemidir. Basınç ve sürtünme ile oluşan sıcaklık, kaplama malzemesi ile kaplanacak malzeme arasında metalik bir bağ oluşturur. Oluşan metalik bağ malzemeler arasında bir difüzyon sürecine yol açar. İşlem sırasında malzemelerin yüzeyinden içerisine doğru ısı iletimi ilerler ve böylece malzemeler arasında viskoplastik bir ara yüzey oluşur. Kaplanacak olan metal çubuk, devam eden ısı iletimi ile oluşan ara yüzeyin dışına doğru birikerek kaplama tabakasının kalınlığını arttırmaktadır. Kaplama malzemesi olarak metal çubuk, kaplanacak yüzey üzerinde gezici bir hareket ile uygulanarak, sürekli bir işlemle alt tabaka yüzeyine kaplanır [27].

Sürtünme yüzey kaplamasının dönme başlangıcı, ilk temas, ilk deformasyon ve biriktirme aşamasını belirten işlem sürecine ait görsel Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Sürtünme yüzey kaplaması işlem süreci (a) Dönme başlangıcı, (b) ilk temas, (c) ilk deformasyon aşaması ve (d) biriktirme aşaması [27]

Sürtünme yüzey kaplaması (FS) malzeme yüzeyleri arasında oluşan sürtünme sonucu ortaya çıkan ısıyla yapılmaktadır. Ayrıca bir ısı kaynağına gerek duyulmaz. Kaplanacak olan malzemenin ergime sıcaklığı kaplanacak yüzeyin malzemesinin ergime sıcaklığından düşük olmalıdır. Kaplama malzemesi olan metal çubuk, sürtünen bölgesinde oluşan ısı neticesinde ergime sıcaklığına getirilir ve yumuşaması sağlanır. Ayrıca çubuk üzerine etki eden eksenel kuvvet, çubuğun kaplanacak olan yüzeye doğru bir basınç oluşturmasını sağlar. Böylelikle, metal çubuk, kaplanacak olan malzeme ile tutucu arasında sıkıştırılarak plastik deformasyona uğrar. Sürtünme ile ergime sıcaklığına getirilmiş, yumuşamış ve sıkıştırılmış çubuk, kaplanacak olan daha soğuk ve sert yüzey üzerinde hızlıca tükenerek sürekli ve ince taneli bir kaplama tabakası

oluşturur. İşlem sırasında kaplama çubuğu, sürtünen uç kısmında yan yüzeylerinin kenara doğru yığılmasından dolayı karakteristik bir mantar görüntüsü vermektedir [27].

Sürtünme yüzey kaplaması (FS) kavramından ilk kez Klopstock ve Neelands (1941) tarafından bir patentte bahsedilmiştir. Bishop (1960) tarafından özetlenen bazı raporların, SSCB'de 50'li yıllar boyunca sürecin geliştiğini göstermesine rağmen, FS ile ilgili araştırmalar izleyen yıllarda nispeten zayıf kalmıştır. 80'li yılların sonlarından itibaren sürtünme esaslı katı hal işlemlerine olan ilginin artmasının ardından bu yöntem üzerine yeni araştırmalar yapılmıştır. Esas olarak sürtünmeli yüzey kaplama yöntemi, üst düzey aşınma veya korozyon özellikleri sergileyen homojen ve ince taneli kaplamaların üretilmesi amacıyla araştırılmıştır. Bu yöntemin ilk uygulamaları, Dunkerton ve Thomas (1984) tarafından, aşınmış, hasar görmüş parçaların veya yüzeyde oluşan çatlakların onararak iyileştirilmesi ile ilgili olmuştur [27].

İşlem için kullanılan parametreler dönme devri, uygulanan kuvvet, eğim açısı, sürtünme süresi, ilerleme hızı ve malzeme çapıdır [30].

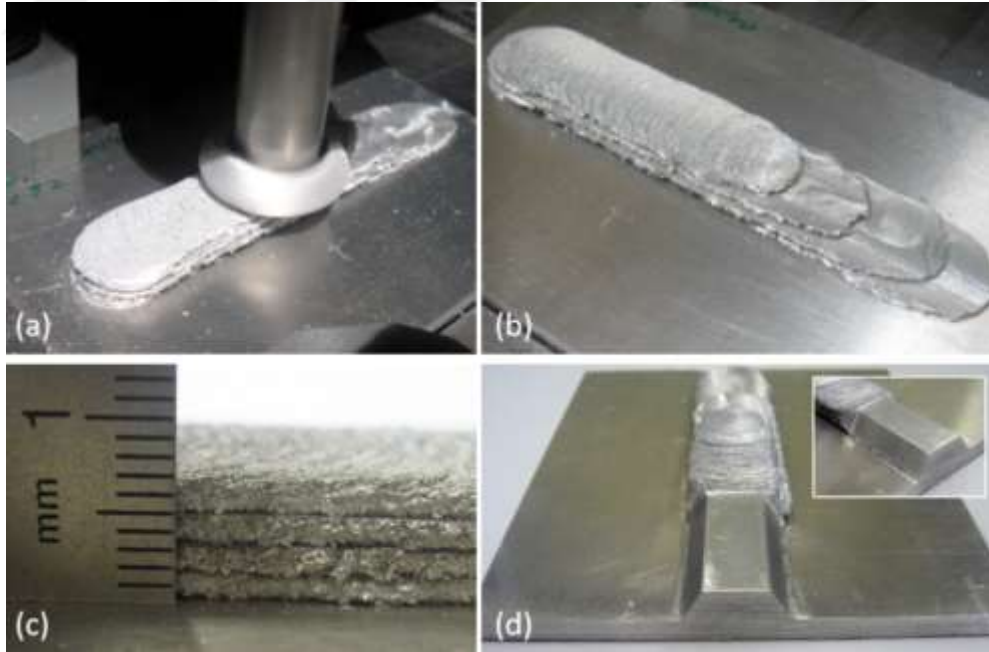
Sürtünmeli yüzey kaplama yönteminin sağladığı avantajlar şu şekildedir;

- Uyumluluk sorunları olan veya ergitme yöntemleriyle kolayca birleştirilemeyen malzemeleri birleştirmek için çok uygundur.
- İşlemden, sıcak dövme işlemine benzer bir durum gerçekleştiğinden dolayı kaplama tabakası homojendir ve çok iyi mekanik özellikler sunar.
- Döküm mekanizmalarına ve yüksek sıcaklığa maruz kalmaya bağlı kusurlar oluşmaz, çünkü kaplama viskoplastik deformasyondan kaynaklanır.
- Kaplanacak olan metal levha ve tüketilebilir metal çubuk arasında oluşan sürtünme ile ısı üretildiği için harici bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sebeple, diğer kaplama yöntemlerine kıyasla daha düşük enerji tüketimi sağlar.
- Sistem diğer kaplama yöntemlerinde kullanılan sistemlere göre daha az donanım içerdiği için daha ekonomiktir.
- Sıçramanın, duman veya radyasyonun oluşmaması FS'yi daha temiz ve çevre dostu bir teknoloji haline getirmektedir.

Yöntemin dezavantajları şu şekildedir;

- Sınırlı sayıda mühendislik uygulamasına katkı sağlamaktadır.
- Kullanılabilir bağ genişliği üretilen kaplamanın genişliğinden daha azdır.
- Kaplama bölgesinin kenarlarında zayıf bağlanmalar oluşmaktadır. Buda işlem sonrası çoğu zaman bu bölgelerin yüzeyden çıkarılması gerekmektedir.
- Ayrıca, sarf malzemesinin ucunda mantar şeklinde oluşan yığılma, alt tabakaya yapışmayan malzemeyi temsil ettiği için kütle transfer verimliliğinde bir azalma oluşur.
- Kaplama geometrisi nispeten dar bir işlem parametresi aralığı ile belirlendiğinden, FS, biriktirilen kalınlık ve genişlik üzerinde sınırlı bir kontrol sağlar.
- Bununla birlikte, şu anda, sürtünme kaplaması işlemi henüz yaygın endüstriyel kullanıma sahip olmayan özel bir ekipmanda gerçekleştirilmektedir [28].

Sürtünme yüzey kaplama yöntemi ile yapılan dört katmanlı kaplamanın görseli Şekil 3.4' te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Sürtünmeli yüzey kaplama yöntemi ile dört katmanlı kaplama oluşturulması (a) Art arda kaplama, (b) art arda gelen dört işlemle üretilen kaplama, (c) elde edilen son kalınlığın ölçülmesi ve (d) frezeleme işlemi sonrası son geometri [33].

Sürtünmeli yüzey kaplama yöntemi ile tarım ve petrol makinelerinin bazı parçaları, buhar tribünü kanatları, kesme aletleri, şaft elemanları, fren diskleri, flanşlar ve demiryolu rayları gibi uygulamalar için kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmış ancak endüstriyel kullanım alanı oluşmamıştır [27].



4. MATERYAL ve METOT

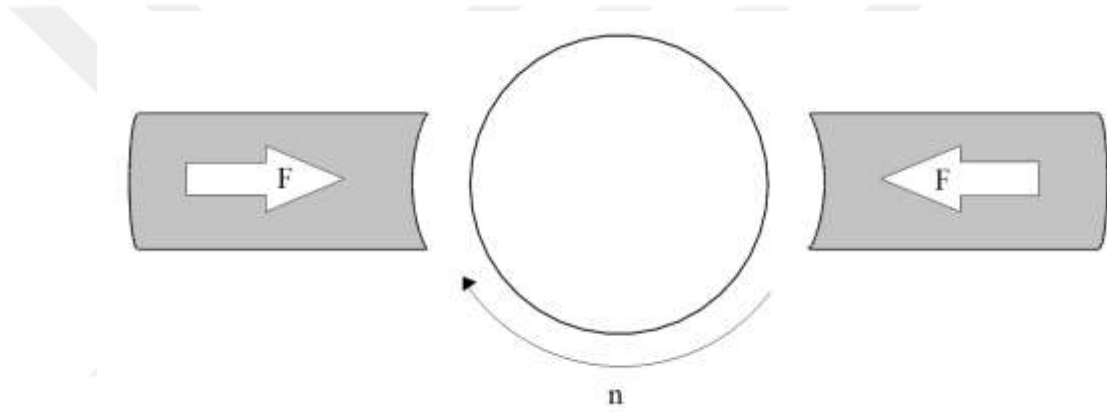
Bu çalışmada, yeni ve özgün bir yöntem olan Sürtünmeli Mekanik Kaplama yöntemi kullanılarak, çelik malzeme yüzeylerini alüminyum alaşımı ile kaplama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemi uygulamak için bir Sürtünmeli Mekanik Kaplama Cihazı tasarlanıp imal edilmiş, sonrasında bu cihaz üzerinde farklı işlem parametrelerinde kaplama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama deneyleri sonrası kaplanmış numunelerden kesitler alınarak, bu kesitler üzerinde mikroyapı incelemeleri, kaplama kalınlıklarının ölçülmesi ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu incelemeler ve ölçümlerin değerlendirilerek kaplamaya etki eden parametrelerin etkisi araştırılmıştır.

4.1. Sürtünmeli Mekanik Kaplama Yöntemi

Endüstride yaygın olarak kullanılan kaplama tekniklerinde, kaplama malzemesi sıvı veya gaz halinde olmalıdır. Eğer, kaplama malzemesi katı veya toz formda ise kaplama öncesinde bu malzemenin sıvı yada gaz haline getirilmesi gerekmektedir. Ayrıca çoğu kaplama tekniğinde, uygulamanın gerçekleşmesi için, kaplama sistemi ile birlikte çalıştırılacak olan ayrı bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulur. Kaplama işleminin uygulanması için gerekli olan ısı kaynağı ve hal dönüştürme işlemleri hem maliyeti arttırmaktadır hem de kaplama sürecini zorlaştırmaktadır. Sürtünmeli Mekanik Kaplama yöntemi ise, kaplama işleminin katı haldeki malzemeler ile mekanik olarak gerçekleştirildiği özgün ve yeni bir yüzey kaplama teknolojisidir. Bu yöntem sayesinde, silindirik geometride olan malzemelerin yan yüzeyleri, kimyasal bileşimi farklı olan ikinci bir malzeme ile kaplanabilmektedir. Kaplama malzemesi olduğu gibi katı halde kullanılacağı için kaplama işlemi öncesinde ayrıca yapılacak bir hal dönüştürme işlemine ihtiyaç yoktur. Kaplama işleminin gerçekleşmesi için gereken ısı ise sürtünme ile elde edileceğinden ilave bir ısı kaynağına da gerek yoktur. Bu hem ekonomiklik hem de uygulama kolaylığı sağlamaktadır.

Kaplama yapılacak olan numune, torna tezgahının etkisi ile kendi eksenini etrafında döndürülürken, kaplama malzemesi de hidrolik silindirlerin uyguladığı itme kuvveti ile dönen parça yüzeyine doğru temas ettirilir. Bu işlem sayesinde kaplama malzemesinin dönen parça yüzeyi üzerinde sürtünmesi sağlanır. Malzemelerin birbiri ile

temas eden yüzeylerinde sürtünmenin etkisi ile ısı ortaya çıkar. Kaplama malzemesinin sürtünen yüzeyi, oluşan ısının etkisi ile ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklığa ulaşır ve bu sayede sürtünme bölgesi katı fazdan, katı-sıvı bir faza dönüşür. Faz değişiminden dolayı daha yumuşak bir yapıya dönüşen kaplama malzemesi, uygulanan sürekli basıncın da etkisi ile plastik şekil değişimine uğrar. Dönen parçada ise sürtünmenin gerçekleştiği bölgede oluşan ısı ve uygulanan basınç, bu malzemenin ergime sıcaklığının ve basma dayanımının çok altında kaldığı için numunenin fiziksel halinde hiçbir değişime yol açmaz, parça katı halini sürdürür. Ayrıca parçanın geometrik şekli de korunur. Sürtülmeli mekanik kaplama işleminin uygulama şeması Şekil 4.1 'de gösterilmiştir.

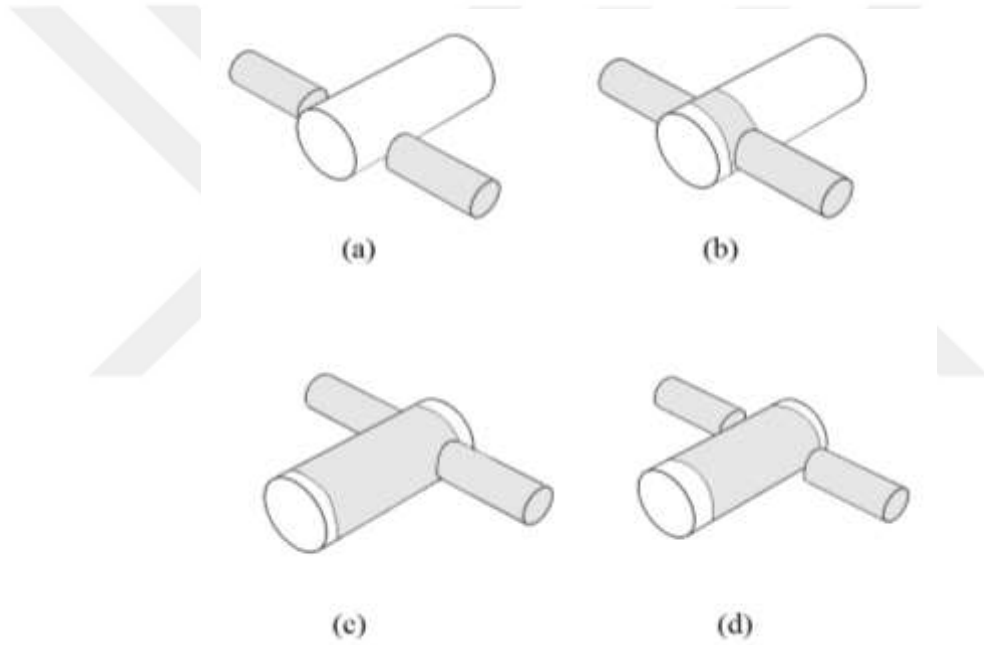


Şekil 4.1. Sürtülmeli mekanik kaplama işleminin uygulama şeması

Faz değiştiren kaplama malzemesi, kendi eksenini etrafında dönen parça yüzeyine doğru, dik yönde sürekli itme kuvveti uygulanarak bastırılır. Bu sayede, kaplama malzemesinin sürtünme etkisiyle katı-sıvı faza dönüşmüş olan yüzeyi ile dönen parçanın sürtünen yüzeyi arasında metalik bir bağ oluşur. Oluşan bu bağ sayesinde kaplama malzemesi dönen parça yüzeyine yapışır. Sonrasında sürtünme ve basıncın sürekli olarak etki etmesiyle birlikte, kaplama malzemesinin dönen parça yüzeyi üzerinde kalınlaşması sağlanır. İstenilen kalınlık elde edilene kadar bu işlem devam eder. İstenilen kalınlık elde edildiğinde kaplama malzemesine uygulanan itme kuvveti ters yönde uygulanır. Bu sayede, kaplama malzemesi dönen parça yüzeyinden ayrılır ve kaplama işlemi tamamlanmış olur.

Kaplama işleminin yüzeyde belirli bir bölgede değil de, yüzey boyunca yapılmasının istenildiği durumlarda ise Sürtünlü Mekanik Kaplama Cihazına ilerleme hareketi vermek için torna kontrol ünitesi kullanılmaktadır. Torna arabasına otomatik ilerleme hareketi verilerek bağlı olan Sürtünlü Mekanik Kaplama Cihazının da otomatik olarak sabit hızda ilerlemesi sağlanır ve kaplama işleminin numune yüzeyi boyunca uygulanması sağlanır.

Sürtünlü mekanik kaplama yönteminin işlem adımları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Sürtünlü mekanik kaplama yönteminin işlem adımları, (a) Kaplama işlemine başlangıç ve ilk temas, (b) yüzeyde kaplamanın oluşması, (c) kaplamanın ilerleme ile numune yüzeyi boyunca uygulanması, (d) Kaplama işleminin sonlanması

Sürtünlü mekanik kaplama yönteminin geleneksel kaplama yöntemlerine göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar;

- Kaplama işleminin gerçekleşmesi için gereken ısı, harici bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulmadan sürtünme ile elde edilir. Bu sayede ekstra maliyet ve işlem gerekmemektedir.

- Kaplama tabakası, uygulama parametrelerinin değiştirilmesi ile kolay bir şekilde 50-1500 µm gibi geniş bir aralıkta, istenilen kalınlıkta elde edilebilmektedir.
- Sürtünmeli mekanik kaplama yönteminin uygulaması, diğer geleneksel kaplama yöntemlerinde olduğu gibi kimyasal reaksiyonlarla ya da elektriksel işlemlerle değil, fiziksel olarak mekanik bir şekilde oluşturulan sürtünme ve basınç ile gerçekleşmektedir. Bu, işlem adımlarını kısaltarak ekonomiklik ve uygulama kolaylığı sağlar.
- Kaplama işlemi öncesinde malzemelerin herhangi bir faz dönüşümüne gerek duyulmaz. İşlem sırasında kaplama malzemesi, kaplanacak olan yüzeye doğrudan katı halde uygulanabilmektedir.
- Kaplama işlemi, diğer yöntemlere göre çok daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Ayrıca kaplamanın yüzeyde soğutulması için farklı ortamlarda bekletilmesine gerek yoktur. Kaplama uygulaması bittiğinde numune son halini alır ve çok kısa bir süre bekletildikten sonra kullanım için hazırdır.
- Kaplama işleminin uygulanması için yalnızca bir sürtünmeli mekanik cihazı ve torna tezgahı gerekmektedir. Bu da, çoğu kaplama yöntemine göre daha az ekipman kullanılmasını sağlamış olur.
- İşlem sırasında duman, radyasyon veya sıçrama gibi olaylar gerçekleşmediğinden dolayı, diğer yöntemlere göre daha çevre dostu bir kaplama yöntemidir.
- Yukarıda bahsedilen ekonomiklik, uygulama kolaylığı ve işlem süresinin kısa olması gibi faktörler bu yöntemin seri üretim için uygun olduğunu göstermektedir.

Sürtünmeli mekanik kaplama işleminin sağlamış olduğu bu avantajların yanında bir takım dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar;

- Yalnızca silindirik geometriye sahip parçalar (miller, borular vb.) için kullanılması bu yöntemi için dar bir uygulama alanı sağlamaktadır.
- Kaplama işlemi sonrasında, kaplama tabakası yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması gereken durumlarda, kaplama işlemi sonrasında ayrıca yüzey işleme uygulaması gerektirmektedir.
- Kaplama malzemesinin tümünün değil de, yalnızca %60 - %70 'inin kullanılıyor olması, kütle transfer verimliliği açısından dezavantaj sağlamaktadır.

4.2. Sürtünmeli Mekanik Kaplama Cihazı

Sürtünmeli mekanik kaplama işlemini gerçekleştirmek için bir Torna Tezgahı ve bir Sürtünmeli Mekanik Kaplama Cihazına ihtiyaç vardır. Torna tezgahı sayesinde numuneye dönme hareketi verilir. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazının çalışması için hidrolik ünitesi tasarlanıp imal edilmiştir. Hidrolik ünitesi, sürtünmeli mekanik kaplama cihazını tahrik ederek, sistemin çalışmasını sağlar. Sürtünmeli kaplama cihazı ve hidrolik ünitesi hidrolik bağlantılar kullanılarak birleştirilmiştir. Şekil 4.3'te gösterilen sürtünmeli mekanik kaplama cihazının çalışma prensibi aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır.



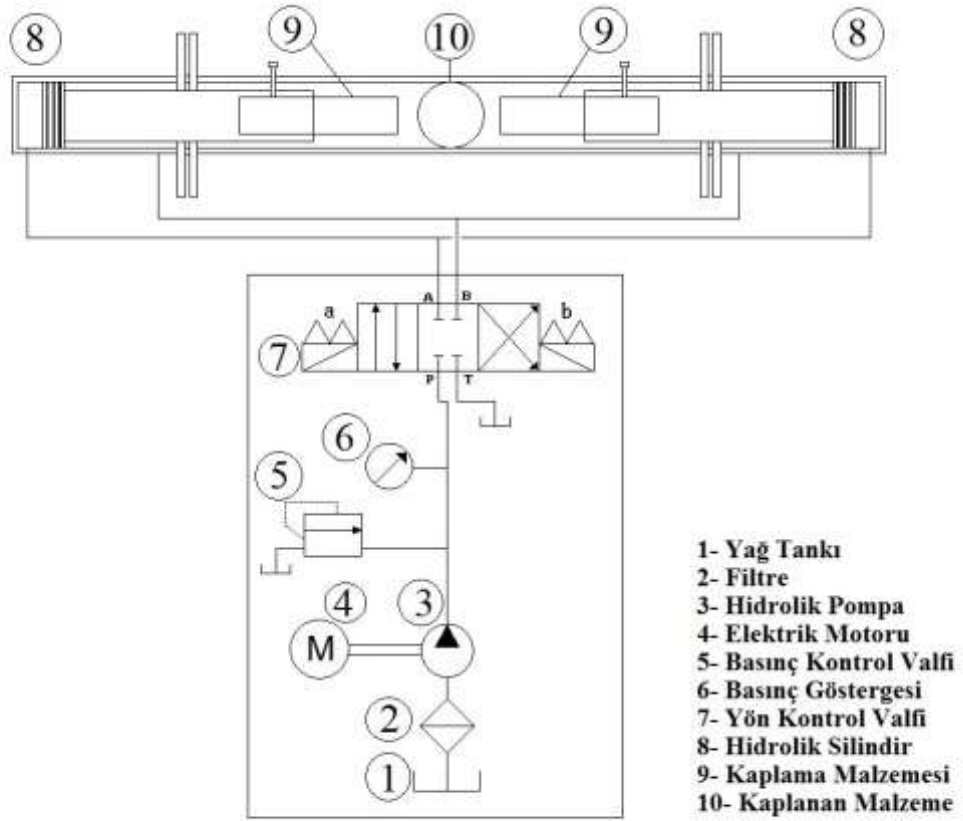
Şekil 4.3. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı

Torna tezgahında arabasının üzerinde yer alan kalemlik sökülerek, kalemlğin bağlandığı bölüme sürtünmeli mekanik cihazı bağlanarak sabitlenir. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazının bağlandığı bölüm Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Kaplanacak olan silindirik metal malzeme, sürtünmeli mekanik kaplama cihazı içerisinden geçirilerek, bir ucu torna tezgahının aynasına bağlanır ve bu sayede malzemeye kendi ekseninde dönme hareketi verilir. Kaplama işlemi sırasında numunenin sabit kalması için diğer ucu da yine torna tezgahı üzerinde bulunan puntaya bağlanarak sıkıştırılır.



Şekil 4.4. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazının torna tezgahı üzerinde yer alan tablaya yerleştirildiği bölüm

Sürtünmeli mekanik kaplama cihazının hidrolik ünitesinde yer alan hidrolik motor şebeke elektriğini (220V) kullanarak, hidrolik pompayı harekete geçirir. Hidrolik pompa ise yağ tankından çektiği yağı sisteme basar. Tankla pompa arasında bulunan filtre ise tankta biriken tortu ve kirleticileri tutarak sisteme temiz yağ gönderilmesini ve ekipmanları korumayı amaçlar. Hidrolik sisteme paralel olarak bağlanan basınç kontrol valfi olası bir arıza durumunda hidrolik sistemin basıncını düzenleyerek, yüksek basıncın olası zararlarından korunmasını sağlar. Sisteme paralel olarak basınç kontrol göstergesi ise sistemin çalışma basıncını gösterir. Hidrolik yağ bu aşamalardan geçtikten sonra selenoid 4/3 kapalı merkez yön kontrol valfine P hattından gelir. Burada yağın hangi yönde gönderileceği ayarlanır. Yön kontrol valfi 1 konumuna getirilir ve A hattından hidrolik silindirlere yağ basılır. Hidrolik silindire basılan yağ, pistonların ileriye doğru hareket etmesini sağlar. Bu sayede kaplama işlemi gerçekleştirilir. Kaplama işlemi bittikten sonra yön kontrol valfi 2 konumuna getirilerek, silindir içerisinde bulunan yağ B hattından yön kontrol valfine çekilir. Bu da, hidrolik silindir içerisinde bulunan pistonların geri yönde hareket etmesini ve kaplama numunesinin kaplama yüzeyinden ayrılmasını sağlar. B hattından yön kontrol valfine çekilen yağ T hattından yağ tankına boşalır. Silindirlerin ilk konumuna gelmesinden sonra sistem durdurulur ve kaplama işlemi tamamlanmış olur. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı şeması ve kullanılan ekipmanlar Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Sürtülmeli mekanik kaplama cihazına ait hidrolik şeması

Kaplama deneyleri sırasında 3 farklı basınç parametresi kullanılmıştır. Bunlar;

$$P_1 = 10\text{bar} = 1 \text{ N/mm}^2$$

$$P_2 = 13\text{bar} = 1,3 \text{ N/mm}^2$$

$$P_3 = 16\text{bar} = 1,6 \text{ N/mm}^2$$

Hidrolik silindirin ürettiği itme ve çekme kuvvetini hesaplamak için Denklem 4.1 kullanılmıştır.

$$F = P \times A$$

$$(4.1)$$

İtme ve çekme kuvvetlerini hesaplamak için gerekli olan alan hesaplaması için Denklem 4.2 kullanılmıştır.

$$A=\pi d^2/4$$

(4.2)

Hidrolik silindirin iç çapı 40mm, piston kolu çapı 25 mm olduğu durumda gerekli alan hesaplamaları aşağıda yapılmıştır.

$$A_1= (3,14 \times 40^2)/4 = 1256,637 \text{ mm}^2$$

$$A_2= (3,14 \times (40^2-25^2))/4 = 765,375 \text{ mm}^2$$

$P_1 = 1 \text{ N / mm}^2$ için hidrolik silindirin çekme ve itme kuvveti şu şekildedir:

$$F_{1(\text{ç})} = P_1 \times A_1 = 1 \times 1256,637 = 1,256/2 = 0,628 \text{ kN}$$

$$F_{1(\text{i})} = P_1 \times A_2 = 1 \times 765,375 = 0,765/2 = 0,3825 \text{ kN}$$

$P_2 = 1,3 \text{ N / mm}^2$ için hidrolik silindirin çekme ve itme kuvveti şu şekildedir:

$$F_{2(\text{ç})} = P_2 \times A_1 = 1,3 \times 1256,637 = 1,633/2 = 0,816 \text{ kN}$$

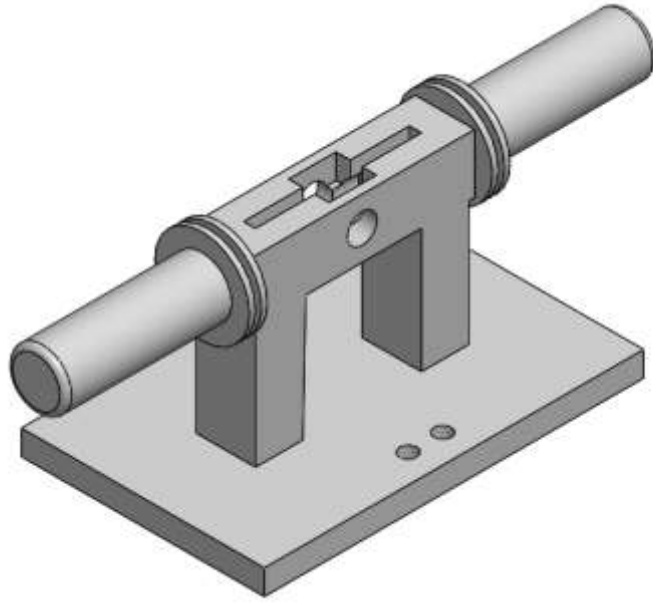
$$F_{2(\text{i})} = P_2 \times A_2 = 1,3 \times 765,37,5 = 0,994/2 = 0,497 \text{ kN}$$

$P_3 = 1,6 \text{ N / mm}^2$ için hidrolik silindirin çekme ve itme kuvveti şu şekildedir:

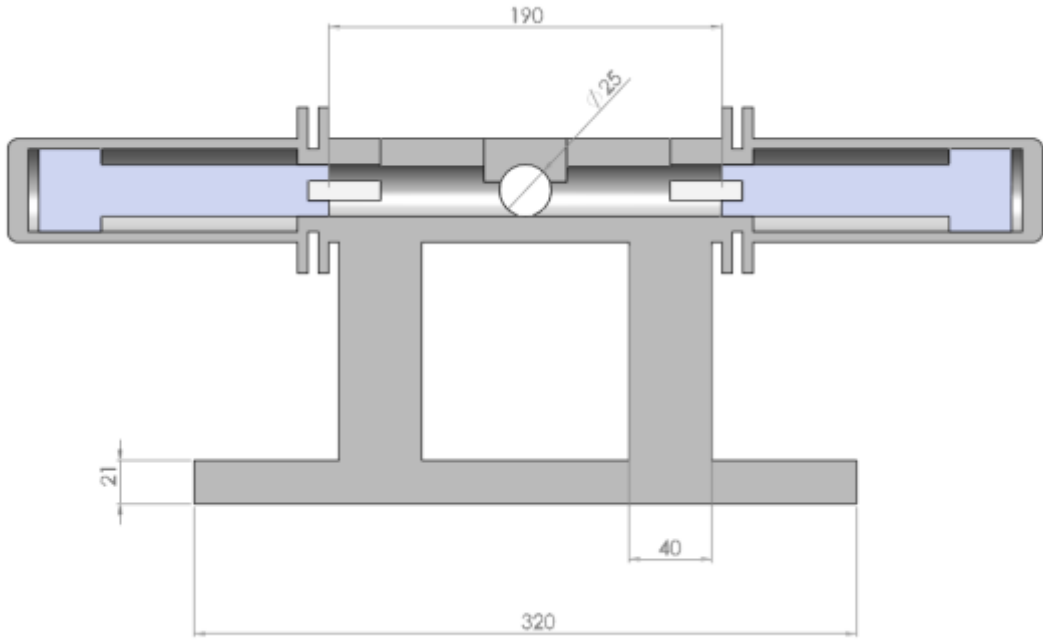
$$F_{3(\text{ç})} = P_3 \times A_1 = 1,6 \times 1256,637 = 2,010/2 = 1,005 \text{ kN}$$

$$F_{3(\text{i})} = P_3 \times A_2 = 1,6 \times 765,375 = 1,224/2 = 0,612 \text{ kN}$$

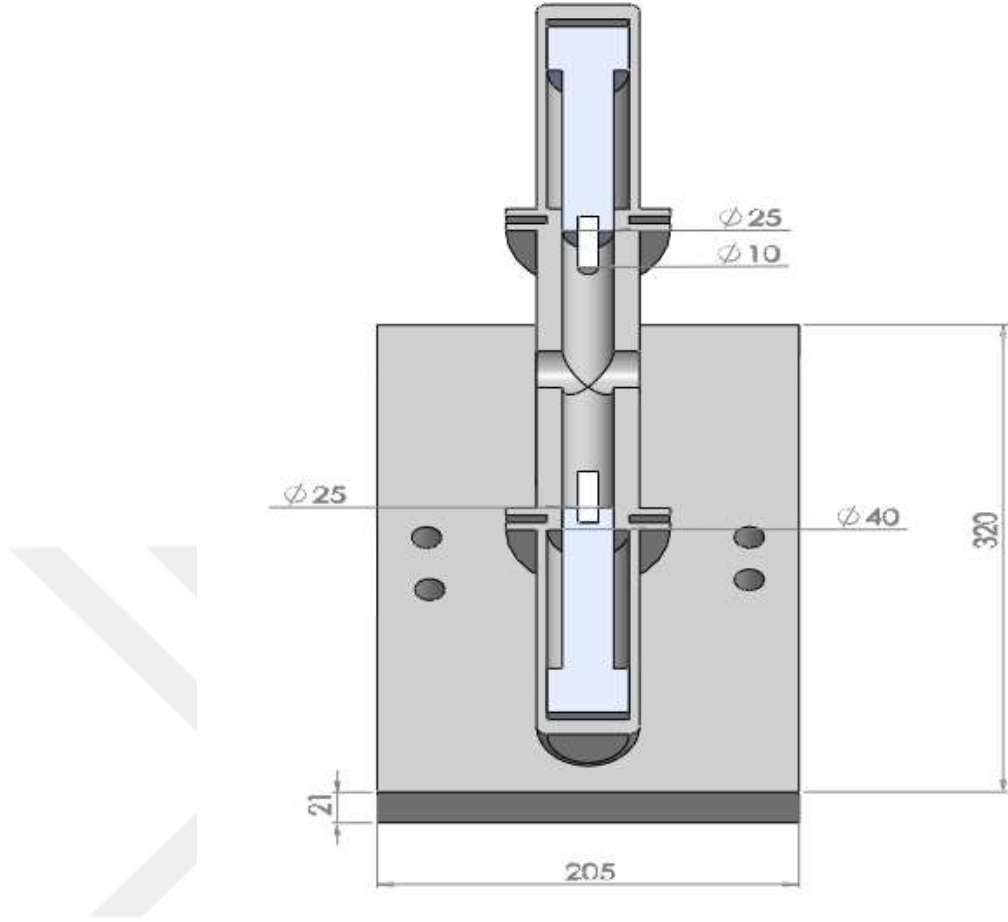
Sürtülmeli mekanik kaplama cihazının üç boyutlu tasarımına ait görüntü Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Tasarıma ait ön kesit görüntüsü Şekil 4.7'de, üst kesit görüntüsü ise 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı üç boyutlu tasarım görüntüsü



Şekil 4.7. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı tasarımı ön kesit görüntüsü



Şekil 4.8. Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı tasarımı üst kesit görüntüsü

4.3. Sürtünmeli Mekanik Kaplama İşleminin Gerçekleştirilmesi

Sürtünmeli Mekanik Kaplama işlemi ile yapılan kaplama işleminde kaplama kalınlığını ve kalitesini etkileyen başlıca parametreler;

1. Dönme devri,
2. Basınç,
3. İlerleme hızı olarak belirlenmiştir.

Kaplanacak olan numunenin dönme devri torna tezgahı kontrol ünitesinden artırılıp azaltılabilmektedir. Dönme devri, malzemeler arasında gerçekleşen sürtünme ile ortaya çıkan ısıyı doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle dönme devrinin artırılıp azaltılması kaplama işlemini etkilemektedir.

Kaplama numunesinin, kaplanacak numune yüzeyine doğru uyguladığı basınç, hidrolik sistemin çalışma basıncına bağlıdır. Hidrolik sistemin çalışma basıncının artıp azaldığı durumda kaplama malzemesinin de, kaplanacak yüzeye olan basıncı artıp azalacaktır. Bu durumda sistemin çalışma basıncı, sürtünmeli mekanik kaplama işlemini etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

Kaplamanın numune yüzeyi boyunca uygulanması için gerekli olan ilerleme hızının değişmesi de sürtünme bölgesinde oluşan ısının değişmesine sebep olacaktır. Bu sebeple ilerleme hızı da, kaplama işlemini etkileyen önemli bir faktör olmaktadır.

Bu faktörlerin Sürtünmeli Mekanik Kaplama işlemine olan etkisini araştırmak için bir takım kaplama deneyleri gerçekleştirilecektir. Yapılacak olan deneylerde her bir parametre için üç farklı düzey kullanılmıştır. Bu parametreler Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Deneylerde kullanılan parametreler

n: Dönme Devri (dev/dk)	P: Basınç (bar)	f: İlerleme Hızı (mm/dev)
400	10	0,028
600	13	0,038
800	16	0,048

Kaplama deneyleri öncesinde parametrelerin uygun çalışma değer aralığını tespit etmek ve uygulama süresini belirlemek için, deneylerde kullanılacak olan çelik ve alüminyum alaşımı malzemeleri ile ön deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön deneylerde; dönme devrinin 400dev/dk ‘dan daha düşük, hidrolik ünite üzerindeki manometrede gösterilen sistem çalışma basıncının 10 bar ‘dan daha az, ve ilerleme hızının 0,048 mm/dev ‘den daha büyük olduğu değerlerde kaplama işlemi, belirgin olmayan şekilde gerçekleşmiş veya yüzeyde herhangi bir kaplama oluşmamıştır. Dönme devrinin 800 dev/dk ‘dan daha yüksek, basıncın 16 bar ‘dan daha fazla ve ilerleme hızının 0,028 mm/dev ‘den daha küçük olduğu durumlarda ise kaplama malzemesi çok kısa süre içerisinde tükenmiş ve bu da deney malzemesinin verimliliğinin düşmesine sebep olmuştur. Ayrıca uygulamanın sonunda kaplama haznesinde bulunan alüminyum numune, çelik yüzeyde oluşan kaplama tabakasına yapışmış ve silindir geri çekildiğinde

bile kaplama yüzeyinden ayrılmadığı görülmüştür. Bu sebeplerden dolayı, yapılacak olan deneylerde Tablo 4.1’de yer alan parametre ve değerler belirlenmiştir.

Bu parametreler kullanılarak yapılacak olan deneylerin sayısı tam faktöriyel metodu kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar için 3 farklı parametre ve her bir parametrenin içinde de 3’er değer seçilmiştir. Tüm parametreler ve değerlerin test edilebilmesi için $3 \times 3 \times 3 = 27$ adet deney gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu deneylerin gerçekleştirilmesi için Tablo 4.2’ de verilen deney planı kullanılmıştır.

Tablo 4.2. Tam faktöriyel metodu ile belirlenen kaplama deneyleri

Deney Sayısı	Basınç (bar)	Dönme Devri (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dev)
1	10	400	0,028
2	10	400	0,038
3	10	400	0,048
4	10	600	0,028
5	10	600	0,038
6	10	600	0,048
7	10	800	0,028
8	10	800	0,038
9	10	800	0,048
10	13	400	0,028
11	13	400	0,038
12	13	400	0,048
13	13	600	0,028
14	13	600	0,038
15	13	600	0,048
16	13	800	0,028
17	13	800	0,038
18	13	800	0,048
19	16	400	0,028
20	16	400	0,038
21	16	400	0,048
22	16	600	0,028
23	16	600	0,038
24	16	600	0,048
25	16	800	0,028
26	16	800	0,038
27	16	800	0,048

Sürtünmeli mekanik kaplama cihazı torna tezgahı arabasının üzerinde yer alan tablaya bağlanarak deney düzeneği Şekil 4.9’ daki gibi kurulmuştur. Daha sonrasında çelik malzeme sürtünmeli mekanik kaplama cihazı içerisinden geçirilerek torna tezgahı üzerinde yer alan punta sayesinde sabitlenerek kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.9. Kaplama deney düzeneği

Öncelikle torna aynasına bağlı olan çelik malzemeye dönme hareketi, sonrasında hidrolik silindirlere içerisinde yer alan alüminyum alaşım malzemelerine itme hareketi verilerek sürtünmeli mekanik kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem 20 saniye boyunca uygulanmıştır. Sürtünmeli mekanik kaplama işleminin gerçekleştirilmesi Şekil 4.10’ da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Kaplama işleminin gerçekleştirilmesi

4.4. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Kaplama deneylerini gerçekleştirmek üzere alüminyum ve çelik malzeme çifti kullanılmıştır. Çeliğin korozyona, oksitlenmeye ve aşınmaya karşı dayanım özelliklerini arttırmak için dış yüzeyinin alüminyum ile kaplanması imalat sektöründe oldukça yaygın bir yer tutmaktadır. Bu yüzden kaplama malzemesi olarak yüksek sertlik,

hafiflik ve kolay işlenebilirlik özelliklerinden dolayı özellikle havacılık, gemi ve otomotiv sanayiinde sıklıkla kullanılan AA7075 malzemesi seçilmiştir. Alüminyum numuneler cihazın içerisindeki haznenin ölçülerine uygun olacak şekilde 35mm uzunluğunda, 10mm çapında silindirik geometriye getirilmiştir. Yapılan deneyler öncesinde hazırlanan alüminyum numuneler Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kaplama malzemesi olarak kullanılan AA7075 alaşım malzemenin kimyasal bileşimi ise Tablo 4.3’te gösterilmiştir.

Tablo 4.3. AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi

Malzeme	Zn	Mg	Cu	Mn	Si
%	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2,2	0,30	0,5



Şekil 4.11. Kaplama öncesinde hazırlanan alüminyum numuneler

Çelik malzeme olarak 1metre uzunluğunda, Ø20mm çapında St37-2 çelik kullanılmıştır. Bu çelik türü yapı malzemelerinde, kutu profil, çubuk yapımı, sac levha, yedek parça gibi imalat sektöründe oldukça yaygın bir şekilde kullanım alanına sahiptir. Kaplama deneylerde altlık malzeme olarak kullanılan St37-2 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 4.4’te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. St37-2 çeliğinin kimyasal bileşimi

Malzeme	C	Mn	P	S	N
%	0,17	1,40	0,045	0,045	0,009

4.5. Numune Hazırlama İşlemleri

Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin orta kesitinden görüntüler alınarak numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Kullanılan metalografik yöntemler öncesinde, bu numunelere bir takım numune hazırlama işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler sırasıyla kesme, zımparalama, parlatma ve durulamadır. Numunelerin kesit olarak alınması için Şekil 4.12’ de gösterilen METKON Metacut-M 250 numune kesme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Numune Kesme Cihazı

Kesme işleminden sonra numunelere Şekil 4.13’de gösterilen METKON Forcipol 2V cihazı ile 240, 400, 600, 800, 1200, 2000 kalınlığındaki zımparalar ile sırasıyla zımparalama işlemi uygulanmıştır. Bu sayede yüzey pürüzlülüğü minimum seviyeye getirilmiştir.



Şekil 4.13. Numune zımparalama ve parlatma cihazı

Zımparalama işleminin sonrasında ise METKON Forcipol 2V cihazında elmas pasta ile keçeleme işlemi uygulanmıştır. Sonrasında ise yüzey alkolle temizlenerek, saf suyla durulanmıştır. Son olarak yüksek hava basıncı sağlayan hava tabancası ile yüzey kurutulmuş ve metalografik inceleme için hazır hale getirilmiştir.

4.6. Mikroyapı İncelemeleri

Numune hazırlama aşamasından sonra Şekil 4.14’de gösterilen Nikon Eclipse MA100 optik mikroskobu ve Zeiss EVO MA10 masaüstü taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak numunelerin kaplama kalınlıkları ve kesit özellikleri incelenmiştir.



Şekil 4.14. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan optik mikroskop

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kesit görüntüleri alınarak kaplamasız bölge, kaplamalı bölge ve ara tabaka olmak üzere 3 ayrı bölgede enerji dağıtıcı spektroskopisi (EDS) analizi yapılmıştır.

4.7. Mikrosertlik Deneyi

Kaplama yapılan numunelerin kesit bölgesi üzerinde mikrosertlik deneyleri yapmak için Şekil 4.15'te gösterilen Mitutoyo Hardness Testing Machine - HM sertlik cihazı kullanılmıştır. 0.5 HV yük altında $t=15$ sn süre ile kaplamalı, kaplamasız ve arayüzey bölgelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Her numunenin bu üç ayrı bölgesinde, 5'er ölçüm yapılarak, bunların aritmetik ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.15. Mikrosertlik Deney Cihazı

4.8. XRD (X-Işını Kırınımı) Analizi

Kaplama tabakasında oluşabilecek fazların belirlenmesi amacıyla, kaplama kalınlığı en az olan (2 numaralı) ve en çok olan (13 numaralı) numunelere 40kV, 15mA ve 20-90° arasında Cu K α X- ışını kaynağı kullanılarak XRD analizi yapılmıştır. Analiz için kullanılan Rigaku Mini Flex 600 bilgisayar kontrollü X-Işını Difraktometresi Cihazı Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. X-Işını Kırınımı (XRD) Cihazı

5. BULGULAR

5.1. Optik Mikroskop Analizleri ve Kaplama Kalınlığı Ölçümleri

Farklı parametrelere göre yapılan kaplama işlemleri gerçekleştirildikten sonra alüminyum kaplanmış olan çelik çubuklar Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Alüminyum kaplı çelik çubuklar

Çelik çubuklar üzerinde uygulanan farklı parametrelerin mikroyapıya ve kalınlığa etkisini araştırmak üzere; çelik çubukların kaplama yapılan bölgelerinden kesit numuneler alınarak bir takım numune hazırlama işlemlerinden geçirilmiştir. Numune hazırlama işlemlerinden geçirilen alüminyum kaplı çelik numuneler Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



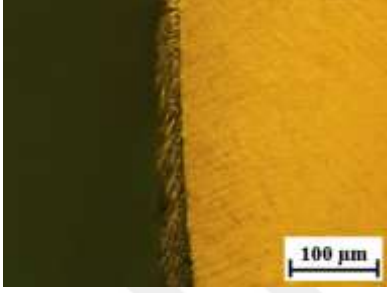
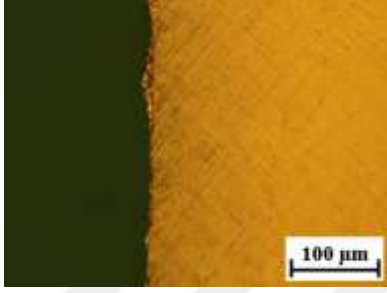

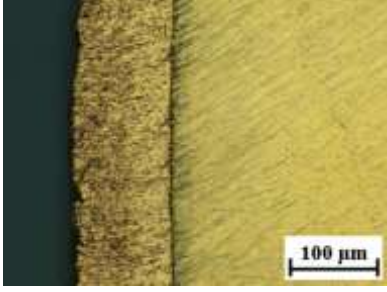
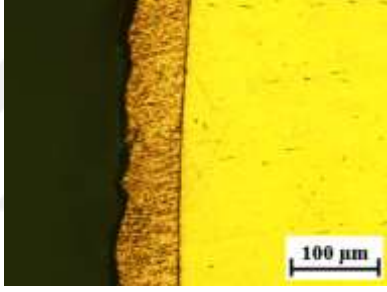
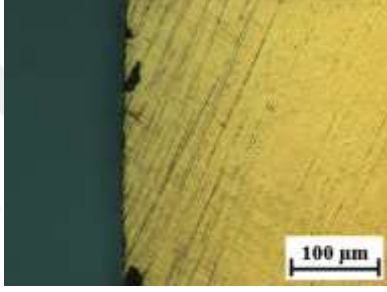
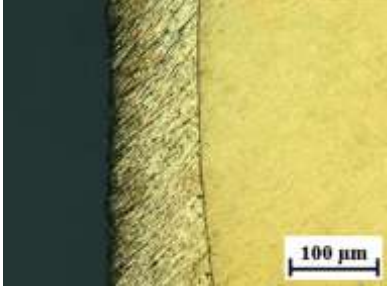
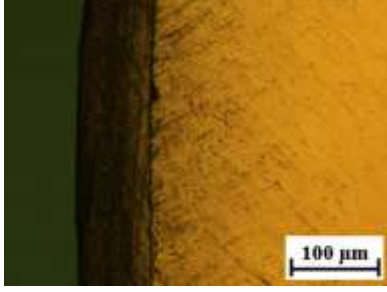

Şekil 5.2. Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler

Kaplama kalınlıklarının belirlenmesi için 27 numune üzerinde, her birinin 5 (beş) farklı noktasından kalınlık ölçümü yapılarak, bu ölçümlerin aritmetik ortalaması Tablo 5.1’te belirtilmiştir.

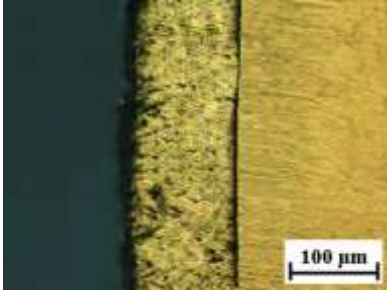
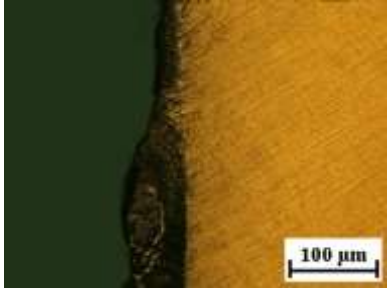
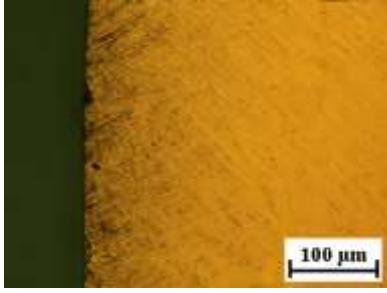
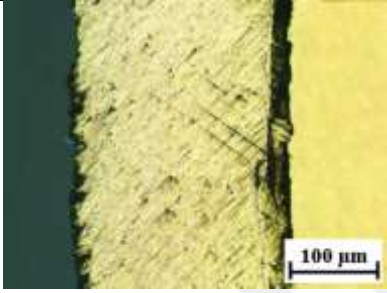
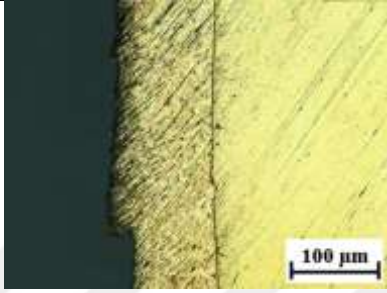
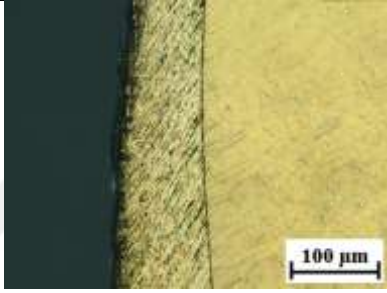


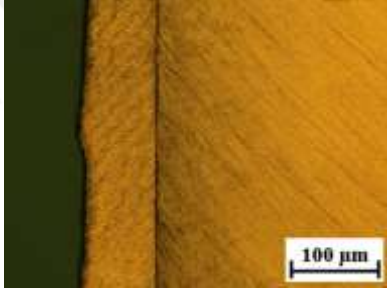
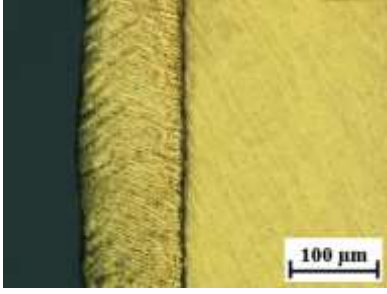

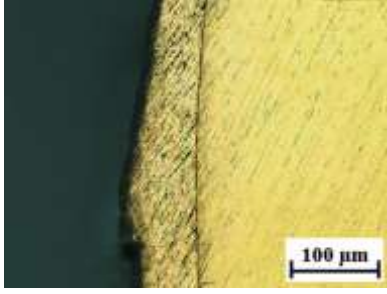
Tablo 5.1. Numunelerin kaplama kalınlıkları

Numune Numarası	Basınç (bar)	Dönme Devri (dev)	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kaplama Kalınlığı (µm)
1	10	400	0,028	197
2	10	400	0,038	65
3	10	400	0,048	0
4	10	600	0,028	507
5	10	600	0,038	258
6	10	600	0,048	0
7	10	800	0,028	554
8	10	800	0,038	617
9	10	800	0,048	278
10	13	400	0,028	497
11	13	400	0,038	224
12	13	400	0,048	0
13	13	600	0,028	1343
14	13	600	0,038	667
15	13	600	0,048	410
16	13	800	0,028	1200
17	13	800	0,038	654
18	13	800	0,048	313
19	16	400	0,028	529
20	16	400	0,038	568
21	16	400	0,048	276
22	16	600	0,028	1134
23	16	600	0,038	643
24	16	600	0,048	310
25	16	800	0,028	781
26	16	800	0,038	637
27	16	800	0,048	303

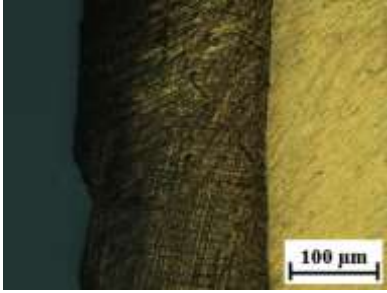
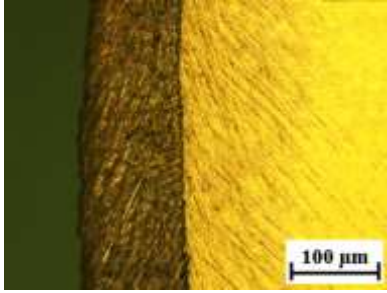
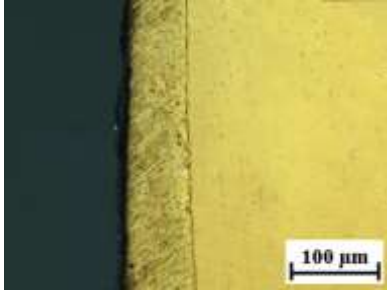
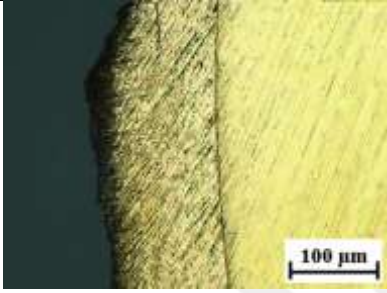
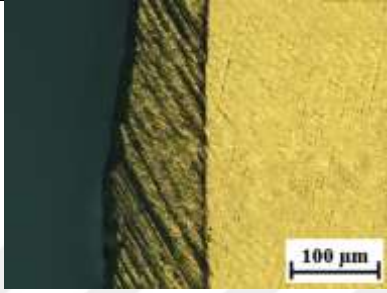
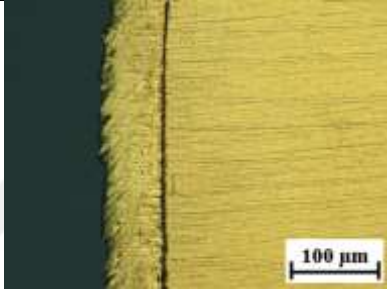
Numunelerin mikroyapısını görüntülemek ve kaplama tabakasının kalınlığını ölçmek için optik mikroskop ile birlikte çalışan NIS-Elements D yazılımı kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için görüntülenen optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir.

		
1 (10bar,400dev/dk,0,028mm/dev)	2 (10bar,400dev/dk,0,038mm/dev)	3 (10bar,400dev/dk,0,048mm/dev)
		
4 (10bar,600dev/dk,0,028mm/dev)	5 (10bar,600dev/dk,0,038mm/dev)	6 (10bar,600dev/dk,0,048mm/dev)
		
7 (10bar,800dev/dk,0,028mm/dev)	8 (10bar,800dev/dk,0,038mm/dev)	9 (10bar,800dev/dk,0,048mm/dev)

Şekil 5.3. Numunelere ait optik mikroskop görüntüleri

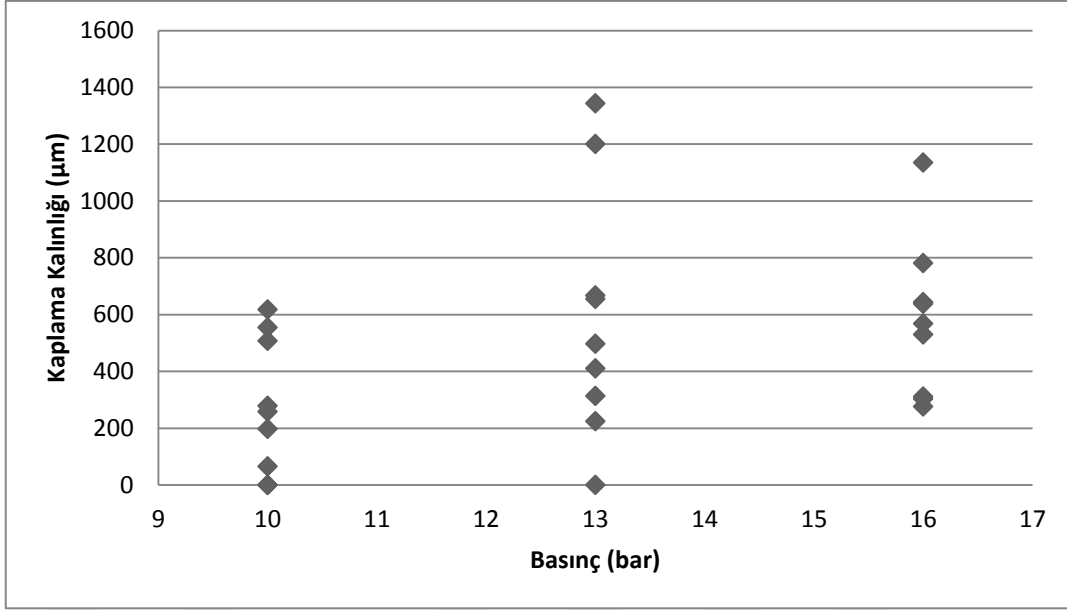
		
10 (13bar,400dev/dk,0,028mm/dev)	11 (13bar,400dev/dk,0,038mm/dev)	12 (13bar,400dev/dk,0,048mm/dev)
		
13 (13bar,600dev/dak,0,028mm/dev)	14 (13bar,600dev/dak,0,038mm/dev)	15 (13bar,600dev/dak,0,048mm/dev)
		
16 (13bar,800dev/dak,0,028mm/dev)	17 (13bar,800dev/dak,0,038mm/dev)	18 (13bar,800dev/dak,0,048mm/dev)
		
19 (16bar,400dev/dak,0,028mm/dev)	20 (16bar,400dev/dak,0,038mm/dev)	21 (16bar,400dev/dak,0,048mm/dev)

Şekil 5.3. Numunelere ait optik mikroskop görüntüleri (Devam)

		
22 (16bar,600dev/dak,0,028mm/dev)	23 (16bar,600dev/dak,0,038mm/dev)	24 (16bar,600dev/dak,0,048mm/dev)
		
25 (16bar,800dev/dak,0,028mm/dev)	26 (16bar,800dev/dak,0,038mm/dev)	27 (16bar,800dev/dak,0,048mm/dev)

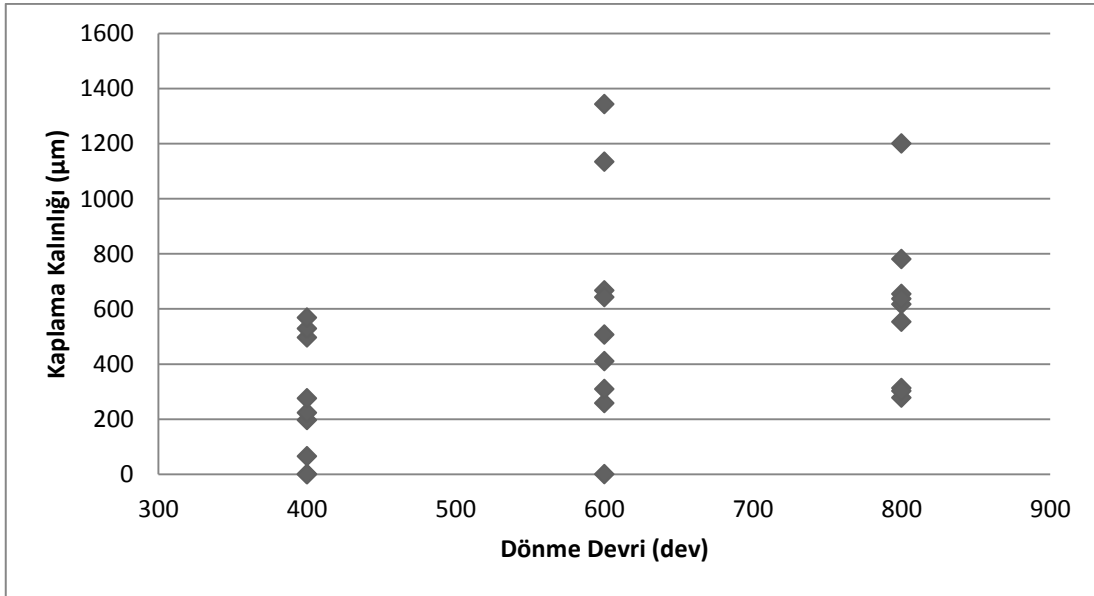
Şekil 5.3. Numunelere ait optik mikroskop görüntüleri (Devam)

Basıncın kaplama kalınlığı üzerindeki etkisi Şekil 5.4'teki Basıncı – Kapsama Kalınlığı grafiğinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 10 bar basınçta en fazla 617µm, 13 bar basınçta en fazla 1343µm ve 16 bar basınçta ise en fazla 1134µm kalınlık değerleri elde edilmiştir. Bu durumda en yüksek kaplama kalınlığı için optimum basınç 13 bar olarak gözlemlenmiştir.



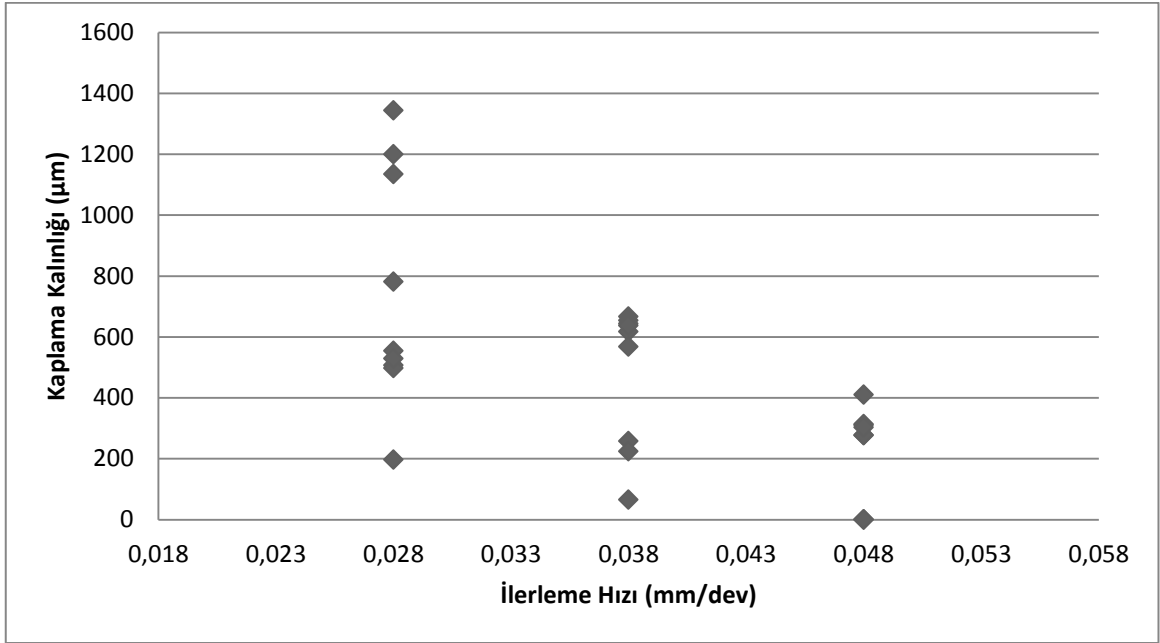
Şekil 5.4. Basınç – Kaplama kalınlığı grafiği

Dönme devrinin kaplama kalınlığı üzerindeki etkisi Şekil 5.5'teki Dönme Devri – Kaplama Kalınlığı grafiğinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 400dev dönme devrinde en fazla 568µm, 600dev dönme devrinde en fazla 1343µm ve 800dev dönme devrinde ise en fazla 1200µm kalınlık değerleri elde edilmiştir. Bu durumda en yüksek kaplama kalınlığı için optimum dönme devri 600dev olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 5.5. Dönme devri – Kaplama kalınlığı grafiği

İlerleme hızının kaplama kalınlığı üzerindeki etkisi Şekil 5.6'daki İlerleme Hızı – Kaplama Kalınlığı grafiğinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 0,028 mm/dev ilerleme hızında en fazla 1343µm, 0,038 mm/dev ilerleme hızında en fazla 667µm ve 0,048 mm/dev ilerleme hızında ise en fazla 410µm kalınlık değerleri elde edilmiştir. Bu durumda en yüksek kaplama kalınlığı için optimum ilerleme hızı 0,028 olarak gözlemlenmiştir.

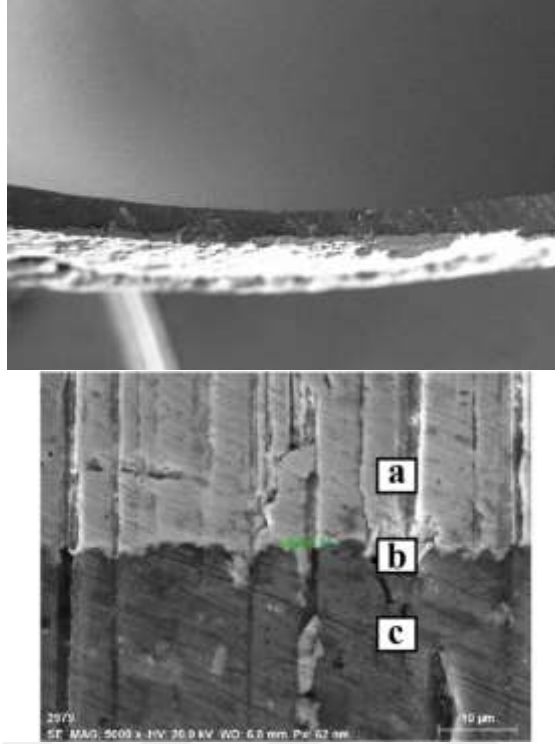


Şekil 5.6. İlerleme hızı – Kaplama kalınlığı grafiği

5.2. SEM – EDS Analizleri

Numunelere 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüleri alınmış, ek olarak çelik, arayüzey ve alüminyum kaplama bölgelerinde EDS analizi uygulanarak çelik ve alüminyum kaplama bölgeleri arasındaki malzeme içerikleri incelenmiştir. SEM görüntülerinde ve EDS analizi ile elde edilen %ağırlık tablolarında AA7075 alüminyum alaşım malzeme “a”, çizgisel ara yüzey “b” ve altlık malzeme olan St-37 çeliği ise “c” olmak üzere 3 farklı bölge şeklinde gösterilmiştir.

1 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



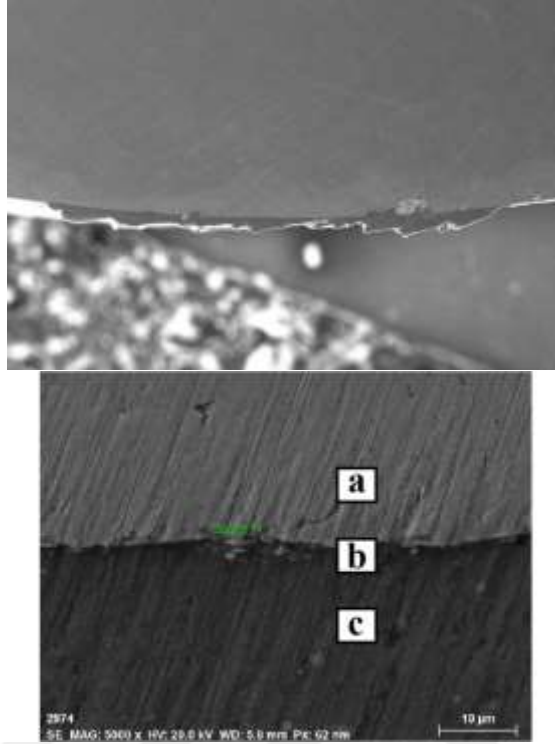
Şekil 5.7. 1 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

1 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.2’de gösterilmiştir.

Tablo 5.2. 1 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	60,82	92,09
Fe	98,77	23,43	-
C	0,14	-	-
Mn	1,09	0,91	0,43
Mg	-	1,67	2,06
Zn	-	4,40	5,42

2 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.8’da gösterilmiştir.



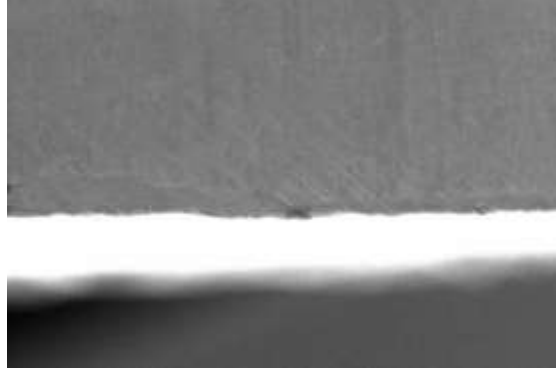
Şekil 5.8. 2 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

2 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.3’te gösterilmiştir.

Tablo 5.3. 2 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

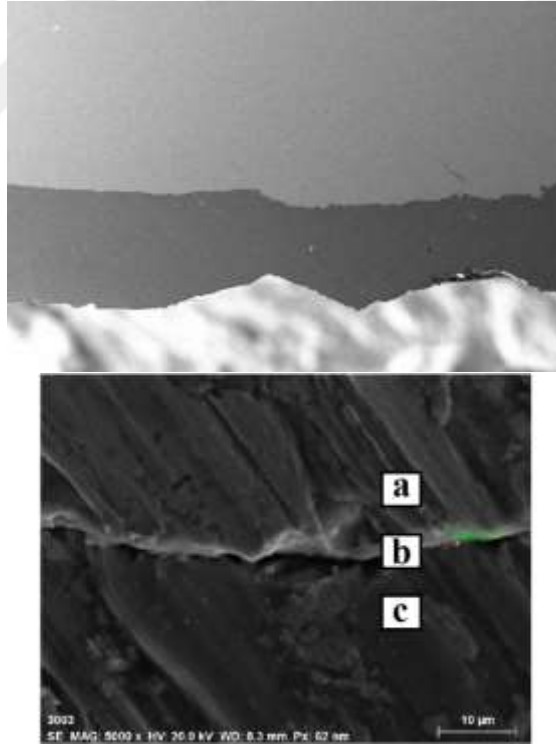
	a	b	c
Al	-	44,96	91,23
Fe	98,59	51,52	-
C	0,15	0	-
Mn	1,26	0,71	0,27
Mg	-	0,46	2,81
Zn	-	2,35	5,69

3 numaralı numune üzerinde 100X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.9’da gösterilmiştir.



Şekil 5.9. 3 numaralı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü

4 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



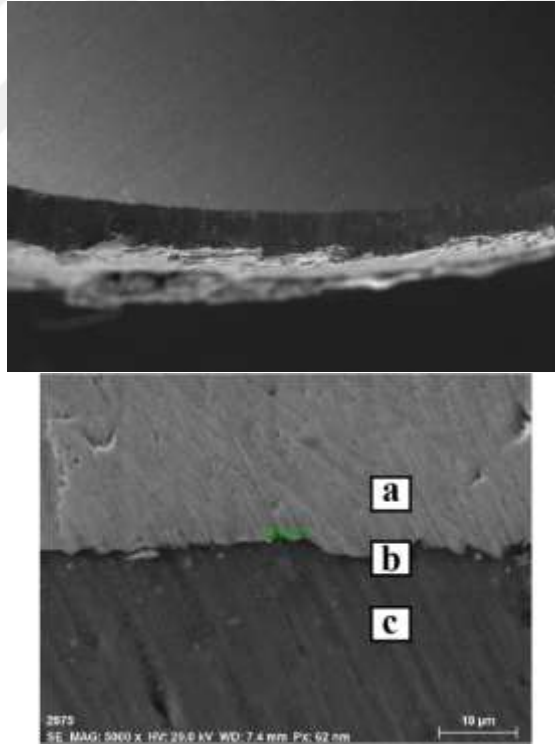
Şekil 5.10. 4 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

4 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4. 4 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	38,59	92,67
Fe	98,69	55,57	-
C	0,13	0,06	-
Mn	1,18	0,94	0,24
Mg	-	1,17	2,14
Zn	-	3,67	4,95

5 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



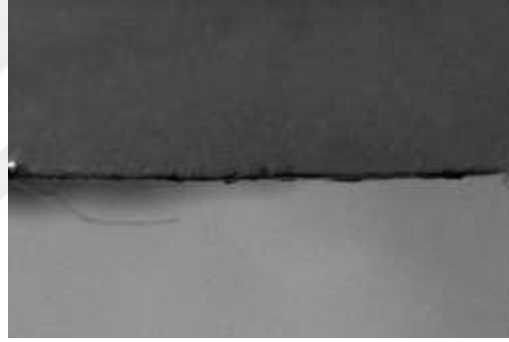
Şekil 5.11. 5 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

5 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5. 5 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

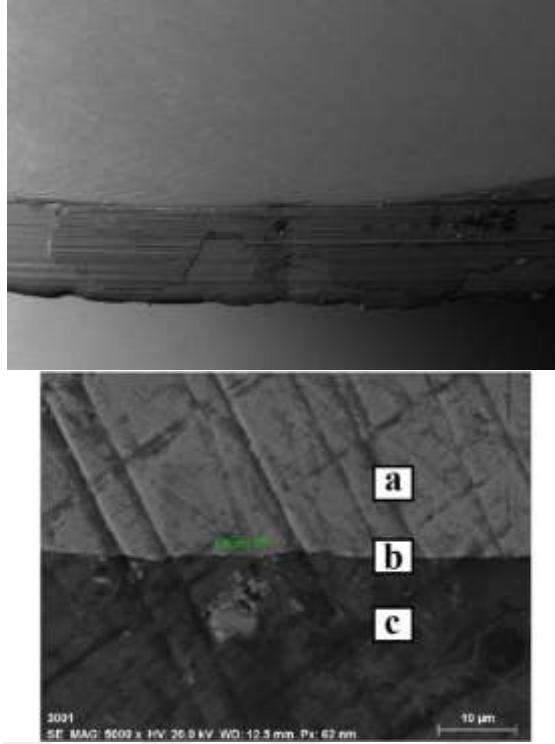
	a	b	c
Al	-	39,88	91,88
Fe	98,78	54,81	-
C	0,17	0,08	-
Mn	1,05	0,15	0,34
Mg	-	1,23	2,65
Zn	-	3,85	5,13

6 numaralı numune üzerinde 100X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12. 6 numaralı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü

7 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



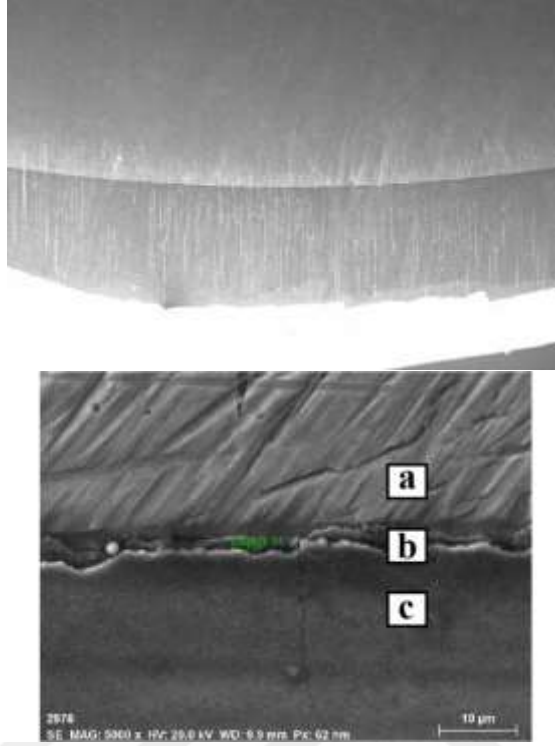
Şekil 5.13. 7 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

7 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.6'da gösterilmiştir.

Tablo 5.6. 7 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	27,36	92,79
Fe	99,04	67,11	-
C	0,09	0	-
Mn	0,87	0,28	0,32
Mg	-	1,17	1,86
Zn	-	4,08	5,03

8 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.14’te gösterilmiştir.



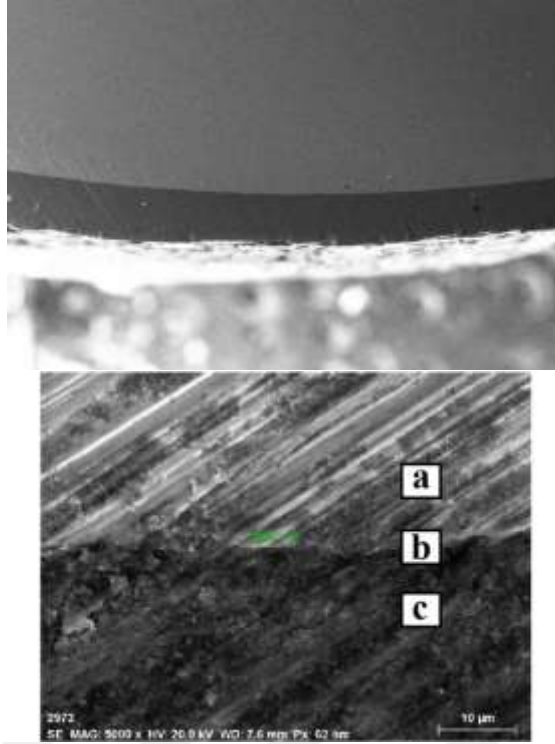
Şekil 5.14. 8 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

8 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

Tablo 5.7. 8 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	51,97	91,16
Fe	98,91	41,35	-
C	0,14	0	-
Mn	1,09	0,74	0,28
Mg	-	2,13	2,49
Zn	-	3,81	6,07

9 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



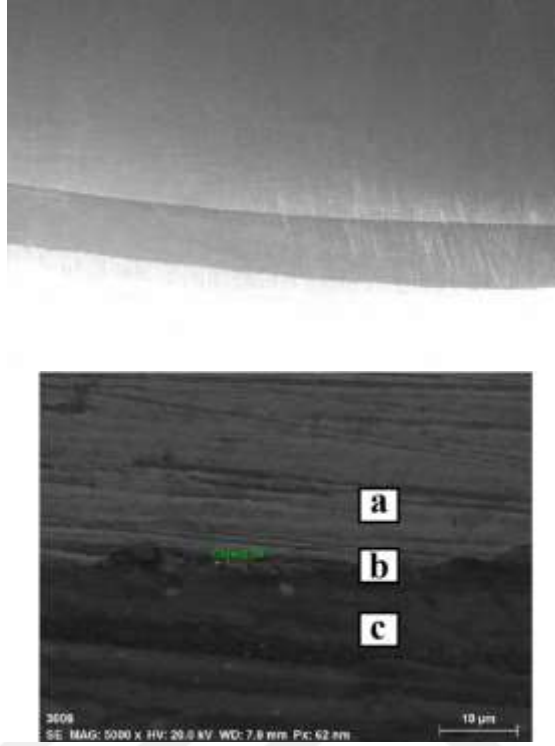
Şekil 5.15. 9 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

9 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5.8. 9 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	56,73	91,65
Fe	98,75	37,21	-
C	0,12	0	-
Mn	1,13	0,45	0,21
Mg	-	1,39	2,38
Zn	-	4,22	5,76

10 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.16’da gösterilmiştir.



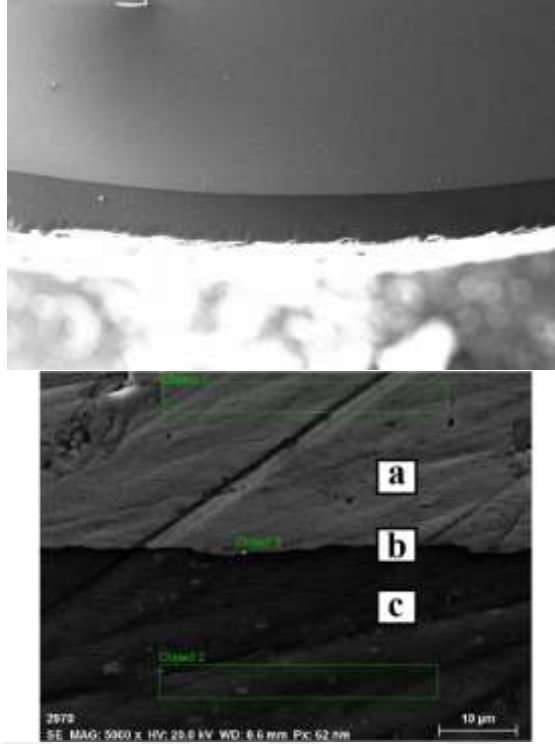
Şekil 5.16. 10 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

10 numaralı numuneye uygulanan EDS analizi verileri Tablo 5.9’da gösterilmiştir.

Tablo 5.9. 10 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	27,15	91,53
Fe	98,56	65,51	-
C	0,21	0,07	-
Mn	1,23	1,02	0,34
Mg	-	1,94	2,86
Zn	-	4,31	5,27

11 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. 11 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

11 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.10’da gösterilmiştir.

Tablo 5.10. 11 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

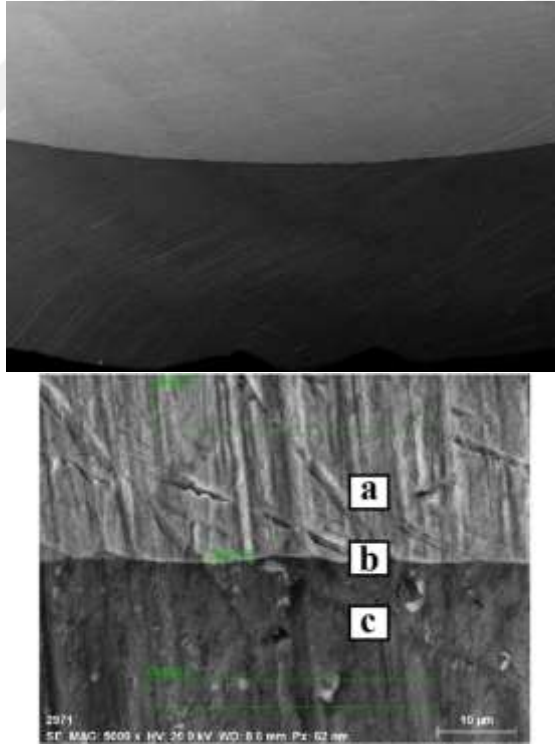
	a	b	c
Al	-	35,64	91,51
Fe	98,71	57,89	-
C	0,16	0	-
Mn	1,13	0,14	0,25
Mg	-	1,76	2,31
Zn	-	4,57	5,93

12 numaralı numune üzerinde 100X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.18’de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. 12 numaralı numunenin 100X büyütmede SEM görüntüsü

13 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.19’da gösterilmiştir.



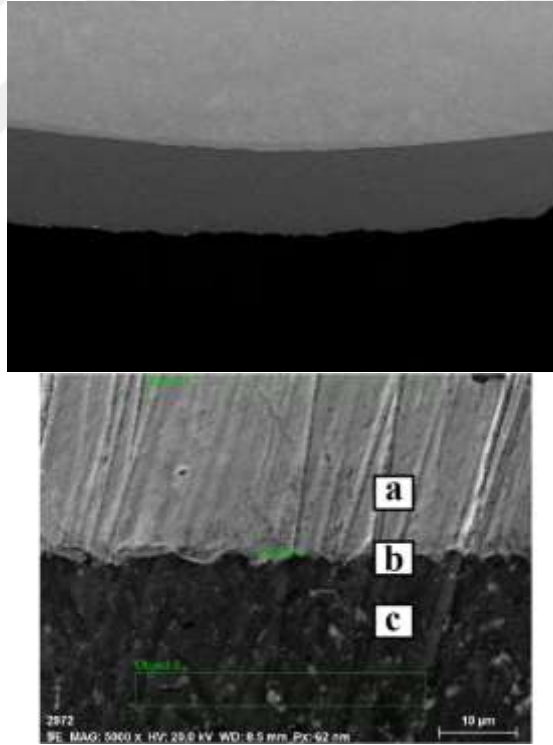
Şekil 5.19. 13 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

13 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.11’de gösterilmiştir.

Tablo 5.11. 13 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	63,28	92,71
Fe	99,27	32,27	-
C	0,10	0	-
Mn	0,63	0,27	0,14
Mg	-	1,24	1,93
Zn	-	2,94	5,22

14 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.20’de gösterilmiştir.



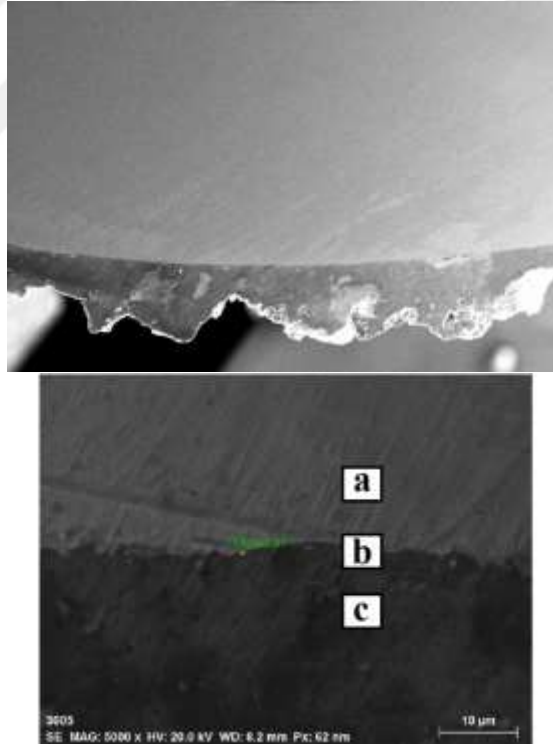
Şekil 5.20. 14 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

14 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.12’de gösterilmiştir.

Tablo 5.12. 14 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	47,89	91,17
Fe	98,23	44,85	-
C	0,19	0	-
Mn	1,58	0,82	0,26
Mg	-	2,08	2,39
Zn	-	4,36	6,18

15 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



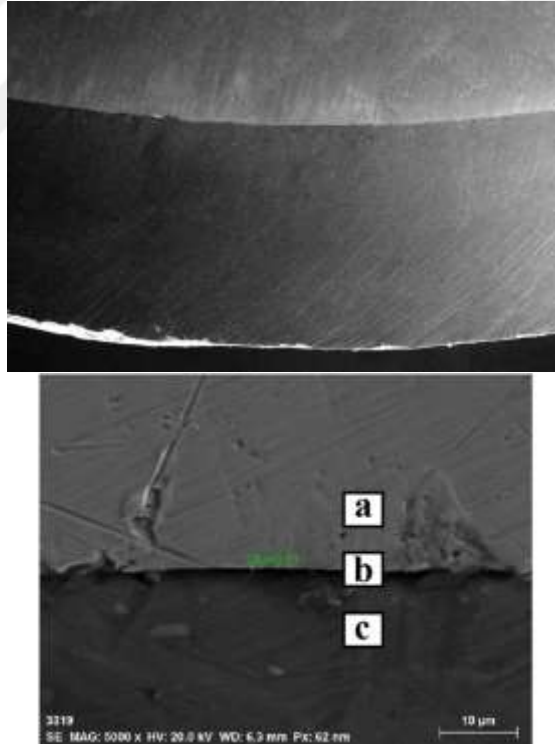
Şekil 5.21. 15 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

15 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.13'te gösterilmiştir.

Tablo 5.13. 15 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	39,51	92,32
Fe	98,42	53,64	-
C	0,21	0,07	-
Mn	1,37	0,43	0,19
Mg	-	1,76	2,16
Zn	-	4,59	5,33

16 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.22'de gösterilmiştir.



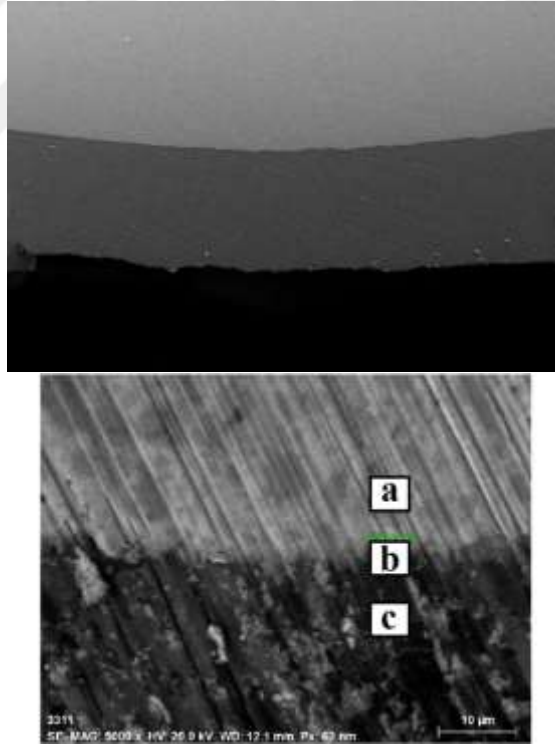
Şekil 5.22. 16 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

16 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.14'te gösterilmiştir.

Tablo 5.14. 16 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	52,75	91,07
Fe	98,91	39,59	-
C	0,11	0	-
Mn	0,98	0,61	0,23
Mg	-	2,14	2,68
Zn	-	4,91	6,02

17 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.23'de gösterilmiştir.



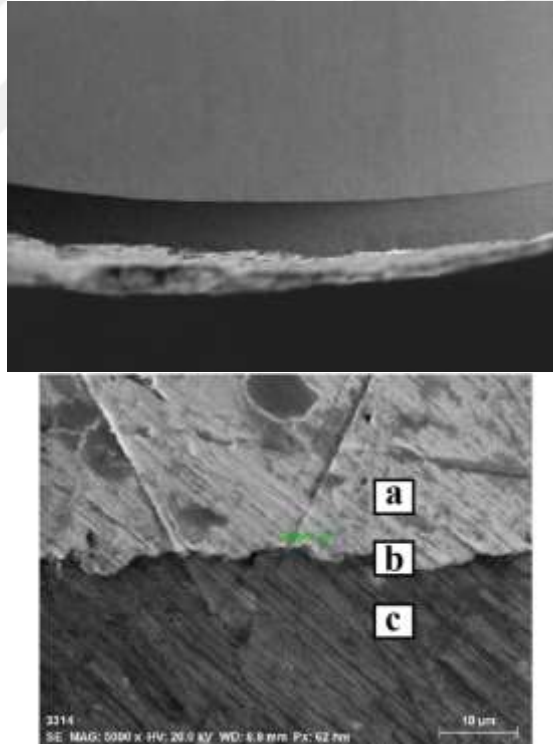
Şekil 5.23. 17 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

17 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.15'te gösterilmiştir.

Tablo 5.15. 17 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	41,26	91,9
Fe	98,54	52,95	-
C	0,13	0,05	-
Mn	1,33	1,02	0,35
Mg	-	1,53	2,28
Zn	-	3,19	5,47

18 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.24'de gösterilmiştir.



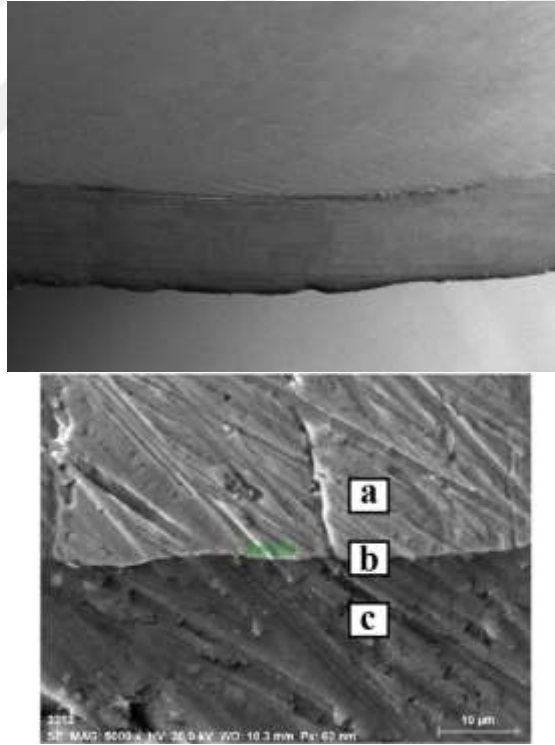
Şekil 5.24. 18 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

18 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.16’da gösterilmiştir.

Tablo 5.16. 18 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	57,17	91,98
Fe	98,49	37,04	-
C	0,16	0	-
Mn	1,35	0,37	0,41
Mg	-	0,74	1,98
Zn	-	4,68	5,63

19 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.25’te gösterilmiştir.



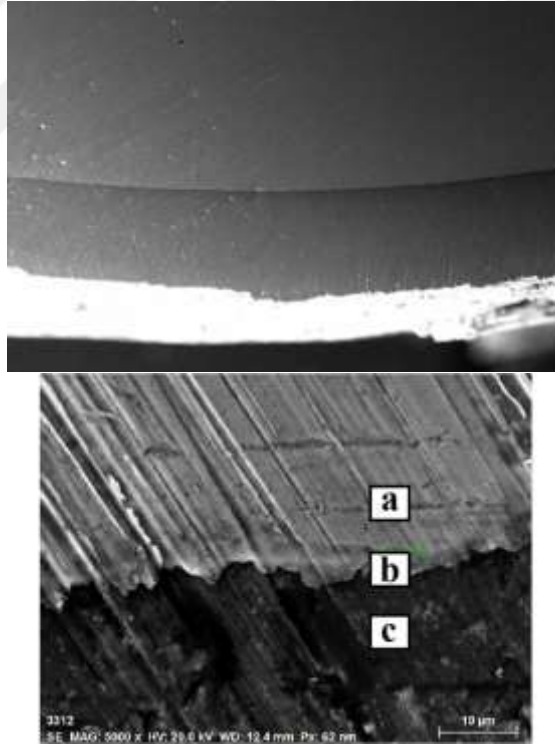
Şekil 5.25. 19 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

19 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.17’de gösterilmiştir.

Tablo 5.17. 19 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	24,62	91,59
Fe	98,67	68,26	-
C	0,10	0,06	-
Mn	1,23	0,95	0,16
Mg	-	1,34	2,11
Zn	-	4,77	6,14

20 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.26’da gösterilmiştir.



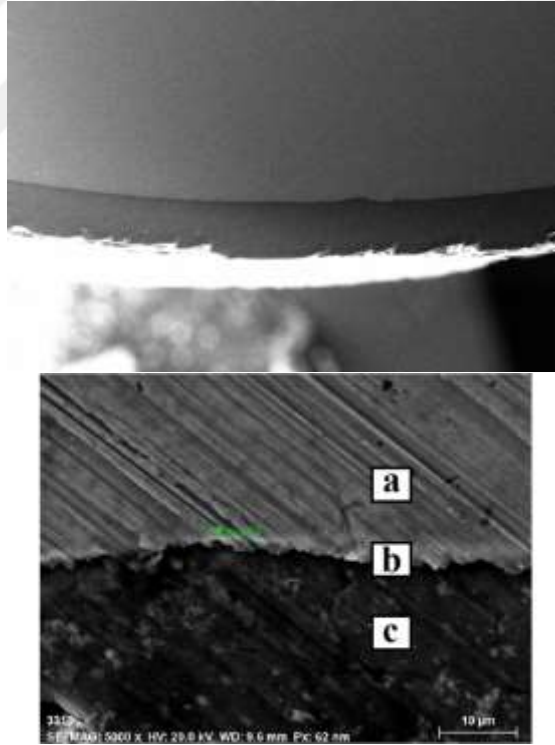
Şekil 5.26. 20 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

20 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.18’de gösterilmiştir.

Tablo 5.18. 20 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	36,28	92,12
Fe	98,32	57,92	-
C	0,18	0	-
Mn	1,44	0,81	0,22
Mg	-	1,1	2,05
Zn	-	3,89	5,61

21 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.27’de gösterilmiştir.



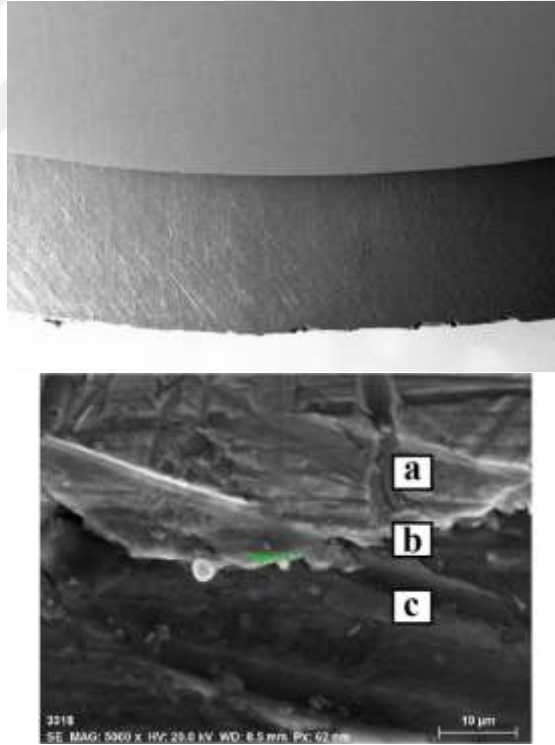
Şekil 5.27. 21 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

21 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.19’te gösterilmiştir.

Tablo 5.19. 21 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	33,54	92,59
Fe	98,71	61,72	-
C	0,12	0,05	-
Mn	1,17	0,91	0,2
Mg	-	1,31	2,32
Zn	-	2,47	4,89

22 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



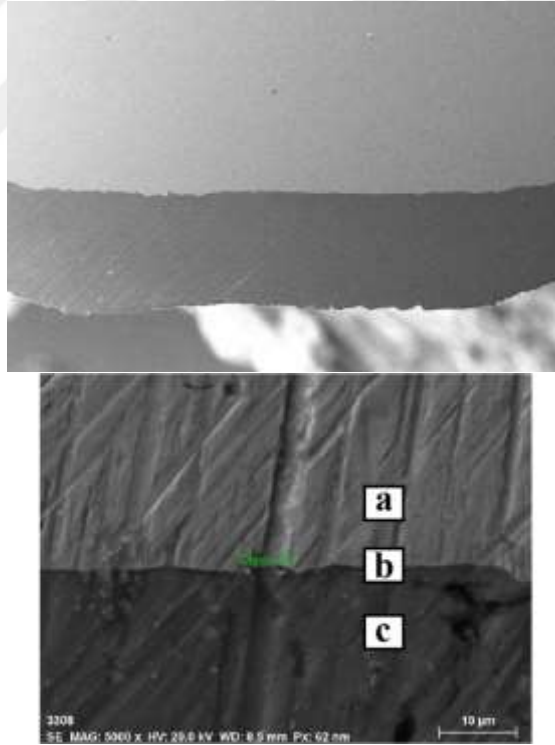
Şekil 5.28. 22 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

22 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.20’de gösterilmiştir.

Tablo 5.20. 22 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	54,74	91,64
Fe	98,62	39,49	-
C	0,11	0	-
Mn	1,27	1,03	0,37
Mg	-	1,04	2,41
Zn	-	3,7	5,58

23 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.29’da gösterilmiştir.



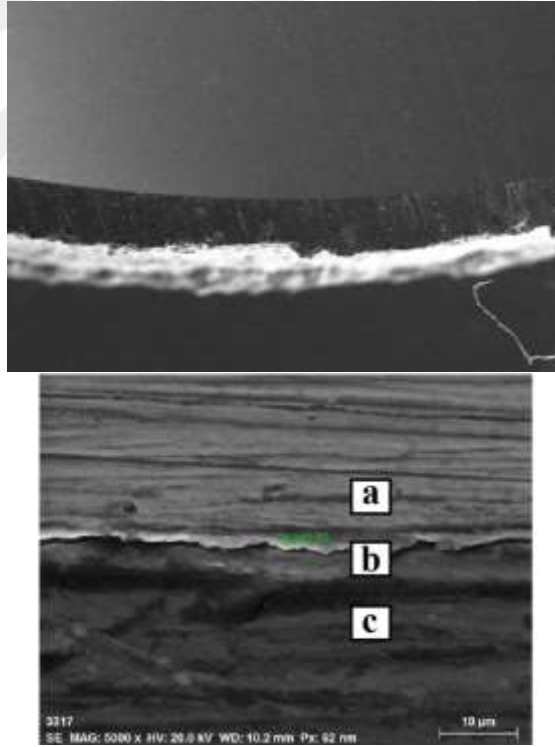
Şekil 5.29. 23 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

23 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.21’de gösterilmiştir.

Tablo 5.21. 23 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	32,5	90,79
Fe	98,83	61,05	-
C	0,08	0	-
Mn	1,09	0,81	0,29
Mg	-	1,26	2,84
Zn	-	4,38	6,08

24 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.30’da gösterilmiştir.



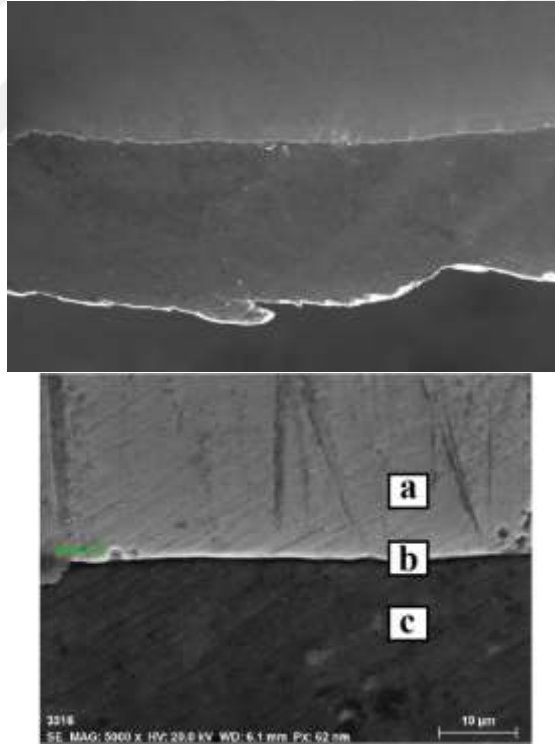
Şekil 5.30. 24 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

24 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.22’de gösterilmiştir.

Tablo 5.22. 24 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	37,92	91,3
Fe	98,53	56,28	-
C	0,13	0	-
Mn	1,34	0,63	0,37
Mg	-	0,98	2,96
Zn	-	4,19	5,37

25 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.31’de gösterilmiştir.



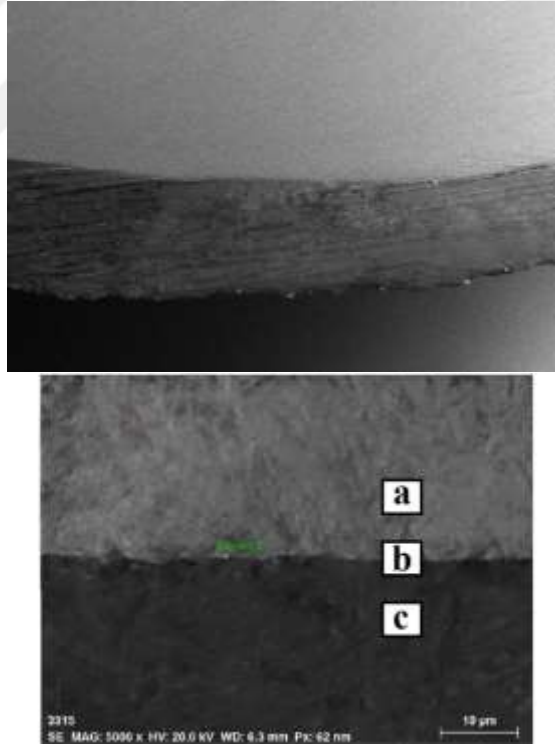
Şekil 5.31. 25 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

25 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.23’de gösterilmiştir.

Tablo 5.23. 25 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	50,97	91,47
Fe	98,54	43,12	-
C	0,20	0,05	-
Mn	1,26	0,92	0,17
Mg	-	1,58	3,01
Zn	-	3,36	5,35

26 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.32’de gösterilmiştir.



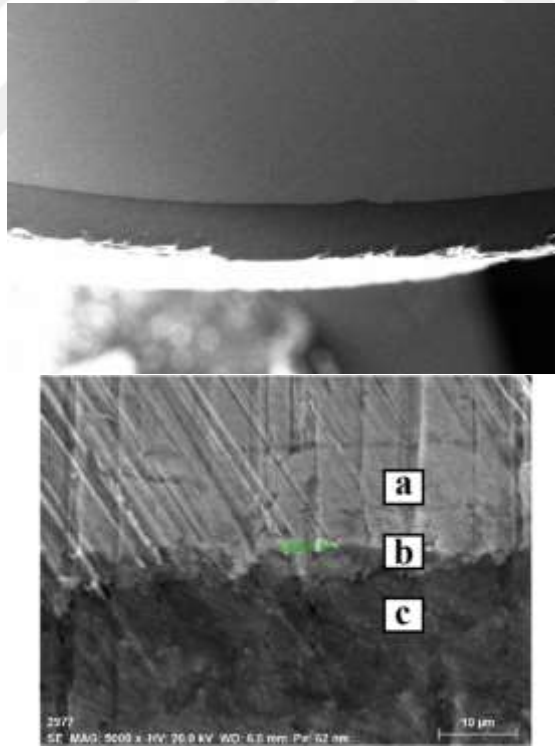
Şekil 5.32. 26 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

26 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.24'de gösterilmiştir.

Tablo 5.24. 26 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	70,65	91,66
Fe	98,93	22,59	-
C	0,14	0	-
Mn	0,98	0,74	0,19
Mg	-	1,3	2,73
Zn	-	4,72	5,42

27 numaralı numune üzerinde 100X ve 5000X büyütme ile yapılan SEM analizine ait görüntüler Şekil 5.33'de gösterilmiştir.



Şekil 5.33. 27 numaralı numunenin 100X ve 5000X büyütmede SEM görüntüsü

27 numaralı numuneye uygulanan EDS analizine ait veriler Tablo 5.24'de gösterilmiştir.

Tablo 5.25. 27 numaralı numunenin EDS analizi ile % ağırlık tablosu

	a	b	c
Al	-	59,13	91,79
Fe	98,53	35,32	-
C	0,16	0	-
Mn	1,31	0,48	0,27
Mg	-	1,46	2,56
Zn	-	3,61	5,38

SEM ve Optik Mikroskop görüntüleri incelendiğinde çelik ve alüminyum kaplama arasındaki arayüzeyin tabaka şeklinde değil çizgisel olarak oluştuğu, çelik bölgesinin ise mikroyapısında herhangi bir değişimin olmadığı gözlemlenmiştir. Yapılan EDS analizleri incelendiğinde ise kaplamalı ve kaplamasız bölgeler arasında herhangi bir madde geçişinin olmadığı gözlemlenmiştir. Çizgisel olarak oluşan arayüzey üzerinde yapılan EDS analizinde ise elementel olarak ölçülen %ağırlık değerleri kaplama sırasında kullanılan işlem parametreleri ile bağlantılı olmadığı belirlenmiştir.

3 numaralı (10bar, 400dev, 0,048mm/dev), 6 numaralı (10bar, 600dev, 0,048mm/dev) ve 12 numaralı (13bar, 400dev, 0,048mm/dev) numunelerde ise işlem parametrelerine bağlı olarak, çelik malzeme yüzeyinde alüminyum kaplama oluşmadığı gözlemlenerek, SEM ve Optik Mikroskop görüntüleriyle belirtilmiştir.

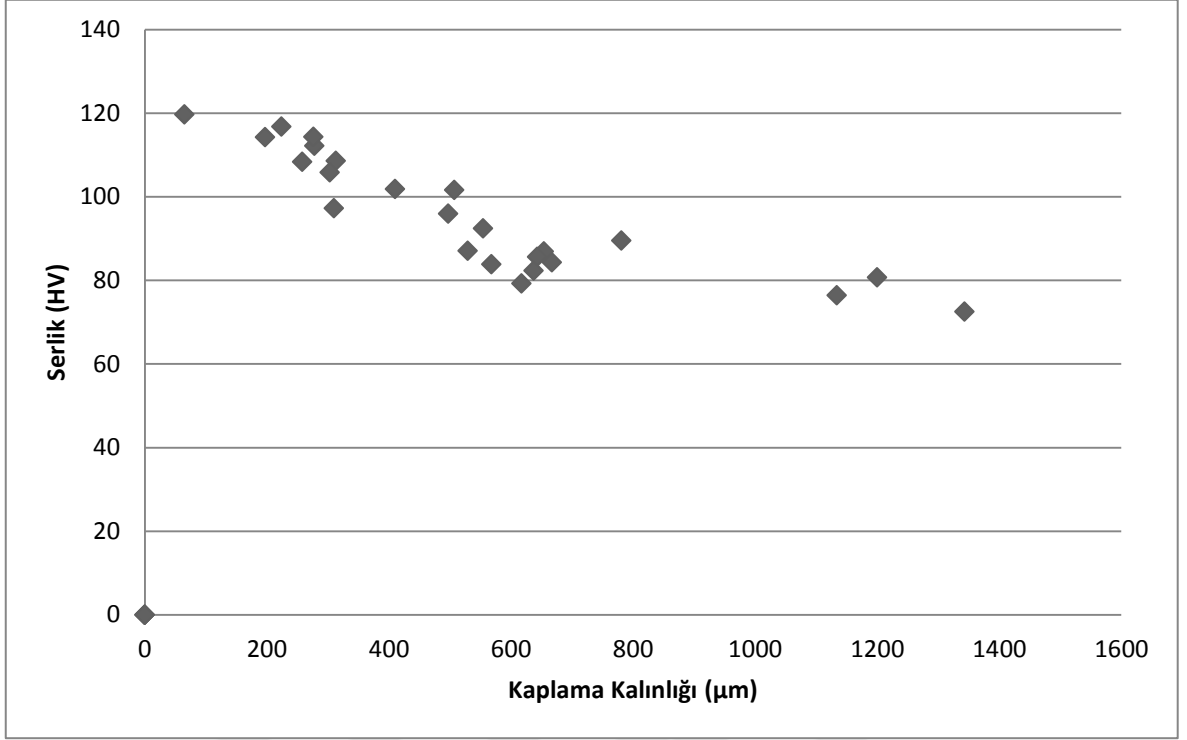
5.3. Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik cihazı ile HV0.5 yük altında $t=15$ sn süre ile kaplamalı, kaplamasız ve arayüzey bölgelerinden 5'er kez sertlik ölçümü yapılarak, bu ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması Tablo 5.26' da belirtilmiştir.

Tablo 5.26. Mikrosertlik HV Ölçüm Sonuçları

Numune Numarası	Kaplamasız Bölge	Arayüzey	Kaplamalı Bölge	Kaplama Kalınlığı (μm)
1	194,6	137,6	114,2	197
2	185,9	141,7	119,6	65
3	213,2	0	0	0
4	200,4	112,5	101,6	507
5	176,7	127,4	108,3	258
6	183	0	0	0
7	198,1	110,9	92,4	554
8	189,9	109,5	79,2	617
9	212,6	124,6	112,1	278
10	192,2	127,2	95,9	497
11	213,7	130,1	116,7	224
12	186	0	0	0
13	209,8	117,9	72,5	1343
14	207,3	124,8	84,3	667
15	206,4	136,9	101,8	410
16	190,7	121,5	80,7	1200
17	203,2	116,3	86,9	654
18	179,5	123,8	108,5	313
19	221,6	124,1	87	529
20	204,3	107,8	83,8	568
21	226,8	125,3	114,3	276
22	184,1	113,8	76,4	1134
23	192,9	102,4	85,6	643
24	203,7	118,3	97,2	310
25	216,3	122	89,5	781
26	200,1	112,6	82,3	637
27	191,5	131,5	105,8	303

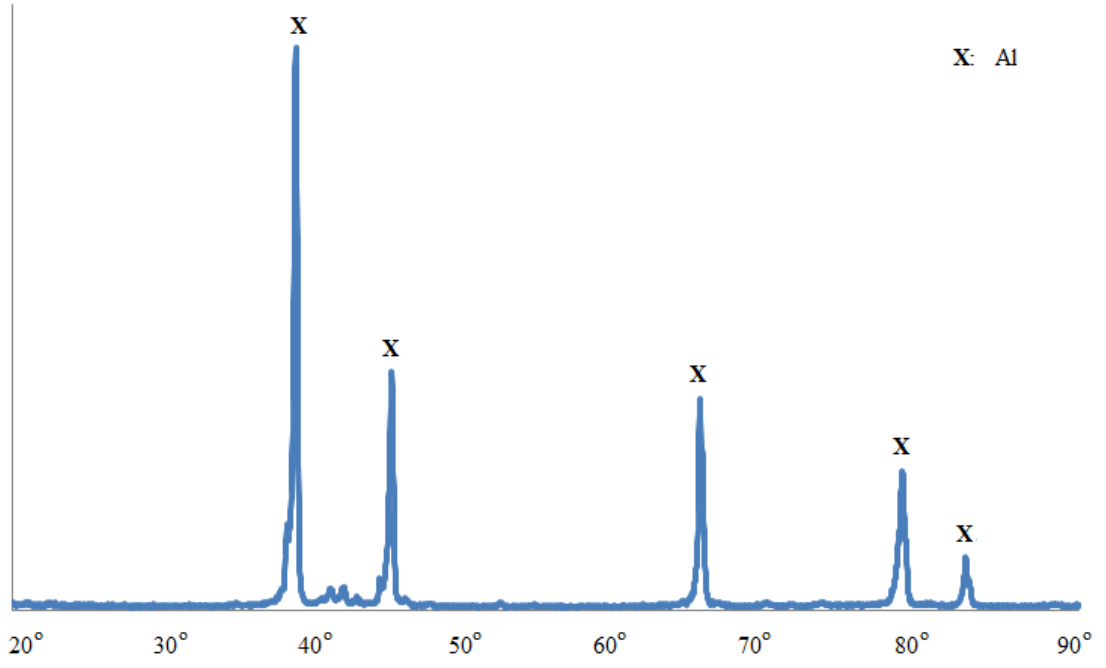
Şekil 5.33'teki Sertlik - Kaplama Kalınlığı grafiği incelendiğinde en ince kaplama kalınlığına ($65\mu\text{m}$) sahip olan numune 119,6 HV ile sertlik değeri en yüksek, en kalın kaplama kalınlığına ($1343\mu\text{m}$) sahip olan numune 72,5 HV ile sertlik değeri en düşük numune olmuştur. Grafik incelendiğinde kaplama kalınlığı arttıkça kaplama tabakasının sertlik değerinin düştüğü belirlenmiştir.



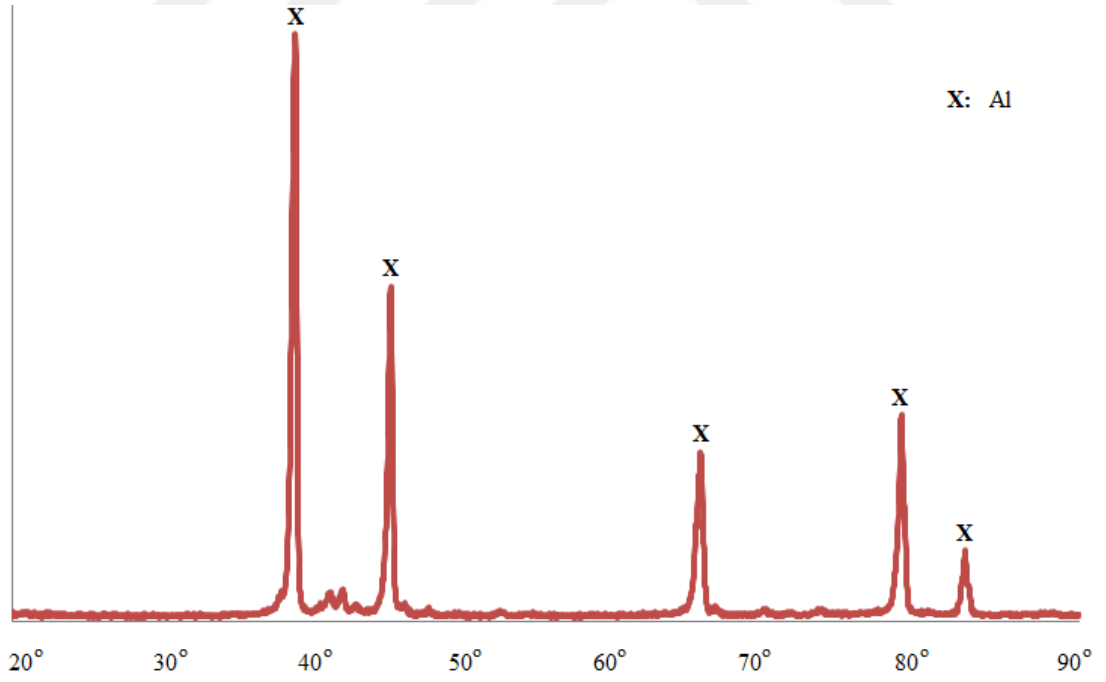
Şekil 5.34. Alüminyum kaplama bölgesinin Sertlik – Kaplama kalınlığı grafiği

5.4. XRD (X-Işını Kırınımı) Analizi

Kaplama yüzeyinde oluşabilecek fazların belirlenmesi amacıyla numunelerin yüzeylerine Cu $K\alpha$ x- ışını kaynağı kullanılarak 20-90° arasında XRD analizi yapılmıştır. Numunelerin kaplama yüzeyinde yalnızca Al pikleri bulunmuş başka fazlar tespit edilmemiştir. Analiz sonuçlarında ortaya çıkan piklerin birbirine benzerlik göstermesinden ötürü kaplama kalınlığı en fazla olan (13 numaralı numune) ve en az olan (2 numaralı) numunelere yapılan XRD analizleri Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



Şekil 5.35. 2 numaralı numuneye ait XRD analizi



Şekil 5.36. 13 numaralı numuneye ait XRD analizi

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada yeni tip bir metal kaplama yöntemi olan sürtünmeli mekanik kaplama konusu incelenmiş ve bu yöntemin uygulanmasını sağlayacak olan bir sürtünmeli mekanik kaplama cihazı tasarlanarak imal edilmiştir. Cihazın uygulamalarını araştırmak için St37-2 çelik malzeme yüzeyine AA7075 alüminyum alaşımı kaplanması için bir takım kaplama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kaplama deneyleri 10bar-13bar-16bar basınç, 400dev-600dev-800dev dönme devri ve 0,028mm/dev-0,038mm/dev-0,048mm/dev parametrelerinin sürtünmeli mekanik kaplamaya olan etkisini araştırmak için bu parametreler değiştirilerek toplamda 27 adet deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarını analiz etmek için numuneler üzerinde Optik mikroskop, SEM (Scanning Electron Microscopy), EDS (Energy Distribution Spectroscopy), Mikrosertlik ve XRD (X-Ray Diffraction) analizleri gerçekleştirilmiştir.

Optik mikroskop, SEM görüntüleri ve EDS analizleri incelendiğinde çelik ve alüminyum tabaka arasında malzeme geçişinin olmadığı, bu nedenle arayüzeyin ayrı bir tabaka şeklinde değil çizgisel olarak oluştuğu, çelik malzeme yüzeyinin homojen kaldığı, alüminyum kaplama tabakası yoğunluğunun çelik malzeme yoğunluğuna göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. XRD (X-Işını Difraktometresi) analizlerine göre ise kaplama yüzeyinde yalnızca Al pikleri bulunmuş ve farklı bir faza rastlanmamıştır.

Yapılan kalınlık ölçümlerine göre;

-Basıncın 10 bar olduğu deneylerde kaplama kalınlığı en düşük, 13 bar olduğu deneylerde ise kaplama kalınlığı en yüksek numuneler elde edilmiştir. İlgili grafik incelendiğinde kaplama kalınlığının 13 bar'dan sonra 16 bar'da tekrar azaldığını göstermektedir. Bu sebeple kaplama kalınlığı için en ideal basınç 13 bar olarak belirlenmiştir.

-Dönme devrinin 400 dev olduğu deneylerde kaplama kalınlığı en düşük, 600 dev olduğu deneylerde ise kaplama kalınlığı en yüksek numuneler elde edildiği belirlenmiştir. İlgili grafik incelendiğinde kaplama kalınlığının 600 dev'den sonra 800dev'de tekrar azaldığını göstermektedir. Bu sebeple kaplama kalınlığı için en ideal dönme devri 600 dev olarak belirlenmiştir.

-İlerleme hızının 0,028 mm/dev olduğu deneylerde kaplama kalınlığı en yüksek numuneler, 0,048 mm/dev olduğu deneylerde kaplama kalınlığı en düşük numuneler elde edilmiştir. İlgili grafik incelendiğinde ilerleme hızı arttıkça kalınlığın azaldığı belirlenmiştir. Bu sebeple kaplama kalınlığı için en ideal ilerleme hızı 0,028 mm/dev olarak belirlenmiştir.

- Mikrosertlik deneyleri sonucuna göre en ince kaplama kalınlığına sahip numunenin sertlik değeri daha yüksek olduğu, en kalın kaplama kalınlığına sahip numunenin ise sertlik değeri en düşük olduğu gözlemlenmiştir. İlgili grafik incelendiğinde kaplama kalınlığı arttıkça kaplama tabakasının sertlik miktarının düştüğü gözlemlenmiştir.

Öneri olarak, kaplama işleminin için kullanılan malzeme çifti değiştirilerek farklı malzemelerin kaplama işlemi yapılabilir. Ayrıca kaplanmış numunelere; scratch test uygulanarak kaplamanın adezyon dayanımı ve korozyon deneyi uygulanarak alüminyum kaplamalı çeliğin korozyona karşı dayanımı ölçülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **URL-1**, <https://www.esteknikmetal.com/Blog/esteknik-metal/55> Metal Kaplamanın Tarihçesi. 27 Mart 2019.
- [2] **Wang, D., Shi, Z.**, 2004. Aluminizing and oxidation treatment of 1Cr18Ni9 stainless steel, *Appl. Surf. Sci.*, **227**, 255–260.
- [3] **Deqing, W., Ziyuan, S., Longjiang, Z.**, 2003. A liquid aluminum corrosion resistance surface on steel substrate, *Appl. Surf. Sci.*, **214**, 304–311.
- [4] **Kobayashi, S., Yakou, T.**, 2002. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment, *Mater. Sci. Eng. A* **338**, 44-53.
- [5] **Koçanaoğulları, S., Köksal, N. S.**, 2015. TM Malzemelerin Korozyon Direncine Sıcak Daldırma Alüminyum Kaplamanın Etkisi - The Effect of Hot Dip Aluminizing on the Corrosion Resistance of PM Materials, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilim. Derg.*, **11**, 241–251.
- [6] **Awan, G. H., Ahmed, F., Ali, L., Shuja, M. S., Hasan, F.**, 2008. Effect of Coating-thickness on the Formability of Hot Dip Aluminized Steel, *Pak. J. Engg. Appl. Sci.*, **2**, 14-18.
- [7] **Pasinli, A., Köksal, N. S.**, 2009. Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplanan Çelik Malzemelerde Yüksek Sıcaklık Oksidasyonunun İncelenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Derg.*, **31**, 1-9.
- [8] **Boulestex, C., Pedraza, F.**, 2018. Characterisation of aluminium diffusion coatings elaborated on austenitic stainless steels and on ferritic-martensitic steels, *Surf. Coatings Technol.*, **339**, 27–36.
- [9] **Esfahani, E. A., Salimijazi, H., Golozar, M. A., Mostaghimi, J., Pershin, L.**, 2012. Study of corrosion behavior of Arc sprayed aluminum coating on mild steel, *J. Therm. Spray Technol.*, **21**, 1195–1202.

- [10] **Zhou, J., Yang, M., Wang, R., Pang, X.**, 2017. Annealing behavior of aluminum coating prepared by arc spraying on P355NL1 steel, *Surf. Coatings Technol*, **330**, 53–60.
- [11] **Zhang, J., Kong, D.**, 2018. Effect of laser remelting on microstructure and immersion corrosion of cold-sprayed aluminum coating on S355 structural steel, *Opt. Laser Technol*, **106**, 348–356.
- [12] **Aytaç, A., Malayoğlu, U.**, 2018. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemlerinden PVD ve JVD / DVD İnce Film Kaplamaların Karşılaştırılması ve DVD Kaplama Teknolojisinin Endüstriyel Uygulamaları Üzerine Kavramsal Akademik ve Teorik Bir Analiz, *Savunma Bilimleri Dergisi*, **17**, 131-164.
- [13] **Buhl, R., Pulker, H.K., Moll, E.**, 1981. TiN coatings on steel, *Thin Solid Films*, **80**, 265-270.
- [14] **Mohd, M., Mohd, Z., Shahrum, A., Zainuddin S., Wan W.Z., Mohd, F.A.**, 2018. Brazed Joint Interface Bonding Strength of AR500 Steel and AA7075 Aluminium Alloy, *Metals (Basel)*, **8**, 668.
- [15] **Zaba, K., Nowosielski, M., Kita, P., Kwiatkowski, N., Tokarski, T., Puchlerska, S.**, 2015. Effect of heat treatment on the corrosion resistance of aluminized steel strips, *Arch. Metall. Mater*, **60**, 1825–1831.
- [16] **Mwema, F. M., Oladijo, O. P., Akinlabi, S. A., Akinlabi, E. T.**, 2018. Properties of physically deposited thin aluminium film coatings: A review, *J. Alloys Compd*, **747**, 306–323.
- [17] **Volynskii, A. L., Panchuk, D.A., Bazhenov S.L., Yablokov, M.Y., Gilman, A.B., Bolshakova, A.V.**, 2013. The structure and properties of thin aluminum coatings, *Thin Solid Films*, **536**, 179–186.
- [18] **Deyab, M. A., De Riccardis, A., Mele, G.**, 2016. Novel epoxy/metal phthalocyanines nanocomposite coatings for corrosion protection of carbon steel, *J. Mol. Liq*, **220**, 513–517.
- [19] **Nazeer, A. A., Madkour, M.**, 2018. Potential use of smart coatings for corrosion protection of metals and alloys: A review, *J. Mol. Liq*, **253**, 11–22.

- [20] **Müller, D., Fromm, E.**, 1995. Mechanical properties and adhesion strength of TiN and Al coatings on HSS, steel, aluminium and copper characterized by four testing Methods, *Thin Solid Films*, **270**, 411–416.
- [21] **Manesh, H. D., Taheri, A. K.**, 2003. Bond strength and formability of an aluminum-clad steel sheet, *J. Alloys Compd*, **361**, 138–143.
- [22] **H, R. Akramifard., H, Mirzadeh., M, H. Parsa.**, 2014. Cladding of aluminum on AISI 304L stainless steel by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties, *Materials Science and Engineering*, **613**, 232-239.
- [23] **Wang, Deqing., Shi, Ziyuan., Qi, Ruobin.**, 2007. Cladding of stainless steel on aluminum and carbon steel by interlayer diffusion bonding, *Scripta Materialia*, **56**, 369-372.
- [24] **Swinnen, F., Faes, K., De Waele, W.**, 2017. Feasibility study of the friction surfacing process, *Int. J. Sustain. Const*, **8**, 9.
- [25] **Ravisekhar, S., Das, V. C., Govardhan, D.**, 2017. Friction Surfaced Deposits for Industrial Applications, *Mater. Today Proc*, **4**, 3796–3801.
- [26] **Liu, S., Bor, T.C., Van Der Stalt, A.A., Geijselaers H.J.M.**, 2015. Friction surface cladding: An exploratory study of a new solid state cladding process, *J. Mater. Proces. Technol*, **229**, 769–784.
- [27] **Gandra, J., Krohn, H., Miranda, R.M., Vilaça, P.**, 2014. Friction surfacing - A review, *J. Mater. Process. Technol*, **214**, 1062–1093.
- [28] **Da Silva, M,M., Afonso M.L.B., Silva, S.L.N.**, 2018. Application of the friction surfacing process in a CNC machining center: a viability assessment for producing Al-alloy coatings on low carbon steel, *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng*, **40**, 14-25
- [29] **Badheka, K., Badheka, V.**, 2017. Friction Surfacing of Aluminium on Steel: An Experimental Approach, *Mater. Today Proc*, **4**, 9937–9941.

- [30] **Saw, K., Shankar, S., Chattopadhyaya, S., Vilaca, P.,** 2018. Microstructure Evaluation of Different Materials after Friction Surfacing - A Review, *Mater. Today Proc*, **5**, 24094–24103.
- [31] **Chandrasekaran, M., Batchelor, A. W., Jana, S.,** 1997. Study of the interfacial phenomena during friction surfacing of aluminium with steels, *J. Mater. Sci*, **32**, 6055–6062.
- [32] **Chandrasekaran, M., Batchelor, A. W., Jana, S.,** 1997. Friction surfacing of metal coatings on steel and aluminum substrate, *J. Mater. Process. Technol*, **72**, 446–452.
- [33] **Gandra, J., Miranda, R. M., Vilaça, P.,** 2012. Performance analysis of friction surfacing, *J. Mater. Process. Technol*, **212**, 1676–1686.
- [34] **Nixon, R. G. S., Mohanty, B. S., Sathish, R.,** 2018. Friction surfacing of AISI 316 over mild steel: A characteriation study, *Def. Technol*, **14**, 306–312.
- [35] **Kumar, B. V., Reddy, G. M., Mohandas, T.,** 2014. Identification of suitable process parameters for friction surfacing of mild steel with AA6063 aluminium alloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, **74**, 433–443.
- [36] **Keleşoğlu, E.,** 2011. Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri. İstanbul Yıldız Teknik Üniversitesi, 131s, İstanbul, Türkiye.
- [37] **Çalı, Ş.,** 2016. İnşaat Çeliklerinin Sıcak Daldırma Yöntemiyle Alüminyum Kaplanması Ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [38] **Evcin, A.,** Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Kaplama Teknikleri Ders Notları <http://www.kimmuh.com/evcin/coating>, 18 Mart 2019.
- [39] **Taşlıçay, C.,** 2017. Sıcak Daldırma Yöntemiyle Alüminyum Kaplanan 316ti Kalite Paslanmaz Çeliğin Yüzey Özelliklerinin Mikro Ark Oksidasyon İşlemiyle Geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- [40] **URL-2,**
http://www.millenniumgalvanizing.com/sites/all/themes/millennium/images/pro_c-hart.png Hot-Dip Galvanizing Process Steps. 12 Ocak 2019.

- [41] **Karode, N. I.**, 2016. Assessment of thermal spray coatings for wear and abrasion resistance applications, *Master of Science*, Stony Brook University Materials Science and Engineering. New York
- [42] **Lenling, B.**, Coating Microstructures: Understanding the Science Behind Thermal Spray Coatings <http://empoweringpumps.com/tstcoatings-microstructures-science-thermal-spray-coatings>, 14 Ekim 2018.
- [43] **Kalaycı, T.**, 2018. Sıcak Daldırma Yöntemiyle Alüminyum Kaplanmış Inconel 718 Süperalaşımının Oksidasyon Direncinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul
- [44] **Koçanoğulları, S.**, 2010. Demir Esaslı Toz Metalurjisi İle Üretilmiş Parçalarda Alüminyum Kaplamanın Yüzey Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa
- [45] **Çevik, B.**, 2014. Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametrelerinin Kalıntı Gerilmelere Birleştirmenin Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara

ÖZGEÇMİŞ

Abdulkadir VAROL, 1991 yılında Elazığ ilinde doğmuştur. İlk ve orta öğretimini Elazığ'da tamamlamıştır. Yükseköğretimini Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde tamamlayarak 2016 yılında buradan mezun olmuştur. 2017 yılında başladığı Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği bölümünde tezsiz yüksek lisansını tamamlamış ve 2019 yılında mezun olmuştur. 2016 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Teknolojileri Anabilim Dalı Mekanik Bilim dalında tezli yüksek lisans eğitimine başlamıştır.

