



**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE
KAPLANAN YAPI ÇELİKLERİNİN
KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Furkan KALAN

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Bilim Dalı

Doç. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK

2019

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE KAPLANAN YAPI
ÇELİKLERİNİN KOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Furkan KALAN

**METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Malzeme Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE KAPLANAN YAPI ÇELİKLERİNİN
KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Doç. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK danışmanlığında, Furkan KALAN tarafından hazırlanan bu çalışma 29/03/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı – Malzeme Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Burak DİKİCİ

İmza

Üye : Doç. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK

İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hikmet ÇİÇEK

İmza

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun 16/04/2019 tarih ve 16/26 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: 6503

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI İLE KAPLANAN YAPI ÇELİKLERİNİN KOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Furkan KALAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK

Yapı çelikleri, günümüz endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Yapı çeliklerinin atmosferik koşullarda veya korozif ortamlarda korozyondan korunması amacıyla çeşitli yüzey kaplama prosesleri uygulanmaktadır. Bunlar içerisinde en yaygın olan yöntem galvanizleme işlemidir. Galvanizleme prosesinde çelik parçaların yüzeyine, sıcak daldırma yöntemi kullanılarak çinko kaplamalar yapılmaktadır. Çinko kaplamalar özellikle klorürlü ortamlarda korozyondan koruma konusunda yetersiz kalmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımları klorürlü ortamlarda ve yüksek sıcaklık oksidasyon direnci istenilen yerlerde çinkoya alternatif bir malzeme grubu olarak göze çarpmaktadır. Bu tez çalışmasında, çelik malzeme yüzeyine, çinko kaplamaya alternatif olabileceği düşünülen, alüminyum/alüminyum alaşımı kaplamalar sıcak daldırma yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Farklı alüminyum alaşımlarının çeliklerin korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyon özelliklerini nasıl etkilediğini incelemek amacıyla üç farklı alaşım kullanılmıştır. Bunlardan AA1050 saf yakın, AA2024 Cu içeriği yüksek ve AA5083 ise Mg içeriği yüksek olan Al alaşımlarıdır. Yapı çelikleri 1, 3 ve 5 dakika sürelerde 700°C sabit sıcaklıkta tutulan ergiyik alüminyum banyolarına daldırılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kaplama sonrası kaplamaların ve kaplama-çelik ara yüzeyinde oluşan intermetalik yapıların özellikleri optik mikroskop, mikro sertlik cihazı, X-ışını Difraktometre (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Saçınım Spektroskopisi (EDS) sistemleri kullanılarak incelenmiştir. Kaplamaların yüksek sıcaklıkta oksidasyon özelliklerini incelemek amacıyla kaplanmış numunelere 24 saat süreyle 750°C sıcaklıkta atmosferik koşullarda oksitleme işlemi yapılmış ve meydana gelen ağırlık artışı incelenmiştir. Al kaplanmış çeliklerin korozyon özelliklerini incelemek için oluşturulan iki farklı korozif çözelti içerisinde daldırma testi yapılmış, oluşan korozyon kayıpları ve bozunma şekilleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sıcak daldırma işlemiyle üretilmiş Al kaplamaların yapı çeliklerinin oksidasyon ve korozyon dayanımlarını önemli derecede artırdığı tespit edilmiştir.

2019, 89 sayfa

Anahtar Kelimeler: Alüminyum kaplama, Sıcak daldırma, Yapı çelikleri, Alüminyum alaşımları, Korozyon Direnci

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF CORROSION BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEELS COATED WITH ALUMINUM ALLOYS

Furkan KALAN

Atatürk University
Graduated School of Natural and Applied Science
Department of Metallurgy and Materials Engineering,
Department of Material

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK

Structural steels are the most widely used materials in today's industry. Various surface coating processes are applied to protect the structural steels from corrosion in atmospheric conditions or in corrosive environments. The most common method is galvanizing. Zinc coatings are applied to the surface of steel parts by hot dipping method in the galvanizing process. Zinc coatings are particularly inadequate in corrosion protection especially chlorine-rich environments. Aluminum and aluminum alloys are considered as an alternative material to zinc in chlorine-rich environments and where high temperature oxidation resistance is desired. In this thesis, aluminum / aluminum alloy coatings, which are thought to be an alternative to zinc coating, are coated with hot dip method. Three different alloys were used to investigate how different aluminum alloys affect the corrosion and high temperature oxidation properties of steels. AA1050 is almost pure, AA2024 is high in Cu content and AA5083 is Al alloys with high Mg content. The structural steels were plated by immersing them in the molten aluminum baths maintained at a constant temperature of 700°C for 1, 3 and 5 min. The properties of the intermetallic structures formed between the coating and the coating-steel interface were examined using optical microscope, micro hardness tester, X-ray diffractometer (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) systems. In order to investigate the high temperature oxidation properties of the coatings, the coated samples were oxidized at atmospheric conditions at 750°C for 24 hours and the resulting weight increase was examined. In order to examine the corrosion properties of Al-coated steels, immersion test was performed in two different corrosive solutions, and corrosion losses and corrosion damages were investigated. Aluminium platings produced by hot dipping process have been found to significantly increase the oxidation and corrosion resistance of the structural steels.

2019, 89 pages

Keywords: Aluminum coating, Hot dip, Structural steels, Aluminum alloys, Corrosion resistance

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin tüm aşamalarında kıymetli vaktini, bilgi ve tecrübelerini benden hiçbir zaman esirgemeyen, tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK'e gösterdiği ilgi, sabır ve anlayıştan ötürü saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın oluşmasında gösterdikleri yardımlardan ötürü Sayın Arş. Gör. Taha Çağrı ŞENOCAK ve Sayın Arş. Gör. Taha Alper YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm çalışma aşamalarımda yanımda olup yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım, Ozan BİNGÖL, Fadime AKPINAR, Kazım KOCA, Derya BİRHAN, Uğur Can BEYTEKİN ve tüm dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bu günlere gelmemi sağlayan anneciğim, babacığim, canım kardeşlerim ve tüm sevdiklerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma 6503 numaralı "Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları ile Kaplanan Çelik Konstrüksiyonlarının Korozyon Davranışlarının İncelenmesi" başlıklı proje kapsamında Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenmiştir. BAP'a vermiş olduğu desteklerden ötürü teşekkürlerimi sunarım.

Furkan KALAN

Nisan, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Tarihçesi, Elde Edilişi ve Genel Özellikleri.....	9
2.2. Alüminyumun Alaşım Sınıfları	10
2.3. Alüminyum Oksit Tabakası.....	13
2.4. Düşük Karbonlu Yapı Çelikleri.....	13
2.5. Alüminyum Kaplama Yöntemleri	16
2.6. Alüminyum Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması	18
2.7. Sıcak Daldırma ile Alüminyum Kaplama	19
2.8. Sıcak Daldırmayla Alüminyum Kaplama İşlemine Hazırlık	20
2.9. Difüzyon	22
2.10. Difüzyon Tabakasının (İntermetalik) Morfolojisi	24
2.11. Daldırma Süresinin İntermetalik Tabakaya Etkisi	27
2.12. Banyo Sıcaklığının İntermetalik Tabakaya Etkisi	29
2.13. Banyo Sıcaklığının ve Daldırma Süresinin İntermetalik Tabakaya Etkisi.....	30
2.14. Alüminyumdaki Silisyum İçeriğinin İntermetalik Tabakaya Etkisi.....	31
2.15. Çelikteki Karbon İçeriğinin İntermetalik Tabakaya Etkisi	33
2.16. Oksidasyon Direnci	34
2.17. Korozyonun Tanımı, Önemi ve Oluşumu	36
2.18. Korozyon Türleri	37
2.19. Korozyon Ortamları	39
2.20. Korozyondan Korunma Yöntemleri.....	41
2.21. Elektrokimyasal Yöntemler.....	41

2.22. Kimyasal Yöntemler.....	42
2.23. Koruyucu Kaplamalar	42
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	44
3.1. Taban Malzemeler.....	44
3.2. Numune Yüzeylerinin Hazırlanması	46
3.3. Kaplama Banyosunun Hazırlanması	47
3.4. Sıcak Daldırma İşlemi	47
3.5. Test Numunelerinin Hazırlanması.....	49
3.6. Optik Mikroskop Analizleri	50
3.7. Sertlik Analizleri	50
3.8. XRD Analizleri.....	51
3.9. SEM-EDS Analizleri.....	52
3.10. Korozyon Testi	52
3.11. Oksitleme İşlemi.....	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	55
4.1. Kesit Görüntüleri.....	55
4.2. Sertlik Ölçümleri	58
4.3. XRD Analiz Sonuçları.....	60
4.4. Kaplama ve İntermetalik Tabaka Kalınlıkları	64
4.5. EDS Analizleri	66
4.6. SEM Görüntüleri	67
4.7. Korozyon Testi Sonrası Bulgular	69
4.8. Oksidasyon Testi Sonrası Bulgular	78
5. SONUÇ	82
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	90

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

12N	: 12 mm nervürlü yapı çeliği
16N	: 16 mm nervürlü yapı çeliği
AA	: Alüminyum alaşımı
Al	: Alüminyum
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
ASTM	: Amerikan test ve malzeme kurumu
BLN	: Büyük lama numune
C	: Karbon
CPR	: Korozyon penetrasyon oranı
Cu	: Bakır
EDS	: Enerji saçılım spektrometresi
Fe	: Demir
HV	: Vickers sertlik değeri
ISO	: Uluslararası standartlar teşkilatı
JCPDS	: Toz difraksiyonu standartları komitesi
KLN	: Küçük lama numune
LN	: Lama numune
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
NN	: Nervürlü numune
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
XRD	: X ışınımı difraktometresi
Zn	: Çinko

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yüzey mühendisliğinde kullanılan bazı yöntemler	15
Şekil 2.2. Kararsız yayınmada konsantrasyon profili	23
Şekil 2.3. Fe-Al denge diyagramı	25
Şekil 2.4. Q235A çeliğinin XRD pikleri.....	26
Şekil 2.5. Alüminyum kaplanmış çeliklerin SEM görüntüleri	26
Şekil 2.6. Farklı daldırma sürelerinde (a=10', b=20', c=40', d=60') 1040 çelik ve saf alüminyum arasındaki intermetalik tabakanın gelişimi	28
Şekil 2.7. Daldırma süresinin intermetalik tabaka kalınlığı üzerine etkisi	28
Şekil 2.8. 5 dakika süreyle, a=700°C, b=750°C, c=800°C, d=850°C ve e=900°C'de eriyik alüminyum içerisine daldırılmış numunelerin kesit görüntüleri	29
Şekil 2.9. Kaplama banyosunun sıcaklığının intermetalik tabaka kalınlığı üzerine etkisi	30
Şekil 2.10. Banyo sıcaklığının ve zamanın alüminyum tabakanın kalınlığına etkisi	31
Şekil 2.11. Banyo sıcaklığının ve zamanın intermetalik tabaka kalınlığına etkisi	31
Şekil 2.12. Silisyum içeriğinin intermetalik tabaka kalınlığı üzerine etkisi	33
Şekil 2.13. a)Al kaplanmış yapı çeliği, b)Al kaplanmış+800°C'de 1 saat difüzyon tavlaması, c)Al kaplanmış+800°C'de 6 saat difüzyon tavlaması.....	35
Şekil 2.14. Korozyif ortamlar	39
Şekil 2.15. Korozyondan korunma yöntemleri	41
Şekil 3.1. Kaplama işleminde kullanılan 12N, 16N, BLN ve KLN	45
Şekil 3.2. Kaplama işleminde kullanılan AA'lar	45
Şekil 3.3. Çelik tel fırçalı taş motoru	46
Şekil 3.4. Elektrikli ergitme ocağı	47
Şekil 3.5. Farklı AA'lar ile kaplanmış çelikler	48
Şekil 3.6. Abrasif kesme diski	49
Şekil 3.7. Zımparalama ve parlatma cihazı.....	49
Şekil 3.8. Optik mikroskop cihazı	50
Şekil 3.9. Mikro-Vickers sertlik cihazı	51

Şekil 3.10. X-ışını difraktometre cihazı.....	51
Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu.....	52
Şekil 3.12. %3,5 NaCl çözeltisi	53
Şekil 3.13. Numune asma sistemi	54
Şekil 4.1. AA1050 ile 1', 3', 5' kaplanmış 12N, 16N ve LN'lerin kesit görüntüleri	55
Şekil 4.2. AA2024 ile 1', 3', 5' kaplanmış 12N, 16N ve LN'lerin kesit görüntüleri	56
Şekil 4.3. AA5083 ile 1', 3', 5' kaplanmış 12N, 16N ve LN'lerin kesit görüntüleri	57
Şekil 4.4. Sertlik izlerinin farklılığı	58
Şekil 4.5. AA1050 kaplamalardan alınan mikro sertlik değerleri	59
Şekil 4.6. AA2024 kaplamalardan alınan mikro sertlik değerleri	60
Şekil 4.7. AA5083 kaplamalardan alınan mikro sertlik değerleri	60
Şekil 4.8. AA1050 ile kaplanmış numuneden ve AA1050'den alınan XRD pikleri	61
Şekil 4.9. AA2024 ile kaplanmış numuneden ve AA2024'den alınan XRD pikleri	62
Şekil 4.10. AA5083 ile kaplanmış numuneden ve AA5083'den alınan XRD pikleri	62
Şekil 4.11. Kaplanmış numunelerin intermetalik tabakalarından alınan XRD pikleri	63
Şekil 4.12. SEM görüntüsü	66
Şekil 4.13. a) AA1050, b) AA2024, c) AA5083 ile kaplı numunelerin SEM görüntüleri	68
Şekil 4.14. AA1050, AA2024 ve AA5083 ile kaplanmış LN'lerin korozyon testi sonrası kesit görüntüleri	70
Şekil 4.15. KLN'lerin korozyon öncesi görüntüleri	71
Şekil 4.16. KLN'lerin korozyon sonrası görüntüleri	71
Şekil 4.17. BLN'lerin korozyon öncesi görüntüleri	72
Şekil 4.18. BLN'lerin korozyon sonrası görüntüleri	72
Şekil 4.19. 12N'lerin korozyon öncesi görüntüleri.....	73
Şekil 4.20. 12N'lerin korozyon sonrası görüntüleri.....	73
Şekil 4.21. Kaplanmış KLN'nin ağırlık değişimi	75
Şekil 4.22. Kaplanmamış KLN'nin ağırlık değişimi	75
Şekil 4.23. Kaplanmış BLN'nin ağırlık değişimi	76
Şekil 4.24. Kaplanmamış BLN'nin ağırlık değişimi	76

Şekil 4.25. Kaplanmış 12N'nin ağırlık değişimi	77
Şekil 4.26. Kaplanmamış 12N'nin ağırlık değişimi	77
Şekil 4.27. BLN'lerin oksidasyon öncesi ve sonrası görüntüleri	79
Şekil 4.28. Oksitleme yapılmış St37 çeliğinin ağırlık değişimi	80
Şekil 4.29. Oksitleme yapılmış AA1050, AA2024 ve AA5083 kaplamaların ağırlık değişimi.....	81



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ana alaşım elementlerine göre alüminyum serileri	10
Çizelge 2.2. Farklı alüminyum kaplama yöntemlerinin karşılaştırılması	19
Çizelge 2.3. Fe-Al fazlarının oluşumuna eşlik eden ΔH° , ΔS° ve ΔG değerleri	25
Çizelge 2.4. Çelikteki karbon içeriğinin intermetalik tabaka kalınlığına etkisi	34
Çizelge 3.1. St37 çeliğinin kimyasal bileşimi	44
Çizelge 3.2. St37 çeliğinin mekanik özellikleri	44
Çizelge 3.3. Kullanılan AA'ların kimyasal bileşimleri	46
Çizelge 4.1. Sertlik değerleri	59
Çizelge 4.2. AA1050 ile kaplanan numunelerin kaplama ve difüzyon tabakası kalınlıkları	64
Çizelge 4.3. AA2024 ile kaplanan numunelerin kaplama ve difüzyon tabakası kalınlıkları	65
Çizelge 4.4. AA5083 ile kaplanan numunelerin kaplama ve difüzyon tabakası kalınlıkları	65
Çizelge 4.5. İntermetalik tabakanın atomik yüzdeleri	66
Çizelge 4.6. KLN'lerin ağırlık değişimleri	74
Çizelge 4.7. BLN'lerin ağırlık değişimleri	74
Çizelge 4.8. 12N'lerin ağırlık değişimleri	74
Çizelge 4.9. Oksitleme işlemi sonucu ağırlık değişimleri	78

1. GİRİŞ

Çelik malzemeler 1850’li yıllardan günümüze, kullanımını oldukça yaygın olan çok yönlü yapısal malzemelerin başında gelmektedir. Çelik, yüksek mukavemet, elastikiyet, esneklik ve tokluk gibi birçok arzu edilen fiziksel özelliği bir arada barındıran ve ayrıca sayısız yapısal uygulamada işleme kolaylığı açısından şekil verilebilme kabiliyetine sahip bir malzemedir. Bazı çelikler, birçok mükemmel özelliğe sahip olmalarına rağmen düşük yorulma dayanımı, gevrek kırılma, yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet ve düşük korozyon direnci gibi bazı istenmeyen özellikler göstermektedir. Çeliğin çeşitli özellikleri bir veya daha fazla alaşım elementi ile alaşımlanarak iyileştirilebilmektedir. Bu özelliklerden bazıları sertlik, ergime noktası, mukavemet, korozyon direnci, dökülebilirlik, elektriksel direnç ve görünümüdür (Flenner 2007).

Genel olarak kullanılan tüm malzemelerin yüzeyi dış çevre ile bir bütün olarak davranmalıdır. Ancak mühendislik hatalarının çoğu, malzeme yüzeyinden kaynaklanmaktadır. Bu da yorulma, aşınma, korozyon ve oksidasyon gibi problemlere neden olmaktadır. Düşük karbon içeriğine sahip yapı çeliklerinin yüzeyleri termodinamik açıdan kararsız bir yapıya sahip olduklarından dolayı genellikle termodinamik açıdan daha kararlı olan oksit formlarına dönmek istemektedirler. Bu da pek çok çalışma ortamında yapı çeliklerinin korozyona uğramalarını kaçınılmaz hale getirmektedir (Tracton 2006). Bu ve bunun gibi sorunları ortadan kaldırmak adına çelik malzemelerin yerine daha dayanıklı malzemelerin kullanılması, çelik yüzeyinin koruma sistemleri ile korunması ya da çelik malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Malzeme yüzeyinde yapılacak değişiklikler veya koruma sistemleri, paslanmaz çelik gibi yüksek korozyon direncine sahip malzemeler kullanmaktan çok daha ekonomik olmaktadır (Altun 1998). Bu amaç doğrultusunda çelik malzeme yüzeyine, bir takım kaplama yöntemleriyle korozyon direnci daha yüksek olan malzemeler biriktirilmektedir. Tercih edilecek olan malzemeler genellikle çinko, alüminyum ve magnezyum gibi demire göre daha aktif olan metallerdir. Kullanılan bu elementler anot olarak davranırken, taban malzeme (Fe) katot olarak davranmaktadır (Tracton 2006). Çinko kaplamalar (galvanizleme) düşük maliyet ve üstün kurban anot

etkisinden dolayı yapı çelikleri için önemli bir kaplama malzemesi ve yöntemidir. Son zamanlarda galvanizli çeliklere, çinko metalinin sınırlı maden kaynakları nedeniyle ve fiyatındaki dalgalanmalar sebebiyle bazı alternatifler bulunma ihtiyacı duyulmuştur (Takata *et al.* 2015). Ayrıca akış söz konusu olan ortamlarda çinkonun korozyonu, akış hızı ile beraber arttığı için galvanizleme sadece sınırlı faydaya sahiptir. Örneğin deniz suyu ortamında kullanılan borularda galvanizleme işlemi boru ömrünü yaklaşık olarak 6 ay kadar uzatabilmiştir (Roberge 2000). Buna ek olarak, özellikle klorür (Cl⁻) içeren ortamlarda çinko filmi hızlıca bozunarak malzeme kaybına neden olmakta ve bulunduğu ortamı kirletmektedir. Galvanizlemenin bazı şartlarda sunduğu bu olumsuz özellikler, başka kaplama malzemelerinin kullanılması gerektiğini düşündürmektedir.

Kaplama işlemlerinde kullanılan diğer bir malzeme de alüminyumdur. Alüminyum, düşük maliyeti ve benzersiz özellikleri sebebiyle en yaygın kullanılan demir dışı metallere biridir. Yoğunluğu ve sertliği, çeliğin yaklaşık üçte birine eşittir, sünek ve kolayca işlenebilir. Saf alüminyum, düşük gerilme direncine sahiptir, ancak bazı alaşım elementleri ilavesiyle önemli ölçüde mekanik özellikler sergileyebilmektedir. Alüminyum alaşımları, özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranlarının bir sonucu olarak havacılık, ulaştırma ve yapı endüstrilerinde kritik rol oynamaktadır. Alüminyum, havadaki oksijenle doğal bir şekilde reaksiyona girerek metal yüzeyinde yaklaşık 2-3 nm kalınlığında Al₂O₃ olarak tanımlanan ince bir koruyucu oksit tabakası oluşturmaktadır. Bu oksit tabaka, yüzeyi stabilize ederek metalin ortam ile daha fazla reaksiyona girmesini önlemektedir (Liu 2009). Alüminyum kaplanmış çelikler, sanayiye girmelerinden bu yana taşıtlar, köprüler, otoyol yapıları, basınçlı kaplar ve birçok yerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Deqing *et al.* 2003; Wang and Chen 2006). Çeliklerin alüminyum ile kaplanması için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan bazıları, manyetik alanda sıçratma, sprey kaplama, paket alüminyum kaplama, giydirme ile kaplama (cladding), elektrolitik kaplama ve sıcak daldırma ile kaplamadır. Bu tez çalışmasında, yukarıda sıralanan yöntemlerden sıcak daldırma ile kaplama işlemi kullanılmıştır. Sıcak daldırma ile alüminyum kaplama, ısı ve oksidasyon direncinin birincil gereksinim olduğu çeliklere uygulanmaktadır. Aynı zamanda çevresel koruma, ekonomiklik ve seri üretim için uygunluk faktörleri ve üstün korozyon direnci dikkate

alındığında, sıcak daldırma ile alüminyum kaplama oldukça pratik ve elverişli bir yöntemdir (Davis 1993; Chang *et al.* 2006; Awan *et al.* 2008; Awan and Ul Hasan 2008; Su *et al.* 2008; Huilgol *et al.* 2013). Çelik yüzeyine sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi sonucunda çelik ve alüminyum katmanları arasında farklı intermetalik fazlar meydana gelmektedir. Bu fazlar genellikle çok sert, kalın ve kırılabilir bir yapıya sahiptirler. Kırılabilir olmaları, bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Birçok araştırmacı çelik ile alüminyum arasında oluşan intermetalik fazların gevrekliğini gidermek, çeliklerin korozyon ve oksidasyon dirençlerini arttırmak amacıyla bazı incelemeler yapmışlardır.

C.W. Su ve arkadaşları tarafından Fe-8Al-30Mn-0.8C alaşımı üzerine 700, 750 ve 800°C'de sıcak daldırma yöntemi ile saf alüminyum kaplanmıştır. Kaplama işleminden önce kaplama numuneleri çeşitli kimyasallar ile temizlenmiştir. Kaplamanın ardından numunelerin mikro yapılarını, sertlik değerlerini ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Fe-8Al-30Mn-0.8C alaşım yüzeyinde saf alüminyum ve (Fe-Mn)₂Al₅ intermetalik fazından meydana gelen katmanlı bir yapı oluştuğunu bildirmişlerdir. Yapılan sertlik deneyleri sonunda alüminyum katmanının 55 HV, intermetalik katmanın 1100 HV ve çelik katmanın 250 HV olduğu bulmuşlardır. ASTM-B117 standardına uygun olarak gerçekleştirilen korozyon testinde, 304 paslanmaz çelik, alüminyum kaplanmış Fe-8Al-30Mn-0.8C alaşımı ve alüminyum kaplanmamış Fe-8Al-30Mn-0.8C alaşımını karşılaştırılmışlardır. Numunelere 72, 240 ve 1200 saat korozyon testi uygulanmıştır. Alüminyum kaplanmış Fe-8Al-30Mn-0.8C alaşımının yüzeyinde sadece beyaz pas oluşumu gözlenmiş ve 304 paslanmaz çelik ile karşılaştırılabilecek seviyede bir korozyon direncine sahip olduğu görülmüştür. Fakat alüminyum kaplama yapılmamış Fe-8Al-30Mn-0.8C alaşımını 1200 saatlik test sonucunda tamamen aşınmıştır. Ayrıca karşılaştırma amacıyla üç numune 900°C'de oksidasyona maruz bırakılmış ve ağırlık artışları ölçülmüştür. Alüminyum kaplanmış Fe-Al-Mn alaşımı, alüminyum kaplanmamış Fe-Al-Mn alaşımı ve 304 paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında en düşük ağırlık artışına sahip numune olduğu bildirilmiştir. Bu sonuç, sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işleminin, Fe-Al-Mn alaşımının oksidasyon direncini büyük ölçüde arttırabildiğini göstermektedir (Su *et al.* 2008).

Tsunekawa ve arkadaşları, çelik üzerine sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi gerçekleştirilmiş ve çelik ile alüminyum arasında oluşan intermetalik tabakanın kırılabilirliğini azaltmak amacıyla daldırma işlemi esnasında çelik üzerine 19.5 kHz rezonans frekansına sahip bir ultrasonik titreşim uygulaması denenmişlerdir. Sonuç olarak, ultrasonik titreşim uygulaması olmayan çalışmalara kıyasla nispeten daha düşük işlem sıcaklığında bir sıcak daldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çelik, ergimiş alüminyumla temas ettiğinde ara yüzeyde Fe_2Al_5 intermetalik difüzyon tabakası oluşmuştur. Bununla birlikte, intermetalik katmanının kalınlığı ultrasonik titreşim uygulanarak 5 μm 'nin altında tutulmuştur. 5 μm 'lik intermetalik tabaka kalınlığına sahip alüminyum kaplanmış çelik numuneler yüksek darbe direnci göstermiş ve adezyon özelliklerinin de iyileştiği bildirilmiştir (Tsunekawa *et al.* 2008).

Eggeler ve arkadaşları, düşük karbonlu bir çelik üzerine, ayrı ayrı saf alüminyum ve %2 silisyum ihtiva eden bir alüminyum alaşımı ile sıcak daldırma yöntemi kullanılarak bir kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Kaplama işlemi 780-792°C arasında gerçekleşmiştir. Sonuç olarak saf alüminyum ile kaplanan çeliklerde intermetalik tabakanın büyümesi çok daha hızlı olmuştur. %2 silisyum içeren alüminyum ile yapılan kaplama sonucunda silisyumun kaplama tabakasına girdiği görülmüştür. Silisyum difüzyon bariyeri olarak davrandığı için intermetalik tabakanın kalınlığı azalmıştır (Eggeler *et al.* 1986).

Bhat Kuruveri ve arkadaşları, düşük karbonlu çelik üzerine sıcak daldırma ile alüminyum kaplamıştır. Daldırma süresi 5 ile 40 dakika arasında, banyo sıcaklıkları ise 690°C ve 750°C'dir. Eriyik alüminyum içerisine $ZnCl_2$ ve NH_4Cl karışımı flux olarak katılmıştır. Sonuç olarak, kaplama sırasında flux kullanımı alüminyum banyo sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda bir miktar çözülmüş çinko açığa çıkmasına yol açmıştır. 690°C'de, intermetalik katman ağırlıklı olarak Fe_2Al_5 fazından oluşurken 750°C'de $FeAl_3$ fazı çoğunluktadır. 750°C'de intermetalik tabaka hızlı soğutma koşullarından dolayı daha yüksek seviyedeki alüminyum konsantrasyonlu $FeAl_3$ 'ten oluşmuştur. Bu değişiklik, çözülmüş çinko nedeniyle artan alüminyum aktivitesine bağlanmıştır (Bhat Kuruveri *et al.* 2013).

Mahallawy ve arkadaşları, düşük karbonlu çelik yüzeyine saf alüminyum ve farklı miktarlarda metalik silisyum (%4, %8, %12) içeren AA'lar ile sıcak daldırma yöntemi kullanılarak kaplanma yapılmıştır. Sonuç olarak, intermetalik tabakanın kalınlığı, özellikle saf alüminyum banyolarda, banyo sıcaklığının artması ile artmış, artan silisyum içeriği ile de azalmıştır. Banyoya ağırlıkça %8'den fazla Si ilavesinin kalınlık üzerinde tespit edilebilir bir etkisi olmamıştır. XRD analizi sonucunda saf alüminyum ile kaplanan çeliklerin intermetalik tabakasının kalın bir Fe_2Al_5 fazından ve nispeten daha ince bir $FeAl_3$ fazından oluştuğu görülmüştür. Al-Si alaşımları ile kaplanan numunelerde ise $Al_{20}Fe_7Si$, $Al_{19}Fe_8Si$, Al_7Fe_2Si , Al_3Fe_2Si gibi farklı Al-Fe-Si fazları tanımlanmıştır (Mahallawy *et al.* 1997).

Cheng ve Wang, düşük karbonlu çeliği farklı silisyum oranlarına (%2.5, %5, %10) sahip AA'lar ile kaplamışlardır. Kaplama işlemi olarak $700^{\circ}C$ 'de 3 dakika daldırma süresiyle sıcak daldırma işlemi tercih edilmiştir. Kaplamanın ardından, çeliğin $750^{\circ}C$ 'deki statik havada, izotermal ve döngüsel oksidasyon davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak alüminyum banyolara silisyum ilavesi, alüminyum ile kaplanmış çeliğin mikro yapısını ve faz dönüşüm davranışlarını değiştirmiş ve dolayısıyla izotermal ve döngüsel oksidasyon dirençlerini de doğrudan etkilemiştir. İzotermal oksidasyon işleminde saf alüminyuma daldırılmış çelik numunelerin en iyi oksidasyon direncine sahip olduğu bildirilmiştir. Silisyum içeren alüminyum alaşımları ile kaplanan çelik numunelerin izotermal oksidasyon dirençleri ise azalmıştır. Bunun sebebinin izotermal oksidasyon sırasında intermetalik tabakada hem daha fazla oranda demir oksit oluşması hem de çok sayıda gerçekleşen faz dönüşümünün neden olduğu boşluklar olduğu bildirilmiştir. Döngüsel oksidasyon durumunda ise saf alüminyuma daldırılmış çelik numunelerin düşük oksidasyon direncine sahip olduğu bildirilmiştir. Bunun sebebinin Fe_2Al_5 fazının düşük kırılma tokluğu nedeniyle çatlak oluşumunu arttırmasından kaynaklandığını bildirmişlerdir. Silisyum içeren alüminyum ile kaplanmış çelik numunelerde ise döngüsel oksidasyon dirençleri düşükten yükseğe doğru sırasıyla Al-%2.5 Si, Al-%10 Si ve Al-%5 Si içeren alüminyumlarla kaplanan çelik numunelerde gözlemlenmiştir (Cheng and Wang 2013).

Shih ve Tu, 250°C'de ön ısıtmaya tabi tutulmuş olan 1020 ve 1040 çeliklerini, 700°C'de sıcak daldırma yöntemiyle 3 ila 60 dakika daldırma sürelerinde ve farklı (saf Al, ağırlıkça %2 Mg içeren Al, ağırlıkça %0.4 Mg içeren Al ağırlıkça ve %7 Si içeren Al) AA'lar ile kaplamışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün kaplama tabakalarına etkisini incelemek amacıyla çelik numunelerin yüzeylerini pürüzlendirmişlerdir. Daldırma işlemi yapıldığında çelik yüzeyinde bir miktar oksit filmi olduğu bildirilmiştir. Sonuç olarak, kaplama sonunda çelik ile saf alüminyum arasında meydana gelen intermetalik tabaka morfolojisinin artan sıcaklık ile parçalı ve dil benzeri bir yapıda olduğu görülmüştür. Karbon, hem demirin tane sınırlarına hem de çelik ile intermetalik tabaka arasına difüze olarak Al_4C_3 fazını oluşturmuştur. Al-7Si ile yapılan kaplamada silisyum intermetalik tabaka içerisine girmiş, alüminyum ve karbon difüzyonunu büyük ölçüde azaltmıştır. Al-0,4Mg ile kaplama esnasında çelik ile intermetalik faz arasında spinel ($MgAl_2O_4$) oluşumu gözlemlenmiştir. Magnezyum yavaş yavaş intermetalik faz ile eriyik arasında toplanmış ve Mg-Al intermetalikleri oluşturmuştur. Bu da Fe-Al intermetalik fazının büyümesini engellemiştir (Shih and Tu 2007).

Yousaf ve arkadaşları, %0.4 C'li çelik numuneleri saf alüminyum ve %11 Cu içerikli alüminyum alaşımları ile kaplamıştır. Kaplama işleminden önce çelik numuneler ilk olarak 60°C'de %3 Na_2CO_3 çözeltisinde 5 dakika boyunca yağdan arındırılmış ve daha sonra 5 dakika boyunca 60°C'de %10 HCl çözeltisinde yıkanmıştır. Kaplama işlemi sıcak daldırma olarak seçilmiş ve 675-950°C'de 1-10 dakika daldırma sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Daldırma işleminden sonra numuneleri oda sıcaklığında soğutmuşlardır. Sonuç olarak, çelik numunenin karbon içeriği, banyonun sıcaklığı ve daldırma süresindeki değişiklikler intermetalik tabakanın (Fe_2Al_5) morfolojisini etkilediği bildirilmiştir. %11 Cu içeren alüminyum alaşımı ile yapılan kaplamada oluşan intermetalik tabakanın kalınlığı saf alüminyum ile yapılan kaplamada oluşan intermetalik tabakanın kalınlığına nazaran yaklaşık %75 oranında azalmıştır. Bu azalmanın sebebi Al_2Cu ve Al_7Cu_2Fe gibi tetragonal intermetalik fazların oluşmasına dayandırılmıştır. Saf alüminyum ile kaplama sonucunda intermetalik tabakanın pürüzlü ve parmak benzeri olduğu fakat %11 Cu ihtivalı alüminyum alaşım ile kaplamada intermetalik tabakanın daha düz ve pürüzsüz olduğu bildirilmiştir (Yousaf *et al.* 2011).

Tilak Kumar ve arkadaşları, yumuşak çelik numunelere 900°C'ye kadar farklı sıcaklıklarda ve sabit daldırma süresiyle (2 dakika) alüminyum kaplamışlardır. Kaplama işleminden önce çelik numuneye asitle temizleme, durulama ve kumlama gibi yüzey hazırlık işlemleri uygulamışlardır. Kaplama işleminde sonra alüminyum kaplanmış çelik numuneler 800°C'de 1 saat boyunca difüzyon tavlmasına tabi tutulmuş. Kaplanmış ve kaplanmamış çeliklerin aşınma oranları incelenmiştir. Sonuç olarak, alüminyum kaplanmamış çelik numunelerdeki aşınma direnci, alüminyum kaplanmış çeliğe nispeten daha az olduğu ve çelik numune için aşınma testinden sonra meydana gelen malzeme kaybının, kaplanmış numunelere göre daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Çelik numunelerin sıcak daldırma ile alüminyum kaplanması korozyon ve aşınmaya karşı dirençte belirgin bir artışa neden olduğu bildirilmiştir (Tilak Kumar *et al.* 2015).

Pradhan ve arkadaşları, çelik üzerine sıcak daldırma yöntemiyle (670°C'de farklı daldırma sürelerinde) magnezyum (%2.82) ve mangan (%1.09) içerikli alüminyum kaplama yapmışlardır. Daldırma işleminden önce çelik numune yüzeyi çeşitli kimyasallarla temizlenmiş ve kaplama öncesi çelik yüzeyini oksidasyondan korumak amacıyla CuSO₄ ile kaplanmışlardır. Kaplama işleminin ardından numunelerin korozyon davranışları 0.5 mV/s tarama hızında, ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi ile gerçekleştirilmiş, anodik potansiyodinamik polarizasyon deneyleri ile değerlendirilmiş. Korozyon hızı ise Tafel ekstrapolasyon tekniği ile ölçülmüş. Ayrıca kaplanmış numunelere bükme testi de uygulamışlardır. Analiz sonuçlarına göre en dış katman yumuşak Al-Mg-Mn alaşımlı kaplama tabakasından, iç katmanın ise parmak benzeri sert Fe-Al intermetalik tabakadan oluştuğu bildirilmiştir. Ayrıca, XRD analizi sonucunda Fe-Al intermetalik tabakanın iki ayrı fazdan oluştuğu bildirilmiştir. Alüminyum dış katmana yakın bölgelerde ince FeAl₃ yapısı oluşurken, çeliğe doğru ilerlemiş yapı ise dil benzeri kalın Fe₂Al₅'den oluştuğu görülmüştür. Fe₂Al₅ intermetalik tabaka kalınlığının, FeAl₃ kalınlığının yaklaşık iki katı olduğu bildirilmiştir. Al-Mg-Mn alaşımı ile kaplanmış numuneler galvanizli çelikler ile karşılaştırılmıştır. Al-Mg-Mn alaşımı ile kaplanmış numunelerin ortalama korozyon oranı 1.11 mpy civarındayken galvanizli çeliklerin korozyon oranınının 6.3 mpy olduğu bildirilmiştir. Çelik üzerindeki Al-Mg-Mn alaşımlı kaplamanın galvanizli çeliklere kıyasla neredeyse 6 kat daha yüksek

korozyon direncine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Bükme testi ile deformasyon sırasında dikey çatlakların sadece kırılğan Fe-Al intermetalik katmanlarında oluştuğu, yatay çatlakların ise yalnızca Fe₂Al₅ katmanında ortaya çıktığı bildirilmiştir (Pradhan *et al.* 2014).

Bu çalışmada, korozyon dirençlerini iyileştirmek amacıyla düşük karbonlu yapı çelikleri üzerine, sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum alaşımı kaplamalar yapılmıştır. Kaplama malzemesi olarak AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi alüminyum alaşımları kullanılmıştır. Kaplama işlemi, 700°C'ye sabitlenmiş sıvı alüminyum banyo içerisinde ve farklı daldırma sürelerinde (1, 3 ve 5 dakika) gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi sonunda, alüminyum kaplamaların numunelerin mikro yapısal özellikleri, kaplama ve difüzyon tabakalarının kalınlıkları ve morfolojileri, sertlik değerleri, oksidasyon ve korozyon özellikleri incelenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Tarihçesi, Elde Edilişi ve Genel Özellikleri

Alüminyum yeryüzünde en bol bulunan ikinci metalik elementtir. Yer kabuğunun %8'inin alüminyumdan oluştuğu bilinmektedir. Atom numarası 13 olan, 660°C ergime sıcaklığına sahip ve "Al" simgesi ile bilinen alüminyum, YMK kristal yapısına sahiptir. Yeryüzünde genellikle boksit olarak bilinen oksit formunda bulunmaktadır. Hacim bazında en yaygın kullanılan demir dışı metal haline gelen alüminyum, doğada bu kadar çok bulunmasına rağmen varlığı 1808 yılında keşfedilmiş ve ticari olarak 1886 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyum üretimi için oksit formdaki alüminyum, ergimiş kriyolit içerisinde çözündürülmüş ve büyük bir akıma maruz bırakılmıştır. Sonuç olarak alüminyum, elektrolitin alt kısmında sıvı halde elde edilmiştir. Bu yöntem günümüzde Hall-Heroult yöntemi olarak bilinmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanılmasının nedenleri şu şekilde sıralanabilir; alüminyumun yoğunluğu (2,7 g/cm³), çeliğin yoğunluğunun (7.8 g/cm³) yaklaşık üçte biri kadardır. Alüminyum zorlu şartların çoğunda korozyona karşı yüksek direnç göstermektedir. Alüminyumun korozyon direnci, yüzeyinde kendiliğinden oluşan koruyucu bir oksit filme bağlıdır. Bu film, yaklaşık 4 ile 8,5 pH aralığındaki ortamlarda oldukça kararlıdır. Oksit film doğal olarak kendini yeniler ve yüzey filminin aşınmasını veya başka mekanik hasarlara uğramasını engeller. Ortamın asitliği veya alkaliliği, alüminyum alaşımlarının korozyon davranışlarını etkilemektedir. Alüminyum asidik bir ortama maruz kaldığında oldukça dayanıklıdır. Fakat alkali bir ortama maruz kaldığında korozyon meydana gelebilmektedir. Alüminyum ve alaşımları yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahiptir. Isı ve elektriği mükemmel bir şekilde iletirler. Ferromanyetik değildir ve elektrik-elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum düşük sıcaklıklarda mukavemetini korur ve genellikle düşük sıcaklıklarda yapılan üretim ve işlemlerde kullanılırlar. Alüminyum saf haldeyken yüksek süneklik özelliğine, alaşımlı haldeyken ise yüksek mukavemet değerlerine sahip bir metaldir. Yanıcı veya patlayıcı maddelerin kullanıldığı uygulamalarda oldukça güvenilirdir. Tüm yaygın metal işleme ve birleştirme yöntemleri ile kolayca imal edilebilirler. Çekici bir parlaklığa ve

görünümüne sahiptir. Alüminyum, hurda değeri bakımından hem ekonomik hem de çevresel faydalar sağlayarak geri dönüşüme tabi tutulabilir. Demir (Fe) ve alüminyum (Al) alaşımları, birçok uygulamada düşük malzeme maliyeti göz önüne alındığında, iyi şekil verilebilirlik, mükemmel döküm kabiliyeti, yüksek mukavemet / ağırlık oranı, iyi korozyon direnci, kaplama parlaklığı ve uzun servis ömrü sağlayan en önemli mühendislik malzemeleri arasında yerlerini almaktadır (Ashby and Cebon 1993; Davis 1993; Cahn and Haasen 1996; Polmear 1996; Davis 1999; Roberge 2000; George and MacKenzie 2003; Schweitzer 2003; Kim *et al.* 2006; Wang and Chen 2006; Springer *et al.* 2011; Jiang *et al.* 2014; Shaha *et al.* 2014; Mao *et al.* 2015; Sui *et al.* 2015; Jiang *et al.* 2016).

2.2. Alüminyumun Alaşım Sınıfları

Alüminyum metali farklı alaşım elementleri ile sentezlenerek farklı özelliklere sahip ürünler meydana getirebilmektedir. Alüminyum alaşımları kimyasal olarak sınıflandırılırken 4 haneli sayılar kullanılmaktadır. İlk rakam alaşım grubundaki ana bileşeni, ikinci rakam orijinal alaşımın veya safsızlık sınırlarının modifikasyonlarını, son iki rakam ise alüminyum alaşımının tanımını veya alüminyumun saflığını göstermektedir. Alaşım gruplarını belirleme Çizelge 2.1'de gösterilmektedir (Schweitzer 2003).

Çizelge 2.1. Ana alaşım elementlerine göre alüminyum serileri (Schweitzer 2003)

Seriler	Ana Alaşım Elementi
1XXX	Alüminyum \geq %99
2XXX	Bakır
3XXX	Mangan
4XXX	Silisyum
5XXX	Magnezyum
6XXX	Magnezyum ve Silisyum
7XXX	Çinko
8XXX	Kalay
9XXX	Diğer Elementler

1XXX serisi alüminyum alaşımları saf alüminyum olarak bilinmektedir. Temel olarak elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır (Davis 1993).

2XXX serisinin ana alaşım elementi Cu'dur ve genellikle %2 ile %10 Cu içeren Al-Cu alaşımları, diğer ilaveler ile birlikte önemli alaşım ailelerini oluşturmaktadır. Hem döküm hem de işlenmiş Al-Cu alaşımları ısıl işlem görebilen alaşım sınıfına girmektedir (George and MacKenzie 2003).

3XXX serisinin ana alaşım elementi Mn'dir ve alüminyum içerisinde normalde 5 ila 50 ppm arasında değişen ve özdirenci azaltan yaygın bir empürite elementidir. Mangan, katı solüsyondaki veya ince çökeltilmiş intermetalik fazdaki mukavemeti arttırmaktadır. Korozyon direnci üzerinde olumsuz bir etkisi yoktur. Tane yapısını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Manganın görevi yeniden kristalleştirme sıcaklığını arttırmak ve lifli yapı oluşumunu teşvik etmektir (Roberge 2000).

4XXX serisinin ana alaşım elementi Si'dir ve alüminyuma ilavesiyle alüminyumun ergime sıcaklığını azaltmakta ve akışkanlığını arttırmaktadır. Alüminyumda tek başına Si bulunması ısıl işleme uygun olmayan bir alaşım meydana getirmektedir. Alüminyuma Si ilavesi, döküm imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır (Askeland *et al.* 2010).

5XXX serisinin ana alaşım elementi Mg'dir ve alüminyumda maksimum katı çözünürlüğü %17,4'tür. Ancak mevcut dövme alaşımlarındaki magnezyum içeriği %5,5'i aşmamaktadır. Düzgün şekilde imal edilmiş %5'e kadar Mg ihtiva eden dövme alaşımları, normal kullanımda kararlıdır. Mg ilavesi, alüminyumun sünekliğini çok fazla azaltmadan mukavemetini belirgin bir şekilde arttırmaktadır. Korozyon direnci ve kaynaklanabilirliği iyidir. 5XXX serisi alaşımlar için bazı yaygın uygulamalar; kamyon ve tren gövdeleri, binalar, zırhlı araçlar, gemi ve bot yapımı, iskele ve köprü direkleri, kimyasal tankerler, basınçlı kaplar ve kriyojenik tanklardır (Association 1984).

6XXX serisinin ana alaşım elementi Mg ve Si'dir. Magnezyum ve silisyumun alüminyuma eklenmesi, magnezyum-silisit (Mg_2Si) bileşiğini meydana getirmektedir. Bu bileşiğin oluşunu sonucunda ısıyla sertleşebilen ve çökeltme sertleştirmesi işlemi uygulanabilen bir alaşım üretilmiş olur. 6XXX serisi alaşımlar, kolay ve ekonomik olarak ekstrüzyon ile imal edilebilirler. 6XXX serisi genellikle teknelerde ve birçok yapısal imalatta kullanılabilirler (George and MacKenzie 2003).

7XXX serisinin ana alaşım elementi Zn'dir. Al-Zn alaşımları uzun yıllardır bilinmektedir, ancak döküm alaşımlarının sıcak çatlaması, dövme alaşımlarının ise stres korozyonu sonucu çatlamasına karşı hassasiyeti nedeniyle kullanımları sınırlı kalmıştır. Çinkonun alüminyuma, magnezyum ve/veya bakır gibi diğer elementlerle birlikte eklenmesi yüksek mukavemete sahip ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarını oluşurmaktadır. Diğer elementleri içeren Al-Zn alaşımları, dövülmüş alüminyum alaşımlarında en yüksek gerilme mukavemeti kombinasyonunu sunmaktadır. Bahsedilen sınırlamaların üstesinden gelmek için yapılan çalışmalar başarılı olmuş ve bu Al-Zn alaşımları ticari olarak daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyuma çinko ilavesi, çözelti potansiyelini yükseltmekte ve kurban anotlarda kullanımını arttırmaktadır. Çinko, büyük ölçüde arttırmaktadır. 7XXX serisi alaşımların ortak uygulamalarından bazıları; havacılık, zırhlı araçlar, beyzbol sopaları ve bisiklet iskeletleridir (Schweitzer 2003).

8XXX serisinin ana alaşım elementi Sn'dir. Alüminyum alaşımlarına %0,03 civarında, döküm alaşımlarına ise yaklaşık %25'lik konsantrasyonlara kadar ilave edilebilmektedir. Küçük miktarlarda kalay ilavesi (%0,05), Al-Cu alaşımlarının suni yaşlanmaya olan yatkınlığını büyük ölçüde arttırmaktadır. Daha yüksek kalay konsantrasyonları Al-Cu alaşımlarında sıcak çatlamaya neden olabilmektedir. Ticari sınıf alüminyumda %0,01'e kadar Sn ilavesi tavlama sırasında yüzey kararmasına ve korozyona olan duyarlılığın artmasına neden olmaktadır. Bu etki küçük miktardaki (%0,2) Cu ilavesi ile azaltılabilmektedir. Tuzlu suda kurban anot olarak az miktarlarda Sn içeren Al-Zn alaşımları kullanılabilir (Revie and Uhlig 2008).

2.3. Alüminyum Oksit Tabakası

Alüminyumun korozyondan korunmasının temelinde, alüminyum oksit (Al_2O_3) yapısı söz konusudur. Al_2O_3 , alüminyum yüzeyinde ince ve kompakt bir oksit filmi olarak doğal bir şekilde oluşmaktadır. Bu film aşınmadan zarar görür veya kırılırsa korozyonu önlemek için anında başka bir oksit tabakası meydana gelmektedir (Schweitzer 2003; Pradhan *et al.* 2014).

Metalik alüminyum, atmosferik oksijene çok reaktiftir ve bu sayede ince pasivasyon tabakası çok kolaylıkla oluşmaktadır. Amorf oksit kaplama, metalik alüminyumun hava koşullarına karşı daha fazla dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Ortam koşullarına bağlı olarak, yüzeyde 5 nm kalınlığa kadar amorf bir Al_2O_3 tabakası oluşabilmektedir (Campbell *et al.* 1999; Davis 1999). Al_2O_3 kaplamalar, korozyon ve erozyona karşı oldukça dayanıklıdır. İnce pasif Al_2O_3 tabakası, alüminyumun oksidasyon oranını azaltmaktadır. Su ile temas ettiğinde dış katman $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ içeriğine sahip bir hale dönüşmektedir. Aşırı asit veya alkali çözeltilerine rağmen, pH 4 ila 8,5 arasında olduğunda alüminyum koruyucu bir oksit tabakası ile kaplanma eğilimindedir. Fakat sulu çözeltinin pH değeri 8,5'in üzerinde olduğunda oksit tabakası çözünerek koruyucu özelliğini yitirmektedir. Aşırı asidik ortam da oksit tabakanın ayrışmasına neden olmaktadır (Caseres 2007).

Pflitsch ve arkadaşları, ASTM G32-92 standardına göre yaptıkları kavite erozyon deneyinde, çelik yüzey üzerindeki 0,75 μm kalınlığındaki amorf Al_2O_3 filminin aşınma hızının, kaplamanın metal yüzeye iyi yapışma ve aşınma direncine bağlı olarak, kaplanmamış temiz yüzeyli bir çelikten üç kat daha düşük olduğunu bildirmişlerdir (Pflitsch *et al.* 2007).

2.4. Düşük Karbonlu Yapı Çelikleri

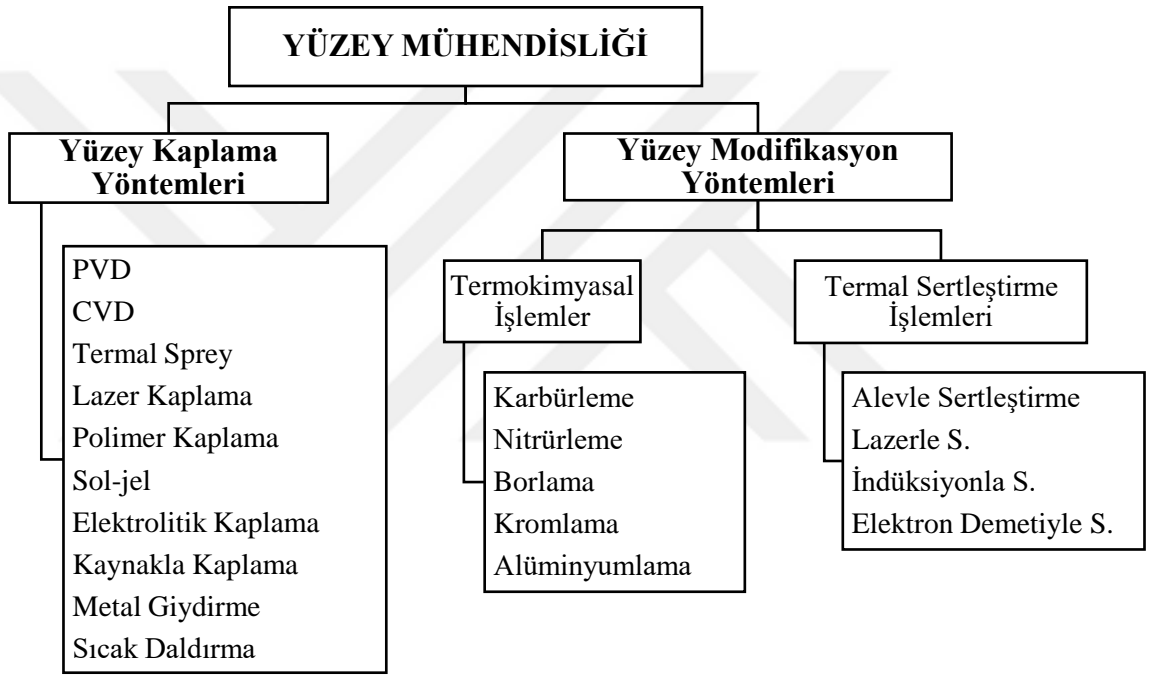
Çelik, temel olarak karbon içeriği ağırlıkça %2'ye kadar olan demir ve karbon alaşımı olarak tanımlanabilmektedir. Çelik, mukavemeti, şekil verilebilirliği, bol miktarda

bulunması ve düşük maliyeti nedeniyle yapısal uygulamalar için kullanılan esas malzemelerden bir tanesidir. Düşük karbonlu çelikler ise %0,20'in altında karbon içeren ve ilk geliştirilen, en ucuz ve en geniş kullanım yelpazesine sahip olan demir-karbon alaşımlarıdır (Schweitzer 2003).

Metaller ve alaşımları, plastikler ve seramikler de dâhil olmak üzere tüm malzemeler korozyona veya bir tür çevresel bozunmaya karşı hassastırlar. Bazı uygulamalar için çoğu zaman birçok malzeme seçimi yapılabilir de, genellikle belirli bir ortama özel ve tatmin edici bir performans gösterebilecek çeşitli malzemeler bulunmaktadır. Uygun malzeme demek, sadece korozyona en yüksek direnç gösteren malzeme anlamına gelmemektedir. Örneğin karbon çelikleri iyi mekanik özellikleri, kaynaklanabilirliği, düşük maliyetleri ve makul derecede korozyona dayanımları nedeniyle en yaygın yapı malzemeleridir. Çelikler, korozif ortamlarda kullanıldıklarında genellikle koruyucu kaplamalarla veya diğer korozyon önleme yöntemleri ile korozyona karşı korunması gerekmektedir. Çünkü korozyon hızı genellikle atmosfere maruz kalmanın ilk yıllarında, sonraki yıllara oranla daha yüksek seviyelerde olacak ve havadaki kirlilik ve nem derecesi ile birlikte önemli ölçüde artacaktır. Nispeten sınırlı korozyon direncine sahip olmalarına rağmen, denizcilik uygulamalarında, nükleer ve fosil yakıtlı enerji santrallerinde, ulaştırma, kimyasal işleme, madencilik, inşaat ve metal işleme ekipmanlarında çok fazla miktarda kullanılmaktadır. Bu alanların tümünde korozyon olayının meydana gelmesi muhtemeldir. Çeliklerin korozyonunu en aza indirmenin iki temel yöntemi mevcuttur. Bunlardan birincisi, reaksiyon fazlarını ayırmak, ikincisi ise reaksiyon fazlarının reaktivitesini azaltmaktır. Reaksiyon fazlarının ayrılması metalik, organik veya inorganik kaplamalar ve yüzeyde film oluşturucu inhibitörler kullanılarak mümkün olmaktadır. Reaktivitenin azaltılması ise anodik veya katodik koruma sistemleri ile gerçekleştirilmektedir (Davis 2000).

Düşük karbonlu çeliklerin korozyon direncini ve diğer özelliklerini iyileştirmek adına birçok uygulama mevcuttur. Bunlar yüzey mühendisliği adı altında bileşenlerin yüzey özelliklerini tasarlamayı ve değiştirmeyi amaçlayan işlemlerdir. Yüzey özelliklerini optimize etmek için kullanılacak iki ana yüzey mühendisliği yöntemi vardır. Bunlar

yüzey kaplamaları ve yüzey modifikasyonlarıdır (Tracton 2006). Yüzey kaplama işlemleri, taban malzemenin bileşiminin değiştirilmesi yerine, yüzey üzerinde bir kaplama tabakası oluşturma esasına dayanmaktadır. Yüzey modifikasyonları ise malzemelerin temel özelliklerinin değiştirilmeden, yüzeylerinde fiziksel ve/veya kimyasal değişimler oluşturulmasıdır (Kennedy *et al.* 2005). Yaygın olarak kullanılan bazı yüzey kaplama ve yüzey modifikasyon yöntemleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Yüzey mühendisliğinde kullanılan bazı yöntemler

Bu çalışma kapsamında düşük karbon içeriğine sahip olan St37 çeliğinin korozyon direncinin artırılması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda çelik yüzeyine bir kaplama işlemi uygulanmıştır. Kaplama malzemesi olarak çelik ile uyumlu olacağı bilinen (Viala *et al.* 2002) alüminyum alaşımları tercih edilmiştir. Kaplama yöntemi olarak sıcak daldırma işlemi uygun görülmüştür. Bu kaplama yönteminin seçilme amacı ilerleyen bölümlerde açıklanmıştır.

2.5. Alüminyum Kaplama Yöntemleri

Alüminyum kaplama, metal olan bir malzeme yüzeyine alüminyumun biriktirildiği bir kaplama işlemidir. Çelik ve alaşımları ticari uygulamalar için alüminyum kaplama işlemine tabi tutulabilecek en yaygın metallerdir. Alüminyum kaplama işlemi, sade karbon çeliği veya çelik alaşımlarının, yüksek sıcaklıklarda (500-800°C) oksidasyona karşı olan dirençlerini arttırmakta ve aynı zamanda hidrokarbonlarda ve sülfürlü atmosferlerde çeliğin korozyon direncini yükseltmektedir. Alüminyum kaplama işlemi, iyi şekil verilebilirliğe sahip, derin çekme özelliğinin ön planda tutulduğu ve fiziki olarak basit kıvrımlar içeren çelik parçalar üzerine uygulanabilen elverişli bir kaplama yöntemidir. Bununla birlikte alüminyum kaplanmış çelikler iyi bir radyan ısı yansıtıcılığına sahip olup 426°C'nin altındaki sıcaklıklara maruz kaldığında radyan ısının %80'ini yansıtabilmektedir (Cotell *et al.* 1994; Isiko 2012).

Endüstriyel anlamda çelik yüzey üzerinde bir alüminyum tabakası elde etmek için kullanılacak birçok teknik mevcuttur. Bunlar şu şekilde sıralanabilir. Elektrolitik kaplama, giydirme ile kaplama (cladding), vakum ile kaplama, spreyle kaplama, gaz ile kaplama, paket kaplama ve sıcak daldırma ile kaplama. Bu alüminyum kaplama yöntemlerinin kısa açıklamaları aşağıda verilmiştir (Awan 2001).

Elektrolitik kaplamada, ya etil bromür ve benzen içerisinde ergimiş alüminyum klorür ya da alüminyum tuzlarının bir karışımından oluşan eriyik elektrolitler kullanılmaktadır. Kaplama işleminden önce kaplama ana malzemesi iyice temizlenir, yağdan arındırılır ve yüzeyi HCl asit çözeltisi ile temizlenir. Bu kaplama işleminde, Al metalinin kaplama ana malzemesi üzerine birikme oranı yavaş olmakla birlikte, yaklaşık 30 dakika içinde 0,01 mm'lik bir kaplama kalınlığı elde edilebilmektedir (Isiko 2012).

Giydirme kaplama (cladding), çelik ve alüminyum levhaların soğuk haddelenmesiyle gerçekleşmektedir. Haddeme işlemi esnasında, alüminyum ve çelik arasında metalik bir bağ meydana gelmektedir. Bu şekilde bimetalik şerit veya tabakalar oluşmaktadır. Kaplama kalınlığı, toplam sac veya levha kalınlığının %2 ila %5 arasındadır ve kaplama

genellikle daha yumuşak ve daha düşük mukavemetli bir yapıda olduğu için kaplamanın varlığı, ürünün yorulma mukavemetini ve aşınma direncini azaltabilmektedir (Cotell *et al.* 1994).

Vakum ile kaplamada, 10^{-3} ila 10^{-5} mmHg'lık basınç değerine sahip olan vakum odası içerisindeki alüminyum buharlaştırıp, kaplama ana malzemesi üzerinde yoğunlaştırma olayı söz konusudur. Alüminyum ergitmek için elektron demetleri kullanılmaktadır. Ayrıca kaplama ana malzemesinin yüzeyinin de 370°C 'ye kadar ısıtılması kaplama adezyonunun daha iyi olmasını sağlamaktadır. Bu durumda kaplama kalınlığı yaklaşık olarak $0,1\ \mu\text{m}$ 'dir (Awan 2001).

Sprey ile alüminyum kaplama, önceden temizlenmiş yüzeye belirli bir kalınlıkta alüminyum eriyiğinin püskürtülmesi esasına dayanmaktadır. Kaplama işlemi, eritilmiş alüminyum metalinin 25-60 psi arasındaki basınçlı hava jeti ile püskürtülmesi sonucu gerçekleştirilmektedir. Elde edilen kaplama adezyonu, kaplama ana malzemesinin yüzey pürüzlülüğünün artırılması ile iyileştirilebilmektedir. Kaplama işleminin ardından uygun süre boyunca $850-1250^{\circ}\text{C}$ arasında gerçekleştirilecek olan bir tavlama işlemi ile kaplama adezyonunun artırılması sağlanabilmektedir (Cotell *et al.* 1994).

Gaz ile alüminyum kaplama yönteminde çelik tabaka, alüminyumun bir gaz fazı olan alüminyum klorür gazı (AlCl_3) ile temasa girdirilir. Bu işlem bir ergitme haznesinde gerçekleştirilir ve gaz karışımının bileşimi %45 saf alüminyum, %45 Al_2O_3 ve %10 AlCl_3 şeklindedir. Ergitme haznesi içerisindeki bu karışım 600°C 'ye ısıtılır. Alüminyum kaplanacak çelik tabaka, haznenin diğer ucuna yerleştirilir ve burada $900-1000^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılır. Sürecin karmaşıklığı ve kayda değer miktarda enerji tüketimi nedeniyle bu yöntem endüstride sık olarak kullanılmamaktadır (Isiko 2012).

Paket alüminyum kaplama, yüksek sıcaklıklarda ($900-1080^{\circ}\text{C}$) gerçekleştirilmektedir. Alüminyum kaplama yapılacak ana kaplama malzemesinin yüzeyi, kir ve pisliklerden temizlenir ve daha sonra alüminyum veya ferro alüminyum tozu ile birlikte hava sızdırmaz ergime haznesinin içerisine doldurulur. Daha sonra hazne 30 saat boyunca

900-1080°C sıcaklık seviyelerine kadar ısıtılır. Bu yöntem pahalı ve zaman alıcıdır. Yalnızca karmaşık şekillerdeki numuneler için önerilmektedir. Paket alüminyum kaplama işlemi çeliklerin yüksek sıcaklık oksidasyon direncini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır (Majumdar *et al.* 2017).

Sıcak daldırmayla kaplama, çelik malzemenin, grafit bir pota içerisinde yaklaşık olarak 600-800°C civarlarında eriyik hale getirilmiş olan Al metali içerisine daldırılması esasına dayanmaktadır. Sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi esasen “ sıcak daldırma ile kaplama” adı altında yapılan tüm kaplama yöntemlerinin uygulama esaslarına göre gerçekleştirilen bir kaplama işlemidir. Kaplama işlemi öncesinde çelik taban malzemeye uygulanan temizleme işlemleri, kaplama esnasında ve sonrasında uygulanan pota içerisindeki eriyik banyodan cüruf alma işlemleri, kaplama banyosunun sıcaklığı, daldırma süresi ve kaplama sonrasındaki soğutma işlemleri gibi uygulamalar, kaplama kalitesini ve kaplama kalınlığını etkileyen en önemli parametrelerdir (Altun 1998; Awan *et al.* 2008).

2.6. Alüminyum Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Çelik yüzeylerin alüminyum ile kaplanmasında uygulanan işlemler arasında bir kıyaslama yapıldığında sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işleminin diğer yöntemlere oranla daha uygun bir teknik olduğu yapılan bazı çalışmalarda görülmektedir. Çizelge 2.2’de beş farklı alüminyum kaplama yöntemi dört parametreye göre sınıflandırılmıştır. En iyi sonuç “1” ile ifade edilmiştir (Bindumadhavan *et al.* 2000).

Çizelge 2.2. Farklı alüminyum kaplama yöntemlerinin karşılaştırılması (Bindumadhavan *et al.* 2000)

Yöntem	Kalınlık (mm)	Maliyet	Ara tabaka yoğunluğu	Kaplamanın devamlılığı
Sıcak daldırma	0,01-0,08	1	2	2
Giydirme	0,01-0,13	2	3	1
Elektrolitik	0,003-0,05	3	1	3
Sprey	0,05-0,5	4	1	4
Paket	0,20-1	3	4	-

Çizelge 2.2'ye göre, sıcak daldırma ile alüminyum kaplama yöntemi, düşük işletme maliyeti, nispeten iyi bir kaplama sürekliliği ve ana kaplama malzemesi ile kaplanan malzeme arasındaki tabakanın sağlamlığı gibi faktörlere bakıldığında diğer yöntemlere kıyasla daha avantajlı bir kaplama yöntemidir. Bu da sıcak daldırma ile alüminyum kaplama yönteminin çeliğin endüstriyel olarak kaplanmasında tercih edilen bir yöntem olmasını sağlamaktadır.

2.7. Sıcak Daldırma ile Alüminyum Kaplama

Bölüm 2.5'de bahsedildiği gibi çelik üzerine alüminyum kaplamak için birçok yöntem mevcuttur. Fakat ısı ve oksidasyon direncinin birincil gereksinim olduğu durumlarda, üstün korozyon direnci, çevresel koruma, ekonomiklik ve seri üretim gibi faktörler göz önüne alındığında sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi oldukça pratik ve elverişli bir yöntemdir (Chang *et al.* 2006; Su *et al.* 2008; Huilgol *et al.* 2013).

Temel olarak bu kaplama yöntemi, gerekli yüzey temizleme işlemlerine tabi tutulmuş çelik parçaların, bir pota içerisinde 600-800°C sıcaklıkları arasında eriyik halde bulunan saf alüminyum veya alüminyum alaşımlarından oluşmuş banyo içerisine belirli süreler ile daldırılması esasına dayanmaktadır. Bu daldırma esnasında, eriyik alüminyum ile temas haline geçen çelik yüzeyi arasında bir difüzyon olayı meydana gelmektedir. Bu difüzyon olayı sıvı alüminyumdan katı haldeki çelik içerisine doğru gerçekleşmektedir. Difüzyon esnasında çelik ile alüminyum tabakası arasında Fe_xAl_y şeklinde intermetalik

fazlar meydana gelmektedir (Bouché *et al.* 1998; Kim *et al.* 2006; Springer *et al.* 2011; Yousaf *et al.* 2011; Takata *et al.* 2015).

Endüstriyel olarak alüminyum kaplanmış çelikler iki sınıfa ayrılabilir. Tip-1 alüminyum kaplanmış çelik olarak adlandırılan grup çelik yüzeyinin, ağırlıkça yaklaşık %9 Si ihtiva eden AA'lar ile kaplanması sonucu üretilmektedir. Bu ürünler genellikle yüksek ısı ve oksidasyon direncinin, derin çekme özelliğinin ve ısı yansıtma özelliğinin ön planda olduğu şartlarda kullanılmaktadır. Tip-2 alüminyum kaplanmış çelik grubu ise çeliğin, ticari saflıktaki alüminyumla kaplanması ile üretilmektedir. Genellikle çevresel koşullarda üstün korozyon direncine sahip ürünlerdir. Günümüz şartlarında sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemleri, ASTM A-463 ve ISO 5000 standartlarına göre uygulanmaktadır (Koçanoğulları 2010).

2.8. Sıcak Daldırmayla Alüminyum Kaplama İşlemine Hazırlık

Kaplama kalitesini ve kalınlığını etkileyen bazı önemli parametreler bulunmaktadır. Bunlar; kaplama işlemi öncesinde çelik taban malzemeye uygulanan temizleme işlemleri, kaplama esnasındaki banyonun sıcaklığı, pota içerisindeki eriyikten cüruf alma işlemleri, daldırma süresi ve kaplama sonrasındaki soğutma işlemleridir.

Yağ Giderme ve Mekanik Temizleme: Ana kaplama malzemesinin yüzeyi, üretim esnasında veya gördüğü diğer işlemler sonrasında yağlardan ötürü kirlenmektedir. Kaplama işlemi öncesinde ana kaplama malzemesinin yüzeyinde bulunan kir, yağ ve oksit tabakalar giderilmelidir. Aksi halde yüzey kirliliklerinin bulunduğu bölgelerde kaplanma tabakası soyulabilmektedir. Yağların giderilmesinde bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar alkali ile temizleme, solvent ile temizleme, buhar ile yağ giderme ve emülsiyon ile temizleme işlemleridir (Yaşar 2009). Yağ giderme işleminin yanı sıra metal yüzeyindeki süreksizlikleri, kirleri ve pasları gidermek amacıyla taşlama, zımparalama ve polisaj gibi mekanik işlemler de uygulanmaktadır.

Banyo Sıcaklığı: Sıcak daldırma ile kaplama işlemi için banyo sıcaklığı kritik bir önem arz etmektedir. Pota içerisindeki eriyik alüminyumun sıcaklığı ne çok düşük olmalı ne de çok yüksek seviyelerden olmalıdır. Örneğin saf alüminyumun ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 640°C'dir. Fakat daldırma işlemi için banyo sıcaklığının yaklaşık olarak 680-720°C civarında olması hem kaplanacak olan çeliğe zarar vermeyecek, hem de kaplama kalitesini olumsuz olarak etkilemeyecektir. Alüminyumun ergime sıcaklığının biraz üzerindeki banyo sıcaklığı, eriyik alüminyumun akıcılığını, kaplanacak malzemenin sıcaklığını ve banyodan çıkarıldıktan sonra numunenin katılaşma süresini etkilemektedir. Sıvı metalin akıcılığının artması, banyodan çıkarılan numunenin üzerindeki fazla metalin daha iyi süzülmesine ve dolayısıyla daha iyi bir dış görünüşlü kaplama meydana gelmesine olanak tanımaktadır. Bunun yanında banyo sıcaklığındaki artış, eriyik alüminyum yüzeyinde oksit oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu oksit tabaka, numune banyodan çıkarılırken numunenin yüzeyine yapışmaktadır. Bu durum sıvı metalin süzdürülmesini engelleyerek istenmeyen bir dış görünüş ve mat bir kaplama oluşmasına sebep olmaktadır (Altun 1998).

Cüruf Alma: Kaplanacak çelik numune, eriyik alüminyum banyosuna daldırılmadan ve banyodan çıkarılmadan hemen önce sıvı alüminyum metalinin üst yüzeyinde meydana gelen oksit tabakası dikkatli bir şekilde alınmalıdır. Böylece daha kaliteli ve düzgün bir kaplama elde edilmiş olacaktır.

Daldırma Süresi: Çelik numune, gerekli ön hazırlık işlemlerinin hemen ardından yüzeyinde herhangi bir oksit tabaka oluşmasına fırsat verilmeden banyo içerisine hızlı ve dikkatli bir şekilde daldırılmalıdır. Daldırma sırasında sıvı metal sıçramasına engel olmak adına gerekli güvenlik önlemleri alınmalıdır. Daldırma hızı kaplama kalitesini ve homojenliğini etkilemektedir. Daldırma süresi, ana kaplama malzemesi ve eriyik alüminyum arasında sağlam bir metalurjik bağ oluşturabilmek adına önemli bir parametredir. Numunelerin boyutlarına bağlı olarak daldırma sürelerinde değişiklikler söz konusudur. Bu sebeple deneysel çalışmalara başlamadan evvel yapılacak araştırmalar sonucunda kullanılacak numune boyutlarına göre optimum daldırma süreleri belirlenmelidir. Örneğin; küçük boyutlu parçalar için 1 dakikalık daldırma

süreleri yeterli olurken büyük boyutlu parçalar için daha yüksek sürelerde daldırmaya ihtiyaç duyulabilmektedir (Altun 1998).

Banyodan Çıkarma ve Soğutma: Homojen bir kaplama tabakasının elde edilebilmesi için banyodan çıkarılan numunelerin üzerlerinde kalan fazlalık durumundaki kaplama sıvısının maksimum seviyede süzdürülmesi gerekmektedir. Düzgün bir kaplama yüzeyi için çoğu numunenin banyodan optimum çıkarılma hızı 0.025 m/s olarak bilinmektedir. Banyodan çıkarılan numuneler genellikle suda, havada, yağda veya fırın içerisinde soğumaya bırakılabilirler. Su verilerek soğutulan kaplamalar, havada soğutulan kaplamalara göre daha üstün korozyon direncine sahiptirler. Suda yapılan soğutma işleminde yapı içerisindeki lameller arası uzaklık azaltılmaktadır. Havada ve suda yapılmış soğutma işlemleri kıyaslandığında bazı kaplamaların korozyon potansiyelleri arasındaki farkın tane büyüklüğündeki değişimden ötürü olduğu belirtilmiştir (Altun 1998; Yaşar 2009).

2.9. Difüzyon

Difüzyon; iyonlar, atomlar, elektronlar, boşluklar ve moleküller gibi herhangi bir türün net akışı anlamına gelmektedir. Bu akışın büyüklüğü, konsantrasyon gradyanına ve sıcaklığına bağlıdır (Askeland *et al.* 2010).

Malzemelerde meydana gelen difüzyon olayı birinci ve ikinci Fick kanunu olarak bilinen bağıntılarla ifade edilmektedir. Birinci Fick kanununa göre yüksek konsantrasyona sahip bölgeden düşük konsantrasyon bölgelerine doğru atom akışı söz konusudur. Birinci Fick kanununa göre difüze olacak olan atomların konsantrasyonlarının mesafe ile olan matematiksel ilişkileri esas alınmaktadır. Birinci Fick kanunu şu eşitlik ile ifade edilmiştir (Savaşkan 1999).

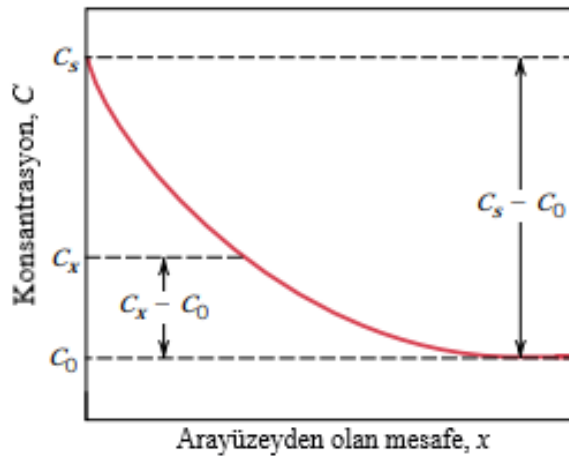
$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2.1)$$

1 numaralı eşitlikte J (atomsal difüzyon akısı) malzemenin birim kesit alanından birim zamanda geçen atom sayısını, D difüzyon katsayısını, C difüzyona uğrayan atomların konsantrasyonunu, x difüzyon mesafesini ve dC/dx 'de konsantrasyon gradyanını ifade etmektedir. Buna ek olarak eşitlikteki negatif işaret, yayınan türlerin akısının yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru olduğunu göstermektedir ve böylece “ J ” pozitif olmaktadır (Savaşkan 1999; Askeland *et al.* 2010).

İkinci Fick kanununda ise bir malzeme kesitindeki atom konsantrasyonunun zaman ve difüzyon mesafesine göre değişimini ifade edilmektedir. Bu değişim şu eşitlik ile gösterilmektedir (Savaşkan 1999).

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (2.2)$$

2 numaralı eşitliğe göre, Şekil 2.2’de de gösterildiği gibi konsantrasyon gradyanının zamanla azalması, başlangıçta yüksek hızlarda devam eden difüzyonun yavaşlamasına sebep olmaktadır (Callister and Rethwisch 2007). Bu da, malzemede homojen bir yapının elde edilmesi için sonsuz bir süreye ihtiyaç olduğu anlamına gelmektedir (Savaşkan 1999).



Şekil 2.2. Kararsız yayımda konsantrasyon profili

Bir metalin başka bir metal içerisindeki yayınmasını gösteren difüzyon katsayısı ise şu eşitlik ile gösterilmektedir.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q_d}{RT}\right) \quad (2.3)$$

3 numaralı eşitlikte D difüzyon katsayısını (m^2/s), D_0 malzemedeki difüzyon katsayısını (m^2/s), Q_d difüzyon için aktivasyon enerjisini (J/mol veya cal/mol), R gaz sabitini [$8,314 J/(mol.K)$ veya $1,987 cal/mol.K$] ve T mutlak sıcaklığı (K) ifade etmektedir (Askeland *et al.* 2010).

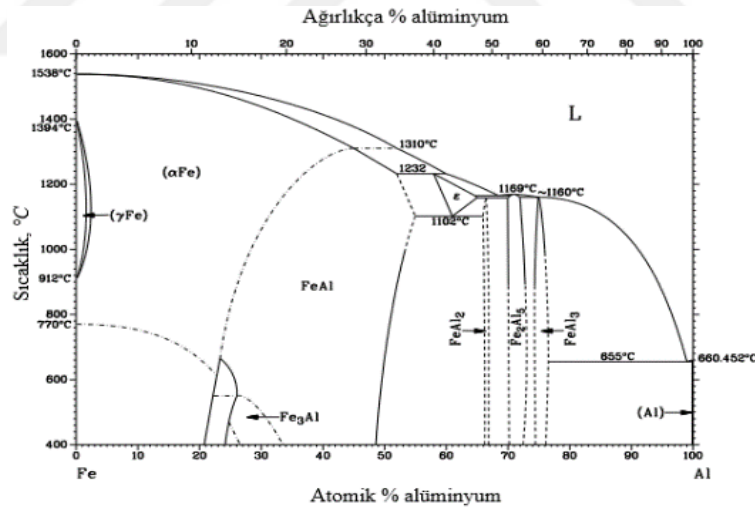
2.10. Difüzyon Tabakasının (İntermetalik) Morfolojisi

Alüminyum ile kaplama işlemi, çeliği korozyondan korumakta ve $900^\circ C$ 'ye kadar olan yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı daha dirençli hale getirmektedir. Bununla birlikte, genellikle $650^\circ C$ 'nin üzerinde gerçekleştirilen kaplama işlemleri, eriyik alüminyum ve çelik malzeme arasında bir intermetalik tabakanın oluşmasına yol açmaktadır (Deqing and Ziyuan 2003). Bu intermetalik tabakanın esas özelliği, sert, kalın ve kırılabilir bir yapıda olmasıdır. Bu da, yapının seramik esaslı olduğunu göstermektedir. Kaplama işlemi sonucunda oluşan bu intermetalik tabaka, çeliğin sünekliğini büyük ölçüde azaltmakta ve bu nedenle bir plastik deformasyon işlemine, biçimlendirmeye veya bükülmeye maruz bırakıldığında, alüminyum kaplanmış çeliklerde mekanik problemler meydana getirebilmektedir. Çizelge 2.3'de, $25^\circ C$ 'de standart entalpi (ΔH^0) ve entropi (ΔS^0) değişiklikleri ve $700^\circ C$ 'de Fe-Al fazlarının oluşumuna eşlik eden Gibbs serbest enerji (ΔG) değişiklikleri gösterilmektedir. Çizelge 2.3'te, Al ile zengin $FeAl_3$ ve Fe_2Al_5 gibi intermetalik bileşiklerde, yüksek değerli negatif standart oluşum entalpisi ve enerji değişimlerinin meydana geldiği görülmektedir. Bu nedenle daha kolay oluşmaktadır. Ancak $FeAl$, $FeAl_2$, $FeAl_3$ ve Fe_3Al yapılarının da mevcut olduğu belirtilmektedir (Bindumadhavan *et al.* 2000).

Çizelge 2.3. Fe-Al fazlarının oluşumuna eşlik eden ΔH° , ΔS° ve ΔG değerleri (Bindumadhavan *et al.* 2000)

Faz	ΔH° (1/mol.K)	ΔS° (1/kJ.mol)	ΔG (1/kJ.mol)
θ -FeAl ₃	-112.5	95.6	-22.8
η -Fe ₂ Al ₅	-194	166.7	-19.6
ξ -FeAl ₂	-81.9	73.3	-16.9
α -FeAl	-51.2	51	-11
Fe ₃ Al	-57.3	28	-4.8

Şekil 2.3'teki Fe-Al ikili denge diyagramında gösterildiği gibi, FeAl₂, FeAl₃, Fe₂Al₅, FeAl ve Fe₃Al'yi içeren beş farklı intermetalik bileşik oluşturmak için Fe ile Al belirli koşullar altında reaksiyona girmektedir (Isiko 2012).

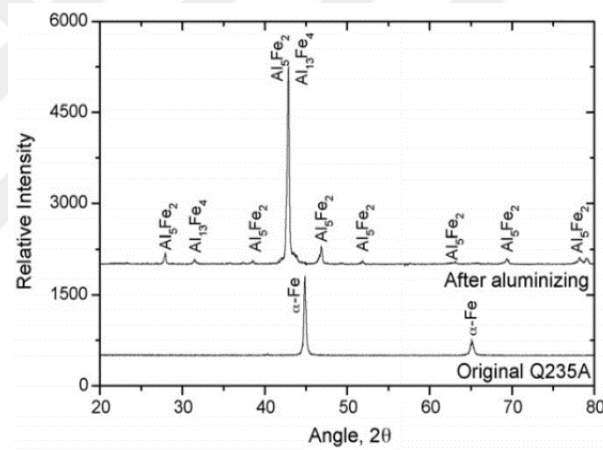


Şekil 2.3. Fe-Al denge diyagramı (Marker 2013)

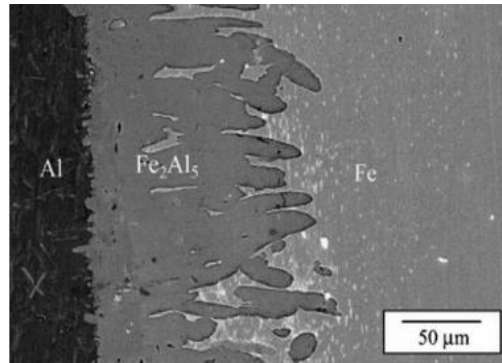
Yüksek alüminyum içeriğine sahip FeAl₂, FeAl₃ ve Fe₂Al₅ gibi intermetalik bileşikler kırılgandır ve mekanik olarak problemler oluşturmaktadır (Pradhan *et al.* 2014). Bunun aksine, yüksek demir içeriğine sahip Fe₃Al ve FeAl fazları iyi aşınma direnci, yüksek mukavemet, iyi oksidasyon ve korozyon direnci gösterdikleri için yapı malzemeleri olarak kullanılabilirler (Johnson *et al.* 1990). Bu nedenle, Fe₃Al ve FeAl katmanlarının

büyümesinin tercih edilmesi, kırılma tokluğunu, oksidasyon direncini ve alüminyum kaplanmış çeliğin mukavemetini iyileştirebilmektedir (Isiko 2012).

Şekil 2.4, yapılan bir çalışmada XRD analiz sonucunda, intermetalik tabakanın baskın fazının Fe_2Al_5 olduğu bildirilmektedir. Şekil 2.5’de ise yüzey morfolojisinin SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 2.5’de Fe ile Al arasında oluşan intermetalik tabaka, çelik içerisine doğru ilerlemiş ve iğnemi bir şekilde büyüme göstermiştir (Deqing 2008). Fe_2Al_5 ’in bu ortogonal kafes yapısı yüksek sertliğe fakat boşlukların ve çatlakların neden olduğu dengesiz bir yapıya sahip olduğu için dış kuvvetler altında kırılma eğilimine sebep olabilmektedir (Mehrer *et al.* 1997).



Şekil 2.4. Q235A çeliğinin XRD pikleri (Deqing 2008)

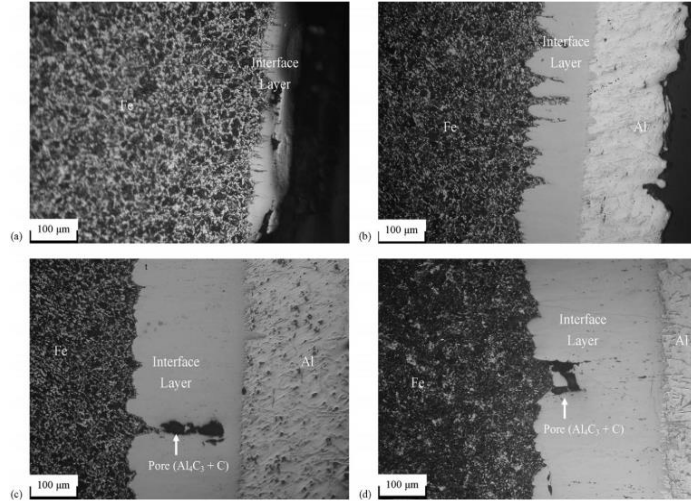


Şekil 2.5. Alüminyum kaplanmış çeliklerin SEM görüntüleri (Deqing 2008)

$FeAl_2$, $FeAl_3$ ve Fe_2Al_5 gibi intermetalik bileşiklerin kırılma sebepleri kalınlıklarından kaynaklanmaktadır. İntermetalik tabaka kalınlığını mümkün olduğunca azaltmak, deformasyon sırasında ve gerilme durumlarında daha iyi bir performans olarak sağlayabilmektedir. Bu da, daldırma süresinin azaltılmasıyla, banyo sıcaklığının düşürülmesiyle veya alüminyum içeriğinin değiştirilmesiyle elde edilebilmektedir (Isiko 2012).

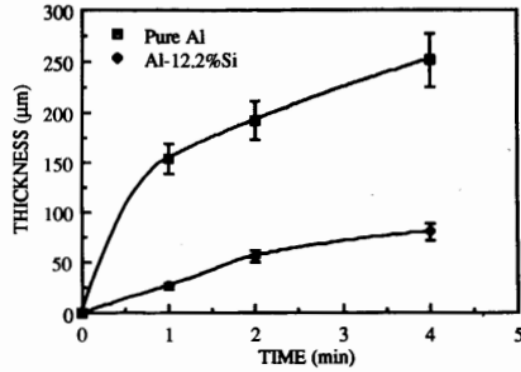
2.11. Daldırma Süresinin İntermetalik Tabakaya Etkisi

T.-S. Shih ve S.H. Tu yaptıkları bir çalışmada, daldırma süresinin intermetalik tabakanın büyüme kinetiği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Şekil 2.6, a-d arası sırasıyla 10, 20, 40 ve 60 dakikalık daldırma süreleri için, 1040 çelik ile saf Al arasındaki intermetalik tabakayı ve büyümesini göstermektedir. Kısa daldırma süreleri için, intermetalik tabakanın kalınlığı önemli ölçüde değişmiştir. Bazı bölgelerde daha kalın bir intermetalik tabaka oluşurken bazı yerlerde de Şekil 2.6.a'da gösterildiği gibi çok ince bir yapıda olduğu görülmüştür. Daldırma süresi arttıkça, ara tabaka daha düzensiz bir hale gelmiş ve Şekil 2.6.b'de parmak benzeri bir morfoloji ortaya çıkmıştır. Daldırma süresindeki daha fazla artış, düzensiz ara tabakanın daha pürüzsüz hale gelmesine neden olmuştur fakat Şekil 2.6.c'de gösterildiği gibi, intermetalik tabakada gözenekler meydana gelmiştir. Ara tabaka Şekil 2.6.d'de görüldüğü gibi 60 dakika gibi çok uzun bir daldırma süreleri için daha da kalınlaşmıştır. Sonuç olarak intermetalik tabaka ile çelik arasındaki ara yüzeyin morfolojisi daldırma süresine bağlı olarak farklılık göstermektedir (Shih and Tu 2007).



Şekil 2.6. Farklı daldırma sürelerinde (a=10', b=20', c=40', d=60') 1040 çelik ve saf alüminyum arasındaki intermetalik tabakanın gelişimi (Shih and Tu 2007)

Akdeniz ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada saf Al ile ve %12,2 Si içeren Al ile kaplanan çelik numunelerin, daldırma sürelerine göre intermetalik tabaka kalınlıkları arasındaki ilişki Şekil 2.7'de verilmiştir (Akdeniz *et al.* 1994)

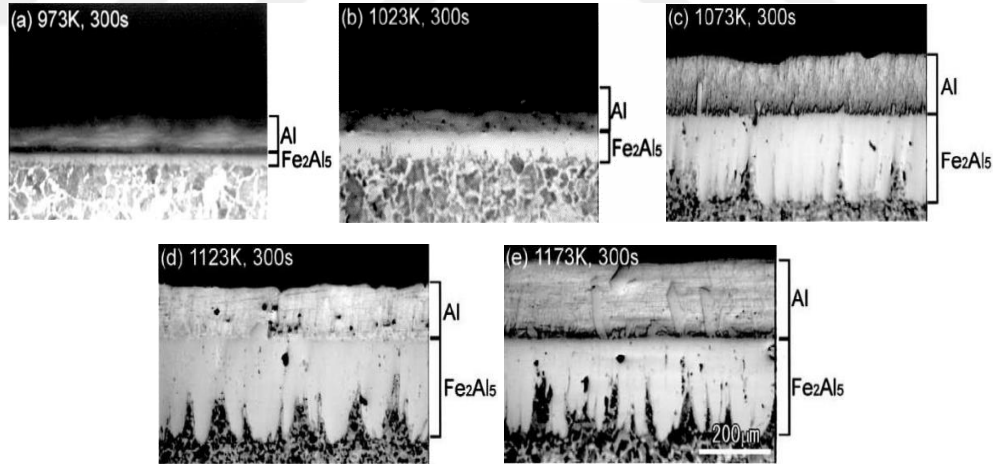


Şekil 2.7. Daldırma süresinin intermetalik tabaka kalınlığı üzerine etkisi (Akdeniz *et al.* 1994)

Şekil 2.7 incelendiğinde, daldırma süresinin artmasıyla beraber saf Al ile kaplanmış çeliğin intermetalik tabaka kalınlığı hızlı bir şekilde artarken, %12,2 Si içeren Al ile kaplanan çeliğin intermetalik tabaka kalınlığı daha az artış göstermiştir.

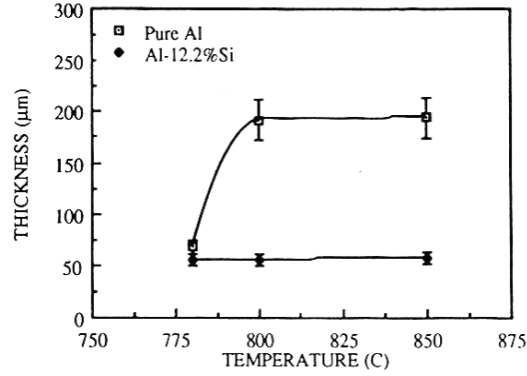
2.12. Banyo Sıcaklığının İntermetalik Tabakaya Etkisi

Sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işleminde banyo sıcaklığının, çelik ve alüminyum arasındaki intermetalik bileşikler üzerindeki etkisi üzerine 700-900°C arasındaki sıcaklıklarda ve 5 dakikalık daldırma süresinde bir çalışma yapılmıştır. Şekil 2.8, çalışılan numuneler için enine kesitleri göstermekte ve tüm kaplama katmanlarının iki fazdan (Al ve Fe₂Al₅) oluştuğu görülmektedir. Kaplama kalınlığının daha yüksek kaplama sıcaklıkları ile birlikte arttığını bildirilmişlerdir. Oluşturulan iki katmanın kalınlıkları kıyaslandığında, yüzeydeki alüminyum katmanının 100 ila 200 µm arasında büyüdüğü bildirilmiştir. Alüminyum ve çelik altlık arasındaki Fe₂Al₅ tabakası, parmak benzeri morfolojisi nedeniyle düzensizdir. Fe₂Al₅ tabakasının kalınlığının düzensizliği, daldırma sıcaklığının artmasıyla artmaktadır (Kobayashi and Yakou 2002). Yapılan bu çalışmadaki sonuçlar, diğer literatür çalışmaları ile benzemektedir (Eggeler *et al.* 1986; Bouché *et al.* 1998).



Şekil 2.8. 5 dakika süreyle, a=700°C, b=750°C, c=800°C, d=850°C ve e=900°C'de eriyik alüminyum içerisine daldırılmış numunelerin kesit görüntüleri (Kobayashi and Yakou 2002)

M. Akdeniz ve arkadaşları tarafından yapılan saf Al ile ve %12,2 Si içeren Al ile kaplanan çelik numunelerin banyo sıcaklığına göre intermetalik tabaka kalınlıkları arasındaki ilişki Şekil 2.9'da verilmiştir (Akdeniz *et al.* 1994).

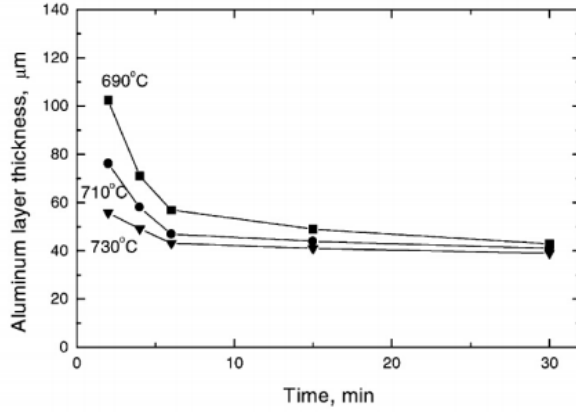


Şekil 2.9. Kaplama banyosunun sıcaklığının intermetalik tabaka kalınlığı üzerine etkisi (Akdeniz *et al.* 1994)

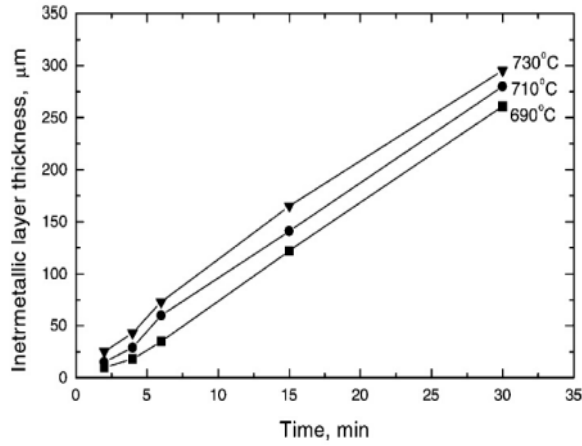
Şekil 2.9 incelendiğinde banyo sıcaklığının artmasıyla beraber saf Al ile kaplanmış çeliğin intermetalik tabaka kalınlığı hızlı bir şekilde artarken, %12,2 Si içeren Al ile kaplanan çeliğin intermetalik tabaka kalınlığı neredeyse sabit kalmıştır.

2.13. Banyo Sıcaklığının ve Daldırma Süresinin İntermetalik Tabakaya Etkisi

Alüminyum kaplanmış çelikteki intermetalik yapının ve alüminyum kaplama tabakasının kalınlığı sıcaklığa ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Deqing ve arkadaşları, çelik numuneler üzerinde alüminyum kaplama işlemi gerçekleştirmiştir. Çelik numuneler eriyik alüminyum içerisinde farklı banyo sıcaklıklarında tutulmuştur. Daha sonra, çelik numuneler farklı daldırma sürelerinde eriyik alüminyum içerisine daldırılmıştır. Şekil 2.10, alüminyum tabaka kalınlığı üzerindeki sıcaklık ve zaman etkilerini göstermektedir. Daldırma süresi arttıkça, her farklı banyo sıcaklığında alüminyum tabakanın kalınlığı değişmektedir. Zaman sabit tutulduğunda alüminyum tabakanın kalınlığı banyo sıcaklığındaki artış ile azalmaktadır. 30 dakika sonrasında ise zaman ve sıcaklık kalınlığı etkilememektedir. Şekli 2.11’de ise sıcaklık ve daldırma süresi arttıkça, intermetalik tabakanın kalınlığı artmaktadır. Sıcaklıkta ve zamanda bir artış söz konusu olduğunda difüze olan alüminyum atomlarının artacağı görülmektedir (Deqing *et al.* 2003).



Şekil 2.10. Banyo sıcaklığının ve zamanın alüminyum tabakanın kalınlığına etkisi (Deqing *et al.* 2003)



Şekil 2.11. Banyo sıcaklığının ve zamanın intermetalik tabaka kalınlığına etkisi (Deqing *et al.* 2003)

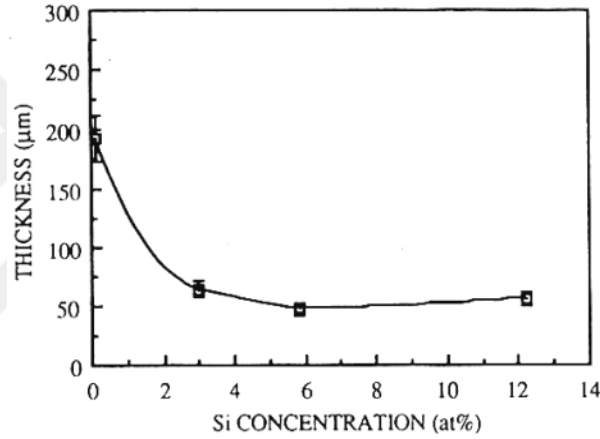
2.14. Alüminyumdaki Silisyum İçeriğinin İntermetalik Tabakaya Etkisi

Eriyik bir alüminyum banyosu içerisinde Si ilavesi sonucu intermetalik tabakanın kalınlığı ve morfolojisinin değiştiği ve alüminyum ile çelik arasındaki ara yüzün daha düzgün hale geldiği bildirilmiştir (Eggeler *et al.* 1986; Akdeniz *et al.* 1994; Akdeniz and Mekhrabov 1998; Kobayashi and Yakou 2002; Wang and Chen 2006; Awan and Ul Hasan 2008; Cheng and Wang 2011; Huilgol *et al.* 2013).

Sundqvist ve Hogmark, alüminyum banyosu içerisinde Si ilavesinin sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işleminde Fe_2Al_5 intermetalik fazının büyümesini engellediğini bildirmiştir (Sundqvist and Hogmark 1993). W. Deqing ve arkadaşları, Fe_2Al_5 'in kristal kafes yapısının ortorombik olduğunu ve maksimum atom konsantrasyonunun %70 olduğunu söylemişlerdir. Bu da yapı içerisinde %30'luk bir boşluk olduğunu göstermektedir. Buna göre Si atomlarının bu boşlukları işgal edebileceğini ve Al atomlarının Fe_2Al_5 fazı boyunca difüzyonu azaltmada yardımcı olabileceğini varsaymışlardır (Deqing *et al.* 2003). Yousaf, Si'nin Fe_2Al_5 fazının difüzyon koşullarını değiştirme yeteneğine sahip olduğunu ve katı hal büyümesini azalttığını bildirmiştir. Kaplama banyosuna Si ilavesinin, başlangıçta demir içermeyen alüminyum eriyiklerinde demir zenginleştirme hızını arttırdığını bildirmiştir. Bu demir, serbest alüminyumla birleşerek Al atomlarının çeliğe doğru difüzyonunda azalmaya neden olur ve dolayısıyla intermetalik tabakanın büyümesini azaltan yeni fazlar meydana gelmektedir. Yapılan ağırlık kaybı testleri sonucunda Si içeren alüminyum eriyiklerinin ağırlık kaybının Si içermeyen alüminyum eriyiklerine göre daha fazla olduğu bildirilmiştir. Buna göre silisyumun demir çözünmesini arttırdığı sonucuna varılmıştır (Yousaf 2011). G. Eggeler ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada ağırlıkça %0.18 C içeren düşük karbonlu çeliği sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi sırasında, Si'nin intermetalik tabakanın büyümesi üzerindeki etkisini incelemek için alüminyum içerisinde %2 Si ilave etmişlerdir. Silisyumun katı halde hareket ettiğini ve sıcak daldırma ile alüminyum kaplama yapıldıktan sonra intermetalik tabakanın kalınlığını azalttığını elde etmişlerdir (Eggeler *et al.* 1986). Springer ve arkadaşları alaşım elementlerinin Fe ve Al eriyikleri arasındaki reaksiyon katmanının büyümesi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmada alüminyum içerisinde ağırlıkça %2,5 Si ilavesinin intermetalik reaksiyon tabakasındaki görünür kalınlığı yaklaşık olarak 3 kat azalttığını gözlemlemişlerdir. Kaplama sonrasında Si etkisinin daha da belirgin bir hale geldiği bildirilmiştir (Springer *et al.* 2011). Genel olarak kırılgen ara tabaka kalınlığını azaltmak için Si, alüminyum banyosuna ağırlıkça %1 ile 10 arasında değişen miktarlarda eklenmektedir. Bu ilave, intermetalik tabakaların, özellikle de Fe_2Al_5 tabakasının kalınlığını azaltmaktadır (Lemmens *et al.* 2014). Silisyum içeriğinde %3'den daha fazla bir artış, ara katmanın kalınlığını azaltmada sınırlı bir etkiye sahiptir. Kaplamanın sünekliği/şekil verilebilirliği, ara tabakanın kalınlığındaki azalma ile

birlikte artmakta ve şekillendirme sırasında kaplama soyulmadan üretim tamamlanabilmektedir (Awan *et al.* 2008). Bunun yanı sıra Al-Fe-Si yapısındaki intermetaliklerin oluşabilme ihtimalleri de çoğu bilimsel çalışmada bildirilmiştir. (Hwang *et al.* 2005; Shih and Tu 2007; Rodriguez-Calvillo *et al.* 2010).

Şekil 2.12, alüminyum banyosundaki Si içeriğinin, ara tabaka kalınlığı üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 2.12 incelendiğinde, artan Si içeriğiyle birlikte intermetalik tabaka kalınlığında bir azalma meydana gelmektedir (Akdeniz *et al.* 1994).



Şekil 2.12. Silisyum içeriğinin intermetalik tabaka kalınlığı üzerine etkisi (Akdeniz *et al.* 1994)

2.15. Çelikteki Karbon İçeriğinin İntermetalik Tabakaya Etkisi

Çelik alt tabakanın karbon içeriğindeki değişiklikler ve kaplama banyosunun kompozisyonu sıcak daldırma ile alüminyum kaplama işlemi sırasında oluşan intermetalik tabakanın büyümesi ve morfolojisi üzerine belirgin bir etkiye sahip olmaktadır. Shih ve arkadaşları, düşük karbon içerikli çeliğin, hem kısa hem de uzun daldırma sürelerinde intermetalik tabakanın kalınlığını arttırdığını bildirmişlerdir. Çalışmada çelik numunesi olarak 1020 ve 1040 çelikler karşılaştırılmıştır. 1020 çeliği, 1040 çeliğine göre hem daha düşük karbon içeriğine, hem de daha yüksek bir ferrit oranına sahiptir. 1020 çeliğinin daha yüksek ferrit oranına sahip olması eriyik

alüminyum ile çelik arasındaki reaksiyonu daha kolay hale getirerek oluşan intermetalik tabakanın daha kalın olmasına sebep olmaktadır. Çizelge 2.4’de, saf alüminyum ile kaplanmış çelik numunelerin intermetalik katmanlarının kalınlığı gösterilmektedir (Shih and Tu 2007).

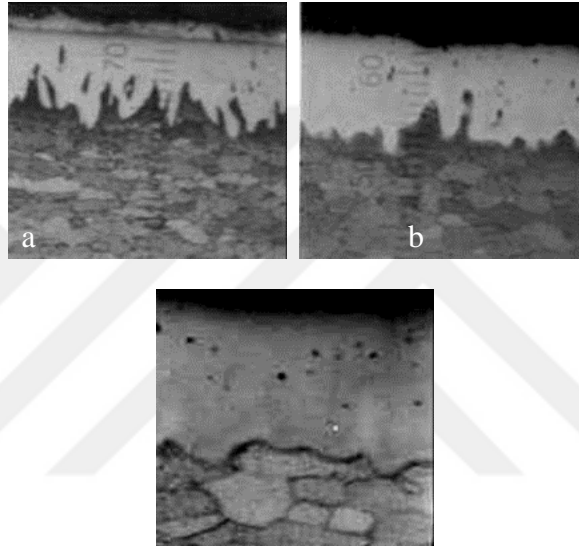
Çizelge 2.4. Çelikteki karbon içeriğinin intermetalik tabaka kalınlığına etkisi (Shih and Tu 2007)

Daldırma Süresi (dakika)	Kalınlık (μm) (Ç1020)	Kalınlık (μm) (Ç1040)
3	-	16-22
10	82-136	45-50
20	91-200	114-136
40	200-318	227-236
60	291-336	264-282

2.16. Oksidasyon Direnci

Oksidasyon, oksijen ile metalin reaksiyona girerek metal-oksit formu oluşturması olarak ifade edilebilmektedir. Birçok metal ve metal alaşımı, atmosferik şartlarda termodinamik olarak kararsız olduklarından dolayı yüzeylerinde ince koruyucu bir oksit filmi oluşturarak düşük sıcaklıklarda taban malzemenin daha fazla oksidasyona uğramasını önlemektedir (Parlakyiğit 2013). Düşük karbonlu çelikler 550°C’ye kadar kullanılabilir. Fakat bu sıcaklığın üzerinde wüstit fazının oluşması ve büyümesi sonucunda kabuk oluşumu meydana gelmekte ve çeliğin bozulmasına sebep olmaktadır. Alüminyum kaplanmış çelikler ise, yüksek sıcaklık direncine sahiptirler. Bu direnç çelik ile dış alüminyum katman arasındaki intermetalik tabakalara dayandırılmaktadır (Koçanaoğulları 2010). Sıcak daldırma ile alüminyum kaplanmış çeliklerin yüksek sıcaklık oksidasyon dirençlerinin incelenmesi üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır. Kaplanmış çelik numunelerin çelik, alüminyum ve intermetalik tabakalardan oluştuğu bildirilmiştir. Şekil 2.13’de kaplama numunelerine farklı sürelerde 800°C’de difüzyon tavlama gerçekleştirilmiştir. Yapıda var olan intermetalik tabakanın parmak benzeri

yapıdan zamanla daha pürüzsüz bir hale geldiği ve kalınlığının değiştiği bildirilmiştir. Difüzyon tabakasındaki intermetalik fazların mikro sertlik ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncini arttığı bildirilmiştir. Ayrıca Al kaplanmış ve kaplanmamış numunelere farklı süreler ile oksitleme işlemi uygulamışlardır. Al kaplanmamış yapı çelikleri oksidasyondan ciddi miktarda etkilenirken, Al kaplanmış yapı çeliklerinin kayda değer bir ağırlık artışı göstermediği bildirilmiştir (Pasinli ve Köksal 2009).



Şekil 2.13. a)Al kaplanmış yapı çeliği, b)Al kaplanmış+800°C’de 1 saat difüzyon tavlaması, c)Al kaplanmış+800°C’de 6 saat difüzyon tavlaması (Pasinli ve Köksal 2009)

Metallerin oksitlenmesinden dolayı ağırlık artışları kıyaslanarak metal ve metal alaşımlarının oksidasyon direnci hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. Ağırlık artışı bazı durumlarda lineer, bazı durumlarda ise parabolik olarak gerçekleşmektedir. Ağırlık artışlarına bağlı, oksidasyon sabiti, (K_p) aşağıdaki denklemden faydalanılarak hesaplanmaktadır.

$$\left(\frac{\Delta W}{A}\right)^n = K_p t \quad (2.4)$$

4 numaralı eşitlikte, K_p oksidasyon sabitini, ΔW ağırlık artışını, A yüzey alanını, t zamanı, n ise bir sabiti simgelemektedir. Lineer izotermal oksidasyon sabitini

hesaplamak için $n=1$, parabolik izotermal oksidasyon sabitini hesaplamak için $n=2$ olarak alınmaktadır. Ağırlık artışı-zaman grafiğinin eğimi oksidasyon sabitini vermektedir (Ata 2018).

2.17. Korozyonun Tanımı, Önemi ve Oluşumu

Korozyon, malzemelerin buldukları çevre içerisinde kimyasal ya da elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda bozularak doğadaki kararlı hallerine dönüşme eğilimi olarak tanımlanabilir. Bu durum, malzemelerin buldukları halden daha düşük bir enerji seviyesine dönmek için kimyasallar ile birleşmek istemesi ile açıklanabilir. Malzemeler bu dönüşümü gerçekleştirebilmek için genellikle doğal ortam içerisinde bulunan oksijen (O_2) ve su (H_2O) ile birleşerek oksitli veya hidroksitli bileşikler oluştururlar. Bu durum tüm malzemelerde geçerli olduğu gibi özellikle de metalik malzemelerde çokça görülmektedir (Stansbury and Buchanan 2000; Roberge 2008; Yalçınkaya 2008).

Korozyon olayı çevreye bağlı olarak kimyasal ve elektrokimyasal olarak sınıflandırılabilir. Kimyasal korozyon, sıvı yokluğunda ve ortamın çığlenme noktasının üzerinde genellikle paslandırıcı yapıda bulunan buharlar ve gazlar tarafından yüksek bir sıcaklıkta meydana gelmektedir. Elektrokimyasal korozyon ise bir sıvı varlığında ortaya çıkar ve genellikle sulu bir solüsyon veya elektrolit içerir. Çoğu endüstriyel alanda elektrokimyasal korozyon olayına rastlanabilmektedir. Elektrokimyasal korozyon olayının çokça gerçekleşmesinin sebebi, atmosferde bulunan çözünmüş su buharından kaynaklanmaktadır (Davis 2000; Roberge 2000; Stansbury and Buchanan 2000). Genel olarak sulu ortamlardaki metallerin korozyonu elektrokimyasal proseslere atfedilmiştir. Yani metallerin elektrokimyasal korozyonu, anodik bir oksidasyon ve katodik bir redüksiyon reaksiyonunun kombinasyonu olarak tanımlanmıştır (Wagner and Traud 2006).

Korozyon Mekanizması, bir maddenin yüzeyinde gerçekleşen atomik, moleküler veya iyonik taşınım işlemidir. Korozyon hızı doğrudan atomik bir ölçekte gözlenemediğinden, dolaylı ölçümler ve gözlemler yapılmalıdır. Numunelerin, ağırlık

veya boyut değişikliğine, ortamdaki korozyon ürünlerinin oluşma oranına, mikroskopta incelenen yüzey görüntülerindeki değişikliklere veya fiziksel değişikliklere bakılarak korozyon mekanizması hakkında fikir sahibi olunabilir. Sonuç olarak korozyon olayında metal ve metal alaşımlarının, metalik bir durumdan metalik olmayan bir duruma geçişi söz konusudur. Metal, düşük enerjili bir duruma dönüşürken sistemin enerjisinde bir düşüş meydana gelmektedir. Sistemin enerjisindeki değişim, termodinamiğin yasalarına göre davranan korozyon işleminin itici bir gücünü nitelemektedir (Davis 2000; Stansbury and Buchanan 2000).

Bir ortamda korozyon olayının gerçekleşmesi için anot, katot ve elektrolit olmak üzere üç unsur bulunmalıdır. Elektrolit, korozyon olayının gerçekleşebilmesi için bulunması gereken elektriksel olarak iletken olan bir çözeltilerdir. Elektrotlar ise anot ve katot olmak üzere farklı metallere veya farklı elektrokimyasal gerilime sahip bölgeleri olan aynı metalden oluşabilmektedir. Korozyon, iki elektrot arasındaki elektrik potansiyelinde bir fark olduğu takdirde meydana gelmektedir (Aribo 2014; Ismail 2014).

2.18. Korozyon Türleri

Korozyon problemleri, korozyon hasarının görünümüne veya saldırı mekanizmasına göre şu şekilde sıralanabilmektedir: üniform, galvanik, çatlak, taneler arası, çukurcuk, aralık, alaşımsızlaşma, hidrojen gevrekliği ve erozif korozyon. Her bir korozyon türü için süreç oldukça karmaşıktır, pek çok faktörü barındırmakla beraber metalin türüne ve özel çalışma koşullarına göre değişebilmektedir (Jones 1992). Aşağıda yaygın olan bazı korozyon türleri açıklanmıştır.

Üniform korozyon, tüm yüzey alanı veya toplam alanın büyük bir kısmı boyunca eşit bir şekilde ilerleyen korozyon türüdür. Genellikle bir korozyon sürecinin bu şekilde ilerlemesi istenir. Bu tür bir korozyonun ölçümü ve öngörüsü diğer korozyon türlerine nispeten çok daha kolaydır. Çoğu durumda, yalnızca görünüş açısından bir sakınca söz konusudur. Korozyon, metalin tüm yüzeyinde düzgün bir şekilde oluştuğundan, katodik

koruma, kaplama uygulamaları veya boyalar kullanılarak kontrol edilebilmektedir. (Jones 1992; Yalçın ve Koç 1998).

Galvanik korozyon, birbirinden farklı iki metalin korozif bir ortama daldırılması ve elektriksel bir bağ ile bağlanması sonucunda oluşan galvanik pil mekanizması olarak tanımlanabilmektedir. Bu metallere elektrot potansiyeli elektronegatif bölgeye daha yakın olan metal anot görevi görür ve korozyona uğrar. Metallerden diğeri ise katot olarak davranır ve daha soy bir metal olduğu için korozyona uğramaz. Korozyon olayı iki metal arasında oluşan potansiyel farka bağlıdır. (Jones 1992; Yalçın ve Koç 1998).

Çatlak korozyonu, malzeme yüzeyinde oluşmuş bir çatlak, dar bir aralık veya iki plaka arasında kalmış durgun bir boşluğa elektrolit transferinin zorlaşması sonucunda oluşmaktadır. Bu yüzeylerdeki korozyon hızı diğer bölgelere nazaran daha fazladır. Elektrolit akışının yavaş bir şekilde ilerlemesi bu bölgedeki oksijen konsantrasyonunda bir azalma meydana getirmektedir. Bu da çatlak ile çatlak çevresi arasında bir oksijen konsantrasyonu farkına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda çatlak bölgesi anot, çatlağın çevresinde kalan yüzeyler ise katot olarak davranır. Böylece yüzeyinde çatlak olan malzemelerde korozyon meydana gelir (Jones 1992; Yalçın ve Koç 1998).

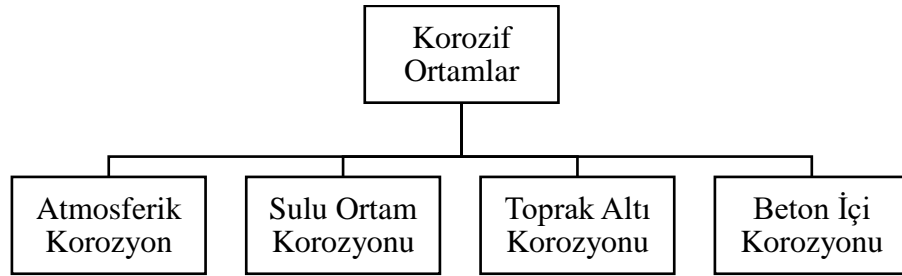
Taneler arası korozyon, malzemelerin kristal yapılarının etkili olduğu bir korozyon tipidir. Örneğin eriyik haldeki bir metal soğumaya bırakıldığında kristaller katılaşmaya başlarlar ve sınır çizgileri ile birbirlerinden ayrılırlar. Bazı taneler arası bölgeler düzensiz bir şekilde katılaştığında bu bölgeler korozyona en dayanıksız bölge haline gelirler. Taneler arası korozyon olayının gerçekleşme sebepleri genellikle homojen olmayan katılma veya tane sınırlarında biriken safsızlıklardır (Jones 1992; Yalçın ve Koç 1998).

Çukurcuk korozyonu, metalik yüzeylerin herhangi bir noktasında oluşan bir çukur sonucu ortaya çıkan korozyon tipidir. Bu korozyon türünde katot ve anot bölgeleri birbirlerinden tamamen ayrılmış haldedir. Anot, metalik yüzeyde oluşmuş çukurun içerisindeki dar bir bölgeyi temsil ederken, katot ise çukurun çevresindeki çok geniş bir

alanı temsil etmektedir. Oluşan korozyon sonucu çukur zaman geçtikçe genişleyerek metalin o noktadan kısa bir süre içerisinde delinmesine neden olmaktadır. Çukurcuk korozyonu, tahmin edilmesi ve karşı koyulması zor bir korozyon türü olduğundan diğer korozyon hasarlarına göre daha tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir (Jones 1992; Vargel 2004).

2.19. Koroziif Ortamlar

Korozyon olayının meydana gelmesi için ortamda gerekli olan esas etmen elektrolit varlığıdır. Korozyon olayı yalnızca su ihtivalı ortamlarda değil atmosferik şartlarda, zemin içerisinde ve beton içerisindeki nemden dolayı da gerçekleşebilmektedir. Örneğin atmosferik ortamlarda bulunan depolar ve tanklar, toprak altında bulunan boru hatları, beton içerisinde bulunan yapı çelikleri ve denizsel ortamlarda bulunan gemiler, iskele ve köprü ayakları korozyondan etkilenen bazı ekipman ve malzemelerdir. Değişik ortamlarda, metal yüzeyine oksijen difüzyon hızının aynı olmaması, korozyon hızını ve bırakacağı etkiyi de değiştirmektedir. Korozyona sebep olan ortamlar ana hatlarıyla Şekil 2.14'deki gibi gösterilebilir (Yalçın ve Koç 1998; Roberge 2000).



Şekil 2.14. Koroziif ortamlar (Yalçın ve Koç 1998)

Atmosferik Korozyon: Köprüler, çatılar, depolar ve birçok atmosfere açık yerlerde bırakılan metaller zaman içinde korozyona uğramaktadırlar. Bu tür ortamlarda etkili olan faktörler şu şekilde sıralanabilir; sıcaklık, katı parçacıklar (toz, is, pas), klorürler, kükürt oksitler ve rutubet (Yalçın ve Koç 1998). Elektrokimyasal korozyon işlemleri için elektrolitin varlığı temel bir gereksinimdir. Belirli bir kritik nem seviyesine

ulaşıldıktan sonra atmosferik koşullar altında metalik yüzeylerde korozyon meydana gelmesi muhtemeldir. Demir için, kritik nemin kükürt dioksit içermeyen bir atmosferde %60 olduğu bilinmektedir. Kritik nem seviyesi sabit değildir ve aşındırıcı malzemeye, korozyon ürünlerinin ve yüzeyin nemi absorbe etme eğilimine ve atmosferik kirleticilerin varlığına bağlıdır. Atmosferik korozyon anodik ve katodik reaksiyonların dengelenmesi ile ilerlemektedir (Roberge 2000).

Sulu Ortam Korozyonu: Su iletim tesisleri, borular, soğutma suyu sistemleri, kazanlar, valfler, buhar türbinleri, gemi gövdeleri, pervaneler, iskele ve köprü ayakları gibi bir çok endüstriyel ekipman ve malzeme su ile temas etmekte ve korozyona uğrayabilmektedir. Sulu ortam korozyonuna etki eden faktörler; oksijen konsantrasyonu ve çözülmüş oksijen miktarı, pH değeri, sıcaklık, iletkenlik, fouling etkisi (hayvan ve bitkiler) ve çözülmüş tuzlardır. Su altı korozyonu, tatlı su içinde korozyon ve deniz suyu içinde korozyon olarak iki grupta toplanabilmektedir. Tatlı sularda ve denizsel ortamlarda korozyon, su içinde çözülmüş oksijen miktarı ve onun metal yüzeyine difüze hızı ile orantılıdır. Bu tip ortamlarda gerçekleşen oksijen redüksiyonu metallerin korozyon hızını tayin eden en önemli etkidir. Gerek tatlı sularda gerekse denizsel ortamda çözünen oksijen miktarı, normal koşullarda 8 ppm civarındadır (Yalçın ve Koç 1998; Roberge 2000).

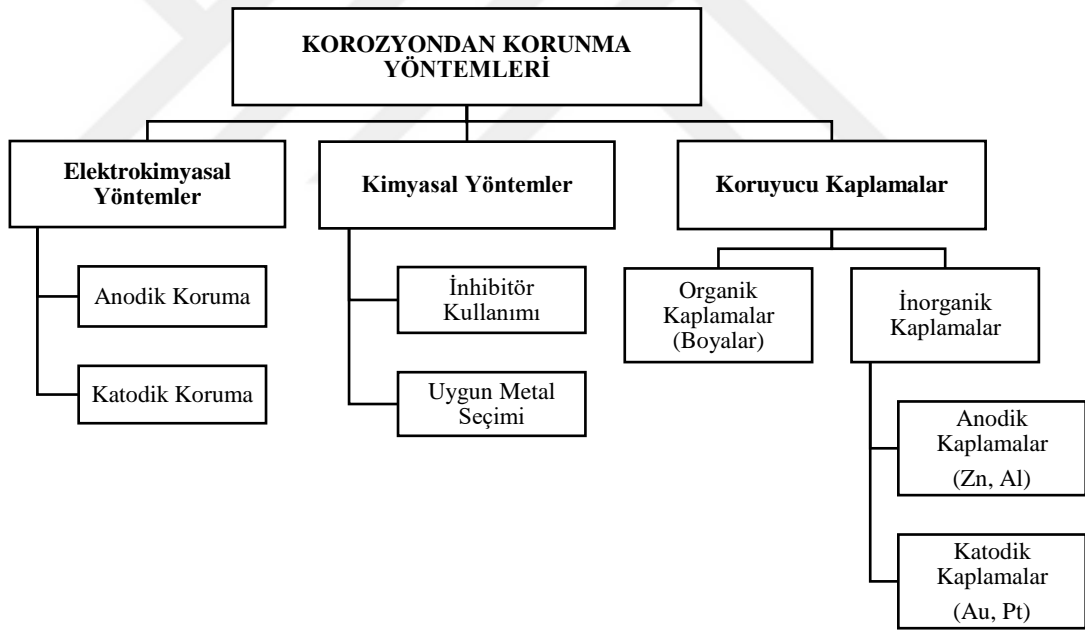
Toprak Altı Korozyonu: Doğal gaz boru hatları, yer altı akaryakıt tankları, yüksek gerilim hattı direklerinin ve çelik kazıkların zemin içerisinde kalan kısımları ve birçok yapı korozyona uğrayabilmektedir. Toprak altı korozyonuna etki eden faktörler; toprağın yapısı ve rutubeti, sıcaklık, oksijen konsantrasyonu, pH değeri ve biyolojik etmenlerdir (Yalçın ve Koç 1998).

Beton İçi Korozyonu: Betonlar yüksek alkali özelliğine sahip (pH=12-13) yapılardır. Bunun sebebi çimentonun su ile reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksitlerden (CaOH) kaynaklanmaktadır. Sulu çözeltiler içinde korozyona dayanıksız olan çelikler, beton içerisinde daha az oranda korozyona uğramaktadır. Bunun sebebi yüksek alkali ortamda çelik yüzeyinin hızlıca pasifleşmesidir. Bu pasifleşmiş tabaka esasen Fe_2O_3

bileşimindedir. Çelik yüzeyine sağlam bir şekilde tutunan bu oksit tabaka metali korozyondan korumaktadır. Ancak beton içerisine difüze olan bazı bileşikler demir yüzeyindeki pasifliği bozabilmektedir. Bu korozyon ortamını etkileyen faktörler; betonun kalitesi ve rutubeti, karbonasyonu, klorür iyonu ve oksijen difüzyonudur (Yalçın ve Koç 1998; Roberge 2000).

2.20. Korozyondan Korunma Yöntemleri

Metalik malzemeleri korozyondan korumak veya korozyonunu en aza indirmek amacıyla uygulanabilecek birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden bazıları Şekil 2.15'deki gibi gösterilebilmektedir.



Şekil 2.15. Korozyondan korunma yöntemleri

2.21. Elektrokimyasal Yöntemler

Anodik koruma, metallerin korozyonunu tam olarak durdurmayıp, korozyon hızını önemsiz bir miktara düşürebilen bir koruma yöntemidir. Anodik koruma elektrokimyasal açıdan bir pasifleşme işlemi olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle

yalnızca pasifleşebilme özelliği gösteren metallere uygulanabilen bir yöntemdir (Ahmad 2006).

Katodik koruma, korunmak istenen metalin katot rolünü üstlendiği ve galvanik bir pil oluşturularak koruma işleminin gerçekleştiği bir yöntemdir. Bu koruma yöntemi korozyondan korunmak istenen metalin galvanik seride kendinden daha aktif olan bir metal ile galvanik çift oluşturması esasına dayanmaktadır (Ahmad 2006).

2.22. Kimyasal Yöntemler

İnhibitör kullanımı, çoğu kez metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşmasına sebep olmaktadır ve ortamın saldırganlığını azaltmaktadır. Bu da metalin korozyondan korunmasına olanak sağlamaktadır (Savaşkan 1999).

Uygun metal seçimi, korozyon olayında önemli bir role sahiptir. Galvanik seride birbirine yakın olan metaller seçilmelidir. Aksi halde birbirine uzak olan metaller tercih edilirse aralarında galvanik korozyon meydana gelebilmektedir (Savaşkan 1999).

2.23. Koruyucu Kaplamalar

Organik kaplamalar, genellikle polimerik esaslı boyalar olarak bilinmektedirler. Polimer kaplamalar çeliği korozyondan korumak için yapılan bir işlemdir. Polimer kaplama işleminden önce çelik yüzeyinin fosfatlanması gerekmektedir. Fakat bu fosfatlama işleminin gerçekleşebilmesi için birçok sayıda kimyasal kullanılması hem işlem maliyeti açısından hem de endüstriyel olarak uygulanabilirlik açısından bir hayli masraflıdır (Dos Santos Júnior *et al.* 1998; Tan and Blackwood 2003).

İnorganik kaplamalar, anodik ve katodik kaplamalar olarak sınıflandırılabilir. Anodik kaplama, çinko, alüminyum veya kadmiyum kaplamalar gibi elementlerin alt tabakaya kaplanmasıdır. Çelikte bu tür kaplamalar genellikle kurban kaplamalar olarak

bilinmektedir. Katodik kaplamalarda ise, depolanan metaller alt tabakaya elektropozitif özelliktedir. Bu tür kaplamalar genellikle gözeneksizdir ve süreksizlik gözlenmez. Bununla birlikte kaplamada herhangi bir kusur varsa, alt tabakaya göre anot görevi görür. Sonuçta elektronlar kusur içinden soy metale doğru akmakta ve korozyon meydana gelmektedir (Ahmad 2006).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Taban Malzemeler

Bu tez çalışması kapsamında taban malzemesi olarak düşük karbonlu yapı çeliği St37 (S235JR) kullanılmıştır. Taban malzemesinin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir (Hascometal 2019).

Çizelge 3.1. St37 çeliğinin kimyasal bileşimi (Hascometal 2019)

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%) Ağırlık				
	C _{max}	Mn _{max}	P _{max}	S _{max}	N _{max}
St37	0,17	1,4	0,045	0,045	0,009

Çizelge 3.2. St37 çeliğinin mekanik özellikleri (Hascometal 2019)

Malzeme	Mekanik Özellikler			
	Akma Mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (HV)
St37	235	340	26	160

Taban malzemesi olarak seçilen çelikler hem silindirik (nervürlü) hem de dikdörtgen prizma (lama) şeklinde olup boyutları;

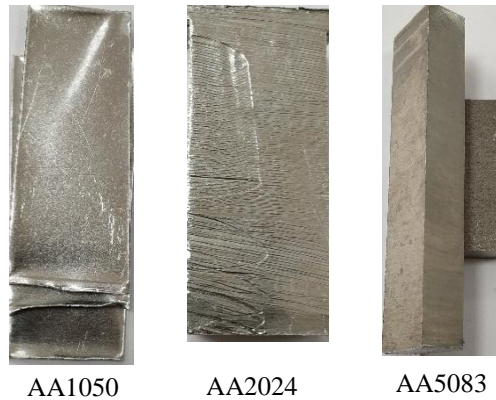
- Silindirik numunelerden birincisi için, 12 mm (çap) * 80 mm (uzunluk),
- Silindirik numunelerden ikincisi için, 16 mm (çap) * 80 mm (uzunluk),
- Lama numuneler için, 55 mm (uzunluk) * 35 mm (genişlik) * 3 mm (kalınlık),
- Lama numuneler için, 35 mm (uzunluk) * 15 mm (genişlik) * 2,5 mm (kalınlık)

olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Kullanılan taban malzemelerin fotoğrafları Şekil 3.1’de verilmiştir. Tezin devamında 12 ve 16 mm çaplı nervürlü çelikler 12N ve 16N olarak, büyük ve küçük lamalar ise BLN ve KLN şeklinde kodlanmıştır.



Şekil 3.1. Kaplama işleminde kullanılan 12N, 16N, BLN ve KLN

Taban malzeme üzerine kaplanacak olan AA’lar külçe halinde satın alınmış ve pota içerisine sığacak şekilde kesilerek küçültülmüşlerdir. Kaplama malzemesi olarak 1050, 2024 ve 5083 serisi alüminyumlar tercih edilmiştir. Seçilen AA’ların fotoğrafları Şekil 3.2’de, kimyasal bileşimleri ise Çizelge 3.3’de verilmiştir (ETİalüminyum 2019).



Şekil 3.2. Kaplama işleminde kullanılan AA’lar

Çizelge 3.3. Kullanılan AA'ların kimyasal bileşimleri (ETİalüminyum 2019)

Malzeme	Kimyasal Bileşim (%) Ağırlık								
	Al	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
AA1050	99,50	0,40	0,25	0,04	0,05	0,04	...
AA2024	> 90	0,50	0,50	3,80-4,90	0,30-0,90	0,20-1,80	0,25	0,15	0,10
AA5083	> 90	0,40	0,40	0,10	0,40-1,60	4,00-4,90	0,25	0,25	0,05-0,25

3.2. Numune Yüzeylerinin Hazırlanması

Taban malzeme olarak seçilen çeliklere hiçbir kimyasal yüzey temizleme işlemi uygulanmamıştır. Sadece mekanik temizleme işlemleri uygulanarak yüzeyde bir süreklilik oluşturulmaya çalışılmıştır. Lama numunelerin yüzeylerindeki yağ, çapak ve oksit yapılar 80 mesh SiC zımpara ile temizlenmiştir. Nervürlü numunelerin yüzeyleri ise Şekil 3.3'de gösterilen taş motoruna bağlanan çelik telli disk yardımıyla çapak, oksit ve diğer yüzey kirlerinden arındırılmıştır. Daldırma işleminin kolaylığı ve sürdürülebilirliği açısından nervürlü numunelerin uç kısımlarından yüksek sıcaklığa dayanıklı teller ile sarılmıştır. Aynı sebeplerle lama numunelerin de bir ucuna 2 mm çapında delikler açılmış ve teller deliklere sabitlenmiştir.

**Şekil 3.3.** Çelik tel fırçalı taş motoru

3.3. Kaplama Banyosunun Hazırlanması

Alüminyum numuneleri eritmek amacıyla elektrikli eritme ocağı kullanılmıştır. Fırının pota kapasitesi 1 kg olup, maksimum 1100°C sıcaklığa kadar çıkabilmektedir. Alüminyum numuneleri eritmek amacıyla grafit potalar kullanılmıştır. Şekil 3.4’de gösterilen ocak, daldırma işleminin yapılacağı 700°C sıcaklığa sabitlenmiştir.



Şekil 3.4. Elektrikli eritme ocağı

3.4. Sıcak Daldırma İşlemi

Daldırma işleminden önce ve sonra eriyik banyonun yüzeyinden cüruf alma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Eriyik alüminyum banyosuna daldırılacak numunelerin yüzeylerinde oksit filmlerinden arındırıldıktan sonra numuneler 1, 3 ve 5’er dakika boyunca 700°C’deki alüminyum banyoya daldırılmıştır. Planlanan sürelerle daldırılan numuneler banyodan uygun çıkarma hızlarında çıkarıldıktan hemen sonra soğutmak amacıyla su içerisinde birkaç saniye bekletilmiştir. Ardından oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Tüm bu işlemler her numune için çok kere tekrarlanmıştır. AA1050, AA2024 ve AA5083 serileri ile kaplanmış bazı numuneler Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Farklı AA'lar ile kaplanmış çelikler

3.5. Test Numunelerinin Hazırlanması

Kaplama yapılmış numuneler Şekil 3.6’da gösterilen abrasif kesici disk yardımıyla ufak dilimlere ayrılmış ve ardından deney kolaylığı açısından bakalite alınmıştır.



Şekil 3.6. Abrasif kesme diski

Bakalite alınan numunelerin test uygulanacak yüzeyleri sırasıyla 180, 240, 400, 600, 800 ve 1200 mesh SiC kâğıtlar ile zımparalanmıştır. Ardından Şekil 3.7’de gösterilen parlatma cihazında yüzey parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. Zımparalama ve parlatma cihazı

3.6. Optik Mikroskop Analizleri

Parlatma işleminin ardından numunenin kesit görüntüsü almak ve numunelerin içyapısında meydana gelen değişiklikleri incelemek amacıyla Şekil 3.8’de gösterilen Nikon LV 150 markalı optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Optik mikroskop cihazı

3.7. Sertlik Analizleri

Alüminyum kaplanmış numunelerin sertlik değerleri Mikro-Vickers sertlik ölçme cihazı ile numune yüzeyine 10 gram ($HV_{0.01}$) yük 10 saniye süreyle uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinde, ölçüm yapılan tabakanın beş farklı yerinden sertlik değeri alınmış ve bu sertliklerden ortalama değer hesaplaması yapılmıştır. Kesit görüntüleri alınmış numunelerin sertlik değerlerinin ölçümü için Şekil 3.9’da gösterilen Wolpert Wilson Instruments markalı sertlik cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Mikro-Vickers sertlik cihazı

3.8. XRD Analizleri

Kaplama işlemi sonrasında numunelerin XRD analizleri $\lambda=1.5404 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip, Cu-K α radyasyon kaynaklı Şekil 3.10'da gösterilen Rigaku-2200D/Max X-Ray Difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm değerleri, 10-90° tarama açısında 2 derece/dakika tarama hızında ve 0.1° adımında elde edilmiştir. XRD sonuçları, PANalytical X'Pert HighScore yazılımında, standart JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) verileri kullanılarak analiz edilmiştir.



Şekil 3.10. X-ışını difraktometre cihazı

3.9. SEM-EDS Analizleri

Kaplamaların yüzey morfolojileri Şekil 3.11’de gösterilen Zeiss - Sigma 300 model SEM cihazı kullanılarak incelenmiştir. Çelik ile alüminyum arasında meydana gelen intermetalik tabakadan 1000X büyütmede görüntüler alınmıştır. Numunelerin kimyasal kompozisyonunu araştırmak amacıyla SEM cihazına bağlı olarak çalışan EDAX - Element marka EDS sistemi kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.10. Korozyon Testi

Numuneler korozyon testi öncesinde TS EN ISO 11846 numaralı standarda göre yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmuştur. Ultrasonik banyoda 15 dakika boyunca etil alkol içinde tutulmuştur. 50 ml/l nitrik asit, 5 ml/l hidroflorik asit ve kalanı saf sudan oluşan çözeltide 95°C’de 1 dakika bekletilmiş ve ardından saf su ile durulanmıştır. Oda sıcaklığındaki derişik nitrik asit çözeltisi içerisine 2 dakika boyunca daldırılmış ve ardından damıtık suda durulanmış, kurutulmuş ve korozyon testi için hazırlanacak çözeltiye daldırılmaya hazır hale gelmiştir. TS EN ISO 11846 numaralı Türk Standardında belirtilen, 30 g/l sodyum klorür, 10 ml/l derişik hidroflorik asit ve kalanı saf sudan oluşan bir çözelti hazırlanmış, numuneler oda sıcaklığındaki bu çözelti

içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Korozyon deneyi sonrasında numuneler damıtık suda durulanmış, ardından yüzeydeki korozyon ürünlerini gidermek için ağırlıkça %70 nitrik asit çözeltisinde 2 dakika bekletilmiş ve damıtık su ile yıkanmıştır. Korozyon deneyi sonrasında numunelerin kesit görüntüleri incelenmiştir.

Ayrıca alüminyum kaplanmış numuneler Şekil 3.12’de gösterilen %3,5’lik NaCl çözeltisi içerisinde 8 gün boyunca bekletilerek daldırmalı korozyon testine tabi tutulmuştur. Bu sayede numunelerin korozif ortamlardaki ağırlık değişimleri korozyon penetrasyon hızları incelenmiştir.



Şekil 3.12. %3,5 NaCl çözeltisi

3.11. Oksitleme İşlemi

1050, 2024 ve 5083 serisi alüminyumlar ile kaplanan büyük lamalar ile hiçbir kaplama işlemi yapılmamış büyük lamalar 750°C’ye ısıtılmış Elektro-Mag marka kül fırınının içerisine Şekil 3.13’de görülen düzenek yardımıyla yerleştirilmiştir. Oksitleme işlemi sabit sıcaklıkta 1, 2, 4, 8, 10 ve 24 olmak üzere altı farklı zaman periyodunda gerçekleştirilmiştir. Oksitlenen numunelerin ağırlık değişimleri hesaplanmıştır.



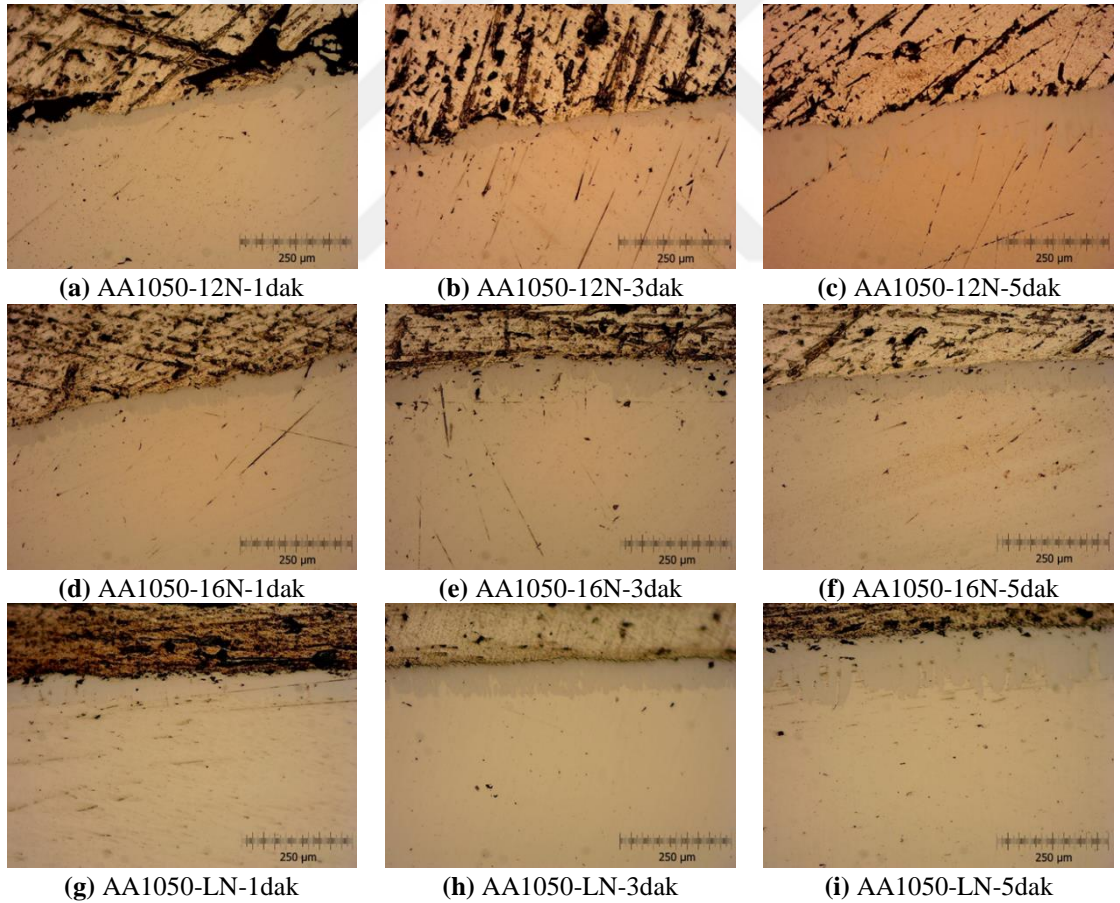
Şekil 3.13. Numune asma sistemi



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Kesit Görüntüleri

Yüzeyi alüminyum kaplanmış çelik numunelerin enine kesitleri alınarak bakalit içerisine yerleştirilmiştir. Kesit alanlarında meydana gelen kesme diskinin meydana getirdiği yüzey pürüzlülüğü, uygun zımparalama ve ardından parlatma işlemleri ile giderilmiştir. 12N, 16N ve LN üzerine yapılan AA1050 serisi kaplamaların kesit görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

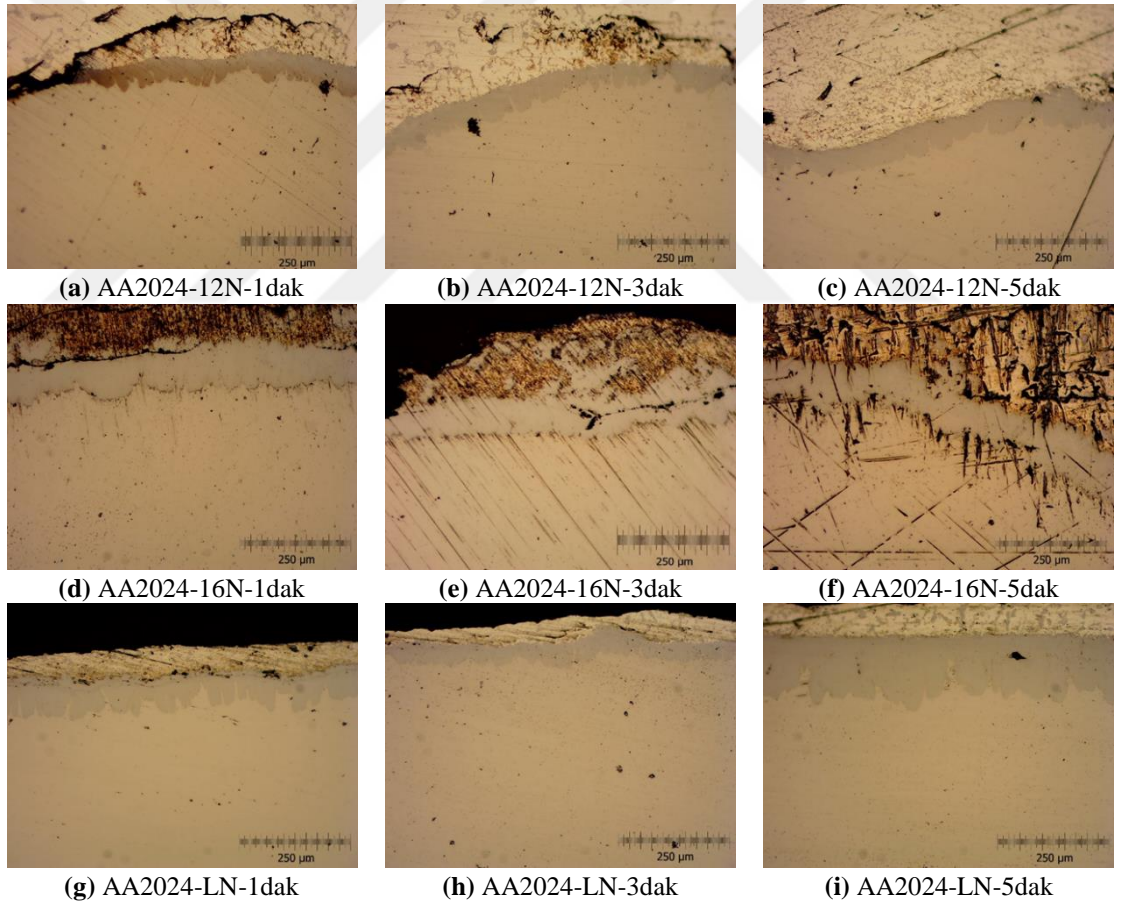


Şekil 4.1. AA1050 ile 1', 3', 5' kaplanmış 12N, 16N ve LN'lerin kesit görüntüleri

Şekil 4.1 incelendiğinde AA1050 serisi ile 12N, 16N ve LN'ler arasında oluşan yapı, literatürde belirtildiği gibi (Takata *et al.* 2015) intermetalik fazlardan oluşmaktadır.

Şekil 4.1’de oluşan tüm intermetalik tabakaların kalınlıkları arasında bir kıyaslama yapıldığında; literatürdekine benzer şekilde (Shih and Tu 2007) daldırma süresinin artmasıyla birlikte intermetalik faz kalınlıklarında bir artış meydana gelmiştir. İntermetalik tabakaların morfolojileri incelendiğinde, düşük daldırma süresinde oluşan morfolojilerin düzgün olduğu fakat daldırma süresinin artmasıyla beraber parmak benzeri bir yapıya dönüştüğü görülmektedir.

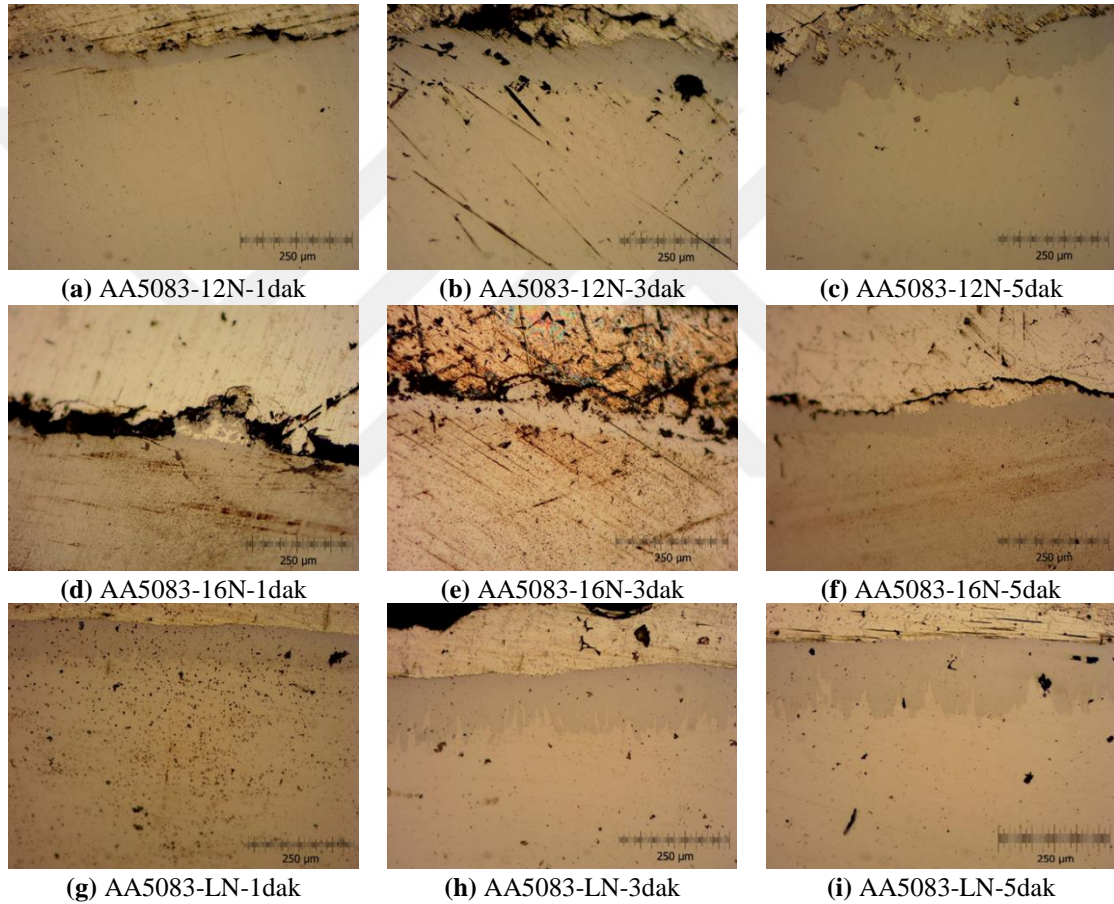
12N, 16N ve LN üzerine yapılan AA2024 serisi kaplamaların kesit görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. AA2024 ile 1', 3', 5' kaplanmış 12N, 16N ve LN’lerin kesit görüntüleri

Şekil 4.2 incelendiğinde AA2024 serisi ile 12N, 16N ve LN’ler arasında oluşan yapı, literatürde belirtildiği gibi (Takata *et al.* 2015) intermetalik fazlardan oluşmaktadır.

Şekil 4.2’de oluşan tüm intermetalik tabakaların kalınlıkları arasında bir kıyaslama yapıldığında; literatürdekine benzer şekilde (Shih and Tu 2007) daldırma süresinin artmasıyla birlikte intermetalik faz kalınlıklarında bir artış meydana gelmiştir. İntermetalik tabakaların morfolojisi incelendiğinde, düşük daldırma süresinde oluşan morfolojilerin parmak benzeri olduğu ve daldırma süresinin artmasıyla beraber düzgün bir yapıya dönüştüğü görülmektedir.



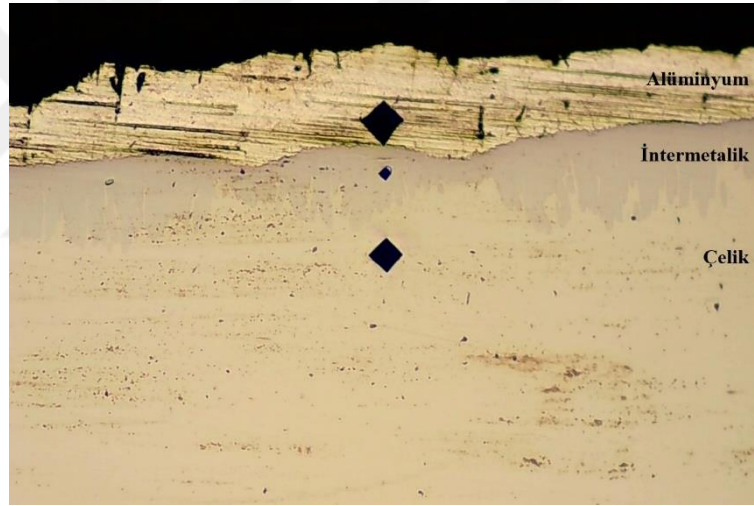
Şekil 4.3. AA5083 ile 1', 3', 5' kaplanmış 12N, 16N ve LN’lerin kesit görüntüleri

Şekil 4.3 incelendiğinde AA5083 serisi ile 12N, 16N ve LN’ler arasında oluşan yapı, literatürde belirtildiği gibi (Takata *et al.* 2015) intermetalik fazlardan oluşmaktadır. Şekil 4.3’de oluşan tüm intermetalik faz kalınlıkları arasında bir kıyaslama yapıldığında; literatürdekine benzer şekilde (Shih and Tu 2007) daldırma süresinin artmasıyla birlikte intermetalik faz kalınlıklarında bir artış meydana gelmiştir. Şekil 4.3’deki intermetalik tabakaların morfolojisi incelendiğinde, düşük daldırma süresinde

oluşan morfolojilerin parmak benzeri olduğu ve daldırma süresinin artmasıyla beraber intermetalik yüzeylerin düzgün bir yapıya dönüştüğü görülmektedir.

4.2. Sertlik Ölçümleri

Şekil 4.4’de yüzeylerinden sertlik ölçümleri alınan numunelerin görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.4’deki sertlik izleri incelendiğinde tüm bölgelere aynı yük uygulanmasına rağmen bazı izler büyük, bazıları ise küçük görülmektedir. İz boyutlarının farklı olma sebebi, bölgelerin sertlik farklarından kaynaklanmaktadır. İz boyutu en küçük olan yer intermetalik bölgelerdir. En büyük izler ise alüminyum bölgelerine aittir.



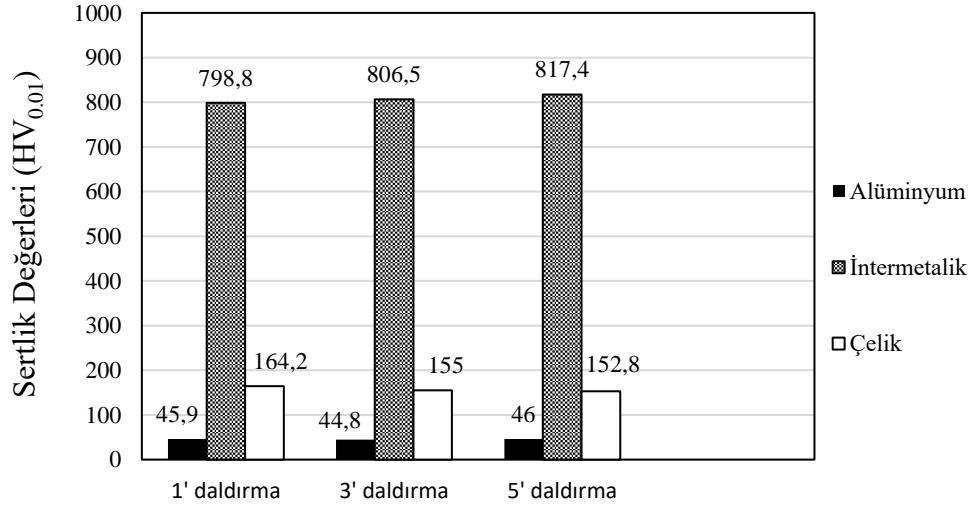
Şekil 4.4. Sertlik izlerinin farklılığı

Yüzeyleri alüminyum ile kaplanmış çelik numunelerin ana metal (çelik), ara tabaka (intermetalik) ve kaplama tabakalarından (alüminyum) alınan sertlik değerleri tablo halinde Çizelge 4.1’de, grafik halinde ise Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Sertlik değerleri ($HV_{0,01}$)

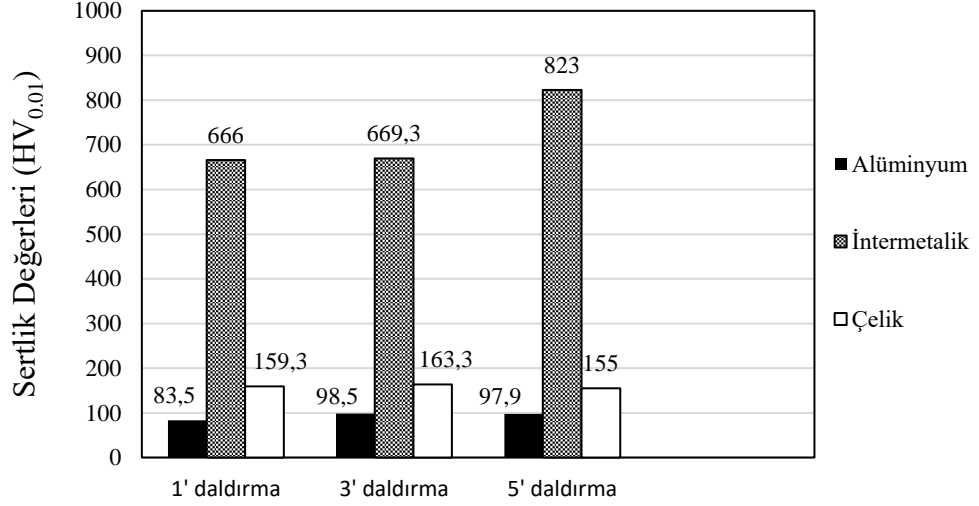
Kaplama Süresi	Tabaka	Sertlik değerleri ($HV_{0,01}$)		
		AA1050	AA2024	AA5083
1 dak	Alüminyum	45,9±8,9	83,5±44	69,9±8,3
	İntermetalik	798,8±175	666±96	736±48
	Çelik	164,2±17,8	159,3±29	132±16,9
3 dak	Alüminyum	44±8	98,5±13,4	81±8,8
	İntermetalik	806,5±146	669,3±106	828,5±35,7
	Çelik	155±18	163,3±16	158,4±9,1
5 dak	Alüminyum	46±7	97,9±14	78,5±9,1
	İntermetalik	817,4±291	823±75	909,3±60,6
	Çelik	152,8±37	155±32	133,5±7,7

AA1050 Kaplamalar



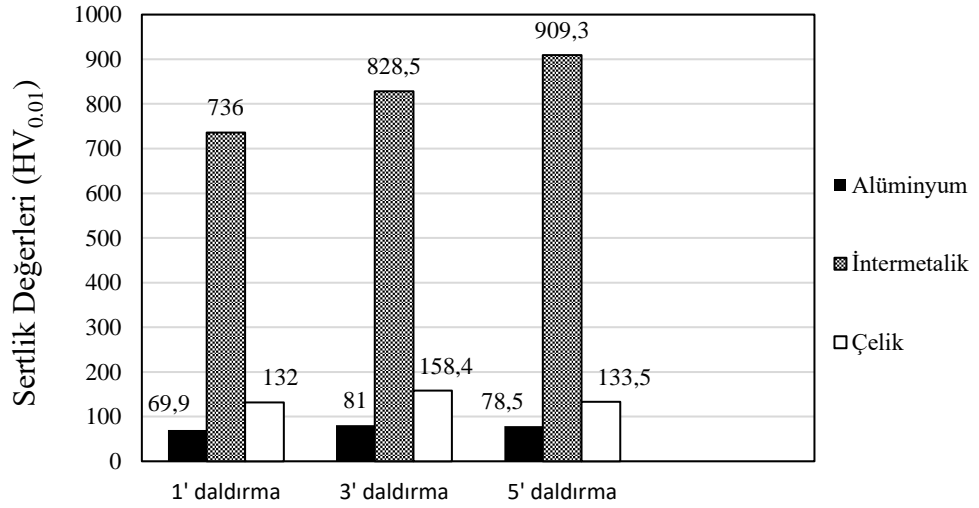
Şekil 4.5. AA1050 kaplamalardan alınan mikro sertlik değerleri

AA2024 Kaplamalar



Şekil 4.6. AA2024 kaplamalardan alınan mikro sertlik değerleri

AA5083 Kaplamalar

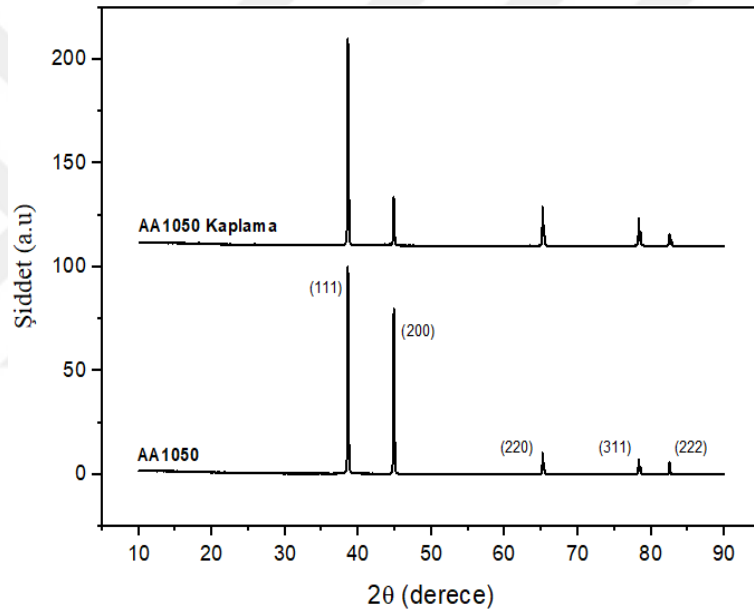


Şekil 4.7. AA5083 kaplamalardan alınan mikro sertlik değerleri

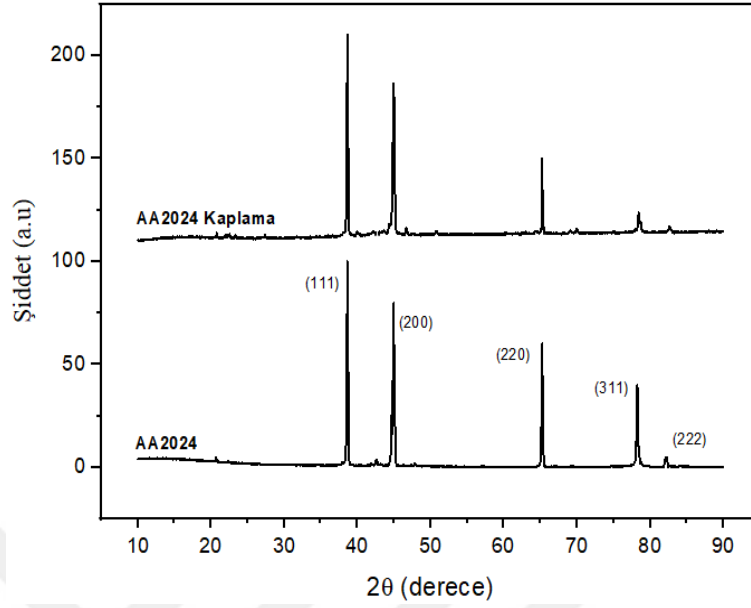
4.3. XRD Analiz Sonuçları

AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile kaplanmış çelik numune yüzeylerinden ve AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi alüminyumlardan alınan XRD piklerinin analiz

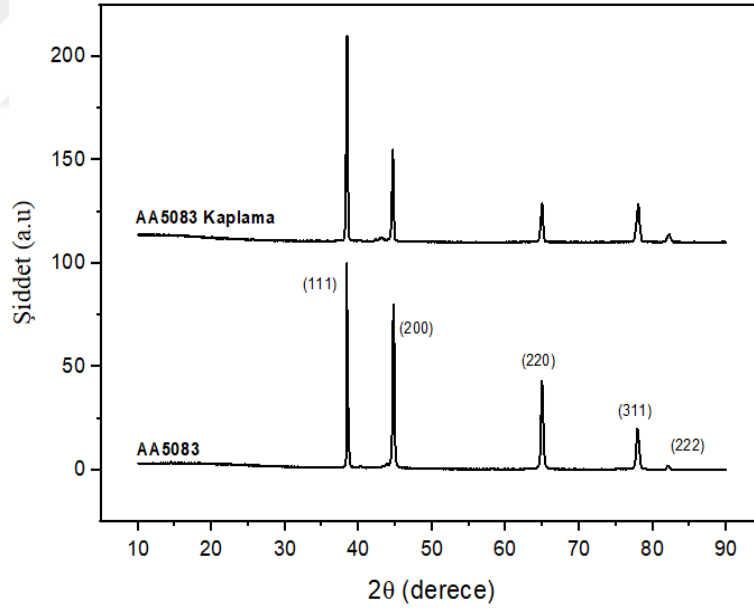
sonuçları Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'de verilmiştir. Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 incelendiğinde, oluşan piklerin elementel Al'ye ait olduğu JCPDS 1-1179 kartı ile tespit edilmiştir. Pik şiddetlerinde ve yansıma açılarındaki değişimler, AA'ların farklı kimyasal bileşimlere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Farklı AA'lar ile kaplanmış çelik numunelerin XRD analizleri incelendiğinde kaplama yüzeyinden alınan XRD pikleri ile AA'lardan alınan pikler arasında önemli bir farklılık olmadığı görülmüştür. Bu da alüminyum alaşımlarının St37 çelik yüzeyine başarılı bir şekilde kaplandığını göstermektedir.



Şekil 4.8. AA1050 ile kaplanmış numuneden ve AA1050'den alınan XRD pikleri



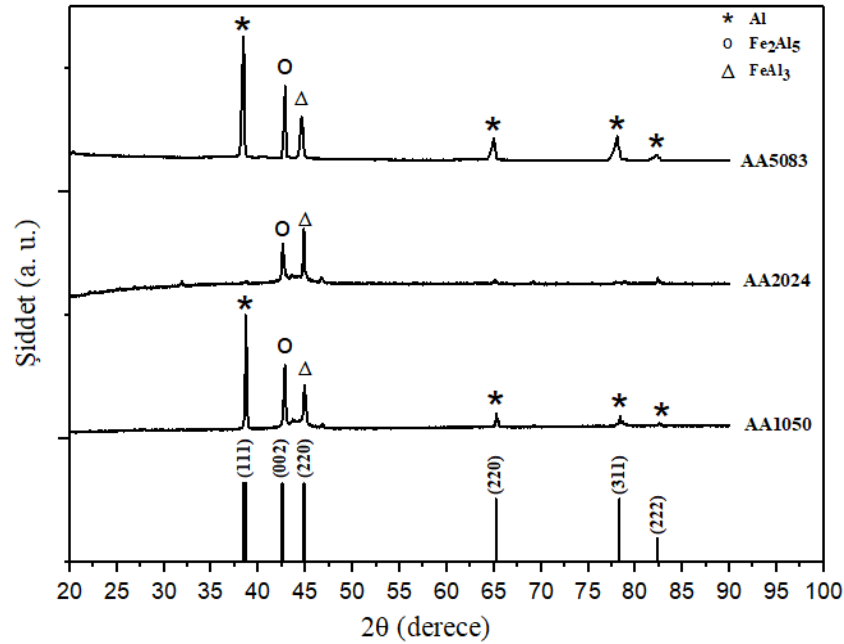
Şekil 4.9. AA2024 ile kaplanmış numuneden ve AA2024'den alınan XRD pikleri



Şekil 4.10. AA5083 ile kaplanmış numuneden ve AA5083'den alınan XRD pikleri

AA1050, AA2024 ve AA5083 ile kaplanmış çelik numunelerde, kaplama ile çelik arasında oluşan ara yüzeylerdeki fazları incelemek amacıyla numuneler NaOH çözeltisine daldırılarak yüzeylerinde bulunan dış alüminyum kaplama tabakası çözündürülmüştür. Bu işlem sonucunda ortaya çıkan intermetalik difüzyon tabakasından

alınan XRD sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde, bazı XRD piklerinin alüminyuma ait olduğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin eşit sürelerle NaOH çözeltisi içerisinde tutulan kaplanmış numunelerin temizleme esnasında yüzeyinde kalan Al’dan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 4.11’de verilen farklı AA’lar ile kaplanan çeliğin alüminyum ile arasında meydana gelen intermetalik fazlara ait XRD pikleri incelendiğinde baskın intermetalik fazın Fe_2Al_5 olduğu JCPDS 47-1435 kartı kullanılarak tespit edilmiştir. Yapıdaki bir diğer intermetalik faz olan $FeAl_3$ ’ün varlığı ise JCPDS 1-1265 kartı ile tespit edilirken, yapıdaki Al elementinin varlığı da JCPDS 1-1179 kartı kullanılarak tespit edilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde Al, Fe_2Al_5 ve $FeAl_3$ ’ü temsil eden pikler görülmektedir. Bu üç AA’nın intermetalik tabakalarının pik şiddetleri arasında bir kıyaslama yapıldığında, AA2024 ile kaplanmış numunelerin Fe_2Al_5 intermetaliklerinin gösterdiği pik şiddetinin, AA1050 ve AA5083’e kıyasla daha yüksek çıktığı görülmektedir. En düşük Fe_2Al_5 pik şiddetinin ise AA5083’e ait olduğu görülmektedir. Bu durum AA5083 ile kaplanmış çeliklerinde oluşan intermetalik faz kalınlıklarının diğerlerine nazaran daha az görüldüğünü, dolayısıyla dış alüminyum kaplama tabakasının diğerlerine nazaran giderilmesinin daha zor olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11. Kaplanmış numunelerin intermetalik tabakalarından alınan XRD pikleri

4.4. Kaplama ve İntermetalik Tabaka Kalınlıkları

Yüzeyleri AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile kaplanmış çelik numunelerin kaplama ve intermetalik tabaka kalınlıkları Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de verilmiştir. Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 incelendiğinde daldırma süresinin artmasıyla birlikte çoğu kaplama numunesinin kaplama tabakasının ve difüzyon tabakasının kalınlığında bir artış görülmektedir. Bu da literatürdeki diğer çalışmalarla (Rodriguez-Calvillo *et al.* 2010; Yousaf *et al.* 2011) benzerdir. Bu durum, daldırma süresinin artmasıyla birlikte, alüminyumun çelik içerisine difüzyonunun daha uzun süreler boyunca gerçekleşmesi ile açıklanabilmektedir.

Çizelge 4.2. AA1050 ile kaplanan numunelerin kaplama ve difüzyon tabakası kalınlıkları

AA1050 Serisi ile Kaplanan Numuneler				
Süre	Numune Boyutu	Kaplama Tabakası (μm)	Difüzyon Tabakası (μm)	Toplam Kaplama (μm)
1 dak	12N	222±13,5	35 ± 13,7	257±32,9
3 dak	12N	240±15,2	39 ± 17,3	279±33,1
5 dak	12N	260±15,9	124 ± 17,1	384±32,9
1 dak	16N	100±14,3	30 ± 7,9	130±23,7
3 dak	16N	102±14,7	48 ± 23	150±38,8
5 dak	16N	120±15,8	64 ± 14,9	184±30,7
1 dak	LN	151±9,6	53 ± 6	204±15,6
3 dak	LN	155±7,3	130 ± 24,7	285±32
5 dak	LN	158±8	75 ± 10,2	233±18,2

Çizelge 4.3. AA2024 ile kaplanan numunelerin kaplama ve difüzyon tabakası kalınlıkları

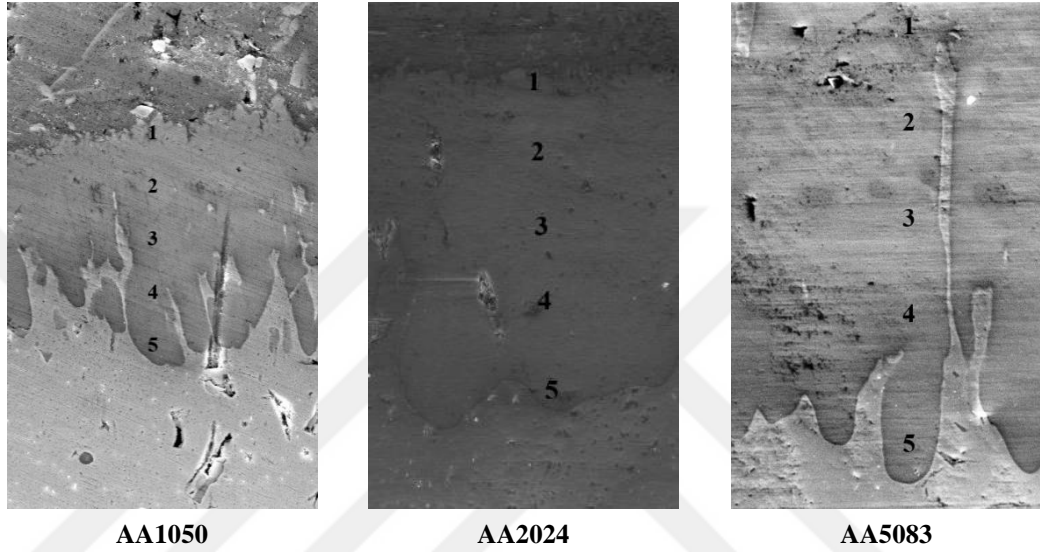
AA2024 Serisi ile Kaplanan Numuneler				
Süre	Numune Boyutu	Kaplama Tabakası (μm)	Difüzyon Tabakası (μm)	Toplam Kaplama (μm)
1 dak	12N	150 ± 10,4	45 ± 13,6	195±24
3 dak	12N	158 ± 10,3	48 ± 15,8	206±26,1
5 dak	12N	210 ± 7,9	65 ± 14,7	275±32,6
1 dak	16N	138 ± 7,4	87 ± 9	225±16,4
3 dak	16N	152 ± 9	93 ± 23,5	245±32,5
5 dak	16N	150 ± 11,5	101 ± 15,9	251±27,4
1 dak	LN	78 ± 9,8	54 ± 16,8	132±26,6
3 dak	LN	88± 13	58 ± 18,2	146±31,2
5 dak	LN	88 ± 13,9	137 ± 19,8	225±33,7

Çizelge 4.4. AA5083 ile kaplanan numunelerin kaplama ve difüzyon tabakası kalınlıkları

AA5083 Serisi ile Kaplanan Numuneler				
Süre	Numune Boyutu	Kaplama Tabakası (μm)	Difüzyon Tabakası (μm)	Toplam Kaplama (μm)
1 dak	12N	102 ± 10,6	35 ± 15,2	147 ± 25,8
3 dak	12N	105 ± 12,3	85 ± 22,7	190 ± 35
5 dak	12N	121± 10,7	89 ± 27,7	210 ± 38,4
1 dak	16N	194 ± 8,9	39 ± 12,9	233 ± 21,8
3 dak	16N	198 ± 9,8	69 ± 19,7	267 ± 29,5
5 dak	16N	202 ± 15,8	80 ± 26,5	282 ± 42,3
1 dak	LN	88, ± 10	87 ± 6	175 ± 16
3 dak	LN	98 ± 25	130 ± 27,5	228 ± 52,5
5 dak	LN	107 ± 12	162 ± 25,8	269 ± 37,8

4.5. EDS Analizleri

Şekil 4.12’da gösterildiği gibi intermetalik tabaka yüzeylerinin beş farklı noktasından alınan EDS analizlerine ait atomik yüzdeler Çizelge 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.12. SEM görüntüsü (Analiz bölgeleri)

Çizelge 4.5. İntermetalik tabakanın atomik yüzdeleri

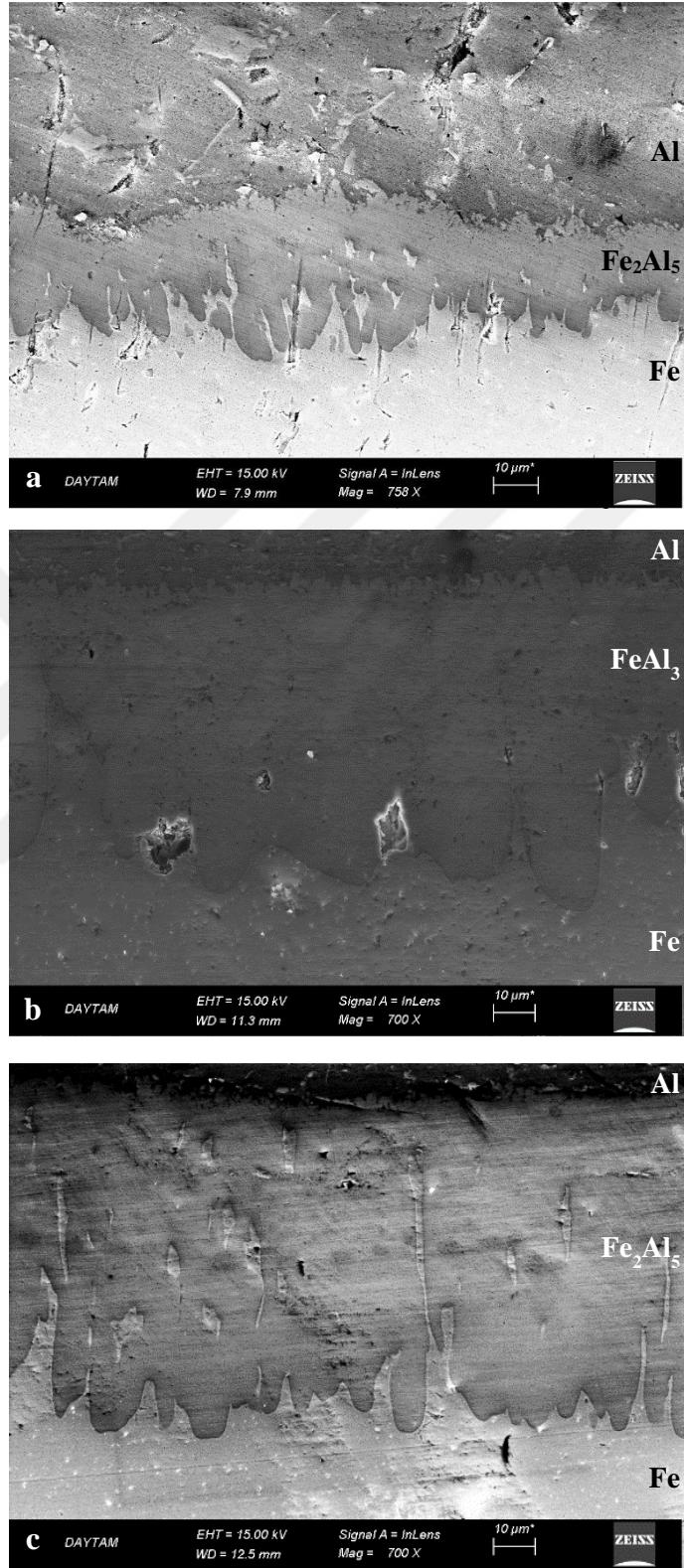
Analiz Bölgeleri	AA1050		AA2024		AA5083	
	%Al	%Fe	%Al	%Fe	%Al	%Fe
1	93,3	6,7	73,9	26,1	71,5	28,5
2	83,06	16,94	73,95	26,05	71,8	28,2
3	78,6	21,4	73,95	26,05	71,7	28,3
4	72,1	27,9	73,84	26,16	71,1	28,9
5	72,14	27,86	4,1	95,9	70,4	29,6

Çizelge 4.5 incelendiğinde, AA1050 serisi ile kaplanmış numunelerin intermetalik tabakasının Al ve Fe yüzdelerine bakıldığında, 1. bölgede çıkan Al oranının %93 olduğu, 2, 3 ve 4. bölgeye doğru gidildikçe Al yüzdesinin yaklaşık %72’ye kadar azaldığı görülmektedir. Bu oluşan intermetalik yapının baskın olarak Fe_2Al_5 yapısından

oluşturduğunu göstermektedir. AA2024 ile kaplanmış numunelerin intermetalik tabakasının 1, 2, 3 ve 4. bölgelerine bakıldığında Al yüzdesinin yaklaşık %74 olduğu görülmektedir. 5. bölgedeki Al yüzdesinin %4 olması 5. bölgenin çelik tabakasına daha yakın olan yerden ölçülmesi ile açıklanabilir. AA2024 ile kaplanan çelik ara yüzeyindeki intermetalik yapının baskın olarak $FeAl_3$ bileşiminde olduğu ve bu sebeple sertlik değerlerinin diğer numunelerin intermetalik tabaka sertliklerinden daha az çıktığı görülmektedir. AA5083 serisi ile yapılan kaplamalardaki intermetalik tabakanın Al yüzdesinin yaklaşık olarak %72 olması, intermetalik yapıda Fe_2Al_5 kompozisyonunun baskın olarak oluşturduğunu göstermektedir.

4.6. SEM Görüntüleri

Çelik ile Al arasında meydana gelen difüzyon tabakasının morfolojisi, taramalı elektron mikroskopundan 700X büyütmeyle alınan Şekil 4.13'deki görüntülerde görülmektedir. Şekil 4.13.a incelendiğinde, AA1050 kaplanmış numunelerin intermetalik tabakası görülmektedir. Çelik içerisine doğru parmak benzeri bir şekilde büyüyen yapının, EDS analizlerine ve literatürdeki diğer çalışmalara bakıldığında baskın olarak Fe_2Al_5 bileşiği şeklinde büyüdüğü görülmüştür. Şekil 4.13.b'deki SEM görüntüsü, AA2024 kaplanmış numune intermetalik yapısının morfolojisini göstermektedir. Çelik içerisine doğru düzgün bir şekilde büyüyen yapının, EDS analizlerine ve literatürdeki diğer çalışmalara bakıldığında baskın olarak $FeAl_3$ bileşiği şeklinde büyüdüğü görülmüştür. Şekil 4.13.c'deki, AA5083 kaplanmış çeliğin intermetalik yapısının parmak benzeri bir şekilde büyüdüğü, EDS analizlerine bakıldığında da baskın olarak Fe_2Al_5 bileşiminden oluştuğu gözlemlenmiştir.



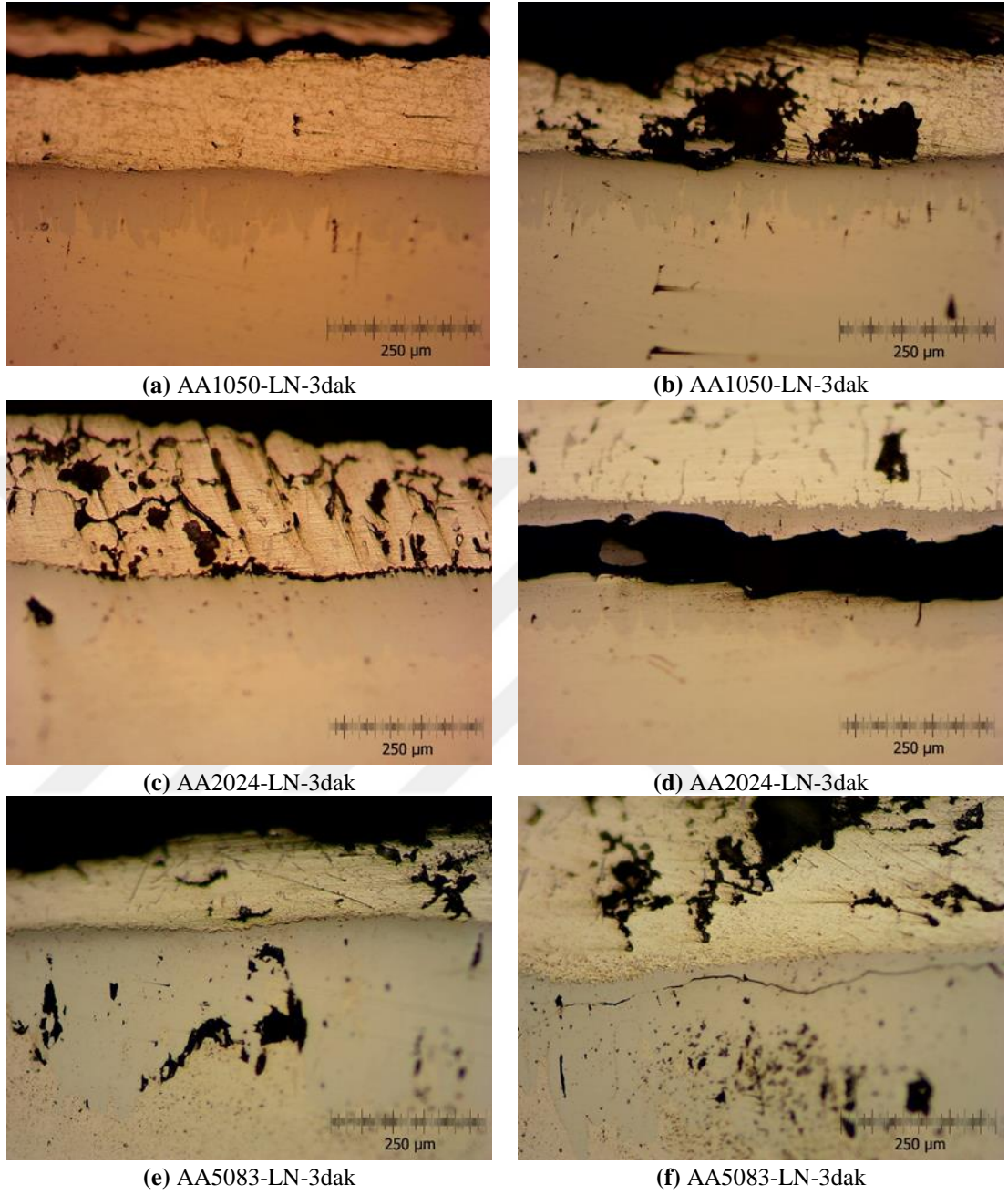
Şekil 4.13. a) AA1050, b) AA2024, c) AA5083 ile kaplı numunelerin SEM görüntüleri

4.7. Korozyon Testi Sonrası Bulgular

Yüzeyleri AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika boyunca kaplanmış olan numunelerin korozyon testi uygulandıktan sonraki kesit görüntüleri Şekil 4.14'de görülmektedir. Şekil 4.14.a incelendiğinde AA1050 serisi ile kaplanmış çelik numunelerde korozyon oluşmadığı, Şekil 4.14.b'de ise sadece delaminasyon olayının gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 4.14.c incelendiğinde AA2024 serisi ile kaplanmış çelik numunelerde taneler arası korozyonun üst alüminyum tabakasını geçerek intermetalik tabakaya kadar ulaştığı fakat intermetalik tabakayı aşmayıp çeliğe ulaşamadığı görülmüştür. Şekil 4.14.d'de ise intermetalik tabakada büyük bir kırık olduğu ve alüminyum tabakanın çelik yüzeyinden ayrıldığı görülmektedir. Buna rağmen çelik korozyondan korunmuştur.

Şekil 4.14.e incelendiğinde AA5083 serisi ile kaplanmış çelik numunelerde homojen bir kaplama tabakasının yanı sıra az miktarda taneler arası korozyon görülmüş fakat intermetalik ve çelik tabakaya ulaşamamıştır. Şekil 4.14.f'de ise intermetalik tabaka üzerinde kılcal bir çatlak meydana gelmiştir. Buna rağmen çelik korozyondan korunmuştur.



Şekil 4.14. AA1050, AA2024 ve AA5083 ile kaplanmış LN'lerin korozyon testi sonrası kesit görüntüleri

Ağırlık değişimlerinin hesaplanması amacıyla AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış KLN'lerin %3.5'lik NaCl çözeltisine bırakılmadan önceki halleri Şekil 4.15'de, bırakıldıktan 8 gün sonraki görüntüleri ise Şekil 4.16'da verilmiştir.



(a) AA1050 (b) AA2024 (c) AA5083 (d) Kaplamasız

Şekil 4.15. KLN'lerin korozyon öncesi görüntüleri



(a) AA1050 (b) AA2024 (c) AA5083 (d) Kaplamasız

Şekil 4.16. KLN'lerin korozyon sonrası görüntüleri

Ağırlık değişimlerinin hesaplanması amacıyla AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış BLN'lerin %3.5'lik NaCl çözeltisine bırakılmadan önceki halleri Şekil 4.17'de, bırakıldıktan 8 gün sonraki görüntüleri ise Şekil 4.18'de verilmiştir.



(a) AA1050 (b) AA2024 (c) AA5083 (d) Kaplamasız

Şekil 4.17. BLN'lerin korozyon öncesi görüntüleri



(a) AA1050 (b) AA2024 (c) AA5083 (d) Kaplamasız

Şekil 4.18. BLN'lerin korozyon sonrası görüntüleri

Ağırlık değişimlerinin hesaplanması amacıyla AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış 12N'lerin %3.5'lik NaCl çözeltisine bırakılmadan önceki halleri Şekil 4.19'da, bırakıldıktan 8 gün sonraki görüntüleri ise Şekil 4.20'de verilmiştir.



(a) AA1050 (b) AA2024 (c) AA5083 (d) Kaplamasız

Şekil 4.19. 12N'lerin korozyon öncesi görüntüleri



(a) AA1050 (b) AA2024 (c) AA5083 (d) Kaplamasız

Şekil 4.20. 12N'lerin korozyon sonrası görüntüleri

Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış KLN, BLN ve 12N'lerin %3.5'lik NaCl çözeltisine bırakılmadan önceki ve bırakıldıktan 8 gün sonraki ağırlık değişimleri verilmiştir. Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 incelendiğinde, AA'lar ile kaplanmış yapı çeliklerinin ağırlık değişimleri, kaplama

yapılmamış çeliklere oranla çok daha az miktardadır. Bu durum, alüminyumun yüzeyinde oluşan doğal Al_2O_3 tabakasının, yapı çeliğini korozyondan koruması ile açıklanabilmektedir.

Çizelge 4.6. KLN'lerin ağırlık değişimleri (korozyon testi)

Numune (Kaplama süresi)	Ağırlık (g)			
	Önce	Sonra	Fark	CPR (mm/yıl)
Kaplamasız	12,4196	12,2633	0,1563	0,6480
AA1050 (3')	14,1308	14,1225	0,0083	0,0958
AA2024 (3')	14,7725	14,6938	0,0787	0,9088
AA5083 (3')	15,3056	15,2998	0,0058	0,0636

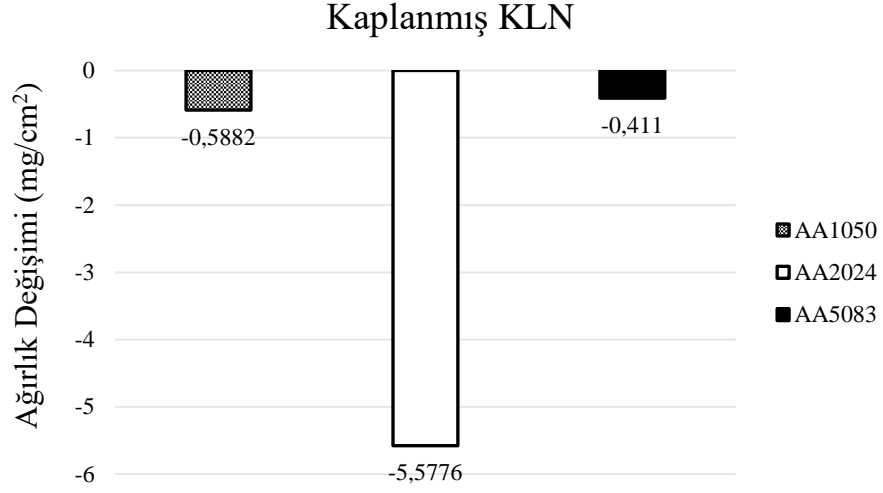
Çizelge 4.7. BLN'lerin ağırlık değişimleri (korozyon testi)

Numune (Kaplama süresi)	Ağırlık (g)			
	Önce	Sonra	Fark	CPR (mm/yıl)
Kaplamasız	40,9804	40,4744	0,5060	0,6807
AA1050 (3')	44,8270	44,8050	0,0220	0,0824
AA2024 (3')	47,1629	46,9337	0,2292	0,8589
AA5083 (3')	57,2767	57,2731	0,0036	0,0148

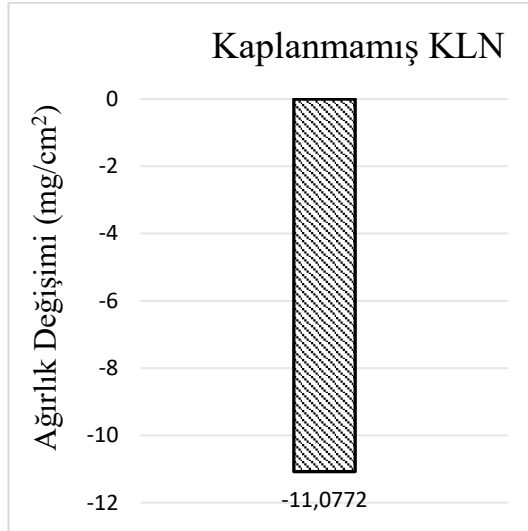
Çizelge 4.8. 12N'lerin ağırlık değişimleri (korozyon testi)

Numune (Kaplama süresi)	Ağırlık (g)			
	Önce	Sonra	Fark	CPR (mm/yıl)
Kaplamasız	64,5462	64,2380	0,3082	0,6215
AA1050 (3')	67,1171	67,1047	0,0124	0,0696
AA2024 (3')	66,0474	65,9322	0,1152	0,6470
AA5083 (3')	66,1113	66,1110	0,0003	0,0202

Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de, AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış KLN’lerin %3,5’lik NaCl çözeltisine bırakıldıktan 8 gün sonraki ağırlık değişimleri grafik halinde verilmiştir.

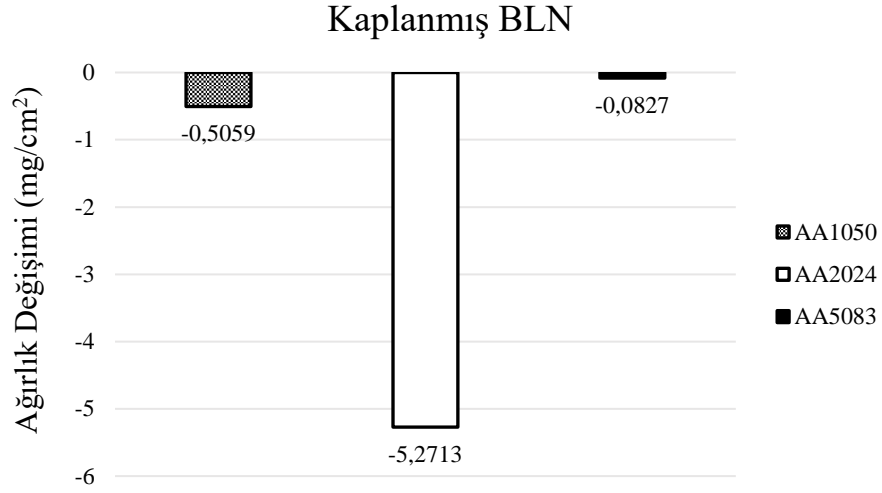


Şekil 4.21. Kaplanmış KLN’nin ağırlık değişimi

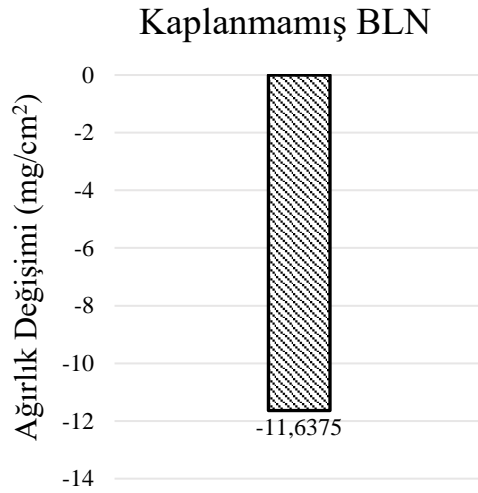


Şekil 4.22. Kaplanmamış KLN’nin ağırlık değişimi

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de, AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış BLN’lerin %3,5’lik NaCl çözeltisine bırakıldıktan 8 gün sonraki ağırlık değişimleri grafik halinde verilmiştir.

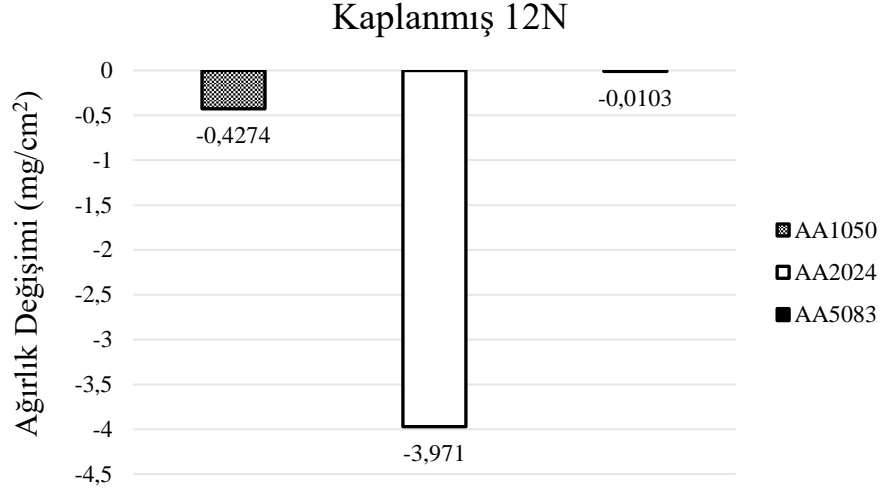


Şekil 4.23. Kaplanmış BLN’nin ağırlık değişimi

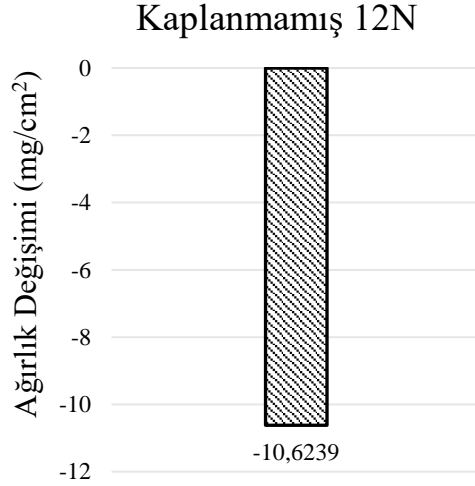


Şekil 4.24. Kaplanmamış BLN’nin ağırlık değişimi

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’de, AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 3 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış 12N’lerin %3,5’lik NaCl çözeltisine bırakıldıktan 8 gün sonraki ağırlık değişimleri grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.25. Kaplanmış 12N’nin ağırlık değişimi



Şekil 4.26. Kaplanmamış 12N’nin ağırlık değişimi

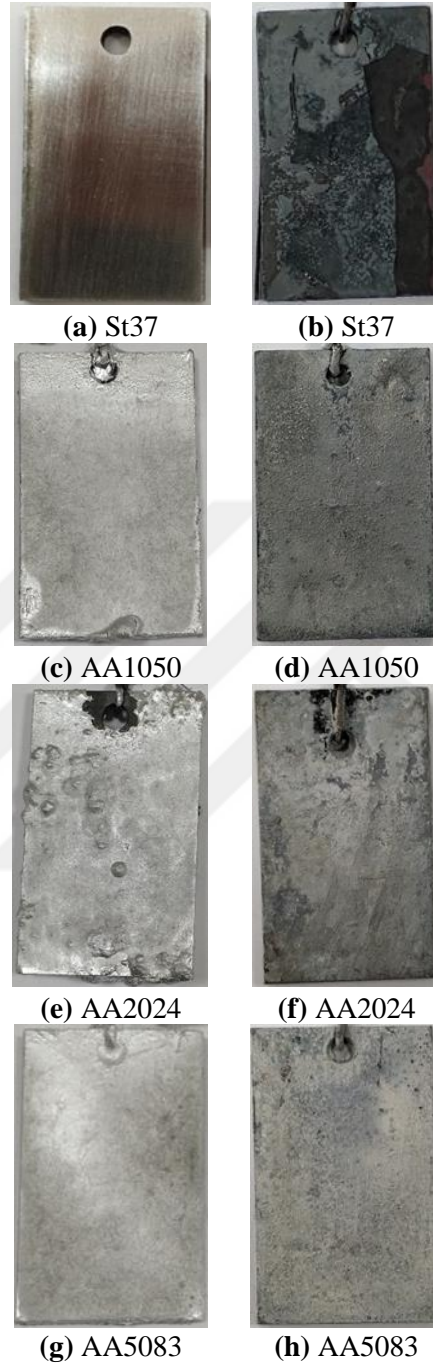
4.8. Oksidasyon Testi Sonrası Bulgular

Çizelge 4.9’da AA1050, AA2024 ve AA5083 serisi ile 5 dakika daldırma süresi boyunca kaplanmış ve kaplama işlemi yapılmamış BLN’lerin 750°C’de 24 saat boyunca oksitleme işlemine tabi tutulmadan önceki ve ilerleyen saatlerdeki ağırlık değişimleri verilmiştir. Çizelge 4.9 incelendiğinde, oksitleme süresinin artmasıyla birlikte AA’lar ile kaplanmış BLN’lerin ağırlık artışının (oksitlenme miktarı), kaplama yapılmamış yapı çeliğinin ağırlık artışına oranla çok daha az miktarda olduğu görülmektedir. Bu durum, alüminyum kaplamanın yüzeyinde doğal olarak oluşan Al_2O_3 ’ün, alüminyum yüzeyini stabilize ederek metalin ortam ile daha fazla reaksiyona girmesini önlemesi ile açıklanabilmektedir.

Çizelge 4.9. Oksitleme işlemi sonucu ağırlık değişimleri

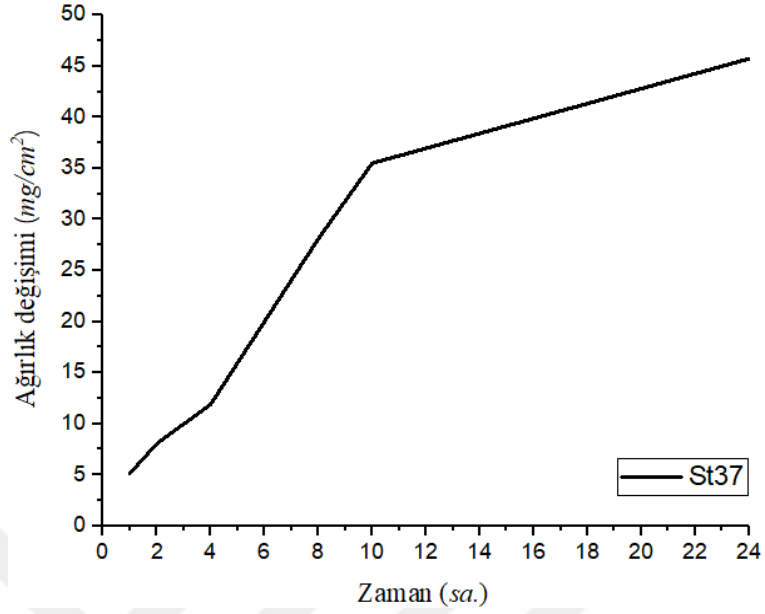
SÜRE	AĞIRLIK DEĞİŞİMLERİ (g)			
	Kaplamasız Numune	AA1050 Kaplama	AA2024 Kaplama	AA5083 Kaplama
Önce	43,6899	57,4547	57,0576	43,1701
1 saat	43,9138	57,4725	57,0770	43,1953
2 saat	44,0403	57,4766	57,0878	43,1986
4 saat	44,2071	57,4845	57,0996	43,2020
8 saat	44,9123	57,4858	57,1089	43,2032
10 saat	45,2331	57,4875	57,1078	43,2039
24 saat	45,6784	57,4905	57,1083	43,2051

Şekil 4.27’de kaplama yapılmamış ve farklı AA’lar ile kaplanmış BLN’lerin 750°C’de 24 saat boyunca oksitleme işlemine tabi tutulmadan önceki ve sonraki görüntüleri verilmiştir.



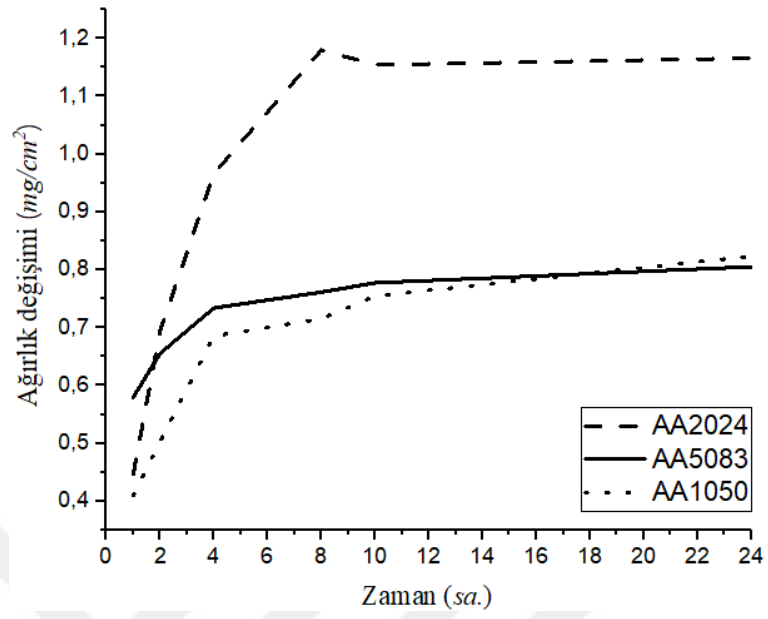
Şekil 4.27. BLN'lerin oksidasyon öncesi ve sonrası görüntüleri

Şekil 4.28'de kaplama işlemi yapılmamış St37'nin oksitleme işlemi sonundaki ağırlık değişimi mg/cm^2 cinsinden verilmiştir. Şekil 4.28 incelendiğinde St37'nin oksitleme işlemi sırasındaki ağırlık artışı, kaplanmış numunelerden yaklaşık olarak 50 kat daha fazladır.



Şekil 4.28. Oksitleme yapılmış St37 çeliğinin ağırlık değişimi

Şekil 4.29'da, AA1050, AA2024 ve AA5083 serileri ile kaplanmış yapı çeliklerinin oksitleme işlemi sonundaki ağırlık değişimleri görülmektedir. Şekil 4.29 incelendiğinde, kaplama yapılmış çelikler arasında bir kıyaslama yapılacak olursa en fazla ağırlık artışının AA2024 ile kaplanmış çeliklerde olduğu görülmektedir. Bu durum, yüzeyi AA2024 ile iyi kaplanmamış çeliğin, oksidasyon sırasında taban malzemenin de oksitlenmesi ve ağırlık artışını etkilemesi ile açıklanabilmektedir. AA1050 ve AA5083'ün ağırlık artışları kıyaslandığında, AA1050 ile kaplanmış çeliğin ağırlık artışının ilk on saat içerisinde yaklaşık 0.74 mg/cm^2 olduğu ve ilerleyen saatlerde artışın az da olsa kademeli bir şekilde devam ettiği görülmektedir. AA5083 ile kaplanmış çelikte ise ilk on saatte ağırlık artışının yaklaşık 0.78 mg/cm^2 olduğu ve ilerleyen saatlerde artışın yatay ekseninde stabile yakın bir doğrultuda devam ettiği görülmektedir. Bu durum AA5083 serisinin endüstriyel olarak yüksek oksidasyon direncinin istendiği ortamlarda çokça kullanılmasını desteklemektedir.



Şekil 4.29. Oksitleme yapılmış AA1050, AA2024 ve AA5083 kaplamaların ağırlık değişimi

5. SONUÇ

Yapılan tez çalışmasında alüminyum alaşımları ile kaplanan yapı çeliklerinin içyapısı, büyütülen kaplama ve difüzyon tabakalarının kalınlıkları ile sertlik değerleri, kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin korozyon ve oksidasyon davranışları incelenmiştir. Kaplama yöntemi olarak sıcak daldırma işlemi kullanılmıştır. Daldırma sıcaklığı sabit ve 700°C'de, daldırma süreleri ise 1, 3 ve 5 dakika olarak belirlenmiştir. Bu bilgiler ışığında yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır;

1. Kaplama işlemi öncesinde taban ve kaplama malzemelerine sadece mekanik olarak temizlenme yapıldıktan sonra kaplamalar başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
2. Kaplama işlemine başlamadan önce taban malzemenin yüzeyinde oluşması muhtemel oksit tabakaların daldırma işleminden hemen önce giderilmesi ve yine daldırma işleminden hemen önce eriyik alüminyum banyosunun yüzeyinde meydana gelebilecek cüruf tabakasının alınması, kaplama işlemi sonunda taban malzemeye daha iyi bir şekilde yapışmış kaplama tabakaları elde edilmesine olanak tanımıştır. Daldırma süresinin sona ermesine yakın bir sürede eriyik alüminyum banyosunun yüzeyinden tekrar bir cüruf alma işlemi uygulanmış ve böylece kaplamanın yüzey kalitesinin arttığı gözlenmiştir.
3. Daldırma işleminin bitmesiyle alüminyum eriyikten çıkarılan numuneler vakit kaybetmeden su verilmek suretiyle soğutulmuştur. Suda soğutma işlemi birkaç saniye sürmüştü ve ardından oda sıcaklığında soğutma işlemine devam edilmiştir. Suda soğutma işleminin birkaç saniye ile sınırlandırılması ve ardından hava ortamında soğutmaya devam edilmesi kaplamanın adezyonunu daha da iyileştirmiş ve oluşacak olan intermetalik tabakanın çelik içerisine difüzyonunun rahat bir şekilde, soğutma işlemi boyunca da devam etmesini sağlamıştır. Bu sayede üst katmandaki alüminyumun soğuma sırasında çelik malzeme yüzeyinden, farklı termal genleşmeler nedeniyle koparak ayrılması engellenmiştir.
4. Kaplamaların kesit incelemesi sonucunda üst yüzeyde alüminyum kaplamadan ve ara yüzeyde Fe-Al intermetalik tabakasından oluşan iki farklı yapının olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan XRD analizleri sonucunda intermetalik tabakanın yapısının,

Fe_2Al_5 ve $FeAl_3$ fazlarından oluştuğu tespit edilmiş. İntermetalik tabakalardan alınan sertlik değerleri de XRD sonuçlarını desteklemektedir.

5. Kesit incelemesi sonucunda literatürde de belirtildiği gibi, daldırma süresinin artmasıyla birlikte intermetalik tabaka kalınlığının genellikle arttığı görülmüştür. Literatürdeki çalışmalara benzer olarak, daldırma süresinin artmasıyla birlikte intermetalik tabakanın parmak benzeri bir morfolojiye sahip olduğu, daldırma süresinin daha da artmasıyla bazı numunelerde parmak benzeri yapının, yerini daha düzgün bir yapıya bıraktığı tespit edilmiştir.

6. Kaplama sonrasında çelik taban malzemenin sertlik değerlerinde önemli bir fark görülmemiştir. Bu da kaplama esnasında ve sonrasında çeliğin banyo sıcaklığından etkilenmediğini göstermektedir. Sertlik deneyinde genel olarak kaplanmış numunelerin intermetalik tabaka sertliklerinin artan daldırma süresiyle birlikte arttığı gözlemlenmiştir. Üç farklı tür alüminyum alaşımı ile kaplanan çeliklerinin intermetalik tabakalarının sertlikleri arasında bir kıyaslama yapıldığında AA2024 serisi ile kaplanmış yapı çeliklerinin intermetalik tabakasının sertliği diğer AA'lar ile kaplanmış çeliklere nazaran daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeninin AA2024'ün içerdiği alaşım elementlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

7. Kaplanmış numunelerin XRD analizleri sonucunda oluşan kaplama tabakasından alınan XRD pikleri ile AA'lardan alınan pikler önemli bir farklılık olmadığı görülmüştür. Bu da alüminyum alaşımlarının kompozisyonlarında bir değişim olmaksızın çelik yüzeye kaplandığını göstermektedir.

8. Yapılan SEM-EDS analizlerinde AA1050 ve AA5083 ile kaplanmış numunelerde intermetalik tabakanın baskın olarak Fe_2Al_5 'den, AA2024 ile kaplanmış numunelerde ise baskın olarak $FeAl_3$ 'den oluştuğu görülmüştür.

9. Yapılan taneler arası korozyon testi sonucunda AA1050 serisi ile kaplanmış çelik numunelerde korozyon oluşmadığı sadece delaminasyon olayının gerçekleştiği görülmüştür. AA2024 serisi ile kaplanmış çelik numunelerde ise taneler arası korozyonun üst alüminyum tabakasını geçip intermetalik tabakaya kadar ulaştığı fakat intermetalik tabakayı aşamayıp çeliğe ulaşmadığı görülmüştür. AA5083 serisi ile kaplanmış çelik numunelerde ise homojen bir kaplama tabakasının yanı sıra az miktarda taneler arası korozyon görülmüş fakat intermetalik ve çelik tabakaya ulaşamamıştır. Bu durumda da çeliğin korozyondan korunduğu görülmektedir.

10. Daldırmalı korozyon deneyleri sonucunda en az ağırlık kaybının AA5083 ile kaplanmış yapı çeliklerinde olduğu gözlemlenmiştir. Denizsel ortamlarda kullanılacak çeliklere AA5083 serisinin kaplanması durumunda korozyon kayıplarının en az olacağı ve AA1050 ile AA2024 alaşımlarına kıyasla daha iyi bir koruma yapacağı söylenebilir.

11. 750°C’de 24 saat boyunca gerçekleştirilen oksitleme işlemi sonucunda numunelerin ağırlık değişimleri incelenmiştir. Kaplanmamış numunelerdeki ağırlık artışının, kaplanmış numunelere oranla yaklaşık 50 kat daha fazla olduğu görülmüştür. AA5083 serisi ile kaplanmış çelik numunelerin ağırlık artışının diğer tüm numunelere oranla daha düşük çıkmıştır. Bu da AA5083 serisi ile yapılan kaplamaların oksidasyon direncinin gerekli olduğu alanlarda kullanılabileceğini düşündürmektedir.

Yapılan incelemelerde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, sıcak daldırma ile alüminyum kaplanmış yapı çeliklerinin, alüminyum kaplama tabaksı ve intermetalik tabaka sayesinde korozyondan korunduğu tespit edilmiştir. Böylece korozyon direncinin ve yüksek oksidasyon direncinin gerekli olduğu alanlarda sıcak daldırma ile alüminyum kaplanmış çelikler kullanılabilir. Oluşan intermetalik tabakanın kalınlığını azaltmak, korozyon, oksidasyon ve mukavemet özelliklerini daha da arttırabilir. Bu amaçla alüminyum banyosu içerisine değişen oranlarda silisyum ilave edilmesi bu yapının daha ince ve gevrek olmayan bir hale gelmesini sağlayacaktır. Ayrıca intermetalik tabaka kalınlığını ve sertliğini azaltmanın bir diğer yolu da kaplama işleminden sonra numunelere ısı işlem uygulamak olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ahmad, Z., 2006. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Elsevier, UK.
- Akdeniz, M. V. and Mekhrabov, A. O., 1998. The effect of substitutional impurities on the evolution of Fe-Al diffusion layer. *Acta Materialia*, 46(4), 1185-1192.
- Akdeniz, M., Mekhrabov, A. and Yilmaz, T., 1994. The role of Si addition on the interfacial interaction in Fe-Al diffusion layer. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 31(12), 1723-1728.
- Altun, H., 1998, Sıcak Daldırma Yöntemiyle Çeliğin Çinko ve Çinko-Alüminyum Alaşımı İle Kaplanması.Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği ABD.
- Aribo, S., 2014, Corrosion and erosion-corrosion behaviour of lean duplex stainless steels in marine and oilfield environments.PhD Thesis, Mechanical Engineering.
- Ashby, M. F. and Cebon, D., 1993. Materials selection in mechanical design. Butterworth Heinemann, UK.
- Askeland, D. R., Phulé, P. P. and Wright, W. J., 2010. The science and engineering of materials. Global Engineering, USA.
- Association, A., 1984. Aluminum: properties and physical metallurgy. ASM International.
- Ata, Ş., 2018, CuAl bazlı yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımların üretimi ve oksidasyon davranışının incelenmesi.Yüksek Lisans Tezi, Fizik ABD.
- Awan, G. H. and Ul Hasan, F., 2008. The morphology of coating/substrate interface in hot-dip-aluminized steels. *Materials Science and Engineering: A*, 472(1-2), 157-165.
- Awan, G. H., 2001, The Morphology of Coating-Substrate Interface in Hot-Dip-Aluminized Steels.PhD Thesis, Metallurgical & Materials Engineering.
- Awan, G., Ahmed, F., Ali, L., Hasan, F. and Shuja, M., 2008. Effect of coating-thickness on the formability of hot dip aluminized steel. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2 13-21.
- Bhat Kuruveri, U., Huilgol, P. and Joseph, J., 2013. Aluminising of Mild Steel Plates. *ISRN Metallurgy*, 1-6.
- Bindumadhavan, P. N., Makesh, S., Gowrishankar, N., Keng Wah, H. and Prabhakar, O., 2000. Aluminizing and subsequent nitriding of plain carbon low alloy steels for piston ring applications. *Surface and Coatings Technology*, 127(2), 251-258.
- Bouché, K., Barbier, F. and Coulet, A., 1998. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. *Materials Science and Engineering: A*, 249(1), 167-175.
- Cahn, R. W. and Haasen, P., 1996. Physical Metallurgy Volume 1. Elsevier Science, NORTH-HOLLAND.
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G., 2007. Materials Science and Engineering. John wiley & sons New York.
- Campbell, T., Kalia, R. K., Nakano, A., Vashishta, P., Ogata, S. and Rodgers, S., 1999. Dynamics of oxidation of aluminum nanoclusters using variable charge molecular-dynamics simulations on parallel computers. *Physical Review Letters*, 82(24), 4866-4869.

- Caseres, L., 2007, Electrochemical behavior of aluminized steel type 2 in scale-forming waters. PhD Thesis, Civil and Environmental Engineering
- Chang, Y.-Y., Tsaur, C.-C. and Rock, J. C., 2006. Microstructure studies of an aluminide coating on 9Cr-1Mo steel during high temperature oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 200(22), 6588-6593.
- Cheng, W.-J. and Wang, C.-J., 2011. Effect of silicon on the formation of intermetallic phases in aluminide coating on mild steel. *Intermetallics*, 19(10), 1455-1460.
- Cheng, W.-J. and Wang, C.-J., 2013. High-temperature oxidation behavior of hot-dipped aluminide mild steel with various silicon contents. *Applied surface science*, 274 258-265.
- Cotell, C. M., Sprague, J. A. and Smidt, F. A., 1994. *ASM Handbook Volume 5: Surface Engineering*. ASM International, USA.
- Davis, J. R., 1993. *ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys*. General Introduction, USA, ASM International, 784.
- Davis, J. R., 1999. *Corrosion of aluminum and aluminum alloys*. Key Characteristics of Aluminum, USA, ASM International, 313.
- Davis, J. R., 2000. *Corrosion: Understanding the basics*. ASM International, USA.
- Deqing, W. and Ziyuan, S., 2003. Effect of Ceramic Particles on Cell Size and Wall Thickness of Aluminum Foam. *Materials Science and Engineering: A*, 361 45-49.
- Deqing, W., 2008. Phase evolution of an aluminized steel by oxidation treatment. *Applied surface science*, 254(10), 3026-3032.
- Deqing, W., Ziyuan, S. and Longjiang, Z., 2003. A liquid aluminum corrosion resistance surface on steel substrate. *Applied surface science*, 214(1), 304-311.
- Dos Santos Júnior, J., Mattoso, L. H. C. and Motheo, A., 1998. Investigation of corrosion protection of steel by polyaniline films. 309-313.
- Eggeler, G., Auer, W. and Kaesche, H., 1986. On the influence of silicon on the growth of the alloy layer during hot dip aluminizing. *Journal of Materials Science*, 21(9), 3348-3350.
- ETİaluminyum, 2019. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kimyasal Bileşimleri. Retrieved, <http://www.etialuminyum.com/>
- Flenner, P., 2007. *Carbon Steel Handbook*. Electric Power Research Institute, USA.
- George, E. and MacKenzie, D., 2003. *Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Processes*. Marcel Dekker Inc., New York, 1309, USA.
- Hascometal, 2019. Yapı Çeliklerinin Kimyasal Bileşimleri ve Mekanik Özellikleri. Retrieved, <http://www.hascometal.com/teknik-bilgiler.aspx?ID=71>
- Huilgol, P., Bhat, S. and Bhat, K. U., 2013. Hot-Dip Aluminizing of Low Carbon Steel Using Al-7Si-2Cu Alloy Baths. *Journal of Coatings*, 6.
- Hwang, S.-H., Song, J.-H. and Kim, Y.-S., 2005. Effects of carbon content of carbon steel on its dissolution into a molten aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 390(1), 437-443.
- Isiko, M. B., 2012, Aluminizing of plain carbon steel: Effect of temperature on coating and alloy phase morphology at constant holding time. MS Thesis, Materials Science and Engineering.
- Ismail, A., 2014, Seawater as a hydraulic fluid; corrosion mechanisms and rates of engineering materials. PhD Thesis, Mechanical Engineering

- Jiang, W., Fan, Z., Dai, Y. and Li, C., 2014. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 597 237-244.
- Jiang, W., Fan, Z., Li, G., Liu, X. and Liu, F., 2016. Effects of hot-dip galvanizing and aluminizing on interfacial microstructures and mechanical properties of aluminum/iron bimetallic composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 688 742-751.
- Johnson, M., Mikkola, D. E., March, P. A. and Wright, R. N., 1990. The resistance of nickel and iron aluminides to cavitation erosion and abrasive wear. *Wear*, 140(2), 279-289.
- Jones, D. A., 1992. *Principles and prevention of corrosion*. Prentice Hall, USA.
- Kennedy, D., Xue, Y. and Mihaylova, E., 2005. Current and future applications of surface engineering. *School of Mechanical and Design Engineering*, 59 287-292.
- Kim, K. H., van Daele, B., Van Tendeloo, G. and Yoon, J. K., 2006. Observations of intermetallic compound formation of hot dip aluminized steel. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publ.
- Kobayashi, S. and Yakou, T., 2002. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 338(1), 44-53.
- Koçanaoğulları, S., 2010, *Demir Esaslı Toz Metalürji ile Üretilmiş Parçalarda Alüminyum Kaplamannın Yüzey Özelliklerine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği ABD.
- Lemmens, B., Gonzalez Garcia, Y., Corlu, B., De Strycker, J., De Graeve, I. and Verbeken, K., 2014. Study of the electrochemical behaviour of aluminized steel. *Surface and Coatings Technology*, 260 34-38.
- Liu, R., 2009. *An Overview of Aluminum Protective Coating Properties and Treatments*. OPTI, The University of ARIZONA, 8.
- Mahallawy, N., Taha, M., A. Shady, M., R. Ei-Sissi, A., N. Attia, A. and Reif, W., 1997. Analysis of coating layer formed on steel strips during aluminizing by hot dipping in Al-Si baths. *Materials Science and Technology*, 13 832-840.
- Majumdar, S., Paul, B., Kain, V. and Dey, G. K., 2017. Formation of Al₂O₃/Fe-Al layers on SS 316 surface by pack aluminizing and heat treatment. *Materials Chemistry and Physics*, 190 31-37.
- Mao, F., Yan, G., Xuan, Z., Cao, Z. and Wang, T., 2015. Effect of Eu addition on the microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 650 896-906.
- Marker, M. C., 2013, *Phase-equilibria, structural and physical characterization in the ternary system Al-Fe-Si and the quaternary system Al-Fe-Si-Ti*. PhD Thesis, Chemistry.
- Mehrer, H., Eggersmann, M., Gude, A., Salamon, M. and Sepiol, B., 1997. Diffusion in intermetallic phases of the Fe-Al and Fe-Si systems. *Materials Science and Engineering: A*, 239-240 889-898.
- Parlakıyığıt, A. S., 2013, *Termal bariyer kaplamaların izotermal oksidasyon davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği
- Pasinli, A. ve Köksal, N. S., 2009. *Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplanan Çelik Malzemelerde Yüksek Sıcaklık Oksidasyonunun İncelenmesi*. Dokuz

- Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 11(31), 9.
- Pflitsch, C., Curdts, B., Buck, V. and Atakan, B., 2007. Wear properties of MOCVD-grown aluminium oxide films studied by cavitation erosion experiments. *Surface and Coatings Technology*, 201(22-23), 9299-9303.
- Polmear, I., 1996. Recent developments in light alloys. *Materials transactions, JIM*, 37(1), 12-31.
- Pradhan, D., Manna, M. and Dutta, M., 2014. Al–Mg–Mn alloy coating on steel with superior corrosion behavior. *Surface and Coatings Technology*, 258 405-414.
- Revie, R. W. and Uhlig, H. H., 2008. *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons, Canada.
- Roberge, P. R., 2000. *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill, USA.
- Roberge, P. R., 2008. *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill USA.
- Rodriguez-Calvillo, P., Suárez, L. and Houbaert, Y., 2010. Al-Si-Fe Intermetallics on Fe-Substrates during Hot-Dipping. *Defect and Diffusion Forum*, 297-301 1042-1047.
- Savaşkan, T., 1999. *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Derya Kitabevi.
- Schweitzer, P. A., 2003. *Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties*. CRC press, USA.
- Shaha, S., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J. and Chen, D., 2014. Effect of Zr, V and Ti on hot compression behavior of the Al–Si cast alloy for powertrain applications. *Journal of Alloys and Compounds*, 615 1019-1031.
- Shih, T.-S. and Tu, S.-H., 2007. Interaction of steel with pure Al, Al–7Si and A356 alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 454-455 349-356.
- Springer, H., Kostka, A., Payton, E. J., Raabe, D., Kaysser-Pyzalla, A. and Eggeler, G., 2011. On the formation and growth of intermetallic phases during interdiffusion between low-carbon steel and aluminum alloys. *Acta Materialia*, 59(4), 1586-1600.
- Stansbury, E. E. and Buchanan, R. A., 2000. *Fundamentals of electrochemical corrosion*. ASM international, USA.
- Su, C. W., Lee, J. W., Wang, C. S., Chao, C. G. and Liu, T. F., 2008. The effect of hot-dipped aluminum coatings on Fe-8Al-30Mn-0.8C alloy. *Surface and Coatings Technology*, 202(9), 1847-1852.
- Sui, Y., Wang, Q., Ye, B., Zhang, L., Jiang, H. and Ding, W., 2015. Effect of solidification sequence on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al–11Si–2Cu–Fe alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 649 679-686.
- Sundqvist, M. and Hogmark, S., 1993. Effects of liquid aluminium on hot-work tool steel. *Tribology international*, 26(2), 129-134.
- Takata, N., Nishimoto, M., Kobayashi, S. and Takeyama, M., 2015. Crystallography of Fe₂Al₅ phase at the interface between solid Fe and liquid Al. *Intermetallics*, 67 1-11.
- Tan, C. K. and Blackwood, D. J., 2003. Corrosion protection by multilayered conducting polymer coatings. *Corrosion Science*, 45(3), 545-557.
- Tilak Kumar, J., Rajarajan, S. and Rajendran, R., 2015. Corrosive Wear of Aluminized Steel. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(3), 91-97.
- Tracton, A. A., 2006. *Coatings materials and surface coatings*. CRC Press, USA.

- Tsunekawa, Y., Tamura, S., Okumiya, M. and Ishihara, N., 2008. Hot-Dip Coating of Lead-free Aluminum on Steel Substrates with Ultrasonic Vibration. *Journal of Materials Science and Technology*, 24 41-44.
- Vargel, C., 2004. *Corrosion of aluminium*. Elsevier, UK.
- Viala, J. C., Peronnet, M., Barbeau, F., Bosselet, F. and Bouix, J., 2002. Interface chemistry in aluminium alloy castings reinforced with iron base inserts. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(10), 1417-1420.
- Wagner, C. and Traud, W., 2006. "On the Interpretation of Corrosion Processes through the Superposition of Electrochemical Partial Processes and on the Potential of Mixed Electrodes," with a Perspective by F. Mansfeld. *Corrosion*, 62(10), 843-855.
- Wang, C.-J. and Chen, S.-M., 2006. Microstructure and cyclic oxidation behavior of hot dip aluminized coating on Ni-base superalloy Inconel 718. *Surface and Coatings Technology*, 201(7), 3862-3866.
- Wang, C.-J. and Chen, S.-M., 2006. The high-temperature oxidation behavior of hot-dipping Al-Si coating on low carbon steel. *Surface and Coatings Technology*, 200(22), 6601-6605.
- Yalçın, H. ve Koç, T., 1998. Mühendisler için korozyon. Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Kimya Mühendisleri Odası.
- Yalçınkaya, S., 2008, Poli (Piról-Ko-O-Toluidin)'in Elektrokimyasal Sentezi Karakterizasyonu ve Demirli Malzemeler Üzerinde Korozyon Performansının Belirlenmesi. Doktora Tezi, Kimya ABD.
- Yaşar, R., 2009, Sıcak daldırma galvanizli çelik tel üretiminde ürün kalitesinin artırılması. Yüksek Lisans Tezi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği.
- Yousaf, M., 2011, Variables Affecting Growth and Morphology of the Intermetallic Layer (Fe₂Al₅) of Steel Aluminized in Al-Cu Alloys. PhD Thesis, Metallurgical and Materials Engineering.
- Yousaf, M., Iqbal, J. and Ajmal, M., 2011. Variables affecting growth and morphology of the intermetallic layer (Fe₂Al₅). *Materials Characterization*, 62(5), 517-525.

ÖZGEÇMİŞ

Furkan KALAN, 1994 yılında Hatay’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Hatay’da tamamladıktan sonra 2012 yılında Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. Lisans eğitimini 2016 yılında tamamladıktan sonra aynı yıl Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

