

**T.C.
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEMİR ESASLI TOZ METALÜRJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARDA
ALÜMİNYUM KAPLAMANIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sedat KOÇANAĞULLARI**

**Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Programı : Konstrüksiyon ve İmalat**

MANİSA 2010

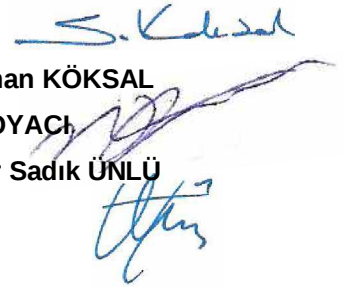
T.C.
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİR ESASLI TOZ METALÜRJİSİ İLE ÜRETİLMİŞ PARÇALARDA
ALÜMİNYUM KAPLAMANIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Sedat KOÇANAĞULLARI

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22. 10. 2010
Tezin Savunulduğu Tarih : 08. 11. 2010

Tez Danışmanı : Yard.Doç.Dr. N.Sinan KÖKSAL
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hakan BOYACI
Yard.Doç.Dr. Bekir Sadık ÜNLÜ



MANİSA 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
SEMBOL LİSTESİ:.....	IV
ŞEKİL LİSTESİ:	V
ÇİZELGE LİSTESİ:	VII
KISALTMALAR LİSTESİ:	VIII
TEŞEKKÜR:	IX
ÖZET	X
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALÜRJİSİ.....	2
2.1. Toz Metalürjisi Nedir?.....	2
2.2. Toz Üretimi.....	2
2.2.1. Mekanik Yöntemler.....	3
2.2.1.1. Talaşlı üretim Yöntemleri.....	3
2.2.1.2. Öğütme.....	3
2.2.1.3. Mekanik alaşımlama.....	3
2.2.2. Kimyasal Yöntemler	4
2.2.3. Elektroliz Yöntemi.....	4
2.2.4. Atomizasyon Yöntemi.....	4
2.3. Toz Metal Parçaların Üretimi	5
2.3.1. Karıştırma	6
2.3.2. Presleme.....	6
2.3.3. Sinterleme.....	6
2.3.4. İnfiltrasyon.....	7
2.3.5. Yağ Emdirme	7
2.3.6. Boyutlandırma.....	7
2.3.7. İkinci Presleme.....	7
2.3.8. Buharlama İşlemi	7
2.3.9. Talaşlı İmalat.....	7
2.3.10. Çapak Alma	8
2.3.11. Birleştirme.....	8
2.3.12. Isıl İşlem.....	8
2.3.13. Yüzey Kaplama.....	8
2.4. TM Parçaların Özellikleri	8
3. ÇELİK ÜZERİNE ALÜMİNYUM KAPLAMA YÖNTEMLERİ	9
3.1. Kutu Alüminyum Kaplama (Pack Aluminising).....	9
3.2. Püskürtme ile Alüminyum Kaplama	9
3.3. Vakum Alüminyum Kaplama.....	10
3.4. Gaz Alüminyum Kaplama	11

3.5.	Fiziksel Buhar Çöktürme Yöntemi ile Alüminyum Kaplama (PVD)	11
3.6.	Giydirme	12
3.7.	Elektrolitik Alüminyum Kaplama.....	12
3.8.	Elektroforez.....	13
3.9.	Sıcak Daldırma ile Alüminyum Kaplama	13
4.	SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ÇELİK ÜZERİNE ALÜMİNYUM KAPLANMASI.....	15
4.1.	Demir— Alüminyum Reaksiyonunun Teorik Yönden İncelenmesi	15
4.1.1.	Demir-Alüminyum Reaksiyonunun Kinetik Açısından İncelenmesi	15
4.1.2.	Demir - Alüminyum İntermetalik Fazların incelenmesi	18
4.1.3.	İntermetalik Fazların Oluşum Mekanizması.....	20
4.2.	Kaplama ve Ara Tabaka Kalınlığına Etki Eden Faktörler	27
4.2.1.	Kaplanan parçanın banyodan çıkış hızının etkisi.....	27
4.2.2.	Alüminyum Banyosunun Kimyasal Bileşiminin Etkisi	28
4.2.2.1.	Silisyum	28
4.2.2.2.	Çinko	29
4.2.2.3.	Demir	29
4.2.2.4.	Nikel.....	30
4.2.2.5.	Magnezyum	30
4.2.2.6.	Berilyum.....	30
4.2.2.7.	Titanyum	30
4.2.3.	Kaplanan Demir Bileşiminin Etkisi.....	30
4.2.4.	Alüminyum Kaplama Koşullarının Etkisi.....	31
4.3.	Sıcak Daldırma ile Alüminyum Kaplama Prosesi.....	32
4.4.	Alüminyum Kaplı Çeliklerin Özellikleri.....	38
4.4.1.	Korozyon Dayanımı.....	38
4.4.2.	Oksidasyon direnci	40
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
5.1.	Malzemeler ve Özellikleri.....	42
5.2.	Kaplamasız Toz Metal Parçaların Özelliklerinin Belirlenmesi.....	45
5.2.1.	Ağırlık Ölçümleri.....	45
5.2.2.	Sertlik Ölçümleri	45
5.2.3.	Yüzey Pürüzlük Ölçümleri.....	47
5.2.4.	Mikroyapıların İncelenmesi	47
5.2.5.	Kaplamasız Numunelerin Korozyon Testi	49
5.3.	Toz Metal Parçaların Alüminyum Kaplanması.....	53
5.3.1.	Yüzey Hazırlama İşlemleri	53
5.3.2.	Kaplama İşlemi.....	54
5.3.3.	Mikroyapıların İncelenmesi	56
5.3.4.	Kaplama Kusurlarının Belirlenmesi	62

5.3.5.	Kaplanmış Numunelerin Korozyon Testi	64
5.4.	Deney Sonuçları ve İrdelenmesi	66
6.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	68
	KAYNAKLAR	69
	ÖZGEÇMİŞ.....	72

SEMBOL LİSTESİ:

D: Difüzyon katsayısı

Do: Frekans faktörü

Q: Aktivasyon enerjisi

R: Gaz sabiti

T: Mutlak sıcaklık K °

k: Hız sabiti

t: zaman (s)

α : Alfa Fazı

η : Eta Fazı

ξ : Zeta Fazı

ζ : Tau Fazı

θ : Teta Fazı

W: Çıkış hızı (cm/s)

n: Dinamik viskozite (cP)

D: Alüminyumun yoğunluğu (g/cm³)

g: Yerçekimi ivmesi (cm/s²)

f: Kinematik viskozite (cSt)

ŞEKİL LİSTESİ:

<u>Şekil No</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Toz metal tekniği kullanılarak üretilmiş bazı örnekleri [3].....	2
Şekil 2.2. Bilyeli öğütme yöntemi [10].	3
Şekil 2.3. Mekanik alaşımlama yöntemi [12].	3
Şekil 2.4. Elektroliz ile toz üretimi [10].....	4
Şekil 2.5. Toz Metalürjisi ile üretim aşamaları [8].	5
Şekil 2.6. Presleme işleminin basamakları [10].	6
Şekil 3.1. Püskürtme Alüminyum kaplama	10
Şekil 4.1. Demir-alüminyum faz diyagramı [15].	18
Şekil 4.2. Fe-Al intermetalik bileşiklerinin serbest enerjileri ile sıcaklık arasındaki ilişki [15]. ..	19
Şekil 4.3. Fe-Al intermetalik bileşiklerinin mikrosertlik değerleri ve difüzyon katsayıları [15]. ..	19
Şekil 4.4. Katı demir-sıvı alüminyum etkileşiminin şematik diyagramı [15].	20
Şekil 4.5. Üç adet (η) fazı (Fe_2Al_5) birim hücresinin birbiri üzerine dizilmiş paterni [15].....	21
Şekil 4.6. Alüminyum kaplamanın ilerleme mekanizması [22].....	23
Şekil 4.7. Ara tabaka sınırında oluşan geçiş reaksiyonları ve işaretçi oluşumu (Marker) [22].	24
Şekil 4.8. Sade karbon çeliklerde, diğer elementlerin ara tabaka kalınlığına etkisi [2].	28
Şekil 4.9. Silisyumun demir-alüminyum ara tabakası kalınlığına etkisi [16].	29
Şekil 4.10. Sendzimir tip alüminyum kaplama hattının şematik görünümü [21].	34
Şekil 4.11. Kaplanmış çeliğin değişik pH değerlerindeki çözeltilerdeki korozyon direnci [17]....	39
Şekil 4.12. Galvaniz ve Tip1 alüminyum kaplı çeliklerin atmosferik korozyon dayanımları [21].	40
Şekil 4.13. Alüminyum kaplı çeliğin ısıtma karşısındaki davranışı [51].....	40
Şekil 4.14. Ç1020 Numunesine kaplama ve ısıtma işlem sonrası mikroyapısı.	41
Şekil 4.15. AISI 316 Numunesine ait kaplama ve ısıtma işlem sonrası mikroyapısı.	41
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan Toz Metal (TM) numune [53].....	42
Şekil 5.2. Eksantrik Baskı Presi ve Otomatik Beslemeli Kalıp Sistemi [53].....	43
Şekil 5.3. Çelik-tel örgülü kayışlı fırın [53].	44
Şekil 5.4. Fırın girişi ve çıkışı [53].	44
Şekil 5.5. Sertlik ölçüm noktaları.....	46
Şekil 5.6. Numunelerden karbon oranına bağlı sertlik değişimi.....	46
Şekil 5.7. Rockwell Mitutoyo SJ-301 yüzey pürüzlük ölçüm cihazı.....	47
Şekil 5.8. Kaplamasız toz-metal numunelere ait mikroyapı görüntüleri; a) A, b) B, c) C, d) D.	48
Şekil 5.9. Korozyon test cihazı [55].	49
Şekil 5.10. Kaplamasız numunelerin yüzeyinde zamana bağlı korozyon ilerlemesi.....	50
Şekil 5.11. A Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.	51
Şekil 5.12. B Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.	51
Şekil 5.13. C Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.	52
Şekil 5.14. D Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.....	52
Şekil 5.15. Numunelere sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama süreci	53

Şekil 5.16. Kaplama deney düzeneği.....	55
Şekil 5.17. A numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (750 °C - 5dk.)	57
Şekil 5.18. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (700°C- 30 s).	57
Şekil 5.19. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (700°C- 5 dk).	58
Şekil 5.20. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (750°C- 30 s).	58
Şekil 5.21. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (750°C- 5 dk).	58
Şekil 5.22 A numunesine ait SEM görüntüsü, (700 °C - 5dk).....	60
Şekil 5.23 D numunesine ait SEM görüntüsü, (700 °C - 5dk).	61
Şekil 5.24. D numunesinin 750 °C - 5dk şartlarında kaplamada oluşan kusurlar.....	62
Şekil 5.25. Kaplama kusurları olan numunelere ait mikroyapılar.....	63
Şekil 5.26. Kaplamalı numunelerde zamana bağlı yüzeyde oluşan korozyon ilerlemesi.....	64
Şekil 5.27. 90 gün korozyon testi uygulanan B (750°C, 5dk) numunesine ait mikroyapı.....	65

ÇİZELGE LİSTESİ:

<u>Çizelge No</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Bazı TM parça örnekleri [3].	8
Tablo 3.1. Alüminyum kaplama yöntemleriyle ilgili karşılaştırmalı bilgiler [15].	14
Tablo 4.1. Fe-Al sistemindeki intermetalik fazların oluşum serbest enerji değişimleri [15].	18
Tablo 4.2. Sıcak daldırma alüminyum kaplamada kullanılan flaksların bileşimi [15].	37
Tablo 5.1. Numunelerin kimyasal bileşimi (%) [52].	42
Tablo 5.2. Etial 171 alaşımına ait yüzde kimyasal bileşim oranları [54].	45
Tablo 5.3. Numunelerin ağırlık ölçümleri (g).	45
Tablo 5.4. Brinell sertlik ölçümü (HB).	46
Tablo 5.5. Pürüzlük Ölçümü Ra (μm).	47
Tablo 5.6. Korozyon Sonucu Oluşan % Kütle Kaybı.	49
Tablo 5.7. Alüminyum tabaka kalınlığı (μm).	59
Tablo 5.8. İntermetalik ara tabaka kalınlığı (μm).	59
Tablo 5.9. A numunesine ait EDS analizi, moleküler yoğunluk grafiği, (700 °C - 5dk).	60
Tablo 5.10. A numunesine ait EDS analizi, elementlerin % ağırlık tablosu, (700 °C - 5dk).	60
Tablo 5.11. D numunesine ait EDS analizi, moleküler yoğunluk grafiği, (700 °C - 5dk).	61
Tablo 5.12. D numunesine ait EDS analizi, elementlerin % ağırlık tablosu (700 °C - 5dk).	61
Tablo 5.13. Korozyon sonucu oluşan kütle kaybı (% değişim).	65

KISALTMALAR LİSTESİ:

TM: Toz metal

PM: Powder Metal

USA: United States of America

ASTM: American Society for Testing and Materials

ISO: International Organization for Standardization

PLC: Programmable Logic Controller

SEM: Scanning Electron Microscope

EDS: Energy Dispersive Spectroscopy

TEŞEKKÜR:

Bu çalışmada bana destek ve yardımcı olan Değerli hocam Yrd. Doç. Dr. N. Sinan KÖKSAL ve yine değerli öneri ve katkılarından dolayı Prof. Dr. Hakan BOYACI ve Yard. Doç Dr. Bekir Sadık ÜNLÜ, Öğr. Gör. Dr. Mustafa KARAMOLLA, Öğr. Gör. Dr. Halit DOĞAN hocalarıma ve İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Prof.Dr. Süheyla AYDIN hocama şükranlarımı sunarım. Ayrıca deneysel çalışmalarım sırasında teknik bilgi ve desteklerini esirgemeyen, Höganäs AB şirketinden Mr Philippe SZABO ve MAYDA Toz Metal şirketi sahibi Mak. Müh. Ahmet DURAN beye, T.K.F. Metal Kaplama San. Tic. şirketinden Kimya Müh. Tayfun Kerim FİLAZİ ile Metalürji Müh. Eren ŞAKAR beylere ve korozyon laboratuvar çalışmalarındaki değerli katkılarından dolayı Kimya teknisyeni Derya ÖZDEMİR hanıma, Özkiraz Galvaniz Kaplama şirketi Genel Müdürü Özlem KİRAZ hanımefendiye, İkizler Makine San. Tic. şirketinden Ülvan GİRAY ve Ata Metal San. Tic. şirketinden M. Ekrem ARIK beylere, yardımları ve katkılarından dolayı değerli arkadaşlarım Ar. Gör. Erdem ERSAYIN, Ar. Gör. Murat SARIGÜL ve Ar. Gör. Ali YURDDAŞ ile Ar. Gör. Uğur ÇAVDAR 'a sonsuz teşekkürler ederim.

Hayatım boyunca bana destek olan sevgili aileme, özellikle okul hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen sevgili halacığım Mesude ŞUMNULU hanımefendiye sonsuz şükranlarımı sunarım.

ÖZET

Bu çalışmada demir esaslı TM numunelere sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanmıştır. TM'in içerdiği karbon oranı ile daldırma sıcaklık ve süre değişkenlerinin, kaplama kalınlığı ve yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karbon içeriğine göre dört farklı toz metal gruptan imal edilmiş parçalar 5 dk. ve 30 s. süre ile 700C° ve 750C° sıcaklıklarında argon örtüsü altında bulunan eriyik Etial 171 alüminyumuna daldırılmıştır. TM numuneler üzerinde oluşan kaplamaların tabaka kalınlıkları ve içyapı özelliklerini belirlemek için metalografik muayeneler yapılmış, kimyasal özellikleri ise elde edilen SEM görüntüleri üzerinden alınan EDS analizleri ile belirlenmiştir. Yapılan mikroskobik incelemelerde, TM yüzeyinde oluşan alüminyum kaplamanın, alüminyum tabaka ile hemen altında bulunan intermetalik bir ara tabakadan oluştuğu belirlenmiştir. EDS analizleri, kaplama işleminin bir difüzyon mekanizması olduğunu göstermiştir. Daldırma sırasında yüksek enerji seviyesindeki alüminyum atomları, yüzeyden TM malzeme içerisine doğru nüfuz ederek intermetalik bir katman oluşturmuştur. Difüzyon mekanizmasında etkin olan sıcaklık ve süre parametrelerinin intermetalik ara tabaka oluşumunda da etkin olduğu görülmüştür. Buna göre daldırma sıcaklığının ve süresindeki artışın ara alaşım tabakası oluşumunu arttırdığı belirlenmiştir. Benzer şekilde TM yüzeyinde biriken alüminyum tabaka kalınlığının, daldırma sıcaklığının artışına bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. TM numunenin karbon bileşiminin kaplama özelliklerine olan etkisini belirlemek için yapılan incelemelerde ise karbon oranındaki artışın intermetalik ara tabaka kalınlığını çok az arttırdığı görülmüştür.

Korozyon dayanımı özelliklerini belirlemek için, kaplamalı ve kaplamasız TM numunelere aynı yoğun tuz ortamında korozyon testi uygulanmıştır. Kaplamalı numuneler 7 gün, kaplamasız numuneler ise 90 gün süre ile test edilerek oluşan kütle kayıpları belirlenmiş, korozyon etkileri metalografik yöntemlerle incelenerek kıyaslanmıştır. Demir esaslı TM numunelerin kimyasal bileşiminin korozyon üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı ve alüminyum kaplanmış numunelerin yoğun tuz ortamında korozyona karşı çok daha iyi direnç gösterdiği belirlenmiştir. Kaplamasız numunelerin yüzeyinde çukurcuk tipi korozyon oluşumu gözlemlenirken, alüminyum kaplanmış numunelerin yüzeyinde ise beyaz renkli sert alüminyumoksit tabakası oluşumu gözlemlenmiştir. Alüminyum kaplı TM numunelerin, kaplamasız TM numunelere göre yoğun tuz ortamına karşı çok daha iyi direnç göstermiştir.

Test sırasında alüminyum kaplama üzerinde oluşan oksit tabakası yumuşak fırça ile periyodik olarak temizlenmiştir. Test sonunda yapılan mikroskobik incelemelerde, kaplama yüzeyinde oluşan pitting tipi korozyonun kaplama içerisine doğru kılcal çatlaklar halinde nüfuz ettiği ve bazı yerlerde intermetalik faza kadar ulaştığı belirlenmiştir. Korozyon direncinde alüminyumoksit tabakasının etkili olduğu görülmüştür.

Daldırma alüminyum kaplama kalitesini iyileştirmek için kaplama kusuru olan numunelerde yapılan mikroyapı incelemelerinde kaplamanın yüzeyden çatlama ve kopmalar halinde ayrıldığı görülmüştür. Bu ayrılma ve kopmaların daha çok alüminyum ve intermetalik tabakalarda bulunan gözenekler ve mikro çatlaklar gibi yapısal hatalardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Bu kusurların oluşumunda eriyik alüminyum üzerinde oluşan oksit tabakasının ve daldırılan TM yüzeylerinde bulunan kir, yağ ve oksitlenmenin doğrudan etkisi olduğu belirlenmiştir. Argon örtüsünün yetersiz olduğu, uygun yüzey temizleme ve dekapan işlemi uygulanmadığı durumlarda kaplama kalitesinin düştüğü belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum kaplama, sıcak daldırma yöntemi, element difüzyonu, demir esaslı toz metal, korozyon dayanımı,

ABSTRACT

In this study, iron based PM aluminum coated by using hot-dip aluminizing method. Dipping time, bath temperature and chemical composition variable effects were investigated on coating thickness and structures of hot-dip aluminum process. For that purpose, four different group of iron based PM samples were produced according to different carbon rate in compositions and were dipped in Etial 171 aluminum bath under argon gas cover, at 5 min. - 30 sec dipping time and at 700 °C - 750 °C temperature. Aluminum coating thickness and structure were investigated by using metallographic and microscopic techniques and chemical composition of coating determined by using EDS analyses on SEM images. According to metallographic studies, aluminum coating on iron based PM samples consist of two layer, aluminum coating at outer surface and inferior intermetallic compound. EDS analyses proof that coating process is a diffusion mechanism. During dipping, because of high energy level of aluminum atoms are advancing through PM and forming band shape intermetallic structure with iron atoms. Observed that, dipping time and bath temperature parameters has a strong effects on forming of intermetallic compound which also effective on diffusion mechanism. According to results, this intermetallic layer thickness increasing with raising temperature. After reaching optimum temperature level, there is no change observed in thickness with increasing temperature, but contrary almost stay constant. Similar effects can be say for while forming of aluminum coating on intermetallic layer. With the increasing of the temperature, the thicknesses of the aluminum coating were increased. At the beginning; coating layer thickness increased with longer dipping time. But later increase slow down and almost stay constant. Time dependent increasing on coating thickness raise is matching parabolic speed law. With increasing dipping time and related coating thickness observed that, there is a crack occurrence and gap propagating in micro structure those are resulting splitting in coating layer. Chemical composition effects on coating thickness also determined with experimental. While carbon rate increasing in chemical composition of PM, also trigger a little increasing on intermetallic layer thickness.

PM and Aluminized PM samples had been examined under same intensive salt environment to defining corrosion resistance properties. For that purpose, uncoated PM samples at 7 day and coated PM samples tested at along 90 day in the corrosion incubator. At the end of the test, mass lost was measured from samples and investigated micro structural propagating of corrosion on PM samples by using metallographic and microscopic techniques.

Experimental results prove that chemical composition of iron based PM, has no effects on corrosion or corrosion resistance and hot dip aluminized PM samples showed that has strong corrosion resistance than uncoated samples. While surface of the uncoated PM samples pitting type of corrosion advance, white colored aluminum oxide observed on aluminized PM samples. According to microscopic investigations and metallographic studies, aluminum oxide propagated on surface micro cracks and pitting type of corrosion on aluminum layer also

propagating, but in the other hand mentioned hard aluminum oxide saved beneath of PM sample from aggressive corrosion environment.

With the intention of improve hot dip aluminum coating properties, the samples had investigated which were has got flaw on coating. According to metallographic studies, coating come apart from outer surface because of stamping and crack. This splitting and come outs from surface determined because of micro structural flaws such as porosity and micro-cracks. Such discovery prove that in any case of dirt or oxide remaining on surface of PM or aluminum bath, or insufficient inert argon gas cover on aluminum bath, during dipping cause a forming of such micro structural flaws on coatings.

KeyWords: Aluminium coating, hot dip method, element diffusion, iron based powder metal, corrosion resistance

1. GİRİŞ

Demir esaslı malzemelerin alüminyum ile kaplanmasıdaki ana fikir, alüminyumun iyi görünümünü, korozyon ve oksidasyon direnci ile TM'in üretim avantajlarına sahip olan kompozit bir malzeme elde etmektir.

Çeliği alüminyumla kaplamak amacıyla birçok yöntem geliştirilmiştir. Ancak, endüstriyel olarak sıcak daldırma yöntemi uygulaması, diğer alüminyum kaplama yöntemlerinden daha hızlı, daha basit ve daha ekonomik olmaktadır. Demir esaslı toz metalürjisi ile üretilmiş parçalar, özellikle otomotiv, makine imalatı ve petrokimya gibi endüstrisinde birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada gemi işletmesi, petrol platformları ve rafineriler gibi asit ve deniz korozyon oranının yüksek olduğu yerlerde kullanılan toz-metal yöntemi ile üretilmiş parçaların korozyon dayanımını arttırmak amaçlanmıştır

[3.4.5]. Sıcak daldırma işlemi sırasında Fe ile Al fazları arasında gerçekleşen difüzyon neticesinde Fe-Al intermetalik alaşım tabakası oluşmaktadır [2]. Oluşan bu intermetalik alaşım tabakasının kalınlığına etki eden en önemli parametreler, banyo sıcaklığı, daldırma süresi, kaplanan çeliğin ve kaplama banyosunun kimyasal bileşimidir [6].

Sıcak daldırma yöntemi ile edilmiş alüminyum kaplı çelikler, yüksek korozyon dayanımı yanı sıra güzel bir görünüme sahip olmasından dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bu kaplama yöntemi çeliklere iyi bir korozyon direnci kazandırmaktadır. Bu yöntemle kaplanmış çeliklerin üzerinde bulunan dış koruyucu kaplamanın mikroyapısı kaplama işlemi sırasında daldırılan eriyik alüminyum ile aynıdır [2]. Kaplama işleminin kinetiği, nüfuz eden kaplamanın morfolojisine, kaplama kalınlığına, eriyik alüminyumun bileşimine ve kaplanan çeliğe bağlıdır

sürekli kaplanmış çelik bant üretimi söz konusu olduğunda, uygulama alanı bulmuş tek yöntem sıcak daldırma olmuştur. Çünkü Bu bağlamda endüstriyel sıcak daldırma kaplamanın demir esaslı toz yöntemi ile üretilen parçaların kaplamasında kullanılabileceği düşünülmüştür. Sıcak daldırma yönteminde kaplama işlemi, yüzeyi yağ ve oksitten temizlenen toz metalin belirli bir sıcaklıkta, belirli sürelerde uygun bileşimdeki alüminyum veya alüminyum alaşımından oluşan banyoya daldırılması ile gerçekleştirilmektedir. Sıcak daldırma yöntemi ile elde edilen kaplama, iki ayrı tabakadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi çelik ile alüminyum tabakası arasında yer alan demir-alüminyum intermetalik bileşik tabakasıdır. İkincisi ise bu tabakanın üzerindeki, banyo bileşimiyle aynı bileşime sahip alüminyum tabakasıdır.

2. TOZ METALÜRJİSİ

2.1. Toz Metalürjisi Nedir?

Parçanın şekil ve boyutlarına uygun olarak metal esaslı tozların preslenip, toz haline getirilmiş metallerin (Şekil 2.1.) ergime sıcaklığının hemen altında vakum veya koruyucu gaz atmosferinde sinterlenmesine toz metalürjisi (TM) adı verilir [7].

Çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim tekniği olan TM üretim süreçleri, 100 yıldan daha uzun süredir mevcut olmasına rağmen, ancak geçen çeyrek yüzyıl içinde çeşitli önemli uygulamalar için yüksek kaliteli parça üretiminin üstün bir yolu olarak kabul edilmiştir [8]. Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi, TM'i cazip kılmaktadır. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimlice kullanır. Sahip olunan bu özellikler nedeniyle, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonlarının yerini almaktadır [8,9].



Şekil 2.1. Toz metal tekniği kullanılarak üretilmiş bazı örnekleri [3].

2.2. Toz Üretimi

Metal tozlarının imalinde kullanılan teknikler, aynı zamanda tozların özelliklerini de belirler. Tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, karmaşık şekillere kadar değişebilmektedir. Tozun yüzey durumu da üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Malzemelerin çoğu, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline getirilebilir. Birçok toz üretim tekniği arasından mekanik, kimyasal, elektroliz ve atomizasyon yöntemleri olmak üzere dört başlıca yöntem kullanılır.

2.2.1. Mekanik Yöntemler

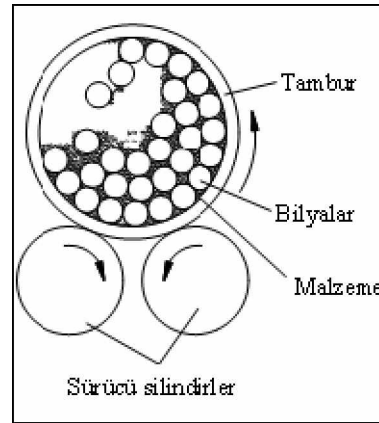
Mekanik yöntemler; talaşlı üretim, öğütme ve mekanik alaşımlama olmak üzere üç grupta incelenebilir:

2.2.1.1. Talaşlı üretim Yöntemleri

Bu yöntemle tornalama, frezeleme ve taşlama gibi talaş kaldırma teknikleri kullanılarak çok iri ve karmaşık tozlar üretilir. Üretilen tozlar, öğütülerek ince tozlar haline getirilebilir. Yüksek karbonlu çelik tozları bu yöntemle üretilir [10].

2.2.1.2. Öğütme

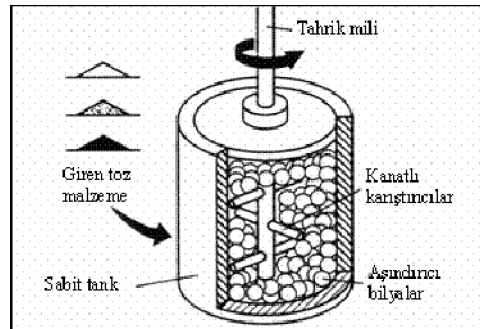
Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılgan malzemeler mekanik olarak bilyeli değirmenlerde öğütülürler (Şekil 2.2.). Fakat öğütme işlemi birçok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Günümüzde öğütme işlemi, alüminyum gibi sünek metallerden pul toz üretiminde de kullanılır. Bu durumda, soğuk kaynaklanmayı ve yapışmayı engellemek için yağlayıcılar kullanılır [9].



Şekil 2.2. Bilyeli öğütme yöntemi [10].

2.2.1.3. Mekanik alaşımlama

Mekanik alaşımlama yöntemi, kuru ve katı haldeki tozların birbirlerine periyodik olarak kaynaklanmasını ve tekrar kaynakların kırılmasını sağlayarak daha ince ve homojen, mikro-yapıya sahip yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılır (Şekil 2.3.) [11].



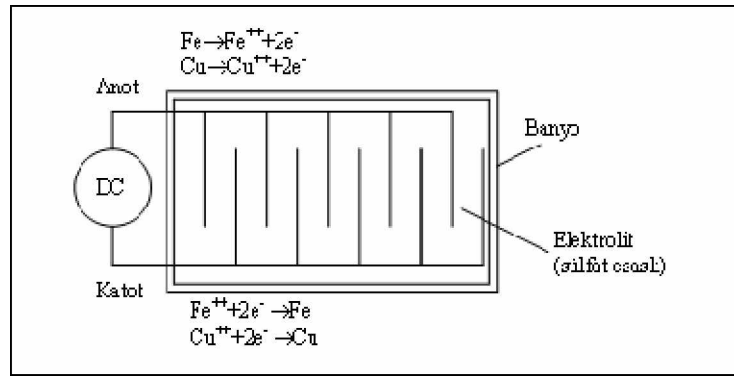
Şekil 2.3. Mekanik alaşımlama yöntemi [12].

2.2.2. Kimyasal Yöntemler

Metal tozlarının kimyasal yöntemle üretimi, metal oksitlerin (demir, bakır, tungsten, molibden, nikel ve kobalt), karbonmonoksit (CO) veya hidrojen gibi indirgeyici gazlarla oksitlerinden kimyasal olarak indirgenmesidir [13].

2.2.3. Elektroliz Yöntemi

Elektroliz yöntemiyle, oksitlerden oluşan tozlar katoda akım vermek suretiyle elektrolitik banyoda çökertilir ya da iyi kırılabilme özelliğinde katotta toplanır. Banyo teknesi kurşun kaplıdır. Elektrolitik olarak bakır sülfat ve sülfürik asit kullanılır. Anot bakır, katot ise antimuanlı kurşundur (Şekil 2.4.). Elektroliz yöntemi ile genel olarak bakır tozları imal edilir. Elektrolitik tozların en büyük avantajı yüksek safiyetleri, dolayısıyla iyi sıkıştırabilme özelliklerine sahip olmalarıdır [10].



Şekil 2.4. Elektroliz ile toz üretimi [10].

2.2.4. Atomizasyon Yöntemi

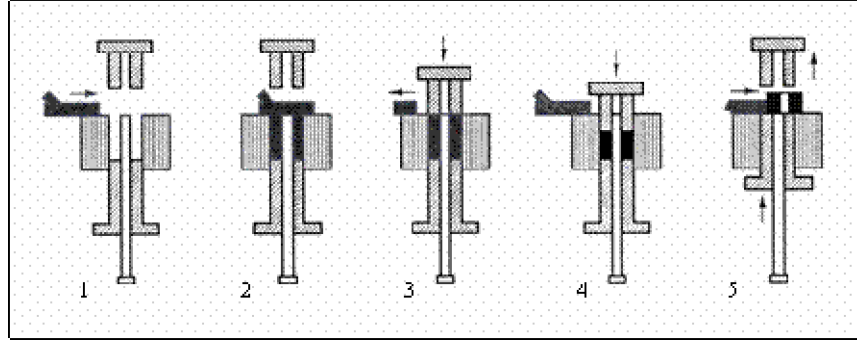
Bu işlemden ergimiş metal küçük damlacıklara parçalanır ve damlacıklar birbirleri ile veya katı yüzeyle temasa geçmeden hızlıca soğutulur. Ana fikir, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı metali daha küçük parçalara ayırmaktır. Hava, azot ve argon en çok kullanılan gazlardır. Su ise sıvılar içinde en çok kullanılandır. Nozulun tasarım ve geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi birçok parametreyi değiştirerek toz boyutu dağılımını kontrol etmek mümkündür. Tanecik şekli ise katılaşma hızı ile belirlenir. Genelde bu toz üretim yöntemi ergitilebilen tüm malzemeler için uygulanabilir ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır. Krom içeren alaşımlar gibi kolayca oksitlenen metallerde atomizasyon, argon gibi asal gazlar yardımıyla gerçekleştirilir. Atomizasyon, alaşımı oluşturan tüm metallerin ergimiş durumda tamamen alaşımlandığı için, özellikle alaşımların toz halinde üretilmesinde faydalı bir yöntemdir. Böylece her toz taneciği aynı kimyasal bileşime sahip olur [9].

2.3.1. Karıştırma

Karıştırma işlemi, tozların tane boyutuna ve şekline göre yığılmasını önlerken, akma hızını ve görünür yoğunluğunu da değiştirir. Karıştırma işleminin uzun tutulması taneciklerin kırılarak küreselleşmesine ve önemli ölçüde plastik deformasyona uğramasına sebep olabilir. Bu da tozun sıkıştırılabilme özelliğini azaltıp, şekillendirme sırasında gerekenden fazla soğuk işlem gerektirir [10].

2.3.2. Presleme

Sıkıştırma bir yük altında serbest yapıdaki toz partiküllerinin istenilen şekle dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. Tozların sıkıştırılmasındaki ana amaç ham yoğunluk ve dayanımın elde edilmesidir. Şekil 2.6. 'da gösterilen presleme işleminde genellikle hidrolik, mekanik ve pnömatik presler kullanılmaktadır. Presleme sıcak veya soğuk yapılabilir [10].



Şekil 2.6. Presleme işleminin basamakları [10].

Presleme işlemi altı basamakta gerçekleştirilir. 1. İşlem başlangıcı, 2. Toz doldurma, 3. Presleme başlangıcı, 4. Preslemenin bitişi, 5. Preslenmiş parçanın çıkarılması [10].

2.3.3. Sinterleme

Sinterleme, gözenekli yapıda bir form kazandırılmış tozların yüzey alanının küçülmesi, partikül temas noktalarının büyümesi ve buna bağlı olarak gözenek şeklinin değişmesine ve gözenek hacminin küçülmesine neden olan ısı olarak aktive edilmiş malzeme taşınımı olarak tanımlanabilir [10]. En yaygın sinterleme sıcaklık aralığı, demir esaslı alaşımlar için 1100-1200 °C'dir. Bazı durumlar için 1250 °C'ye kadar olan yüksek sinterleme sıcaklıklarına ihtiyaç duyulur. Sinterleme genellikle metalin erime sıcaklığının % 70'i ve % 90'ı arasında yapılır (mutlak sıcaklık cinsinden) [14]. Uygulamaya bağlı olarak sıcaklıktaki bekleme zamanı 10 ile 60 dakika arasında değişir. En yaygın kullanılan fırın, çelik-tel örgülü kayışlı fırındır. Çelik-tel örgülü kayışlı fırınların sıcaklıkları en fazla 1150 °C'dir. Daha yüksek sıcaklıklar için yürüyen kiriş veya itmeli fırınlar yaygındır [9].

2.3.4. İnfiltrasyon

Parça içerisindeki birbirleri ile bağlantılı gözenekler, ana metalin sinterleme sıcaklığından daha düşük bir ergime sıcaklığına sahip bir alaşımla doldurulur. Örneğin, bakır esaslı alaşımlar sinterleme esnasında demir esaslı parçalara sızarlar. İnfiltrasyon işlemi parçaları sızdırmaz yapar ve mekanik özelliklerde artışa sebep olur. Ancak boyut hassaslığı azalır. İnfiltrasyon işlemi bazı ısıtma işlemleri kolaylaştırır. Örneğin, birbirine bağlı gözenek kalmadığı için yüzey sertleştirme işleminde sertlik derinliği kontrolü kolaylaşır [9].

2.3.5. Yağ Emdirme

Sinterlenmiş parçalara yağ ve diğer metalik olmayan malzemeler emdirilerek korozyona karşı koruma artırılır. Kendi kendine yağlamalı yataklar, sinterlenmiş gözenekli yataklara yağ emdirilmesi sonucu ve sadece TM yöntemi ile üretilir [9].

2.3.6. Boyutlandırma

Boyutlandırma sinterleme sonrası yapılan ilave presleme işlemidir. Ana amaç, boyut hassasiyetini ve beraberinde yüzey kalitesini artırmaktır. Az miktarda plastik deformasyona ihtiyaç olduğu için orta büyüklükteki basınçlara ihtiyaç vardır [9].

2.3.7. İkinci Presleme

İstenilen mekanik ve manyetik özelliklerin sağlanmasında gerekli olan parça yoğunluğunu elde etmek için bir gözenek azaltma işlemi olan ikinci presleme kullanılır. Preslenmiş parçanın 700-800 °C arasında ön sinterlenmesi ile yağlayıcılar yanar ve yeniden kristalleşme meydana gelir. Pekleşme ve iç gerilmeler kaldırıldığından malzeme sünekliğini tekrar kazanır. İkinci preslemeden sonra parçalar ikinci defa sinterlenir [9].

2.3.8. Buharlama İşlemi

Bu işlem sadece demir esaslı parçalara uygulanabilir. Parçaları 550 °C'ye kadar ısıtarak ve onları su buharına maruz bırakarak dış yüzeylerinde ve iç bağlantılı boşluklar boyunca ince bir Fe₃O₄ tabakası oluşturulur. Buharlama işlemi korozyon mukavemeti, sertlik, basmaya karşı dayanım ve aşınma dayanımında artışa sebep olur [9].

2.3.9. Talaşlı İmalat

Sinterlenmiş parçaların üretilmesindeki en önemli çekicilik karmaşık şekiller ve dar toleransa sahip parçaların üretilebilmesi olmasına rağmen, bazı sınırlamalar bulunur. Bundan dolayı frezeleme, delik delme (presleme doğrultusuna dik delikler), dış açma gibi talaşlı imalat operasyonları, kalıpta presleme ile elde edilemeyen şekillerin başarılabilmesinde kullanılır. Sinterlenmiş metallerin talaşlı imalatı genellikle aynı bileşimdeki döküm-dövme alaşımlarından daha kolaydır. Bundan dolayı kesme hızı ve kesme takımları optimum sonuçları almak için ayarlanmalıdır. Takım ömrünü artırmak için, MnS gibi işlenebilirliği artırıcı katkıları toz ile karıştırılabilir. Sinterleme sonrası bu katkıları yapı içerisinde düzgünce dağılmış olarak kalırlar ve mekanik özellikler belirgince etkilenmez [9].

2.3.10. Çapak Alma

Bu işlem, presleme ve talaşlı imalattan kaynaklanan çapakları almak için kullanılır. En yaygın yöntem tamburlamadır ve bazı durumlarda içinde aşındırıcı toz bulunan sıvı ortamlar kullanılır [9].

2.3.11. Birleştirme

Karmaşık ve büyük parçalar birleştirme ile üretilebilir. Difüzyonla birleştirme, sinter-birleştirme ve lazer kaynağı gibi birçok birleştirme tekniği vardır [9].

2.3.12. Isıl İşlem

Alaşımlarda faz dönüşümleri gözenek miktarına değil kimyasal bileşim ve alaşımın homojenliğine bağlıdır. Böylece döküm-dövme alaşımlara uygulanan tüm ısı işlemler sinterlenmiş malzemeler için de uygulanabilir. Sertleştirme operasyonu önemli ölçüde mukavemeti ve aşınma direncini artırır, fakat süneklik azalır. Sinterlenmiş parçalarda karbürleme ve karbo-nitrürleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri yaygınca kullanılır [9].

2.3.13. Yüzey Kaplama

İhtiyaç duyulduğu zaman, korozyondan korunma kaplama ile gerçekleştirilebilir. Fakat düşük yoğunluktaki parçalar kaplama öncesi elektrotun boşluklara girmesini önlemek için doyurulmalıdır [9].

2.4. TM Parçaların Özellikleri

Sinterlenmiş malzemelerin özellikleri birçok faktöre bağlıdır ve özel talepleri karşılamak için bu özelliklerden bazıları optimize edilebilir. Belirli bir uygulama için yapılacak malzeme seçiminde, kimyasal bileşim ve parçaların yoğunluğu dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Yaygın kullanılan bazı Kimyasal bileşim ve mekanik özellikler Tablo 2.1.'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Bazı TM parça örnekleri [3].

Kimyasal Bileşim	Mekanik Özellikler
Fe	Sertlik
Fe-Cu	Yoğunluk
Fe-Cu-C	Çekme ve akma mukavemeti
Fe-Ni-Cu-Mo-C	Çapraz kırılma mukavemeti
Fe-Pe	Young modülü
Fe-P-C	Young modülü

TM malzemelerin mekanik özellikleri gözeneklerin varlığından dolayı düşer. Çekme mukavemeti ve sertlik, gözenek miktarı ile doğrusal olarak düşerken, % uzama ve darbe enerjisi eğrisel olarak düşerler.

3. ÇELİK ÜZERİNE ALÜMİNYUM KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Alüminyum kaplı çelik, alüminyumun iyi görünümünü, korozyon ve oksidasyon direncini, çeliğin ise mukavemetini birleştirdiği bir malzemedir. Çeliğin alüminyumla kaplanmasıyla ilgili olarak ilk patent 1893 yılında alınmıştır. Ancak geçen yüzyılda, alüminyumun yüksek kimyasal aktivitesinden kaynaklanan bazı güçlüklerle karşılaşmıştır. 20.yy.da bu problemler büyük oranda giderilmiş ve kaplama işlemi için birçok yöntem önerilmiştir. Her birinin kendine özgü uygulama alanı ve pazarı bulunan bu yöntemler şunlardır;

- 1-Kutu alüminyum kaplama (Pack Aluminising),
- 2-Püskürtme ile alüminyum kaplama,
- 3-Vakum alüminyum kaplama,
- 4-Gaz alüminyum kaplama,
- 5-Fiziksel buhar çöktürme yöntemi ile alüminyum kaplama,
- 6-Giydirme,
- 7-Elektrolitik alüminyum kaplama,
- 8-Elektroforez,
- 9-Sıcak daldırma ile alüminyum kaplama [15, 16].

3.1. Kutu Alüminyum Kaplama (Pack Aluminising)

Kutu alüminyum kaplama yönteminde, ilk önce kaplanacak çeliğin yüzeyi oksit ve yabancı maddelerden temizlenir. Çelik parça, alüminyum veya ferro-alüminyum tozları ve diğer bileşenleri içeren karışım ile beraber karbürizasyon kutularına yerleştirilir. Sinterleşmeyi önlemek için alüminyumoksit veya öğütülmüş kil, oksidasyonu önlemek için amonyumklorür yâda alüminyumklorür karışıma ilave edilir.

Alüminyum kaplama işlemi oldukça yüksek sıcaklıklarda (900-1080 °C) gerçekleştirilir. Sıcaklık ve karışımın bileşimine bağlı olarak 4 ile 30 saat işlem süresinde, oluşan kaplama derinliği 0,03 ile 1,5 mm arasında değişir. Kaplamanın dış bölgesi yüksek oranda alüminyum (%36-65) içerdiğinden oldukça kırılgandır. Bu nedenle kaplama işleminden sonra yüksek sıcaklıkta (815-1000°C) tavlama yapılır. Böylece dış bölgenin alüminyum içeriği %20-30'a düşer ve toplam kaplama derinliği artar.

Kutu alüminyum kaplama yöntemi pahalı ve zor bir işlem olduğundan sadece karmaşık şekilli parçalar için tavsiye edilir [15].

3.2. Püskürtme ile Alüminyum Kaplama

Yöntem, alüminyum veya alüminyum alaşımının eritilmesi ve 2-4 atm basınca sahip hava akımı ile kaplanacak yüzeye püskürtülmesini içerir. Şekil 3.1. 'de püskürtme kaplama uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Püskürtme Alüminyum kaplama

Metal parçacıkları, alüminyum kaplanacak parça üzerine hareketleri sırasında hızla sıcaklıklarını kaybeder ve soğuk yüzeye çarptıkları zaman katılışırlar. Çelik ile kaplama arasında, mukavemeti zayıf basit bir mekanik bağ oluşur. Çelik ile kaplama arasındaki bağın mukavemetini arttırmak için çelik yüzeyinin kabalaştırılması tavsiye edilir. Bu işlem için çelik yüzey metal fırça ile fırçalanabilir. Bu yöntemle, bağlanma sadece çelik ile kaplama arasında değil, aynı zamanda bağımsız alüminyum tabaka ve partikülleri arasında da gerçekleşir. Sonuç olarak kaplama tabakası yüksek poroziteye sahiptir. Bağımsız taneciklerin birbiriyle bağlanması oksit filmleri ve soğurulmuş oksitlerden dolayı gerçekleşmez. Alüminyum kaplama işleminden sonra kaplama ile demir-karbon alaşımları arasındaki bağın mukavemetini ve yoğunluğunu arttırmak için 950-1200°C'de uzun süre tavlama tavsiye edilir [15].

3.3. Vakum Alüminyum Kaplama

Bu proses bir öncekinin benzeridir. Kaplama, alüminyumun buharlaştırılıp, parça üzerinde yoğunlaştırılması ile gerçekleştirilir. Kaplama kalitesi bu yöntemde daha iyidir [15]. Alüminyum, buhar basıncı çevre atmosfer basıncından fazla olacak bir sıcaklığa ısıtılır. Çelik parça alüminyum buharıyla temas ettirildiğinde, alüminyum buharı çeliğin soğuk yüzeyinde yoğunlaşır. Kaplama işlemi için 10^{-3} – 10^{-5} mmHg basınçlı vakum odaları gereklidir. Kaplanmış alüminyumun iyi bir yüzeye sahip olması için çok yavaş buharlaşma ve yoğunlaşma hızları gereklidir. Alüminyum 1400°C'ye ısıtmak için elektron huzme cihazları kullanılır. Elektron tabancası tarafından yaratılan yüksek enerjili elektron demeti iletilecek alüminyuma doğrultulur. Elde edilen kaplamanın kalınlığı (0,08 – 2,5 μ m) işlem süresiyle orantılıdır. Kaplamanın görünüşü, kullanılan çeliğin yüzey kalitesiyle orantılıdır. Bu yöntemle elde edilen alüminyum kaplama ünitardır, poroz değildir ve ferroalüminyum ara alaşım tabakası içermez. Alüminyum kaplama ile çelik arasında kuvvetli bir bağ elde etmek için, bant veya parça 175-370°C'ye kadar ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Çelik bandın veya parçanın yüzey hazırlama

işlemi çok dikkatli yapılmalıdır. Yüzeyde herhangi bir film tabakası kalmamalıdır, aksi halde bağ mukavemeti azalabilir. Yüksek kalitesi ve alüminyum ile çelik arasındaki güvenilir bağdan dolayı, bu kaplama yöntemi kritik parçaların kaplanması için kullanılır [6].

3.4. Gaz Alüminyum Kaplama

Bu yöntemde, çelik yüzeyine, alüminyumklorür ($AlCl_3$) gaz fazını içeren ortamda alüminyum kaplanır. Alüminyum kaplama işlemi, bir tarafına %45 alüminyum, %45 alüminyumoksit ve %10 amonyumklorür içeren bir karışım yerleştirilmiş bir retortta (gaz sızdırmayan fırın) gerçekleştirilir. Karışım $600^{\circ}C$ 'ye kadar ısıtılır. Kaplanacak parçalar retortun diğer ucuna yerleştirilir ve $900-1000^{\circ}C$ 'ye ısıtılır. Çeliğe alüminyum kaplama işlemi aşağıdaki reaksiyon gereğince gerçekleşir [15] ;



Elde edilen monoatomik alüminyum çelik içerisine difüze olur ve ince bir kaplama tabakası oluşturur. Karmaşık bir yöntem olması ve aşırı enerji tüketiminden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmamaktadır.

3.5. Fiziksel Buhar Çöktürme Yöntemi ile Alüminyum Kaplama (PVD)

Bu yöntem, uçak sanayinde iniş takımları gibi yüksek mukavemetli çelik parçaların korunması ve alüminyum yapı içersine yerleştirilen çelik bağlantı elemanlarının, galvanik etkiyi azaltmak için kaplanmasında kullanılır. Bu prosesin diğer yöntemlere göre birkaç avantajı vardır. Alüminyum tabakası çelik yüzeyine kuvvetlice yapışır, böylece bükme testinden kolayca geçer. Alüminyum tabaka, çeliğin mekanik özelliklerini etkilemez, çok çeşitli şekillerdeki parçalara, istenen kalınlıkta hassas bir kaplama yapılabilir. Kaplama ve proses, toksik olmayıp çevre kirlenmesine neden olmaz. Bu avantajlarından dolayı, fiziksel buhar çöktürme yöntemi geniş bir uygulama alanına sahiptir ve özellikle kadmiyum kaplamalar yerine kullanımı etkin olmaktadır [16].

Bu yöntemde, kaplanacak parça ile buhar kaynağı arasına daha negatif bir potansiyel uygulanmasıyla daha yoğun ve daha sağlam bir kaplama elde edilebilir. Vakum sistemine inert bir gaz uygulanır ve iyonlaştırılır. Pozitif yüklü iyonlar, negatif yüklü parça yüzeyi tarafından çekilir ve bu iyonların bombardımanı sonucu son temizleme işlemi gerçekleşmiş olur. Temiz yüzeyler daha iyi bir yapışma sağlar. Bu işlemten sonra buharlaştırılan alüminyum iyonize olur ve parçaya doğru hızlanarak hareket eder. Böylelikle daha yoğun bir kaplama elde edilir. Ayrıca iyonizasyon daha iyi bir atma gücü sağlar ve kompleks şekilli parçaların üniform kaplanmasını sağlar [17]. Uçak sanayinde kullanılan üç ayrı sınıf kaplama vardır. Sınıflara göre kaplama kalınlığı $8-25 \mu m$ arasında değişmektedir.

3.6. Giydirme

Bu yöntem, alüminyum ile çelik bantların beraberce haddelenmesinden ibarettir. Haddelme sırasında alüminyum ile çelik arasında metalik bir bağ oluşur. Çelik ile alüminyum arasındaki bağın mukavemeti, temperleme işlemi ile artırılır. Bu yöntem temel olarak bant, levha ve boru üretiminde kullanılır [15]. Alman üreticiler bu yöntemi şöyle uygulamaktadırlar [16]; %0,06 C içeren çelik bant %0,7 Si içeren alüminyum levha ile 200°C'de %40 redüksiyonla haddelenir. Ara tav uygulanmaz, işlem sonunda 530-550 °C'de kontrollü tav yapılır. Son yıllarda paslanmaz çeliklerin bu yöntemle alüminyum kaplanması yaygınlaşmaktadır [6].

3.7. Elektrolitik Alüminyum Kaplama

Bu tip kaplama, ya ergimiş alüminyumklorür tuzları ve alkali metallerin klorürlerinden oluşan karışımları içeren ergimiş elektrolitlerde ya da etilbromür ve benzen içerisindeki alüminyum bileşiklerinden oluşan inorganik elektrolitlerde gerçekleştirilir. İlk elektrolitler daha ucuz ve daha basittir.

Elektrolit %80 $AlCl_3$ ve %20 NaCl'den oluşabilir, bu taktirde proses, 175°C'de $1,6 A/dm^2$ akım yoğunluğunda gerçekleştirilir. Eğer $AlCl_3$ ve NaCl moleküler oranı 3:2 alınırsa, sıcaklık 160-200°C, akım yoğunluğu da $1 A/dm^2$ olmalıdır. Elektrolit %50 (mol) $AlCl_3$ içerirse işlem 380°C'de, $1 A/dm^2$ akım yoğunluğunda gerçekleştirilir. Kaplama öncesi parçalar tamamen temiz, yağı alınmış ve hidroklorik asit çözeltisinde dekape edilmiş olmalıdır. Kaplama oluşum hızı oldukça yavaş olup $1,94 A/dm^2$ akım yoğunluğunda, 0,3 g/A.saat değerine eşittir, bu ise 30 dakika içerisinde 0,01 mm kalınlığa denk gelmektedir. Kaplama hızı olarak 25-50 $\mu m/dk$. kullanılır [16]. Bazı uzmanlar 800°C'de, ilave bir tavlama işlemini tavsiye ederek, böylece daha üniform bir kaplamanın elde edilebileceğini iddia etmektedirler. Ancak tavlama işlemi, alüminyumun demir içersine difüze olmasına ve kırılgan intermetalik bileşiklerin oluşumuna sebep olur. Düşük sıcaklıklarda galvanik kaplama yapmanın üstünlüğü, kaplama tabakası içerisinde kırılgan fazın oluşmamasıdır [15].

Elektrolitik alüminyum kaplamanın birkaç dezavantajı vardır. Birincisi, alüminyum kaplama işleminin, kolayca buharlaşan, higroskopik, normal şartlar altında dahi bozunabilen alüminyumklorür ile yapılmasıdır, ikincisi, $AlCl_3$ -NaCl karışımının eritilmesinin, alüminyumklorür ve hidrojenklorürün kolayca buharlaşmasından dolayı oldukça güç olması ve bu durumun elektrolit bileşiminin değişmesine neden olmasıdır. Üçüncüsü, bu yöntemin oldukça yavaş olması ve ekonomik olmamasıdır [6].

3.8. Elektroferez

Alüminyum kaplamanın diğer bir yolu, alkol içerisinde bulunan küresel alüminyum parçacıklarının toz şeklinde, kaplanacak çelik parçasının yüzeyinde çöktürülmesidir. Daha sonra bu toz tabakası, en az %1 redüksiyonla haddelemek suretiyle pekiştirilir, sonra 500°C'de yavaşça ısıtılarak sinterlenir ve çeliğe bağlanması sağlanır [16].

3.9. Sıcak Daldırma ile Alüminyum Kaplama

Çeliklere alüminyum kaplamak için birçok yöntem uygulanabilir. Fakat özellikle seri alüminize çelik üretiminde, en yaygın kullanılan sıcak daldırma yöntemi olmuştur [19-20]. Esas olarak bu yöntem, yüzeyi temizlenmiş çelik parçaların sıvı alüminyum veya alüminyum alaşımı içersine daldırılması ve belirli süre tutulmasıyla gerçekleştirilir. Bu durumda yüzey tabakası alüminyum içinde çözünür, alüminyumla reaksiyona girerek Fe_2Al_5 şeklinde intermetalik alaşımlar oluşturur. Geçiş tabakasının daha sonraki büyümesi alüminyumun demir içersine difüzyonu ile gerçekleşir. Reaksiyon ve difüzyon hızlı gerçekleşir, 1-15 dakika içerisinde 0,02-0,010 mm kalınlığındaki alaşım tabakası meydana gelir [15]. Bu yöntemin temel avantajları, hızlı olması, nispi olarak düşük sıcaklıklarda (600-800°C) çalışılması ve basit olmasıdır. Sürekli olarak kaplanmış bant üretimi söz konusu olduğunda en ekonomik yöntem sıcak daldırma olmaktadır [6].

Son yeni teknolojik gelişmeler ile birlikte, günümüzde sıcak daldırma alüminize çelik üretiminin dünya üzerindeki toplam üretimin yaklaşık olarak % 5 'ini teşkil ettiği tahmin edilmektedir. Ticari olarak alüminize çelikler 2 sınıfta toplanabilir. Tip 1 sıcak daldırma alüminize çelikler, çelik malzeme üzerine ötektik bileşene yakın oranda (~11 wt- %Si) Al-Si'den kaplanarak elde edilirler. Genel olarak, bu tür malzemeler yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımı istenen yerlerde kullanılır. Tipik uygulama örneği olarak otomotiv sektöründe egzoz sistemlerinde ve dahili uygulamalarda ise ocak, fırın davlumbaz kurutucular ısıtıcılar vs. gibi yerler verilebilir. Tip 2 sıcak daldırma alüminize çelikler ise çelik malzeme üzerine ticari saf alüminyum ile kaplanarak elde edilirler. Bu tip malzemeler genellikle yüksek oranda yansıtma gereken ve ortam sıcaklığında korozyon dayanımı istenen yerlerde uygulama bulur. Bu tip malzemelerin genel uygulama örneği olarak bina konstrüksiyonlarında dış cephe kaplama sacları, klima ve ventilasyon sistemleri verilebilir. Tip 2 alüminize çelikler, ticari olarak kaplama ağırlıkları minimum 195 ~ 305 g/m² (yaklaşık olarak kaplama kalınlıkları 38 µm ~ 60µm) arasında değişirken; Tip 1 alüminize çeliklerde ise bu oran 75~120 g/m² (15 ~25 µm) arasındadır [18].

Son zamanlarda sıcak daldırma çelik şartnamelerinde ve uygulama yöntemlerine ait belirgin bir standardın oluşmamıştır. Özellikle İngiltere'de yerel üreticilerin ortam sıcaklığında korozyon dayanımı istenen yerler için çok farklı kalitede tip 1 alüminize çelik ürettiği ve üretilen kaplamaların kalınlıklarının 45 µm olması gerekirken yaklaşık olarak 8 µm gibi düşük oranlarda kaplamaların yapıldığı gözlenmiştir. Benzer ürünlerin Japonya'da ortaya çıkması ile kaplama

bileşeninden çok kaplama kalınlığına bağlı yeni teknik şartnameler düzenlenmiştir. Tarihsel gelişimde tip 2 sıcak daldırma alüminize çelikler Avrupa üretiminin çok küçük bir oranını oluştururken; daha büyük bir pazar olan Amerika Birleşik Devletlerinde ise Galvalume ve Galfan olarak bilinen yeni nesil Al-Zn alaşımları ile yarışmaktaydı. Galvalume 43,5 Zn-55Al-1,5Si alaşımından oluşan sıcak daldırma kaplama sistemidir. Bethlehem Steel Corp. USA tarafından geliştirilmiştir. Galfan ise yaklaşık olarak 95Zn-5Al alaşımına sahip sıcak daldırma kaplama sistemidir ve International Lead Zinc Research Organisation USA tarafından geliştirilmiş lisanslı bir yöntemdir [18].

Sıcak daldırma yöntemini tehdit eden bu son gelişmelere ve yüksek maliyetine rağmen , alüminize çeliklerin eşsiz özellikleri sayesinde sanayide tercih edilmiş ve daha yüksek üretim sayısına çıkmayı başarmıştır. Son verilere göre (1994) eşdeğer genişlik ve ölçüye sahip tipik sıcak daldırma galvaniz maliyeti £490/t iken tip1 alüminize sac maliyeti £559/t olmakta; Zn-Al kaplı saclar ise kabaca arada bir rakamda kalmaktadır. Maliyetlerdeki eşitsizliğe rağmen, sıcak daldırma alüminize çeliklerin sahip olduğu iyi korozyon ve oksidasyon direncini, olağanüstü ısı ve ışık yansımaları özelliğini hiçbir sıcak daldırma galvaniz veya Al-Zn alaşımı sağlayamamaktadır.

Alaşımların düzenlenmesi ile yüksek sıcaklık performansları iyileştirilerek elde edilen özellikleri sayesinde daha ucuz paslanmaz çelikler ile eşdeğer konuma ulaşmıştır.

Günümüzde sıcak daldırma ile alüminyum kaplama. NF A 36-340, Euronorm 154, ASTM A-463 ve ISO 5000 standartlarına uygun olarak yapılmaktadır. Tablo.2.1'de alüminyum kaplama yöntemleri ile ilgili karşılaştırmalı bilgiler verilmektedir [6].

Tablo 3.1. Alüminyum kaplama yöntemleriyle ilgili karşılaştırmalı bilgiler [15].

Proses	Kalınlık (mm)	Nispi maliyet	Ara tabaka yokluğu	Kaplamanın devamlılığı
Sıcak daldırma	0,013-0,076	1*	2	2
Giydirme	0,010-0,127	2	3	1
Elektrolitik	0,003-0,051	3	1	3
Püskürtme	0,051-0,508	4	1	4
Kutu yöntemi **	0,254-1,016	3	4	-

* 1, en iyi sonucu gösterir.

4. SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ÇELİK ÜZERİNE ALÜMİNYUM KAPLANMASI

4.1. Demir— Alüminyum Reaksiyonunun Teorik Yönden İncelenmesi

Sıcak daldırma ile alüminyum kaplanmış çelik bant, alüminyum kaplama banyosu bileşimine eşdeğer bir kaplama tabakası, çeşitli demir-alüminyum intermetalik bileşiklerinden oluşan, bağlanmayı sağlayan bir tabaka ve son olarak çeliğin kendisinden oluşmaktadır. Demir-alüminyum reaksiyonu, banyo sıcaklığı, banyo bileşimi gibi proses değişkenlerinin alüminyum kaplı bandın kaplama kalınlığına ve yapısına olan etkileri üzerinde durulacaktır.

4.1.1. Demir-Alüminyum Reaksiyonunun Kinetik Açısından İncelenmesi

Bütün metal kaplama reaksiyonlarının en önemli prensibi difüzyondur. Bu olay, termal olarak aktive edilmiş malzemenin, malzeme içinde taşınımı olarak tanımlanabilir. Diğer bir deyişle difüzyon, atom veya molekül bazında kütle transfer prosesidir.

Difüzyonun temel eşitlikleri Adolph Fick tarafından formüle edilmiştir. Birinci kanun kararlı durumda difüze olan flakın (j) konsantrasyon gradyanı ile (dc/dx) doğru orantılı olduğunu göstermektedir [21]. ;

$$J = D(dc/dx) \quad (4.1)$$

D: Difüzyon katsayısı

Fick'in ikinci kanunu kararsız durumu tanımlamaktadır;

$$dc/dt = d/dx(dc/dx) \quad (4.2)$$

dc/dt: Zamana bağlı olarak konsantrasyon değişimi

Şayet D konsantrasyondan bağımsız ise ikinci Fick kanunu;

$$dc/dt = D (d^2c / dx^2) \quad (4.3)$$

olarak elde edilir.

Difüze olan iki madde bulunduğunda, bileşimin değişiminde, D 'nin nadir olarak sabit kaldığı deneysel olarak gözlenmiştir. Bu durumda difüzyon D, gerçek difüzyon katsayıları olarak bilinen iki difüzyon olayından oluşmaktadır. Böylece ikili sistem için;

$$D = D_A N_B + D_B N_A \quad (4.4)$$

DA, DB : A ve B bileşenlerinin gerçek difüzyon katsayıları

NA, NB: Mol fraksiyonları

Difüzyon katsayısı, D, sıcaklıkla eksponansiyel olarak değişir;

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (4.5)$$

D_0 : Frekans faktörü

Q : Prosesin aktivasyon enerjisi

R : Gaz sabiti

T : Mutlak sıcaklık

4.2 nolu denklemin çözümü, bir maddenin difüze olduğu sınır şartlarına ve geometrisine bağlıdır. Sadece bir bileşenin difüze olduğu durumu düşünürsek burada çözüm şöyle olacaktır [21];

$$C_{(x,t)} = C_0 [1 - \operatorname{erf}(x / 2\sqrt{Dt})]. \quad (4.6)$$

$C_{(x,t)}$: Kaplama metalinin taban metali içerisindeki x mesafesinde, t zaman sonraki konsantrasyonu

C_0 : Kaplamadaki ilk konsantrasyon

$\operatorname{erf}(x / 2\sqrt{Dt})$: Gauss hata fonksiyonu

Gauss integrali konsantrasyonla değişen boyutsuz bir büyüklüktür. Bu büyüklük, $(x / 2\sqrt{Dt})$ boyutsuz çıkarımının bir fonksiyonu olarak tablolarda verilmektedir. Daha genel durumda D , konsantrasyonun bir fonksiyonudur. Bu durumda Fick'in ikinci kanununun 4.2 nolu denklemde verilen şekli kullanılır. Bu eşitliğin homojenleştirilmesi ile aşağıdaki eşitlik elde edilir [21];

$$D_{(x,t)} = dx/2t \quad \int \quad (4.7)$$

Bu çözümde difüzyon eğrisinde herhangi bir pozisyondaki difüzyonu saptamak için iki parametrenin ölçülmesi gerekir. Bunlar, eğimin tersi ve istenen pozisyonda eğrinin altında kalan alandır. $2\sqrt{Dt}$ değerinin difüze olan atomun, t zaman içinde kat ettiği ortalama mesafeyi temsil ettiği göz önüne alınarak, ortalama mesafe, kaplamanın derinliğine eşitlenirse aşağıdaki denklem bulunur [21];

$$x^2 = 4Dt \quad (4.8)$$

Buradan,

$$dx/dt = 2D/x = k/x \quad (4.9)$$

k : Hız sabiti

bulunur.

4.9 eşitliğinin düzenlenmesi ve integrasyonu ile;

$x^2=2kt$ veya daha genel bir gösterilişle,

$$x=kt^n \quad (4.10)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik parabolik hız kanunu olarak bilinir ve difüzyon kontrollü proseslerde kaplamanın büyüme hızı genellikle parabolik hız kanununa uyar.

Tam difüzyon kontrollü bir reaksiyon için $n=0,5$ tir. Bu değerden sapmalar incelenmiştir. Bu sapmalara neden olan faktörlerden biri, çoğu metal kaplama sistemlerinde difüzyon tabakasında intermetalik bileşiklerin oluşmasıdır. Yine de teorik çalışmalar, metal kaplama uygulamalarında, toplam kinetik davranışın parabolik zaman bağımlılığına indirgenebileceğini göstermiştir [21].

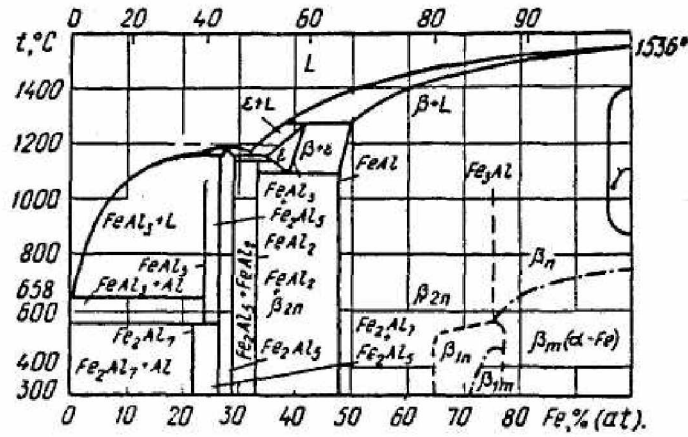
Alüminyum kaplamada ilk kinetik bilgiler Gebhardt ve Obrowski tarafından ortaya konmuştur. Bu araştırmacılar, dilatometrik tekniği kullanmışlardır. Bu teknik reaksiyon derecesi için bir aritmetik ortalama değeri vermektedir. Gebhardt ve Obrowski deneylerinde saf Armco demirini alüminyum banyosuna daldırmışlardır. Ancak bu araştırmacılar reaksiyon zamanı ile intermetalik tabaka kalınlığı arasında belirli bir kinetik ilişki kuramamışlardır [21].

1953 yılında da Hanink ve Boegehold, 710°C'deki alüminyum banyosuna düşük karbonlu ve az alaşımlı çelikler daldırmışlar ve 8 dakikaya kadar değişen sürelerle banyo içerisinde tutmuşlardır. Bu araştırmacıların ortaya koyduğu grafiklerden yararlanarak yapılan hesaplama ile 4.9 nolu denklemdeki n değeri, düşük karbonlu çelikler için 0,6 ve az alaşımlı çelikler için 0,7 olarak hesaplanmıştır. Banyo sıcaklığı arttıkça, n değerleri 0,27'den 0,38'e kadar değişmektedir. Hız sabiti yüksek sıcaklıklarda, daha yüksek dereceden difüzyon kontrollüdür. Daha düşük sıcaklıklarda çekirdeklenme hızı komplike bir faktör olmaktadır. 715—1032°C arasında süper saf demirle (%99,9+) yapılan deneylerde, metalografik ölçümler sonucu, maksimum difüzyon mesafesinin parabolik zaman ilişkisine uyduğu saptanmıştır [21].

Demir ve düşük karbonlu çelik yerine, orta karbonlu çelik kullanıldığında reaksiyon hızı 800°C'de maksimuma ulaşmakta ve bunun üzerindeki sıcaklıklarda azalmaktadır. Bunun alaşım tabakasının sürekli ergimesinden kaynaklandığı iddia edilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda oluşan kalın intermetalik fazların, sıcak daldırma işlemi sırasında dökülme eğiliminde olması daha mümkün bir sebep olarak görünmektedir. Böyle bir etki anormal incelikte bir alaşım tabakasının oluşmasına neden olacaktır [21].

4.1.2. Demir - Alüminyum İntermetalik Fazların incelenmesi

Şekil 4.1'deki demir-alüminyum denge diyagramında görüldüğü üzere, alüminyum kaplama sıcaklıklarında üç intermetalik bileşik kararlıdır. %66,6 alüminyumda FeAl_2 olarak formüle edilen ve zeta (ξ) olarak isimlendirilen bileşik mevcuttur. Fe_2Al_5 ara fazı, eta (η), 1173°C 'deki bir ergime reaksiyonu sonucu oluşmaktadır ve %71,9 alüminyum içermektedir. 1160°C 'de sıvı alüminyum ile Fe_2Al_5 arasındaki peritektik bir reaksiyon sonucu FeAl_3 (θ) üçüncü intermetalik bileşiği oluşmaktadır. Bu faz %74,3 – 77,2 alüminyum içermektedir ve monoklinik yapıdadır. Yukarıdaki üç intermetalik bileşiğe ilave olarak alüminyum kaplama sıcaklıklarında, bu sistemde en az iki fazın daha olduğu belirtilmektedir. Fe_2Al_7 bileşiğinin herhangi bir kristalografik kanıt olmamasına rağmen kararlı olduğu sanılmaktadır. Bundan başka metastabil olarak tanımlanan FeAl_6 fazı da mevcuttur [21].

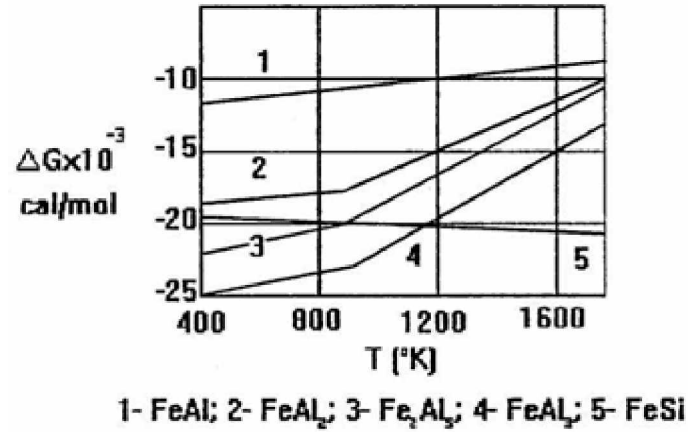


Şekil 4.1. Demir-alüminyum faz diyagramı [15].

Tablo. 4.1 ve Şekil 4.2 ' de demir-alüminyum sistemindeki intermetalik fazların serbest enerji değişimleri verilmektedir.

Tablo 4.1. Fe-Al sistemindeki intermetalik fazların oluşum serbest enerji değişimleri [15].

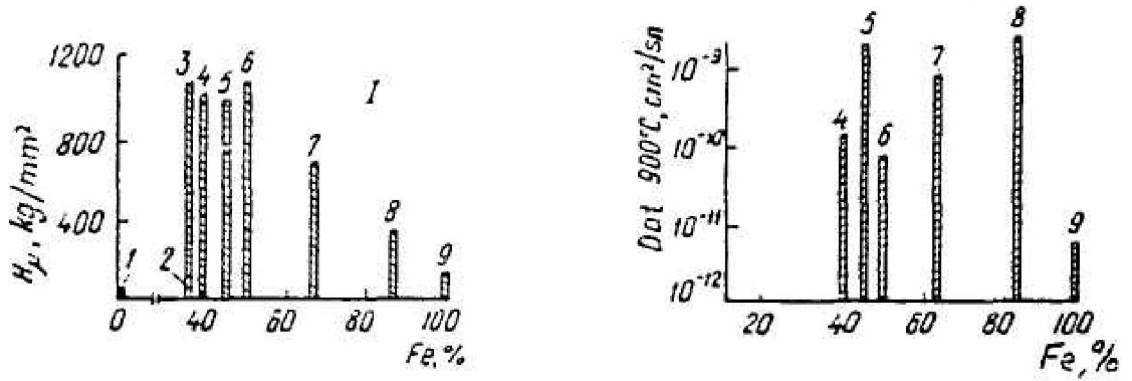
Bileşik	$T_{\text{erg}} (^{\circ}\text{C})$	ΔG° (Cal./ mol.)	
		933 °K'e kadar	933 °K'nin üzerinde
FeAl_3	1160	$-26800 + 4,04 T$	$-34300 + 12,08 T$
Fe_2Al_5	1173	$-23100 + 3,56 T$	$-29350 + 10,27 T$
FeAl_2	1158	$-19500 + 2,57 T$	$-24500 + 7,93 T$
FeAl	1103	$-12200 + 1,14 T$	$-14700 + 3,82 T$



Şekil 4.2. Fe-Al intermetalik bileşiklerinin serbest enerjileri ile sıcaklık arasındaki ilişki [15].

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi termodinamik açıdan demir-alüminyum intermetalik bileşiklerinin oluşum ihtimali, içerdikleri alüminyum miktarı arttıkça artmaktadır. Bu nedenle oluşum ihtimali en yüksek olan bileşik FeAl₃'tür.

Şekil 4.3'te demir-alüminyum intermetalik fazlarının mikrosertlik değerleri verilmektedir. Fe₂Al₅, Fe₂Al₇, FeAl₃ ve FeAl₂ fazlarının mikrosertlık değerleri (H_μ) 960-1150 kg/mm² arasında değişmekte, bileşiğin demir içeriği arttıkça, FeAl için 660 ve Fe₃Al için 270 kg/mm² değerlerine düşmektedir. Yine Şekil 4.3'te intermetalik bileşiklerin mikrosertliklerine ilave olarak difüzyon katsayıları da verilmektedir.



Şekil 4.3. Fe-Al intermetalik bileşiklerinin mikrosertlik değerleri ve difüzyon katsayıları [15].

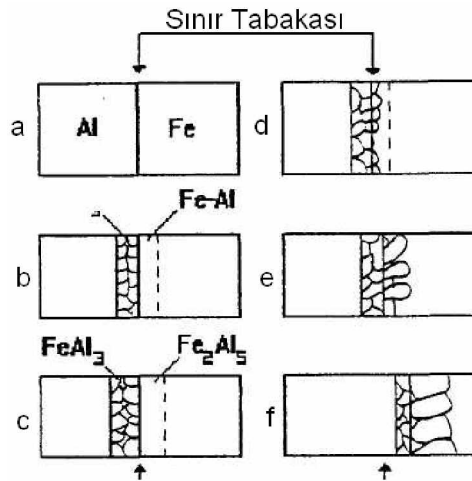
1) Al, 2) Al + FeAl₃, 3) Fe₂Al₇, 4) FeAl₃, 5) Fe₂Al₅, 6) FeAl₂, 7) FeAl, 8) Fe₃Al, 9) Fe

4.1.3. İntermetalik Fazların Oluşum Mekanizması

İki metalin birbiriyle etkileşmesiyle oluşan reaksiyonda hızı kontrol eden iki mekanizma vardır. Birincisi, reaktanların ara yüzeyde oluşturdukları kimyasal reaksiyon, diğer mekanizma ise reaktanların reaksiyon ürünü içerisinde difüzyondur. Bu iki mekanizma için iki ayrı kinetik kanun söz konusudur. Ara yüzeydeki reaksiyonun reaksiyon hızını kontrol eden adım olması durumunda ürün kalınlığının artışı zamana bağlı olarak lineerdir. Eğer difüzyon reaksiyon hızını kontrol eden adım ise kaplama kalınlığının zamana bağlı olarak artışı parabolik hız kanununa uyar.

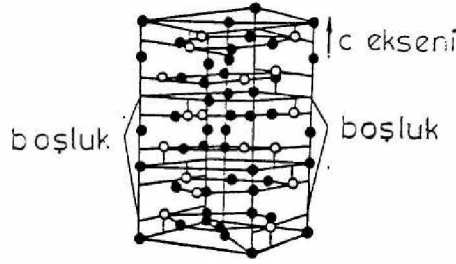
Difüzyon tabakasının oluşumu aşağıdaki gibi açıklanabilir [15] ;

Katı demir sıvı alüminyum ile temas ettiği zaman, temas yüzeylerinde karşılıklı difüzyon meydana gelir ve her iki metalde de difüzyon tabakası oluşur (Şekil.4.4). Alüminyum içerisinde demir konsantrasyonu arttığı zaman Şekil 4.1'deki Fe-Al faz diyagramında görüldüğü gibi $FeAl_3$ oluşur. Daldırma işleminin bu ilk safhasında numune yakınında anlık bir sıcaklık düşüşü meydana gelir. Bu sıcaklık düşmesi, oluşan bileşiğin sıvı alüminyuma doğru olan büyümesini durdurur ve bir miktar bileşik numune yüzeyinde kalır. Aynı anda demir içerisinde alüminyum katı eriyiği belirir. Metallerin karşılıklı difüzyonu sürerken tabaka belli bir kalınlığa erişir ve Fe_2Al_5 tipinde bileşik görünür (Şekil 4.4.c) . Kendine özgü yapısından dolayı Fe_2Al_5 kristalleri c eksenı boyunca kolonsal kristal bölgesi oluşturarak çok hızlı bir şekilde büyümeye başlar. Fe_2Al_5 kolonsal kristallerinin demir tabana doğru büyümesi meydana gelir ve $FeAl_3$ ara tabakasından difüze olan demir alüminyuma nüfuz eder. Demirin ilerleyen difüzyon aşamasında, Fe_2Al_5 , $FeAl_3$ 'e dönüşür (Şekil 3.4.d). Fe_2Al_5 fazının büyümesi ve demirin alüminyum içerisindeki difüzyon hızının artması sonucu demir içerisindeki alüminyum katı eriyiğinden oluşan bölge ortadan kaybolur (Sekil 3.4.e) . Böylece demir içerisinde alüminyumun difüzyonu, iki metalin teması süresince hemen hemen tek başına görülen (n) fazı (Fe_2Al_5) tarafından belirlenir. Mikrosertlik ölçümleri sonucu ara tabaka kenarlarında, çok dar bir alanda başka bir faz tespit edilmiştir. Bu faz alüminyumun demir içerisindeki α katı eriyiğidir [15].



Şekil 4.4. Katı demir-sıvı alüminyum etkileşiminin şematik diyagramı [15].

(η) fazının kristallografik yapısı tespit edilerek intermetalik fazın büyüme anizotropisi açıklanmıştır. Bulgulara göre Fe_2Al_5 fazı ortorombik hücre yapısına sahiptir ve c eksenine alüminyum atomlarınca doldurulmuştur. Geri kalan alüminyum atomları ve bütün demir atomları hücre içerisinde veya yanal yüzeylerde yer almaktadır. Şekil 3.5'te (η) fazını oluşturan birim hücrelerin birbiri üzerine dizilmiş paterni görülmektedir. Bu zincir yapısında yapılan yoğunluk ölçümleri, c ekseninin %70'lik doluluğa sahip olduğunu göstermiştir. Bu denli yüksek orandaki boşluk alüminyum atomlarının tercihli kristallografik düzlemlerde selektif hareket kabiliyetini arttırmaktadır.



Şekil 4.5. Üç adet (η) fazı (Fe_2Al_5) birim hücrelerinin birbiri üzerine dizilmiş paterni [15].

Kristal kafesinin taban düzlemi, intermetalik (η) fazının kolonsal yapıdaki kristallerinin taban düzlemine rast gelmektedir. c eksenine de, kolonsal tek kristallerin boylamasına olan eksenine denk gelmektedir. Böylece difüzyon hızının anizotropisi ve iki metalin (η) fazı oluşumu arasındaki nispi yüksek hızlı etkileşimi basitçe açıklanmaktadır. Böylelikle, sıcak daldırma yönteminde oluşan fazların çok hızlı büyümelerinin ve belirli doğrultularda yönelmelerinin sebebi anlaşılmıştır. Ayrıca bu durum demir-alüminyum faz diyagramında belli konsantrasyon ve sıcaklık aralığında mevcut oldukları gösterilmelerine rağmen, Fe_2Al_5 hariç diğer fazların niçin yeterli doğrulukta tespit edilemediğini de açıklamaktadır. Böylece 750-800 °C'de intermetalik fazların kolonsal oluşumunun, kenarlardan çeliğin içine doğru büyümesi açıklanabilir. Alüminyumun çeliğin içindeki difüzyonu, intermetalik fazın alüminyum içerisindeki çözünme hızından fazladır. Sıvı alüminyumun çelik içerisine emilmesi mikroskobik boşluklardaki kapiler kuvvetlerden dolayı veya tane sınırlarında ötekiğin erimesiyle mümkündür. Bu durumda intermetalik tabaka genişliği temas süresiyle artmaktadır. Kristalleşme sırasında belli bir miktarda intermetalik faz sıvı alüminyumdan ayrılmaktadır. Sıcaklığı 900-980 °C'ye arttırmak, demir atomlarının intermetalik tabaka içerisindeki difüzyon hızını, alüminyum atomlarına göre daha fazla artırır. İntermetalik fazın çözünürlüğü de artar. Alüminyum içerisindeki yoğun çözünmeden dolayı genelde tabaka kalınlığı artan temas süresiyle artmaz (hatta azalabilir). Toplam intermetalik faz miktarı artar, fakat belli bir kısmı kristalleşme sırasında sıvı alüminyum içerisinde kalır.

Banyonun demir doygunluğunun 700°C'de %2,5 atomik demir seviyesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu orandan daha fazla demir bulunması durumunda banyoda ve bant yüzeyinde FeAl_3 'ten ibaret bir çamur oluşmaktadır.

Alüminyumun, Fe_2Al_5 , FeAl_2 , FeAl ve demir içerisinde katı eriyik halinde demir içeren birçok fazı saptanmış ve tanımlanmıştır. 576°C'nin altında ana ürün fazı (θ) dır, (η) fazı 532°C'nin üzerinde ortaya çıkmakta, 576°C'nin üzerinde yoğunluk kazanmaktadır, bu sıcaklıkta aynı zamanda küçük miktarda FeAl_2 fazı görünmeye başlamaktadır [21]. Birçok araştırmacı tarafından çok sayıda araştırma yapılmasına rağmen sıcak daldırmada, demir ile alüminyum arasındaki reaksiyonla ilgili olarak sadece tek bir durum ortaya çıkarılmıştır, bu da oluşan intermetalik tabakanın Fe-Al denge diyagramında gösterilen intermetalik bileşiklerin hepsini içermekte olduğudur [21]. Fe_2Al_5 , görünen tek intermetalik bileşik değildir, ancak diğer fazların hepsinden daha büyük bir hacim oranına sahiptir.

Alüminyum kaplamanın büyüme mekanizmasını açıklamak için gerek demir ile alüminyum banyo arasında ve gerekse proseste oluşan fazlar arasındaki difüzyon mekanizmalarını incelemek gerekir.

Demir ve demir esaslı alaşımlar ile alüminyum banyo arasında meydana gelen reaksiyonlar, difüzyon katmanlarının oluşum süreçlerine bağlı olarak 5 zaman kademesine bölerek izah edilebilir. Her bir zaman adımı alüminyum banyodaki demir üzerinde sıcak daldırma ile oluşan kaplamanın ilerlemesi Şekil 4.1. 'de gösterilmiştir [22].

T_0 boyunca soğuk demir sıvı alüminyum ile temas halindedir. Daldırılan malzemenin ısınması ile birlikte, banyo sıcaklığı bölgesel olarak düşer (bazen banyoda katılaşma dahi olabilir). Isı transferi süreçleri katı metal (demir) ile sıvı alüminyum arasında reaksiyonun başlayacağı ana kadar devam eder. Bu başlangıç süreci boyunca demir ile alüminyum arasında ekzotermik bir reaksiyon devam eder. Sıvı alüminyum, demir yüzeyinde yayılırken demir-alüminyum fazları oluşmaya başlar. Reaksiyon enerjisinin beslenmesi ile birlikte yüzeyde faz oluşum süreçleri aktif hale gelir. Yapılan deneyler, kaplamanın büyümeye başlaması ile birlikte oluşan katı-sıvı ara fazında gaz absorbe edilmediği gözlenmiştir. Bu olay, kaplanan parçanın yüzeyinde kaplamanın ve ara-fazın ilerleyerek birikmesi ile açıklanabilir.

Demir alüminyum sistemi içindeki ilk fazların (η Al_3Fe veya Al_5Fe_2) demir yüzeyinde oluşumunu göstermek güçtür. Literatürde ilk oluşumun η - Al_3Fe olduğu gösterilmiştir [22-26].

T_1 boyunca, reaksiyon difüzyonu olarak bilinen iki yönlü difüzyonun neticesinde difüze olan metale ait latislerden farklı kristallografik latisler oluşur. Reaksiyon difüzyonuna ait karakteristik

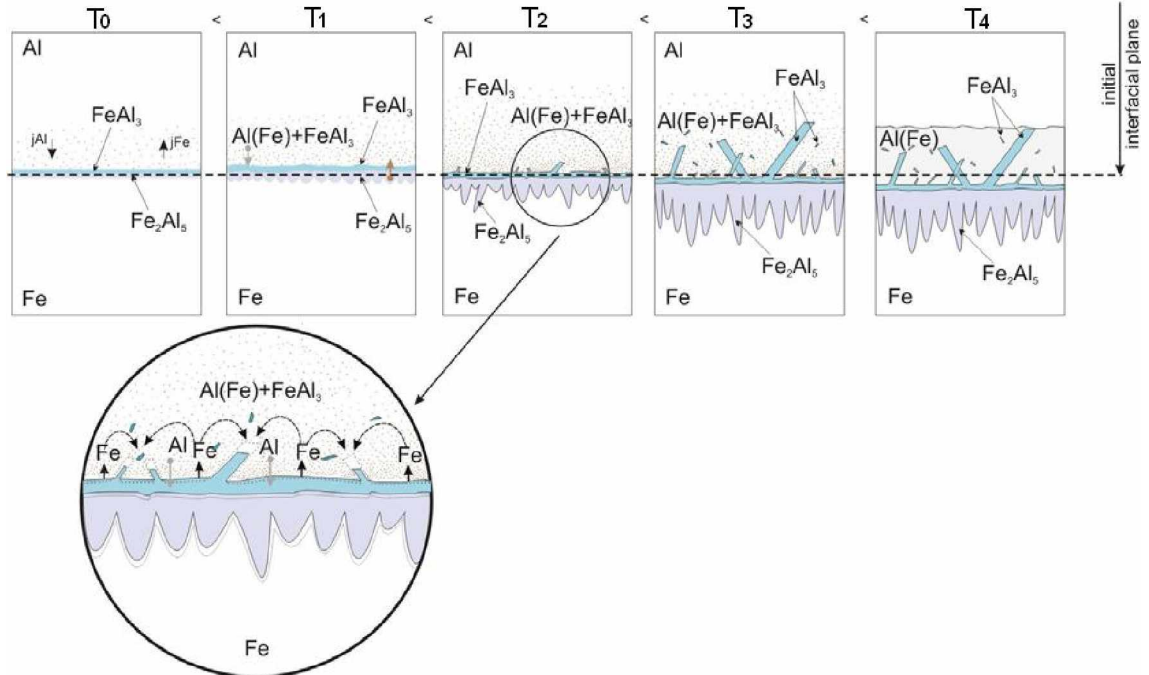
özellik, difüzyon oranı sadece fazlar içerisinde bulunan her bir elemente bağlı değil aynı zamanda ara yüzey reaksiyonlarının kinetiğine bağlıdır. Difüzyon reaksiyonu sırasında oluşan yeni fazlar, difüze olan bileşenlerin konsantrasyonu açısından bazı süreksizlikleri içerir. Tek bir bütün fazdan oluşmayan katman gözlenir. Dolayısı ile bunlar, homojen olmayan bir ortamda gerçekleşen heterojen reaksiyonlardır

Bu proses ayrıca şu aşamaları da içerir;

- Faz sınırı boyunca reaktanların difüzyonu (Fe ve Al)
- Demir ve Alüminyum atomlarının faz sınırı boyunca transferi neticesinde elementlerin var olan bazı eski bağlarını bozup aralarında yeni bağlar oluşturması
- Yeni intermetalik fazlar içerisinde oluşun element difüzyonu

Bu süreç birinci kısımda anlatılan, alüminyumdan demire ve demirden alüminyuma olan geçiş durumlarının karakterize edilmesinin devamı şeklinde görülmelidir. Bu yüzden görece daha kısa sürede fazlarda ikili demir-alüminyum sistemlerinin oluşacağı öngörülür [22].

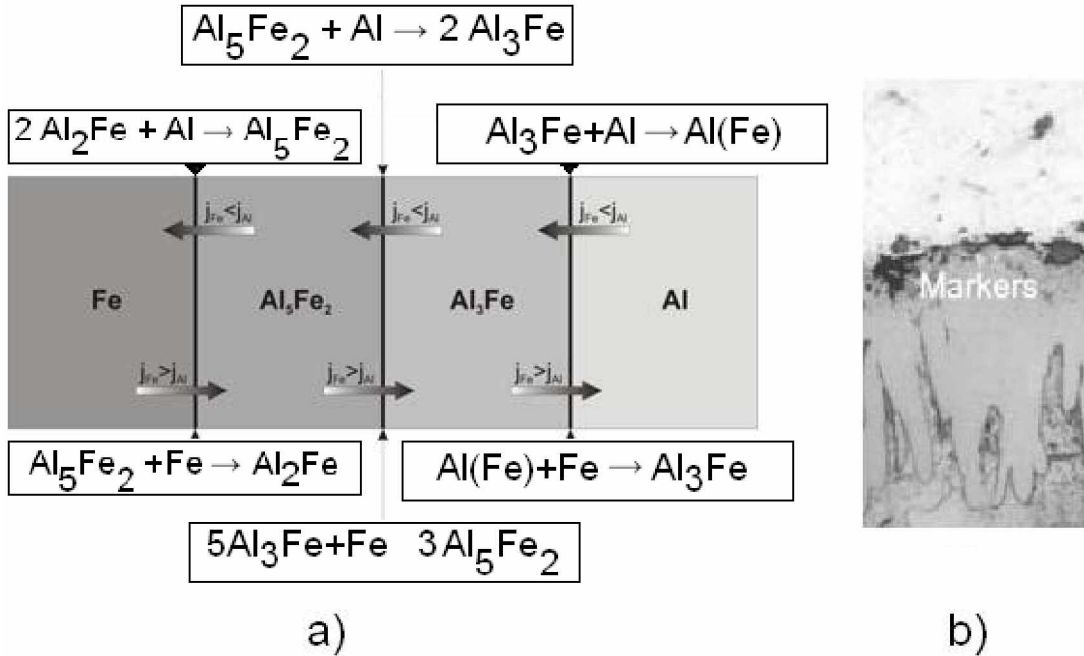
Demir Alüminyum sistemine ait denge diyagramından, benzer bir alüminize işlemi için seçilen sıcaklıkta elde edilen kaplamanın yapısı, katı demir içinde çözünmüş alüminyum ve artan oranlarda alüminyum bileşene sahip (AlFe_3 , AlFe , $\zeta\text{-Al}_2\text{Fe}$, $\eta\text{-Al}_5\text{Fe}_2$, ve $\theta\text{-Al}_3\text{Fe}$) intermetalik fazlardan oluşmuştur. Ayrıca, prosesin bu aşamasında, metalik sıvı içerisinde katı faz çözülmeye başlar. T_1 aşaması sonuna doğru kaplamanın büyümeğe başladığı periyotun başlangıcıdır.



Şekil 4.6. Alüminyum kaplamanın ilerleme mekanizması [22].

T_2 aşamasında, başlangıç periyodunda oluşan intermetalik bileşiklerin kalınlığının daha da artarak büyümesinin, Fe-Al fazının alüminyum banyo ile temasından kaynaklandığı görülmektedir. Sıcak daldırma alüminyum kaplamaların büyümesinde yapılan gözlemler, her bir fazın büyümesini sağlayan bu reaksiyonların aslında çok yüksek bir hızda ilerlerken difüzyon, vs. gibi çok daha yavaş mekanizmalar ile kontrol edildiğini göstermiştir. Bu yüzden, sıcak daldırma prosesinde gerçekleşen difüzyon ilerlemesi açıklanacaktır. Dolayısıyla difüzyon tabakası büyümesine getirilen açıklamalarda kullanılan, sıcak daldırma galvaniz şartlarında oluşan difüzyon süreçlerinin de incelenmesi gerektiği görülmektedir. Deneyler, kaplamanın yeterli kalınlıkta olmasını sadece iki intermetalik fazın sağladığını göstermiştir. Bunlar η -Al₅Fe₂ ve θ -Al₃Fe'dir [23-32]. Bunlardan birisinin yeterli kalınlıkta tabaka oluşturması mümkün değildir. Böylece Fe-Al denge sistemindeki diğer fazların karakterize olduğunu varsayabiliriz [22].

Değişik faz sınırlarında oluşan Fe-Al reaksiyonları Şekil 4-a 'da gösterilmiştir. Her faz sınırlarında oluşan yer değiştirmenin yönünü belirlemek ve proses sırasında oluşan kütle transferini belirlemek için, bu difüzyon reaktanlarının akıları arasındaki ilgili oranların belirlenmesi gereklidir. Kaplamalardaki difüzyon süreçlerinin gözlemlendiği deneysel çalışmaların sonucunda, işaretçilerin pozisyonundan itibaren (Şekil 4.6 b), Alüminyum difüzyonu oluşacağı için kaplamanın büyümesinin mümkün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, diğer tüm önceki çalışmalar, katmanlardaki büyümenin difüzyon ve alüminyum akısına bağlı olduğu varsayımına dayandırılmıştır [22].



Şekil 4.7. Ara tabaka sınırında oluşan geçiş reaksiyonları ve işaretçi oluşumu (Marker) [22].

Al_3Fe fazının alüminyum banyo ile temas ettiği yer, alüminyumun doyma derecesinin değişimine bağlı bir fonksiyon olarak açıklanabilir. Fazda oluşan bu değişim, Al_3Fe katmanını geçen alüminyumun konsantrasyonunu değiştirir. Bunun sonucunda alüminyum atomlarının demire doğru her bir ayrı katmanı geçmesini sağlar. Faz sınırları üzerinde, bulunan alüminyum zaten orada mevcut olan intermetalik bileşiklerle reaksiyona girer. Bu olay η Al_5Fe_2 fazının büyüme reaksiyonu sayesinde mümkündür:



Bu faz, kaplama mikroyapısı görüntülerinde görünmüyorsa da, η Al_5Fe_2 faz tabakasının altında mevcut olduğunu bilinmektedir ve bu gözlemi imkansız kılan sadece kalınlığıdır. Gerçekte η Al_5Fe_2 difüzyon tabakasının kalınlaşması, ζ Al_2Fe fazının büyümesi ile ilgili değildir. Aslında η fazında oluşan dinamik büyüme ilerlemesi, bu fazda bulunan alüminyumun alt latislerinde ve eşkenar kafes latislerde boş alanlara doğru oluşan kolay difüzyonundan dolayıdır [23, 26, 27]. Al_3Fe ve Al_5Fe_2 faz ara yüzünde oluşan tepkime, θ Al_3Fe fazının büyümesini teşvik eder:



Bu reaksiyon difüzyon yolunu uzatırken ve alüminyum akı bu faz kısaltır. Sıvı içerisindeki alüminyumun nispeten daha geniş difüzyon akısına sahip olmasına, banyo ile temas halinde olan intermetalik fazın aşırı doymunluk neticesinde çözünmesi neden olmaktadır. Bu $\text{Al} + \text{Al}_3\text{Fe}$ ötektik oluşumu nedeniyle meydana gelebilir. Sonra ötektik bir düşük sıcaklık nedeniyle faz aşırı doyar ve erime gerçekleşir. Sonuç olarak, Al_3Fe fazı düşük kalınlıkta oluşur ve sonuç olarak bir difüzyon akısı büyür. Bu olgu nedeniyle, θ Al_3Fe fazı kalınlığı ilk olarak büyümeye devam edecek, prosesin geri kalan süresi boyunca aynı düzeyde kalacaktır [22].

Demir atomları, muhtemelen çok bulunduğu Al_3Fe faz kümelerinden banyoya geçiyor ve faz sınırında alüminyum içinde doymunluğa ulaşıyor. Demirin sıvı içerisindeki hareketini difüzyon prosesine borçludur. Bu hareket, banyo içerisinde başka yerlerde bulunan demirin doymunluğa ulaşması için uygun şartları oluşturur. Demirin banyo içinde taşınımının ve alüminyum içinde çözünürlüğünün sınırlı düşük bir oranda olması, Al_3Fe fazının sütun şeklinde kristalizasyonu için uygun şartlar oluşturur. Kristallografik olarak tercih edilen bölgelerde, yani intermetalik fazın tabaka yüzeyinde büyürler [22].

İkincil kristalizasyon oluşumları etrafında bölgesel demir konsantrasyonunun da bir düşme olmadığı için, alüminyum banyonda bulunan demir içeriğin zenginleşmesi için uygun koşullar sağlanmış olur. Literatürde bu sütunsal kristallerin hangi zaman sürecinde büyümeye başladığı vs. gibi konular tartışılmıştır. Eggeler ve diğerleri bu kristalitlerin kaplanan parçanın banyodan

alındığında ortaya çıktığını iddia etmişlerdir [34]. Bu yazarların görüşüne göre, kristalleşmenin olası sebebi olarak, alüminyum banyoda çözünmüş demirden kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda, Al_3Fe fazında bulunan bu kolon şeklindeki kristallerin, kaplanan ürünü çevreleyen çözünmüş demir ile doymuş olan sıvı alüminyum banyosunda gerçekleşen ikincil kristalizasyonu ile oluştuğu kanıtlanmıştır [23, 26, 27].

Bu tezi daha iyi ispatlamak için bir deney yapılmıştır. Bu deneyde kaplamanın üst katmanı kurşun ile kaplanmıştır. Bunu gerçekleştirmek için eriyik potasında kurşun ve alüminyum birlikte eritilerek, iki katlı banyo hazırlanmıştır. Yoğunluk farkından dolayı, potanın dibinde kurşun yer alırken, üst kısmında ise alüminyum yer almıştır.

Test numunesi olarak hiperötektik beyaz dökme demir kullanılmıştır. Yüzeyi hazırlanan numune ilk olarak üst kısımdaki $963^\circ K$ olan alüminyuma 180 s süresince daldırılmış, daha sonra numune alt katmandaki kurşunun içerisine indirilmiştir. Bu bölgede Kurşunun sıcaklığı üst katmandaki alüminyuma görece daha azdır. Numunenin 300s boyunca bekletilmesinden sonra banyodan çıkarılmıştır. Çıkarma sırasında kurşun katmanı içerisinden geçerek çıkmıştır. Böylece kaplama iki ayrı katmandan oluşması sağlanmıştır.

Benzer şekilde alüminyum kaplamanın ara katmanı Al_5Fe_2 fazından oluşurken, öte yandan dış katmanda Al_3Fe fazında kristalitlerden oluştuğu ve kristalitler arasındaki oluşan boşlukların % 95,2-98,5 kurşun ile dolduğu gözlemlenmiştir. Kurşun kaplı katmanın yüksekliği bu Al_3Fe fazındaki kristallerin yüksekliğine bağlı olduğu belirlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen önceki çalışmalarda kaplamaya ait bölgesel ilerlemeler bazı etkileşimlerle karakterize edilmişti ve anlık olduğu anlatılmıştı. Alüminyum kaplamanın büyümesi sırasında dinamik bir denge kurulmuş ve bu dengede elementlerin ve intermetalik fazların fiziki-kimyasal özellikleri ve gerçekte oluşan reaksiyonların kinetiği yatmaktadır [22].

T_3 aşamasında, işleyen süreçler devam ederken, η fazına ait kalınlık, zamana bağlı olarak yaklaşık parabolik bir fonksiyon çizerek artar. Yüzey ara katmandan, başlangıç fazı sınırı boyunca iç kısımdan ayrılır. Banyoda çözünen demir bileşimi artar. Difüzyon bölgesinde dinamik bir denge kurulur. Bu denge farklı intermetalik fazlarda difüze olan alüminyum akısına ve banyoya geçen demir oranına dolayısı ile Nernst difüzyon katmanına bağlıdır.

T_4 adımı kaplanan parçanın banyodan alınması ile başlar. Bu adımda kaplanan parçadan, ortama doğru ısı transferi olur, kaplanan parça yüzeyinde sıcaklık düşer. Sıcaklık değişimi ile birlikte, demir yüzeyinde anlık olarak oluşan η Al_5Fe_2 intermetalik fazları, demire yapışır. Kendi yüzeyinde ise daha ince katman halinde θ $FeAl_3$ fazı sütun şeklinde kolonlar halinde ilerleyerek büyür. Bu fazlar ise demir içeren ve sıvı alüminyum banyosu ile aynı özellikte ince bir film

tabakası ile kaplıdır. Kaplamanın hacmi muhtemelen banyonun viskozitesine bağlı olarak değişmektedir [22].

4.2. Kaplama ve Ara Tabaka Kalınlığına Etki Eden Faktörler

Sıcak daldırma yönteminde elde edilen kaplama iki tabakaya sahiptir. Çelik yüzeyinde oluşan demir-alüminyum alaşım tabakası (intermetalik faz) ve bunun üzerinde alüminyum tabakası vardır. Alüminyum kaplı çelik deforme edildiği zaman, intermetalik fazın oluşturduğu kırılğan tabaka boyunca, kaplama kolayca sıyrılabilir. Bu nedenle alaşım tabakası kalınlığı minimum bir değerde tutulmaya çalışılır [15].

Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama teknolojisi geliştirilirken banyo sıcaklığının, daldırma zamanının, çelik bandın banyodan çıkış hızının, banyo ve çelik bileşiminin alüminyum kaplama yapısı üzerindeki etkileri önemlidir.

4.2.1. Kaplanan parçanın banyodan çıkış hızının etkisi

Daldırma alüminyum yöntemi ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda bant şeklindeki çelik sac levhalar farklı hızlarda banyodan çıkarılarak oluşan kaplama özellikleri incelenmiştir. Buna göre kaplama kalınlığını kontrol etmenin temel yolu kaplanan çelik bandın alüminyum banyosundan çıkış hızını değiştirmektir [21].

Çelik, alüminyumun katılma hızına eşit bir hızda banyodan çıkarılırsa çok kalın bir kaplama elde edilir. Kaplama kalınlığı (x) mikron olarak aşağıdaki gibi verilebilir [21] ;

$$X=2/3(Wn/Dg)^{1/2}= 2/3 (Wf/g)^{1/2} \quad (4.13)$$

W: Çıkış hızı (cm/s)

n: Dinamik viskozite (cP)

D: Alüminyumun yoğunluğu (g/cm³)

g: Yerçekimi ivmesi (cm/s²)

f: Kinematik viskozite (cSt)

Alüminyumun kinematik viskozitesi olarak 0,65 cSt değeri kullanılırsa eşitlik aşağıdaki gibi basitleştirilebilir;

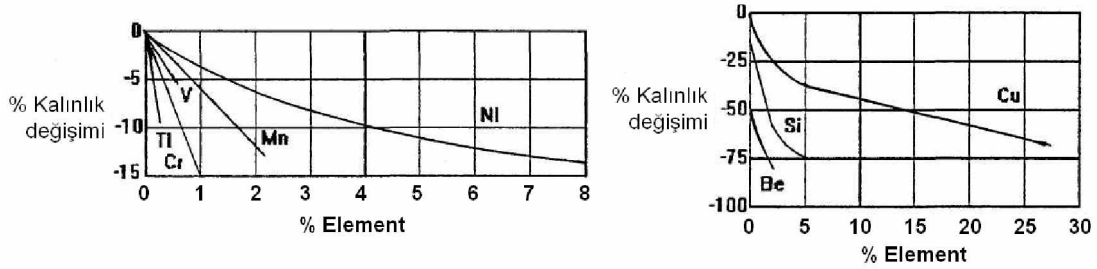
$$X= 17.2\sqrt{W} \quad (4.14)$$

Eşitlikten görüldüğü gibi, daha yüksek çıkış hızlarında daha kalın kaplama elde edilmektedir. 4.14 eşitliğindeki teorik değer olan 17.2, 18 ile 20 arasında değişmektedir, yukarıdaki eşitlik 0,3 - 33 cm/s çıkış hızları arasında geçerlidir.

Yukarıdaki eşitlikler sıcak daldırmayla üretilen kalınlığın viskozitenin kareköküyle doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Alüminyumun viskozitesi, saf alüminyum için 2,84 cP değerinden, silisyumla alaşımlandırmak suretiyle ötektik bileşimdeki değer olan 1,8 cP değerine kadar azaltılabilmektedir. Bunun sebebi ötektik bileşime yaklaşıldığında (%11,7 Si) katılaşılan yapının dentritik karakterini kaybetmesidir. Sıcaklığa bağlı olarak viskozitenin değişimi çok azdır. 662°C'de 1,4 cP, 804°C'de 1,1 cP. Böylece sıcaklığın değişimi toplam kaplama kalınlığı üzerinde çok az bir etkiye sahiptir. Ancak sıcaklık alaşım tabakası kalınlığına önemli ölçüde etki etmektedir [21].

4.2.2. Alüminyum Banyosunun Kimyasal Bileşiminin Etkisi

Difüzyon prosesine dayanan bir kaplama sisteminde, kaplama metal ile kaplanacak metal arasındaki bağlanma, fiziksel olarak bir difüzyon tabakası üzerinden gerçekleşir. Benzer bileşiklerde yaygın olduğu üzere Fe-Al sistemindeki intermetalik bileşikler de kırılgandır ve kötü bir süneklığe sahiptir. Bu etkiyi mümkün olan en düşük seviyeye indirmek için, alaşım tabakası kalınlığı yeterli bağlanmayı sağlayacak bir seviyeye kadar azaltılmalıdır. Reaksiyon zamanını ve sıcaklığını azaltarak bazı başarılar elde edilmesine rağmen, ticari üreticiler kalınlığı azaltmak için banyoya alaşım elementi ilavesi yapmaktadırlar.

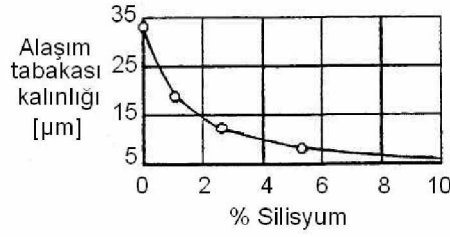


Şekil 4.8. Sade karbon çeliklerde, diğer elementlerin ara tabaka kalınlığına etkisi [2].

Şekil 4.8'da banyoya ilave edilen çeşitli alaşım elementlerinin ara tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi tüm alaşım elementleri değişik oranlarda alaşım tabakasının kalınlığını azaltmaktadır.

4.2.2.1. Silisyum

Ticari uygulama alanı bulmuş en önemli banyo ilave malzemesi silisyumdur. Silisyum ilavesi durumunda, %5 Si içeren alüminyum banyosunda, alaşım tabakası kalınlığı %75 azalmaktadır. %10 Si ilavesi durumunda %80'lik bir azalış olmakta ve ilk bastaki büyük azalış devam etmemektedir (Şekil 4.8.). Alüminyum banyosunun Si içeriği %6-8 civarında tutulmalıdır. Şekil.4,9'de de görüldüğü gibi, küçük miktarlardaki Si ilaveleri (%2'ye kadar) banyo sıcaklığına ve bekleme süresine bağlı olarak ara tabaka kalınlığını 33 µm'den 13 µm'ye azaltmaktadır. Daha fazla Si ilavesinin tabaka kalınlığı üzerinde çok az bir etkisi vardır [16].



Şekil 4.9. Silisyumun demir-alüminyum ara tabakası kalınlığına etkisi [16].

Alüminyum banyosunda Si bulunması durumunda alüminyumun difüzyonu zorlaşır. Silisyum, sadece alüminyumun difüzyonunu engellemekle kalmaz, eriyik alüminyum ile temas eden demir yüzeyinin eriyik içinde çözünmesini de zorlaştırır. Silisyum içeriğinin artması ara tabaka kalınlığını biraz azaltır. Alüminyum, demir ve silisyum arasında gerçekleşen denge reaksiyonlarında, alüminyumun difüzyon katsayısının düşmesine bağlı olarak ara tabakanın büyüme hızındaki büyük düşmeler görülür (0,15-0,48 mm/saat'ten 0-0,15 mm/saat'e) [15].

4.2.2.2. Çinko

Eldeki bilgilere göre alüminyum-çinko alaşımında kaplama yapmak, saf alüminyumla yapılan kaplamaya göre daha sağlam bir ara tabaka oluşturur ve kaplama işlemi çok daha düşük sıcaklıklar ve daha kısa sürelerde oluşur. Süre arttığında, saf alüminyumda olduğu gibi tabaka kalınlığı sürekli olarak artmaktadır. Alüminyum-çinko alaşımı kullanıldığında alaşım tabakası görünümü farklı olmaktadır. Bu durumda, intermetalik tabakanın gözenekli yapıda olduğu ve reaksiyon hızını böylece arttırdığı gözlenmiştir. Çinko içeriği %30'a çıktığında bu artış azalmaktadır. Örneğin, %10-29 çinko içeriğinde daldırma süresi 2' den 12 dakikaya çıktığında tabaka kalınlığı, 15-20 µm artar. Oysa %30' un üzerindeki konsantrasyonlarda artış, 5-10 µm olmaktadır. 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda tabaka kalınlığında çok az bir değişim (0'dan - 5µm'ye) olmaktadır. Bu durum, düşük sıcaklıklarda difüzyon prosesinin zorlanmasıyla açıklanmaktadır. Daha yüksek kaplama sıcaklıklarında (680-720°C) ve 4 ile 8 dakikalık daldırma sürelerinde, ara tabaka kalınlığı artar. Daha yüksek çinko konsantrasyonlarında, çinkolu alüminyum demire göre daha yüksek reaktiviteye sahip olduğundan difüzyon tabakası kalınlığı artar. Sonuç olarak, intermetalik bileşikler ara alaşım tabakasına girdikleri zaman yoğun olarak çözünürler. Belirli koşullar altında intermetalik fazın çözünme hızı ile ara tabakanın oluşum hızı birbirine eşit olur ve ara tabaka kalınlığı değişmez. Sıcaklık ve çinko konsantrasyonunun daha da artırılması ile çözünme hızı, difüzyon tabakasının oluşum hızına baskın olur. Bunun sonucunda, difüzyon tabakasının kalınlığı artmaz, tersine azalır. Bu durum, çinkonun ara tabaka kalınlığına etkisini incelemek için daha önce yapılan çalışmalarda çelişkili sonuçları açıklamaktadır [15].

4.2.2.3. Demir

Özellikle yüksek kaplama sıcaklıklarında, demir alüminatlardan bir kısmı alüminyum banyosunda çözünür ve banyoyu kirletir. Yapılan çalışmalarda, %2,9 Fe içeriklerinde tabaka kalınlığının 40-45 µm'den 32-36 µm'ye azaldığı ve daha sonra pratik olarak sabit kaldığı

görülmüştür. Demir içeriğinin artması alüminyum kaplama prosesini ve tabakanın özelliklerini etkilemez. Ancak, demir, alüminyumun ergime noktasını hızla yükseltir. Böylece, yaklaşık %6 Fe konsantrasyonunda ergime sıcaklığı 800 °C civarına ulaşır ve bu durumda da alüminyum kaplama işleminde banyonun sıcaklığını yükseltmek gerekir. Demir ayrıca banyonun viskozitesini de artırır. %1,1 Fe içeriğinden daha yüksek oranlarda Fe bulunması durumunda alaşımın katılaşma sıcaklığı yükseldiği için viskozite daha da hızlı artar. Çok yüksek demir içeriklerinde alüminyum tabakası kalınlığı artar ve ara tabakaya yapışır. Örneğin, % 0,36 Fe içeren bir alüminyum-çinko alaşımında (Al+ %28 Zn) kaplama yapıldığında, sıcaklığa bağlı olarak tabaka kalınlığı 0,1 ile 0,3 mm arasında değişir, aynı alaşımın Fe içeriği %8,14'e arttırıldığında tabaka kalınlığı 1-2,5 mm'ye artar. Düşük demir içeriklerinde sıvı olan tabaka, daha yüksek Fe içeriklerinde yarı katı haldedir. Bu yüzden alüminyum kaplama banyolarında demir içeriği, 710-730°C'de %2,5-3' ten fazla olmamalıdır. Ayrıca çözünürlük sınırından daha fazla Fe ilavesi $FeAl_3$ drosu oluşumunu hızlandırmaktadır [15].

4.2.2.4. Nikel

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi alüminyuma Ni ilavesi tabaka kalınlığını yavaşta olsa sürekli olarak azaltmaktadır.

4.2.2.5. Magnezyum

720-730°C'de %0,5 Mg ilavesi, saf alüminyum kullanıldığında elde edilen 25-32 μ m'lik kalınlıkla kıyaslandığında, tabaka kalınlığını (15-25 μ m) azaltmaktadır. Daldırma süresi arttığında difüzyon tabakası kalınlığı artar [15].

4.2.2.6. Berilyum

Banyoya Be ilavesiyle, alaşım tabakası büyümesini silisyum'dan çok daha etkin kontrol etmek mümkündür. Alüminyumu Be ile alaşımlandırmak difüzyon tabakasının kalınlığını ve sertliğini %80-90 oranında azaltır. Alüminyum banyosuna %0,5 Be ilavesi %9 Si ilavesinin yaptığı etkiyi yapmaktadır. Ancak Be, sadece ekonomik dezavantajından dolayı değil aynı zamanda sağlık açısından oluşturduğu toksik etkisinden dolayı kullanılmamaktadır [21].

4.2.2.7. Titanyum

Silisyum ve titanyumun her ikisi de banyoda bulunduğunda birbirinin etkisini arttırmaktadır. %2 Si ve %0,04 Ti ilavesi, alaşım tabakası büyümesini kontrol etmede, %6 Si ilavesiyle aynı etkiye sahiptir [21].

4.2.3. Kaplanan Demir Bileşiminin Etkisi

Daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanan çeliğin kimyasal bileşimi ve mikroyapısı, çeliğin alüminyumla etkileşimine dolayısı ile difüzyon tabakasının oluşum hızına, yapısına, kalitesine etkileyen en önemli faktörlerdendir [15]. Hem 750°C hem de 850°C'de yapılan daldırma kaplama deneylerinde, malzemenin karbon içeriğinin %0,2'den %0,56'ya artmasının alaşım tabakası kalınlığını çok az arttırdığı belirlenmiştir (sırasıyla 110 μ m'den 125 μ m'ye ve 90 μ m'den

110 μm 'ye). 850°C'de tabaka daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan daha incedir. Alüminyum, karbonun sıvı ve katı demir içerisindeki çözünürlüğünü azalttığı için, alüminyum-demir katı çözeltisi içerisinde dışarı atılır ve ara tabaka oluşumu sırasında difüzyon bölgesinin önünde karbonca zengin bir bölge oluşur. Karbon, demir ve alüminyumdan farklı olarak intermetalik tabakaya nüfuz edemediği için, bu durum ortaya çıkmaktadır. Alüminyum kısmen karbonla bileşerek Fe_3AlC_x , Al_4C_3 , AlC_3 karbürlerini oluşturur. Ara tabakanın mukavemeti alaşımdaki karbon içeriğine çok az bağlıdır, ancak 850°C'deki sertliği 750°C'dekine göre yaklaşık 100 kg/mm^2 fazladır. Alaşımdaki karbon miktarının artmasıyla tabaka daha düzenli hale gelir. Tabakanın yapısındaki farklılık çeliğin ferritik yapıdan perlitik yapıya dönüşümüyle açıklanmaktadır [15].

4.2.4. Alüminyum Kaplama Koşullarının Etkisi

Yapılan çalışmalar, daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama yönteminde kaplama koşullarının kaplama kalitesini üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermiştir. Alaşım katmanındaki büyüme oranına etki eden ana etmenler daldırma süresi, daldırma sıcaklığı ve banyo alaşımıdır. Her üç faktör üretim sırasında kontrol edilmelidir [18]. İntermetalik tabakayı da kapsayan toplam kaplama kalınlığı daldırma zamanının artmasıyla artar. Banyonun sıcaklığının artması tabaka kalınlığının hızla artmasına sebep olur. Bu nedenle mümkün olduğunca ince bir intermetalik tabaka elde etmek için daldırma zamanının ve sıcaklığın azaltılması gerekir. Alüminyum ile demir arasındaki etkileşim hızını azaltan elementler (silisyum, berilyum, magnezyum vb.) bu amaçla banyoya ilave edilebilir [6].

Alüminyum kaplama sıcaklığının intermetalik tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi çok önemlidir. Sıcaklık 665°C'den 800°C'ye arttırıldığında difüzyon hızındaki artış nedeniyle tabaka kalınlığı hızla artar. Ancak sıcaklığın daha fazla arttırılması tabaka kalınlığında belirgin bir azalmaya sebep olur ve 950°C'de çok ince hale gelir. Kalınlık - sıcaklık eğrisinde tabaka kalınlığının bir maksimum değere ulaştığı ve daha sonra azaldığı gözlenmiştir. Bazı araştırmacılar bunun nedenini, demirin alüminyum içinde çözünmesi ve α -demirin alüminyumun difüzyonunun daha kötü olduğu ζ -demire dönüşmesi olarak açıklamışlardır. Alüminatların banyo içerisinde çözünmesi daha etkindir. Çünkü yüksek sıcaklıklarda yapılan kaplama işleminde sadece ince tabaka elde edilmez, aynı zamanda numune yüzeyinde kuvvetli bir erozyon meydana gelir. Alaşım tabakasının hemen yakınındaki önemli miktarlardaki alüminatlar ara tabakadan koparak tabakanın incelmesine neden olurlar [6].

Saf alüminyum ile yapılan kaplama işleminde elde edilen ara tabakanın bağ mukavemeti 1,5-3,2 kg/mm^2 arasındadır [15]. Elde edilen verilerin geniş bir aralıkta dağılması nedeniyle, tabaka mukavemetinin daldırma zamanına ve sıcaklığa, diğer bir deyişle tabaka kalınlığına bağlılığını açıklamak zordur. Yinede alüminyum ile çelik arasındaki bağ mukavemetinin difüzyon tabakası

kalınlığı arttıkça bir miktar arttığı söylenebilir. Tabakanın darbe mukavemeti $0,008 - 0,010 \text{ kg.m/cm}^2$ den azdır, yani tabaka çok kırılgandır. Ara tabakanın mikrosertliği $750-1200 \text{ kg/mm}^2$ arasındadır. Ancak mikrosertliği $1300-1500 \text{ kg/mm}^2$ 'ye ulaşan izole edilmiş bölgeler vardır. Ara tabakanın kalınlığının artmasıyla ortalama mikrosertliği de artar.

Önceki çalışmalarda ön ısıtmanın, difüzyon tabakasının oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kaplanacak numunenin ısı kapasitesi arttıkça difüzyon tabakasının büyümesi hızlandığı ayrıca kaplanacak parçaların flaks içeren bir banyoda ön ısıtmaya tabi tutulması difüzyon tabakasının büyümesini hızlandırdığı belirlenmiştir [15].

Bütün endüstriyel sıcak daldırma kaplama süreçlerinde kaplama sıvısının kaplanacak metali ıslatabilmesi ve metal ile reaksiyona girebilmesi için kaplanacak metalin etkin temizliği sağlanmalıdır. Benzer şekilde, daldırma sırasında oluşan alaşım katmanı kalınlığı büyümesi, diğer bir tabirle kaplama reaksiyonları sıkı şekilde kontrol edilmelidir. Bahsedilen faktörlerin kontrol edilmesi, alaşım tabakası kalınlığının dolayısı ile intermetalik yapının kırılganlığının takip eden üretim süreçlerini tehdit etmesinden dolayı önemlidir. Çünkü intermetalik alaşım tabakasındaki kalınlık artışı, kırılganlığı arttırmakta ve kırılganlığa bağlı olarak sonraki bükme eğme gibi iş imalat süreçlerinde, kaplamanın malzemeden kolayca ayrılmasına sebep olmaktadır. Alaşım katmanındaki büyüme oranı etki eden ana etmenler daldırma süresi, daldırma sıcaklığı ve banyo alaşımıdır. Her üç faktör üretim sırasında kontrol edilmelidir [18].

4.3. Sıcak Daldırma ile Alüminyum Kaplama Prosesi

Sanayide sıcak daldırma alüminize çelikler, uygun süreçlerden geçirilmiş şerit halindeki sacların Tip 1 veya Tip 2 özelliklerine sahip ergiyik alüminyum banyosundan geçirilmesi ile gerçekleştirilir. Tip 1 sıcak daldırma alüminize çelikler, çelik malzeme üzerine ötektik bileşene yakın oranda ($\sim 11 \text{ wt- \%Si}$) Al-Si 'den kaplanarak elde edilirler. Tip 2 sıcak daldırma alüminize çelikler ise çelik malzeme üzerine ticari saf alüminyum ile kaplanarak elde edilirler. Banyo içerisinde sac üzerindeki Fe ile ergiyik içerisindeki Al veya Al-Si arasında difüzyon reaksiyonları gelişir. Bunun sonucu olarak, alaşım katmanı olarak tabir edilen sert kırılgan Fe-Al veya Fe-Al-Si intermetalik fazları oluşur. Eriyikten çekilmesi ile birlikte ince bir sıvı kaplama tabakası yapışır ve hemen alaşım katmanı üzerinde katılaşır. Gerçekte, oluşan alaşım katmanı üstteki parlak kaplama ile altında yatan çeliğe metalürjik bağlar ile tutunur [18].

Pratikte bütün sıcak daldırma alüminize üretimi teknikleri aslında sıcak daldırma galvaniz prosesi olan Sendzimir den geliştirilmiştir [35]. Literatürde bu tipteki sürekli alüminize süreçlerine ait birçok bilgi bulunsan bile teknik atölye bilgileri ticari hassasiyete sahiptir [18].

Bu tekniğe dayalı ilk büyük sürekli hat Middletown, Ohio'da 1939 yılında kurulmuştur. Burada Sendzimirin sürekli olarak galvanizli bant üretimi için ortaya koyduğu patentli yöntem kullanılmış, ancak çinko banyosunun yerini alüminyum banyosu almıştır [6].

Alüminyumlama işlemi bir kaplama prosesi olduğundan, böyle bir işlemde metalik bağın oluşması için birçok şartın sağlanması gerekir [21]:

- 1- Kaplama metali kaplanacak metal içerisinde hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda çözünebilir olmalıdır.
- 2- Kaplama metali ile kaplanacak metalin atom yarıçapları arasındaki fark %15-16'dan fazla olmamalıdır.
- 3- Kaplama metali ile kaplanacak metal arasında metalik bir temasın sağlanması gerekir.

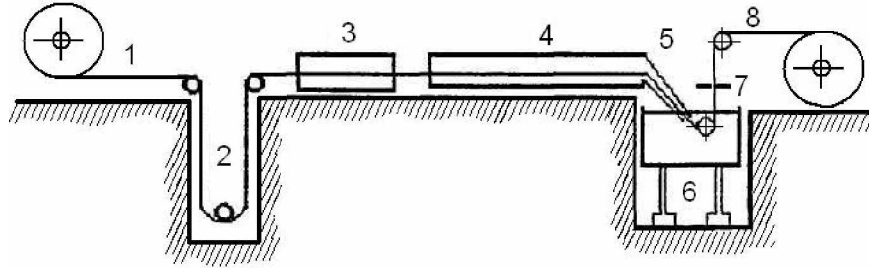
Alüminyum kaplama işleminde 3. prensibe bağlı kalındığı sürece yeterli bir bağın oluşumu mümkündür. Çünkü alüminyumla demir arasındaki boyut farkı %11,7 dir ve alüminyum, demir içerisinde hem düşük sıcaklıklarda hem de yüksek sıcaklıklarda çözünebilir olduğundan ilk iki prensip sağlanmaktadır. Bu nedenle alüminyum kaplama hatlarının büyük bir bölümü, bant yüzeyindeki oksit ve diğer maddelerin giderilmesi için kullanılır. Bu bölüm proses kısmı olarak isimlendirilir ve kaplama banyosundan önce yer alır [6].

Temelde modifiye edilmiş olan bu sendzimir tip üretimde, proses kısmı, kaplanacak bandın yüzeyindeki oluşan pislik ve korozyonu gidermek için kontrollü bir atmosferde on ısıtma aşamasını içerir.

Bu işlem, 500 °C ile 850 °C arasında tandem geçişli korozif olmayan kontrolü bir atmosfere sahip fırında gerçekleştirilir. Bu ön ısıtma aşaması aynı zamanda bandın tavlansak kaplama sırasında oluşabilecek soğuk deformasyonlara da mani olmaktadır. Anlık ön ısıtma işlemini takiben plaka kaplanan metalin ergime sıcaklığına yakın bir değerde daldırma banyosuna girer. Tip1 prosesinde daldırma sıcaklığı 670 °C ile 700 °C arasında gerçekleştirilirken, Tip2 prosesinde yaklaşık 700 °C ile 730 °C arasında gerçekleşir [18].

Tipik Sendzimir yönteminde ise bant yüzeyindeki yağları yakmak için oksitleyici bir fırın kullanılır. Daha sonra bant yüzeyi hidrojen atmosferi içeren bir fırında redükleme işlemine tabi tutulur (Şekil 4.10). Bant, sistemin sürekliliğini sağlayan lup çukurundan geçtikten sonra proses bölümüne girer. 450-500 °C de çalışan gaz yakıtlı oksitleyici fırına beslenir. Bu sıcaklıkta bant yüzeyindeki yağlar tamamen uzaklaştırılır. Daha sonra bant 800-850 °C'de çalışan redükleyici amonyak atmosferine sahip tavlama fırınına girer. Bu kısım bant üzerinde mevcut olan oksitleri redükler. Ayrıca bu fırın, bandın alüminyum banyosunun içerisine girmesini sağlayan, ergiyik alüminyum seviyesinin altına uzanan kapalı bir kısma sahiptir. Böylece bant havayla temas

etmeksizin banyoya girer ve yeniden oluşacak oksitlenme önlenmiş olur. Redükleyici atmosferde oksijen bulunması durumunda, oksijenin ergimiş alüminyumla etkileşerek alüminyumoksitlerin oluşmasına yol açması muhtemeldir. Bu oksit banyo yüzeyinde meydana gelmekte ve kaplamanın yapışma özelliğini kötü yönde etkilemektedir. Bu problemi çözmek için çeşitli metotlar önerilmiştir, örneğin basınçlı sıcak hava kullanarak yüzeydeki oksit tabakası kırılabilir veya sodyum buharı ile oksijen giderilebilir. Banyo, refrakterle astarlanmış bir çelik pota içerisinde oluşturulur. Banyo, ya ticari safiyette alüminyum veya silisyum, berilyum vb. ile alaşımlandırılmış alüminyum içerir. Kanal endüktörlerle ısıtılan banyo, 12 tonluk kapasiteye sahip bir potadır. Bu tip bir sistem, ergimiş alüminyum içerisinde bulunan alüminyumoksit ve demir-alüminyum intermetalik bileşikler gibi istenmeyen katı maddelerin sirkülasyonunu minimize etmeye yardımcı olur. Böylece katı maddelerin bant yüzeyini kirletme riski azaltılmış olur. Ancak bunun sonucunda katı maddeler Dros olarak banyonun dibinde ve kenarlarında toplanır. Kanallı indüksiyon fırınları başlangıç durumunda katı alüminyumı ergetemezler ve bu nedenle katı ilaveler yapılmadan önce banyonun ergimiş alüminyumla kısmen doldurulması gerekir. Banyonun bulunduğu pota hidrolik kaldırıcılar üzerine yerleştirilmiştir. Böylece üretimin uzun süreli durması durumunda, banyo aşağı alınarak daldırma merdanesi gibi daldırma aparatlarının zamanla banyo içerisinde çözünerek hasara uğraması ve banyoyu kirletmesi önlenmiş olur [6].



Şekil 4.10. Sendzimir tip alüminyum kaplama hattının şematik görünümü [21].

1. Kaynak aparatını içeren giriş bölümü
2. Hattın sürekliliğini sağlayan lup çukuru
3. Bant üzerindeki yağları yakmaya yarayan oksitleyici fırın
4. Redükleyici fırın
5. Fırından alüminyum banyosuna giriş
6. Hidrolik kaldırıcı
7. Hava bıçakları
8. Çıkış bölümü

Daldırma süresi ve daldırma sıcaklığı gibi parametreler, ön ısıtma, yüzey temizleme ve daldırmada oluşan alaşım tabakası kalınlığına göre optimize edilmektedir. Tipik daldırma süresi 4-8 s arasında tutulurken, modern hatlarda bu süre 175 m/dk 'yı aşmaktadır.

Ergiyikten dolayı bant üzerinde oluşan fazla kaplama tabakası basınçlı gaz bıçakları yardımı ile ergiyik potasına temizlenir [36,37]. Bu sistem üretim sırasında kaplama kalınlığını x-ray yardımı ile aralıksız ölçen bir donanımla ölçülür [18].Kaplamanın toplam kalınlığı silici merdaneler veya hava bıçakları kullanılarak kontrol edilir. Bu sistem, bant soğutulup çıkış bölümüne gitmeden önce fazla alüminyumun giderilmesini sağlar [6]. Yüzeyde katılaşan eriyik tabakası ile kaplama işlemi, takip eden son temperleme, sıcak haddeleme ve kromatlama ve/veya yağlama süreçleri ile tamamlanmaktadır [18].

Temel prensip aynı kalmakla beraber zaman içerisinde Şekil 4.10'de görülen alüminyum kaplama hattına bazı yeni bölümler eklenmiştir. Oksitleyici fırın yerine, sabit, düşey, direkt alevli oksitleyici olmayan bir ön ısıtma fırını kullanılmıştır. Bu fırın 700°C gibi daha yüksek sıcaklıkların kabuk oluşumu olmaksızın uygulanabilmesini sağlamış ve redükleyici fırın içerisinde ekstra hidrojen kullanımını ortadan kaldırmıştır. Alüminyum banyosunu oluşturmak için çekirdeksiz tipte iki adet indüksiyon fırını kullanılmıştır. Bu fırınlar hem ergitme hem de alüminyum muhafaza etme işlevlerini yerine getirmiş ve böylece sıvı alüminyum ilavesi gerekliliğini ortadan kaldırmıştır. Aynı zamanda bu ikili pota sistemi Tip 1 ve Tip 2 kaplamalarının yapılabilmesi için kolay bir değişim sağlamıştır. Yine de bu tip çekirdeksiz fırınlarda, refrakter astarın hızlı aşınması bir problem olarak kalmıştır [6].

Başka bir değişiklikte, oksitleyici fırın ile redükleyici fırının arasına bir dekapaj ünitesinin yerleştirilmesidir. Bant burada %10 HCl içeren banyoda ısıtma olmaksızın dekape edilir. Dekapaj ünitesi, süngerimsi reaktif demir artıklarının alüminyum banyosunu kirletmesini engelleyecek şekilde dizayn edilmiştir [6].

Alüminyum banyosu üzerindeki oksit tabakasını gidermek için ya basınçlı sıcak hava kullanarak yüzeydeki oksit tabakası kırılmış veya sodyum buharı ile oksijen giderilmiştir. Bant temizliğini arttırmak için redükleyici fırın ile alüminyum banyosu arasına başka bir ünite yerleştirmiştir. Bu ünite, çelik bant üzerinde demirklorür tabakası oluşturmak için hidrojenklorür atmosferi kullanılmış, daha sonra demirklorür tabakası alüminyum banyosu üzerinden kolayca uzaklaştırılabilmektedir [21].

Bahsedilen sürekli sıcak daldırma alüminize bant üretim yöntemine alternatif olarak, Cook-Nortermann yöntemi gibi birçok farklı prosesler geliştirilmiştir [38, 39]. Sanayide 'soğuk hat' metodu olarak bilinen bu yöntemde bant yüzeyi kimyasal yöntemlerle temizlenmektedir [40]. Bu yöntemde, kaplanacak yüzeydeki yağ ve pislikler alkaline yağ alıcı ile giderilmekte, takip eden asit daldırma işlemi ile yüzeyde kalan korozyon imha edilmekte ve son yüzey flakslama işlemi ile kaplamaya uygun yüzey elde edilmektedir. Daldırmaya hazırlanan yüzey, sıcak daldırma işlemine kadar geçen sürede tekrar oluşabilecek oksidasyondan, koruyucu atmosfer

ile muhafaza edilmektedir. Flakslama işleminde, dekapan olarak su bazlı Halojenik solüsyonlar, gliserol ve bezir yağı gibi birçok farklı organik, kimyasal maddeler kullanılmaktadır. Dekapan işlemine alternatif olarak çözünmüş Halojenik sıvılar veya Flash elektrolitik kullanarak yüzeyde bakır depozit biriktirme yöntemleri de kullanılmaktadır [32-41, 42, 43]. Sahip olduğu işleme süreçlerinden ötürü kaplanacak bandın mekanik özellikleri açısından tavlanması gerektiği durumlarda kaplanacak bantlar önceden tavlanarak stoklarda bekletilmektedir. Bu yöntemler, Sendzimir tip üretim süreçlerine kıyasen daha pahalı ve karmaşık olmalarından dolayı sanayide sınırlı uygulama alanı bulmuştur [43-44].

Sıcak daldırma yöntemi daha önce belirtildiği gibi hızlı, basit ve ekonomik olması gibi avantajları nedeniyle çelik bantların sürekli olarak alüminyum kaplanmasında endüstriyel uygulama alanı bulmuş tek yöntemdir.

Sıcak daldırma yöntemi avantajları yanında aşağıda belirtilen dezavantajlara da sahiptir [15].

1. Kırılgan bir intermetalik bileşiğin varlığı,
2. Sıvı alüminyumun diğer metallerle kolayca reaksiyona girmesinden dolayı, daldırılan parçaların korozyona uğraması,
3. Potaların ömrünü kısaltan oldukça yüksek sıcaklık,
4. Oluşan kaplama tabakası üzerine alüminyumun bölgesel olarak yapışması,
5. Alüminyumun demire homojen yayınmaması,
6. Daldırma işlemi sırasında çeliğin oksitlenmesi,
7. Alüminyumoksit filminin varlığı.

Yukarıdaki olumsuzlukların hepsi, ısıya dayanıklı kaplamaların üretimi sırasında dikkate alınmaktadır. Kırılgan bileşenin bulunması, alüminyumun demire homojen yayınmaması gibi problemler diğer yöntemlerde de mevcuttur. Sıcak daldırma yöntemine özgü olumsuzlukları gidermek için üç grup altında toplanabilecek birçok farklı yöntem önerilmektedir [15]:

1. Koruyucu metalik kaplamaların kullanımı,
2. Koruyucu gaz atmosferinin oluşturulması,
3. Koruyucu flaksların kullanımı.

Kalay, çinko, kurşun, kadmiyum, bakır ve gümüş ön metalik kaplama olarak kullanılabilir. Ancak ön kaplamaların kullanımı kaplamanın maliyetini arttırır ve zamanla banyo bileşiminin değişmesine neden olur. Bimetalik dökümlerin üretimi sırasında, hidrojen, karbondioksit, disosiye olmuş amonyak, vb. koruyucu bir atmosferin yaratılması oldukça karmaşık ve pahalıdır. Buna ilaveten, hidrojen kullanımı, çelikte kırılganlığa yol açmaktadır. Parçaların alüminyum kaplanması sırasında kullanılmak üzere flaksların geliştirilmesi için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Sıcak daldırma yöntemlerinin hepsinde parlak kaplama elde etmek amacıyla ergimiş alüminyum banyosuna flaks ilave edilir. Flakslar parçalara, sulu çözeltiler ve ergiyikler içerisinde

veya sıvı alüminyum banyosunun üzerinde uygulanır. Flaks olarak, alkali ve toprak alkali metallerin klorür veya florürleri, çinko ve alüminyum klorür, kriyolit, borik asit, boraks, titanyum ve zirkonyum florür ve diğerleri kullanılır. Bu flaksların bazıları, örneğin titanyum ve zirkonyum florür, pahalı olduklarından kullanımları ekonomik değildir. Diğer flakslar istikrarlı değildir ve flaks özelliklerini kısa sürede kaybederler. Flakslar Alüminyumlama işlemini biraz karmaşıktırır ve ergimiş alüminyum banyosu üzerine uygulanmaları daha sonraki döküm işlemini güçleştirir. Tablo.4.2'de alüminyum kaplamada yaygın olarak kullanılan flaksların kompozisyonu görülmektedir [6].

Tablo 4.2. Sıcak daldırma alüminyum kaplamada kullanılan flaksların bileşimi [15].

No	NaCl	KCl	Na ₃ AlF ₆	AlF ₃	ZnCl ₂
1	40	40	10	10	-
2	35	47	12	6	-
3	35	35	10	-	20
4	44	56	-	-	-

Yukarıdaki flakslara ilave olarak bezir yağının flaks olarak kullanımı, özellikle gelişmekte olan ülkeler için ideal görünmektedir. Birçok probleme sahip olmasına rağmen, bu problemler, silisyum gibi alaşım elementlerinin kullanımıyla giderilebilmekte ve bu teknik özellikle bezir yağının elde edildiği bitkinin (keten) yetiştirildiği gelişmekte olan birçok ülke için ekonomik görünmektedir [21].

Çelik yüzeyini hazırlama yöntemlerinin alüminyum kaplı çeliğin korozyon direncine etkisini değerlendirmek için, flaks ve redükleyici atmosferle işleme tabi tutulmuş numunelerle deneyler yapılmıştır. Korozyon hızı flaks kullanarak alüminyum kaplanan numunelerde daha fazla olarak saptanmıştır. Çünkü, flaks artıkları, nemli atmosferde ekstra bir agresif ortam yaratmaktadır. Buna ilave olarak numunenin banyodan çıkarılması sırasında yüzeyde kalan flaks, soğuma sırasında, alüminyumun korozyondan korunmasında temel rol oynayan alüminyumoksit tabakasının oluşumunu engellemektedir. Bu durumda flaksın uzaklaştırılması, alüminyum yüzeyinin oksitlenmesi gibi ilave işlemler gerekmektedir. Araştırmalar çelik bantların sürekli olarak alüminyum kaplanması işleminde redükleyici atmosferin kullanılmasının daha etkili olduğunu göstermiştir. Redükleyici atmosfer kullanımı (Sendzimir prosesi) çelik bantların alüminyum kaplanmasıdaki birçok güçlüğü gidermeye yardımcı olur ve sıcak daldırma yönteminin daha geniş bir endüstriyel uygulama alanı bulmasını sağlar [15].

4.4. Alüminyum Kaplı Çeliklerin Özellikleri

Ticari olarak üretilen alüminize çelikler iki sınıfta toplanabilir. Tip 1 sıcak daldırma alüminize çelikler, çelik malzeme üzerine ötektik bileşene yakın oranda (% 5~11 Si) Al-Si 'den kaplanarak elde edilirler. Genel olarak, bu tür malzemeler yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımı istenen yerlerde, örneğin egzoz sistemlerinde ve ocak , fırın davlumbaz kurutucular ısıtıcılar vs. gibi kullanılır. Tip 2 sıcak daldırma alüminize çelikler ise çelik malzeme üzerine ticari saf alüminyum ile kaplanarak elde edilirler. Bu tip malzemeler genellikle yüksek oranda yansıtma yapması ve ortam sıcaklığında korozyon dayanımı istenen yerlerde, örneğin bina konstrüksiyonlarında dış cephe kaplama sacları, klima ve ventilasyon sistemlerinde kullanılır. Tip 2 alüminize çelikler, ticari olarak kaplama ağırlıkları minimum $195 \sim 305 \text{ g/m}^2$ (yaklaşık olarak kaplama kalınlıkları $38 \mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$) arasında değişirken; Tip 1 alüminize çeliklerde ise bu oran $75\sim 120 \text{ g/m}^2$ ($15 \sim 25 \mu\text{m}$) arasındadır [18]. Tip1'de toplam kaplama kalınlığı, $14\sim 25 \mu\text{m}$ (iki tarafta $80\sim 150 \text{ g/m}^2$) arasında değişirken. Tip 2' de normal olarak $40 \mu\text{m}$ (230 g/m^2) den fazladır. Her iki kaplama alaşımında banttandır ve banyo sistemindeki çelik parçalardan çözünerek banyoya geçen %2-4 oranında Fe mevcuttur [17]. Temel olarak Fe_2Al_5 'ten oluşan alaşım tabakası kalınlığı Tip 2' de biraz daha fazladır. İntermetalik alaşımlar genellikle çok kırılgan olduklarından tabaka kalınlığının çok ince olması istenir. Si ilavesi, değişik morfoloji ve yapıda bir alaşım tabakası oluşturarak bunu gerçekleştirir. Bu durumda FeAl_3 ve Fe_2SiAl_6 karışımı oluşur [6].

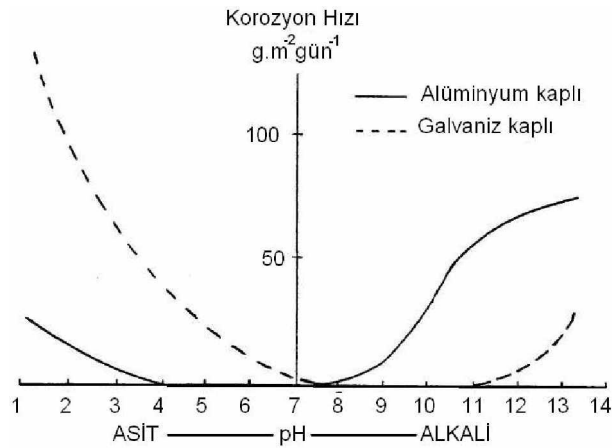
4.4.1. Korozyon Dayanımı

Alüminyum üzerinde doğal olarak oluşan sert oksit tabakasının korozyon dayanımı yaygın olarak bilinmektedir. Alüminyum açık atmosferde hemen bir Al_2O_3 oksit tabakası oluşturur. Sert olan bu tabaka oksijenin alt kısma geçmesine müsaade etmez. Böylece çelik oksitlenmekten korunmuş olur.

Alüminyum, yüksek bir elektronegatif potansiyelli bir metaldir. Normal denge gerilimi $-1,67 \text{ V}$ 'tur. Buna rağmen, alüminyumun dış hava şartlarına, bir çok zayıf asit çözeltisine, çoğu nötr çözeltilere ve suya karşı yüksek korozyon dayanımı vardır. Havalandırılmış çözeltilerde pasif durum kararlılığına göre alüminyum, kromla birlikte titanyumdan sonra ikinci sıradadır. Korozyona direnci yüksek bir malzeme olan alüminyum parçaların üzerindeki anodik tabaka normalde açık gri renkte olup, bazı alaşımlarda koyu griye dönüşmektedir. Tabaka ilk oluştuğu zaman gözenekli ve oldukça yumuşak alüminyum oksit haline geldiği sırada sertleşir ve metali nemden, havadan ve korozyondan koruyan koruyucu tabaka halini alır [45]. Korozyonun oluşması sadece bir reaksiyondur, asıl önemli olan korozyonun malzeme üzerinde ve çevresinde bırakacağı etkilerdir. Bu halde demir ve çelik malzemeler bulundukları bu farklı atmosferik koşullardan etkilenecek fiziksel, kimyasal, elektriksel ve diğer özelliklerini yitirirler. Korozyon sonucu oluşan paslanma, sadece görüntü bozukluğu olmayıp aynı zamanda metali

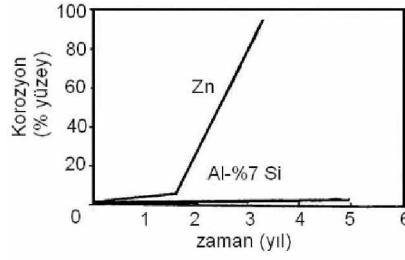
aşındıran bir kimyasal reaksiyondur [46]. Yapılan bazı çalışmalarda, alüminyumun anodik oksidasyonu, oksalik asit ve sülfürik asit karışımında, alüminyumun anot olduğu koşullarda elektroliz işlemiyle gerçekleştirilmiş ve anodizing işlemi, çıplak alüminyum yüzeyini sertleştirerek dayanımını arttırmıştır. Anodizing işlemi süresince yüzeyde önce hidroksit sonra oksit oluşur ve yüzey oldukça sertleşmiştir. Sonuçlarında, alüminyum yüzeyinde oluşturulan oksit, üstün korozyon dayanımı göstermiştir [46].

Görüldüğü gibi alüminyumun çinkoya göre daha etkin olarak katodik koruma davranışı göstermesi gerekmektedir. Gerçekte bu böyle olmaz, çünkü alümina film, alüminyumun kendisinden çok daha soy bir bölgededir ve alüminyumu ortamdan yalıtır. Ancak taban metalinin atmosfere açık bölgelerinin korunmasını engellemiş olur. Katodik koruma ancak 1000 A° kalınlığındaki bu alümina filmin parçalanması durumunda rol oynamaya başlar. Bu durum denizel ortamlarda halojen iyonlar nedeniyle meydana gelir. Sülfatlar veya nitratlar herhangi bir problem yaratmaz. Alüminyum kaplı çeliklerin atmosferik korozyonuna ait bilgiler galvanizli çelikler kadar fazla değildir. Yinede eldeki bilgiler, birçok ortam için alüminyum kaplı çeliklerin mükemmel korozyon dayanımına sahip olduklarını göstermektedir [21]. Alüminyum kaplı çelikler özellikle sülfür içeren ortamlarda mükemmel korozyon dayanımına sahiptir. Şekil.4.11'de alüminyum kaplı çeliğin oda sıcaklığındaki korozyon direnci ile ilgili özellikler görülmektedir. Alüminyum kaplı çeliğin performansı asidik ortamlarda daha iyi iken, galvanizli çelik alkali ortamlarda daha iyi performans göstermektedir [17].



Şekil 4.11. Kaplanmış çeliğin değişik pH değerlerindeki çözeltilerdeki korozyon direnci [17].

Belirli şartlar altında alüminyum kaplı çelik aynı kalınlıkta çinko kaplı olana göre iki kat dayanıklıdır. Tip2, Tip1'e göre daha yüksek atmosferik korozyon dayanımına sahiptir. Ancak Tip1 dahi Şekil.4.12'de görüldüğü üzere galvanizli çelikten daha iyi korozyon dayanımına sahiptir [21].

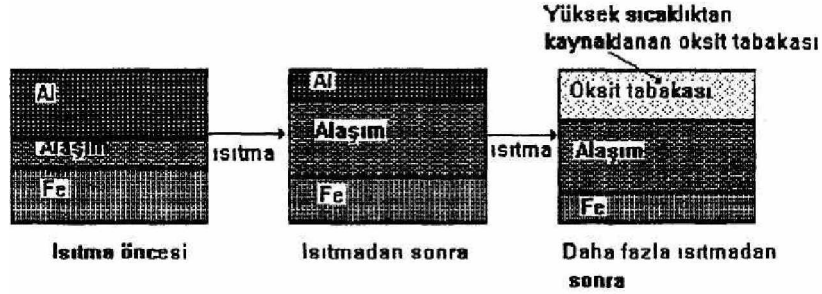


Şekil 4.12 Galvaniz ve Tip1 alüminyum kaplı çeliklerin atmosferik korozyon dayanımları [21].

Klorürler ve diğer halojenler, alüminyumdaki koruyucu film tabakasını tahrip etme kapasitesine sahiptir. Bundan dolayı klorlu çözeltilerde alüminyumun kararlılığı, biraz azalmıştır. Bununla beraber saf alüminyum gibi bir takım hallerde kararlılık hala yüksektir. Alüminyum ve alaşımları, HCl çözeltilerinde kararlı değildir. Kuvvetli negatif potansiyelinden dolayı, pek çok elektropozitif metallerle (bakır, platin, demir, nikel, kalay vb. gibi) temasında alüminyumun korozyonu çok artar [47-49].

4.4.2. Oksidasyon direnci

Alaşımsız çelikler 550°C sıcaklığa kadar kullanılabilir, ancak bu sıcaklığın üzerinde wüstit fazının oluşumu ve büyümesi kabuk oluşumu ile birlikte çeliğin tamamen bozulmasına sebep olur [6].

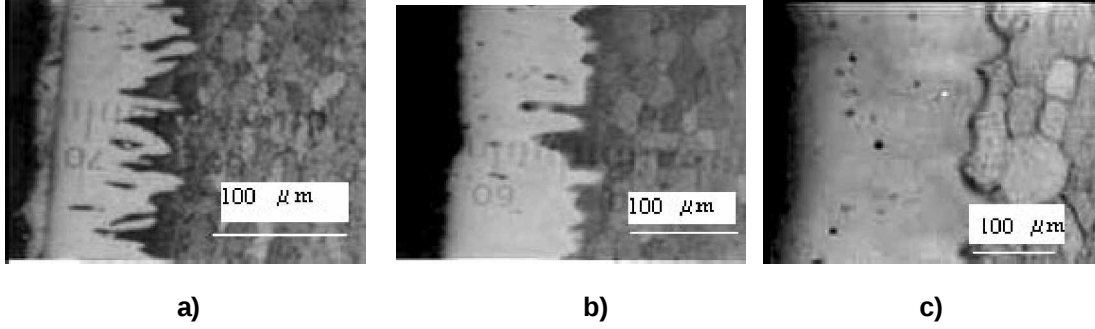


Şekil 4.13 Alüminyum kaplı çeliğin ısıtma karşısındaki davranışı [51].

Tip1 alüminyum kaplı çelik bant, ısı dayanımı özelliğini çelik ile dış yüzeyde yer alan alüminyum arasındaki Al, Fe ve Si'un oluşturduğu intermetalik bileşikten almaktadır. Bu ürün orijinal yüzey parlaklığını 450°C'ye kadarki sıcaklıklarda uzun süre korumaktadır. Bu sıcaklığın üzerinde, FeAlSi alaşım tabakası büyümeye başlamakta ve yüzey rengi yavaş yavaş açık griden koyu griye dönmektedir. Bu sayede malzeme 700°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilir. Buna ilaveten 450°C ile 550°C arasındaki sıcaklıklarda alüminyum tabakası üzerinde bir oksit tabakası oluşur. Şekil 4.13'te alüminyum kaplı çeliğin ısıtılması sonucu yapısında meydana

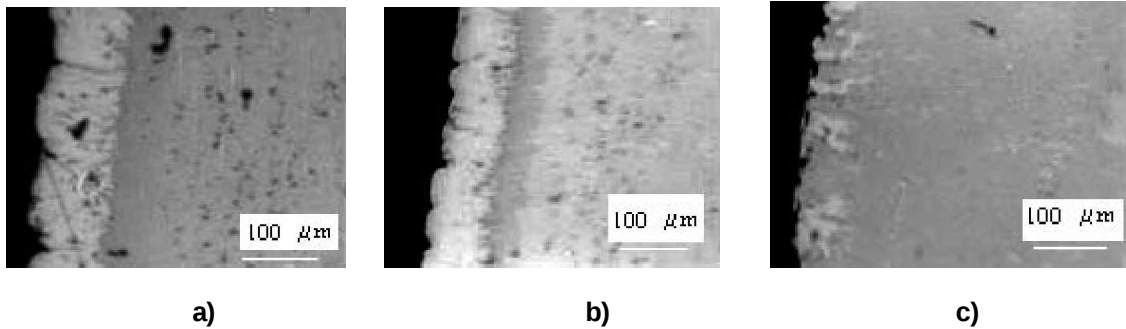
gelen değişiklikler görülmektedir [6]. Difüzyon kontrollü bu dönüşüm proseslerinin hızlı oluşumu, kaplamada meydana gelecek ayrılma ve deliklerin oluşumunu önlemesi açısından

önemlidir. Böylelikle oksijen girişi önlenerek, alt tabakanın oksidasyonu engellenmiş olur [51]. Diğer birçok yapılan çalışmalarda sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanan çelik malzemelerde yüksek sıcaklık oksidasyonunu incelemişler ve çelik malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla, genel yapı çeliği ve paslanmaz çelik numunelere sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama işlemi uygulanmıştır. Bu işleme göre malzemelerin yüzeylerinde farklı kalınlıklarda Al ve difüzyon tabakası elde edilmiş (Şekil 4.14-15). Daha sonra kaplanan numunelere 6 ve 8 saat süre ile 800 °C sıcaklıkta, nötr ortamda difüzyon tavlaması uygulanmış. Difüzyon tabakasında oluşan intermetalik fazlar, mikrosertliği ve yüksek sıcaklık oksidasyonuna direnci artırdığını belirlenmiş. Ayrıca uzun süreli yüksek sıcaklık oksidasyonu sonuçlarında, özellikle Ç1020'nin direncinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Buna göre yapı çeliklerinde Al Kaplamanın, yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı malzemeyi koruduğu belirlenmiştir [50].



Şekil 4.14. Ç1020 Numunesine kaplama ve ısıt işlem sonrası mikroyapısı.

- a) Alüminyum kaplanmış ısıt işlem uygulanmamış,
- b) Al Kaplama + 800 °C' de 1 saat difüzyon tavlaması uygulanmış Ç1020 numunesinin içyapı görüntüsü,
- c) Al Kaplama + 800 °C' de 6 saat difüzyon tavlaması uygulanmış Ç1020 numunesinin içyapı görüntüsü



Şekil 4.15. AISI 316 Numunesine ait kaplama ve ısıt işlem sonrası mikroyapısı.

- a) Al Kaplanmış,
- b) Al Kaplama + 800 °C'de 1 saat difüzyon tavlaması uygulanan AISI 316 numunesinin içyapı görüntüsü,
- c) Al Kaplama + 800 °C'de 6 saat difüzyon tavlaması uygulanan AISI 316 numunesinin içyapı görüntüsü

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzemeler ve Özellikleri

TM parçalar, Höganäs şirketinden temin edilen demir esaslı toz malzemeden üretilmişlerdir. Bu malzemeler, NC 100,24 seri numaralı toz karışımı esas alınarak imal edilmiş [52], farklı oranda karbon içeren dört gruptan oluşmuştur. Deneyde kullanılan toz karışımları aralarında yalnızca Cu, Zn ve C oranları farklılık gösterecek şekildedir. Bu karışımlar Höganäs tarafından NC.100,24 - 69.04.03 - 69.04.06 ve 69.04.08 seri numaraları ile İsveç'te üretilerek uluslararası pazarda satılmaktadır.

Bu numunelerin içeriği Tablo 5.1.'te ek'te verilmiştir.

Tablo 5.1. Numunelerin kimyasal bileşimi (%) [52].

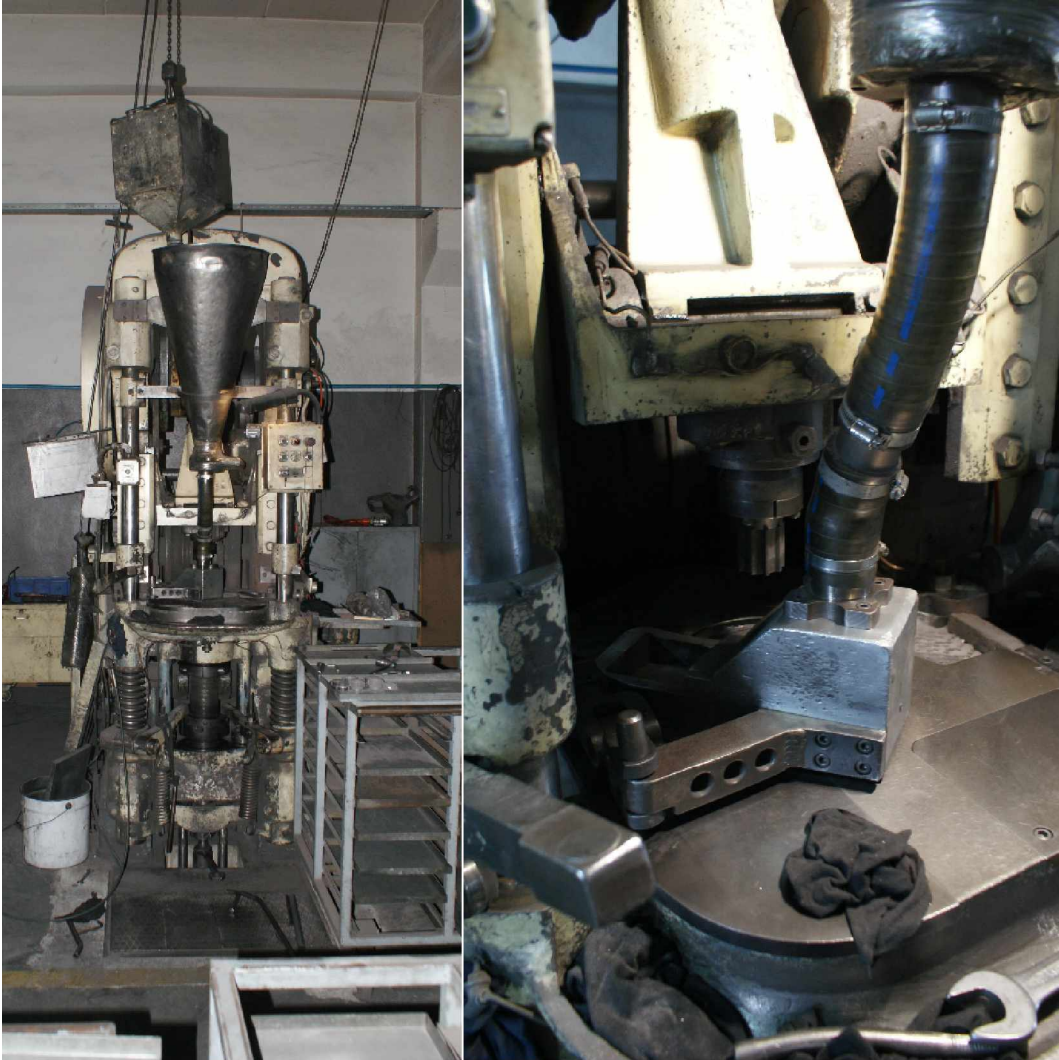
	Fe	C	Cu	Zn
A	99,79	0,01	-	0,20
B	96,84	0,21	2,00	0,95
C	96,59	0,41	2,00	1,00
D	96,24	0,76	2,00	1,00

Seri üretim toz metal parçalar tercih edilmiştir. Bu amaçla Bursa otomotiv sanayinde faaliyet gösteren MAYDA toz metal Ltd. Şti. tarafından, Renault marka araçlarda amortisör destek pulu (Şekil 5.1) olarak imal edilen TM parçalar kullanılmıştır [53]. Otomotiv sektörüne birçok karmaşık şekilli TM parça üretilmektedir. Yapılacak deneysel çalışmaya uygun geometrili, pul şeklinde numune tercih edilmiştir.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan Toz Metal (TM) numune [53].

Höganäs'tan alınan toz karışımlar 40 tonluk basma kabiliyeti olan eksantrik prese bağlı kalıplarda sıkıştırılmaktadır (Şekil 5.2). Seri üretimde parçaların basma kalitesi kullanılan toz cinsine göre minimum $4,2 \text{ ton/cm}^2$ olacak şekilde kalibre edilmektedir. Bu çalışmada her gruptan 250'şer adet parça olacak şekilde toplamda 1000 adet parça tek kademeli kalıpta her seferinde bir parça basacak şekilde ve tek yönlü olarak preslenmiştir. Parçalarda gözeneklilik oranlarının farklılık göstermemesi için pres $4,5 \text{ ton/cm}^2$ basma değerine kalibre edilmiştir. Preslenen parçaların geometrik boyutları $\pm 0,01 \text{ mm}$ ve ağırlıkları $\pm 0,001 \text{ g}$ hassasiyetle belirlenerek ortalama ham yoğunlukları tespit edilmiştir. İmalat atölyesinde kalibre edilen parça ortalama yoğunluk oranları; $5,8\text{--}6,2 \text{ g/cm}^3$ düşük, $6,2\text{--}6,8 \text{ g/cm}^3$ orta ve $6,8\text{--}7,2 \text{ g/cm}^3$ ise yüksek olarak sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan numuneler orta yoğunlukta basılmıştır [53].



Şekil 5.2. Eksantrik Baskı Presi ve Otomatik Beslemeli Kalıp Sistemi [53].

Preslenmiş parçalar ilerleme hızı maksimum 0,5 m/dk olan çelik örgü bantlı üç kademeli fırında sinterlenmiştir. İlerleme hızı değişkeni ve sinterleme sıcaklığı değişkenleri yardımı ile istenen süre ve sıcaklıkta toz-metal parça sinterlenebilmektedir. Fırının giriş ve çıkışında yerleştirilmiş birinci ve üçüncü kademeleri alevli tip ısıtıcılardır. Bu kademelerde oluşturulan alev perdesi yardımı ile fırın içerisinde redükleyici bir atmosfer sağlanmıştır. Bu sayede daha yüksek sıcaklıklara ulaşılan sinterleme işlemi sırasında parçalarda oluşabilecek oksidasyon önlenmiştir. Fırının birinci kademesinde bulunan alevli ön ısıtıcılarda sinterlenecek toz metal parçalar ön ısıtma sıcaklığına ısıtılmaktadır. İkinci kademede bulunan termokupl kontrollü Elektrik Rezistans ısıtma sistemi ile toz parçalar maksimum 1200 °C de sinterlenmekte ve fırın çıkış ağzında bulunan üçüncü kademe alevli ısıtıcılar ile kontrollü olarak oda sıcaklığına düşürülmektedir. Fırın tamamında sıcaklık değişimi termokupl yardımı ile ± 5 °C hassasiyette sınırlandırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan toz metal parçaların tamamı, 0,3 m/dk ilerleme hızı ile 1130 °C sıcaklık ve ± 5 °C hassasiyet sağlanarak, 30 dk boyunca sinterleme işlemine tabii tutulmuş, daha sonra aynı soğuma hızı ve atmosfer altında oda sıcaklığına soğutulmuştur [53].



Şekil 5.3. Çelik-tel örgülü kayışlı fırın [53].



Şekil 5.4. Fırın giriş ve çıkışı [53].

Kaplama işleminde piyasada kullanılan Etial-171 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Külçe olarak kolay tedarik edilebilmektedir. Kaplama işleminde kullanılan alüminyum alaşımına ait kimyasal bileşimler Tablo 5.2. 'de grafik olarak verilmektedir, bu veriler spektral analizi yöntemi ile belirlenmiştir [54].

Tablo 5.2. Etial 171 alaşımına ait yüzde kimyasal bileşim oranları [54].

Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	P	Sb	Sn	V	Al
0,316	0,354	0,031	0,021	0,0028	0,0066	0,0111	0,0028	0,0014	0,0005	0,0086	99,2

5.2. Kaplamasız Toz Metal Parçaların Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen TM numunelerin karakteristik yapısını belirlemek amacı ile çeşitli mekanik test ve ölçümler yapılmış, mikro yapısal özellikleri araştırılmıştır.

5.2.1. Ağırlık Ölçümleri

Bütün ağırlık ölçümlerinde kapalı hazneli Sartorius marka 0,0001 hassasiyetli terazi kullanılmıştır. Her ölçümlerden önce cihaz sıfıra kalibre edilmiştir. Ölçüm sırasında ortam koşullarından oluşacak hataları önlemek için ölçüm boyunca terazi haznesi kapalı tutulmuş, ağırlık değeri sabitlenene kadar beklenmiştir. Numunelerde imalat farklılığından oluşabilecek ölçüm hatalarını bertaraf etmek için, her gruptan beş farklı numune ölçülerek aritmetik ortalaması alınmıştır.

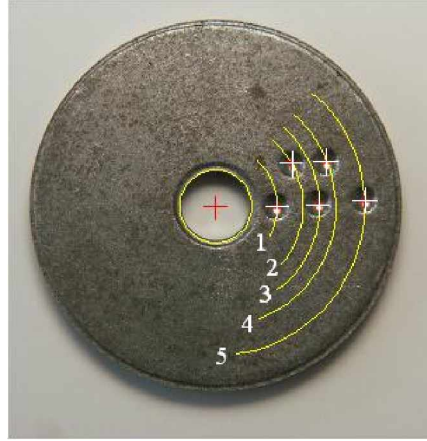
Tablo 5.3. Numunelerin ağırlık ölçümleri (g)

Ölçüm	A	B	C	D
1	7,179	4,876	4,881	4,798
2	7,204	4,876	4,814	4,818
3	7,182	4,876	4,861	4,798
4	7,170	4,876	4,799	4,807
5	7,179	4,876	4,856	4,801
Ortalama	7,180	4,880	4,840	4,800

5.2.2. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçüm deneylerinde, Rockwell ve Brinell sertlik değerlerini ölçebilen BMS 200-RB cihazı kullanılmıştır. Hidrolik olarak yüklenen test yükleri 100, 150, 62,5 ve 187,5 Kgf 'dir. Bu çalışmada toz metal parçaların brinell sertlik ölçümü yapılmıştır. Aynı yüzde, merkezden kenara doğru, 4 mm aralıkla 5 farklı noktadan ölçüm yapılmıştır. Deney sırasında analog kadran üzerinde çelik ölçüm çevirme tablosu kullanılmıştır. Her ölçümden önce, sertlik değerini gösteren çevirme tablosu kadran üzerinden sıfırlanmıştır. Ölçüme 10kgf 'lik ön yükleme ile

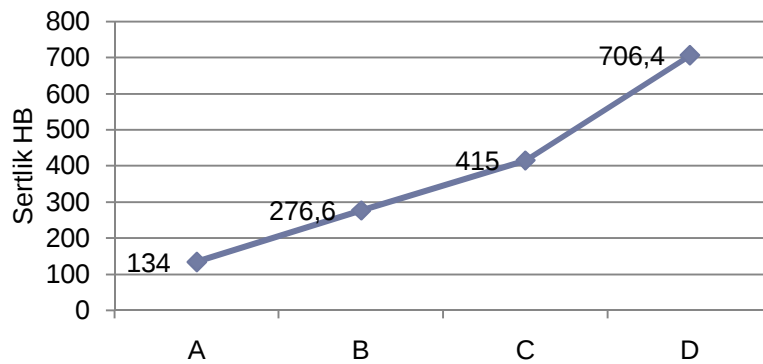
başlanmış, 187,5 kgf kuvvet uygulanmış sonra tekrar ön yükleme seviyesine düşürülmüştür. Numune üzerinde 2,5 mm uç çaplı bilyenin oluşturduğu iz derinliği analog ibreden okunarak ölçüm tamamlanmıştır.



Şekil 5.5. Sertlik ölçüm noktaları.

Tablo 5.4. Brinell sertlik ölçümü (HB).

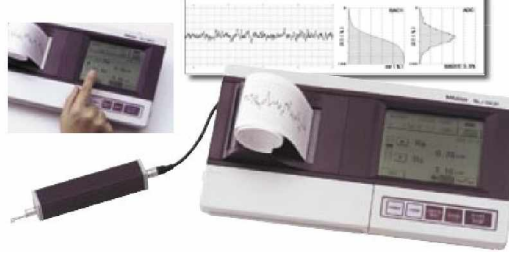
	A	B	C	D
1	122	211	470	695
2	138	282	380	715
3	148	321	430	715
4	144	285	320	702
5	118	284	475	705
Ortalama	134	276,6	415	706,4



Şekil 5.6. Numunelerden karbon oranına bağlı sertlik değişimi.

5.2.3. Yüzey Pürüzlük Ölçümleri

Toz metal parçaların yüzeylerine pürüzlük ölçümü deneylerinde, Rockwell Mitutoyo SJ-301 cihazı kullanılmıştır. Cihazın travers aralığı 12,5 mm, ölçüm aralığı max 300 μ m ve ölçüm hızı 0,25 mm/s ile 0,5 mm/s 'dir. Deneylerde standart ölçüm hızı olarak 0,5 mm/s alınmıştır.



Şekil 5.7. Rockwell Mitutoyo SJ-301 yüzey pürüzlük ölçüm cihazı.

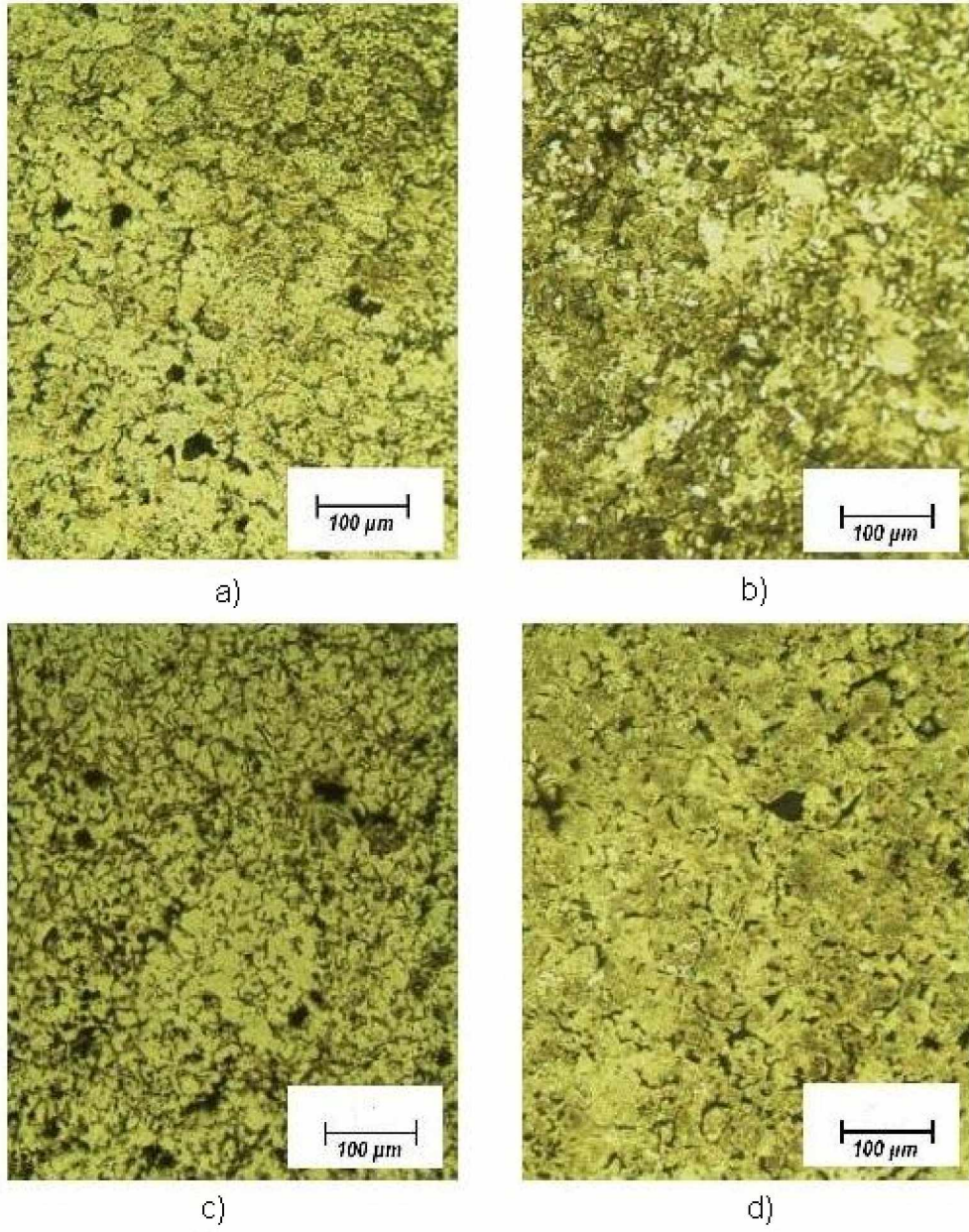
Toz metal parçaların sahip olduğu poroziteli yapı nedeni ile oluşabilecek ölçüm hatalarını minimize etmek için ölçümden önce cihaz sıfırlanmıştır ve her numunede 5 farklı yerden ölçüm alınmıştır. Toz-metal malzemelerin üretiminde homojen kalitede yüzey pürüzlülüğü elde edilemediği için yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması da hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlüğünün kaplama tutunması üzerindeki etkisi araştırılmak amaçlanmıştır Ra: Aritmetik ortalama sapma

Tablo 5.5. Pürüzlük Ölçümü Ra (μ m)

Ölçüm	A	B	C	D
1.	1,06	1,52	1,6	1,62
2.	0,93	1,41	1,5	1,21
3.	0,78	1,7	0,96	1,45
4.	1,07	1,13	1,01	1,18
5.	0,94	1,33	1,24	1,32
Ortalama	0,96	1,42	1,26	1,36

5.2.4. Mikroyapıların İncelenmesi

Kaplamasız numunelerin içyapılarını belirlemek için orta kesitinden görüntü alınmıştır. Epoksi kalıba alınan numunelerin yüzeyleri METKON Forcipol 1V polishing cihazında parlatılmıştır. Parlatma cihazında sırası ile 240, 400, 600, 800 ve 1200 kalınlığında zımpara kullanılmıştır. Parlatma işlemi için sıvı alümina solüsyonu (Metkon sıvı elmas parlatıcı) ile keçeleme işlemi uygulanmıştır. Parlatılan numuneler Nital çözeltisinde 6 ile 8 saniye aralığında dağlandıktan sonra saf su ile durulanmıştır.



Şekil 5.8. Kaplamasız toz-metal numunelere ait mikroyapı görüntüleri; a) A, b) B, c) C, d) D

Dağlama reaktifi olarak, kaplamasız toz parçalarda Nital (%4 HNO₃+Alkol), ve kaplamalı toz metal parçalarda Keller (2 ml HF + 3 ml HC1 + 5 ml HNO₃ + 90 ml H₂O) kullanılmıştır. Deneylerde Meiji ML 7100 ışık mikroskobu ve iç yapı fotoğraflaması için Moticam 1000 dijital kamera kullanılmıştır.

5.2.5. Kaplamasız Numunelerin Korozyon Testi

Tuzlu ortamda oluşan korozyon hızını ölçmek için ASCOTT marka korozyon test cihazı kullanılmıştır. Korozyon test cihazı yalıtılmış ortama sahiptir ve cihaz içine yerleştirilen numuneleri sabit sıcaklık ve nem değerlerinde tutmaktadır. Cihaz test boyunca numunelerin üzerlerine sürekli ve pulvarize şekilde NaCl sulu çözeltisi püskürtmektedir. Korozyon hızı, ortam sıcaklığı ve püskürtülen tuzlu su derişimi ile ayarlanır. Test periyodu olarak 24, 48, 72 saat gibi artan aralıklar seçilir, sanayide belirlenen test periyodu, 1gun aralıkla kırmızı pas oluşana kadardır.

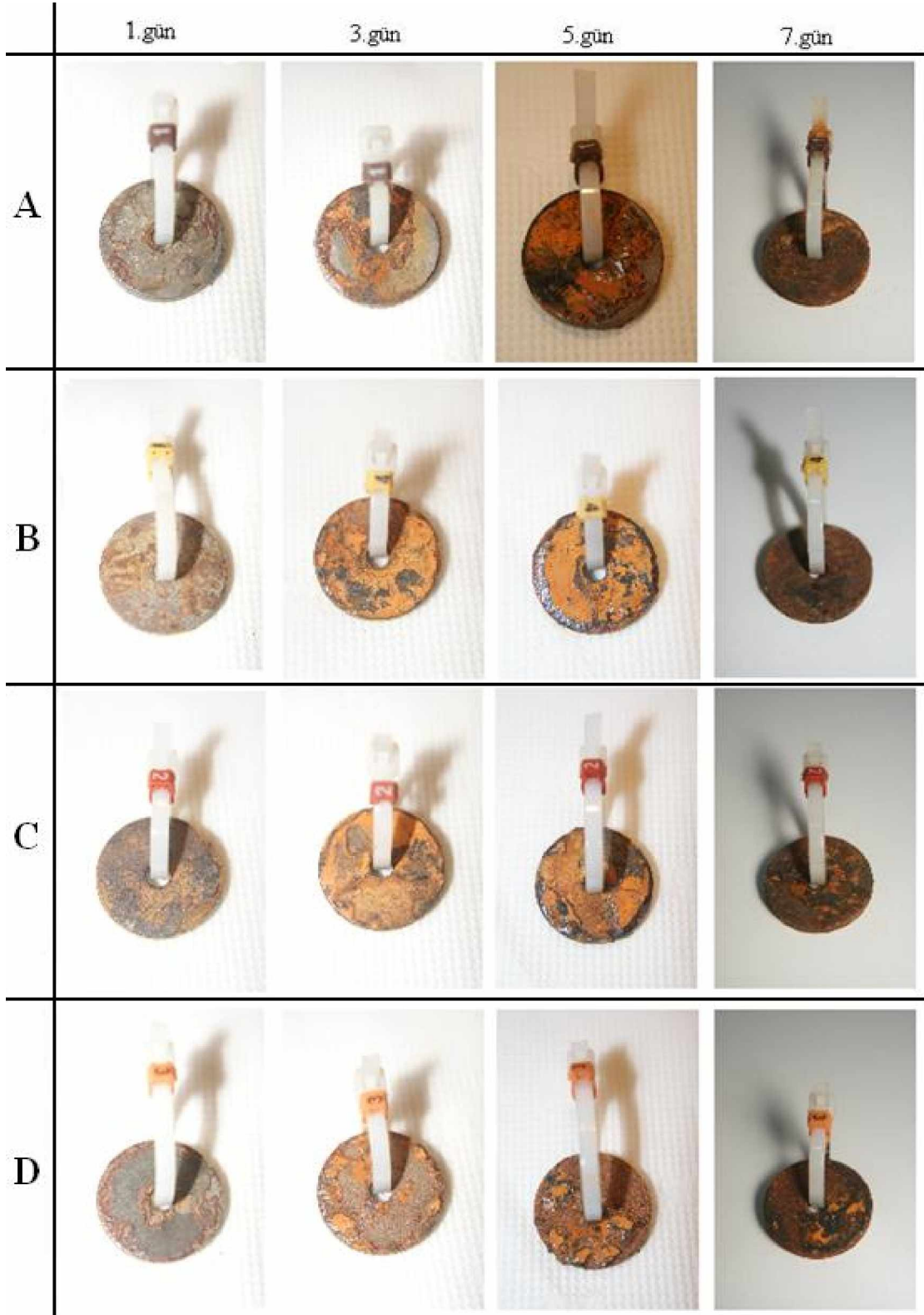


Şekil 5.9. Korozyon test cihazı [55].

Bu deneyde ortam sıcaklığı 35 °C 'da sabit tutularak numune üzerlerine pulvarize şekilde % 5'lik NaCl sulu çözeltisi püskürtülmüştür. Yukarıdaki şartlar altında 24, 72, 120 ve 168 saatlik aralıklarda korozyona tabii tutulmuşlardır [55]. Her periyot sonunda numuneler cihazdan çıkarılarak, Yüzeydeki korozyon kalıntıları yumuşak fırça ve su ile giderilmiştir. Oluşan kütle değişimi bölüm 5.2.1'de belirtilen yöntem ve cihaz kullanılarak belirlenmiştir. Yüzeyde oluşan korozyon ilerlemesi, 10x Makro lens adaptörlü, SonyA200 DSLR kullanılarak gözlenmiştir. Yüzeyden içeri doğru oluşan korozyon ilerlemesi ise yine kesitten alınan mikroyapı görüntüsü ile gözlenmiştir. Mikroyapının belirlenmesinde Bölüm 6.2.4'te belirtilen yöntem kullanılmıştır. Deney sonucu elde edilen kütsel değişim ve toplam yüzde değişim Tablo 5.6 'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Korozyon Sonucu Oluşan % Kütle Kaybı.

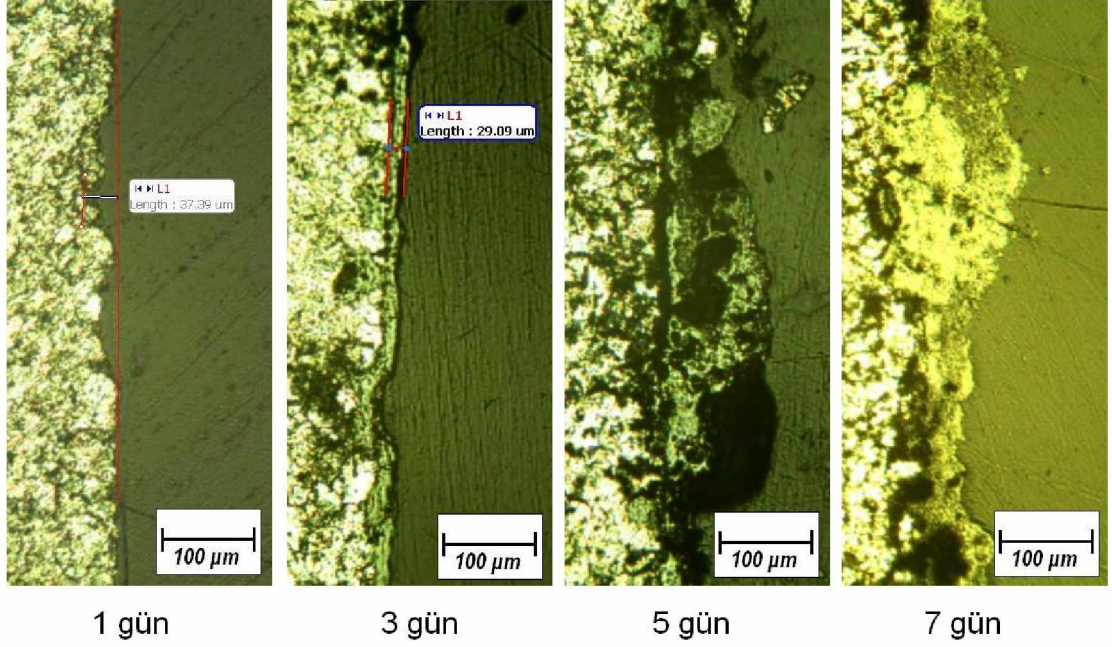
Ağırlık (g)	A	B	C	D
Başlangıç	7,1800	4,8800	4,800	4,8400
1 gün	7,1842	5,0647	5,0742	4,9396
3 gün	7,2278	5,0673	5,1051	4,9484
5 gün	7,2880	5,0906	5,1572	4,9756
7 gün	7,2612	5,0149	5,0149	4,8734
(%) Değişim	1,1300	2,7600	4,4800	0,6900



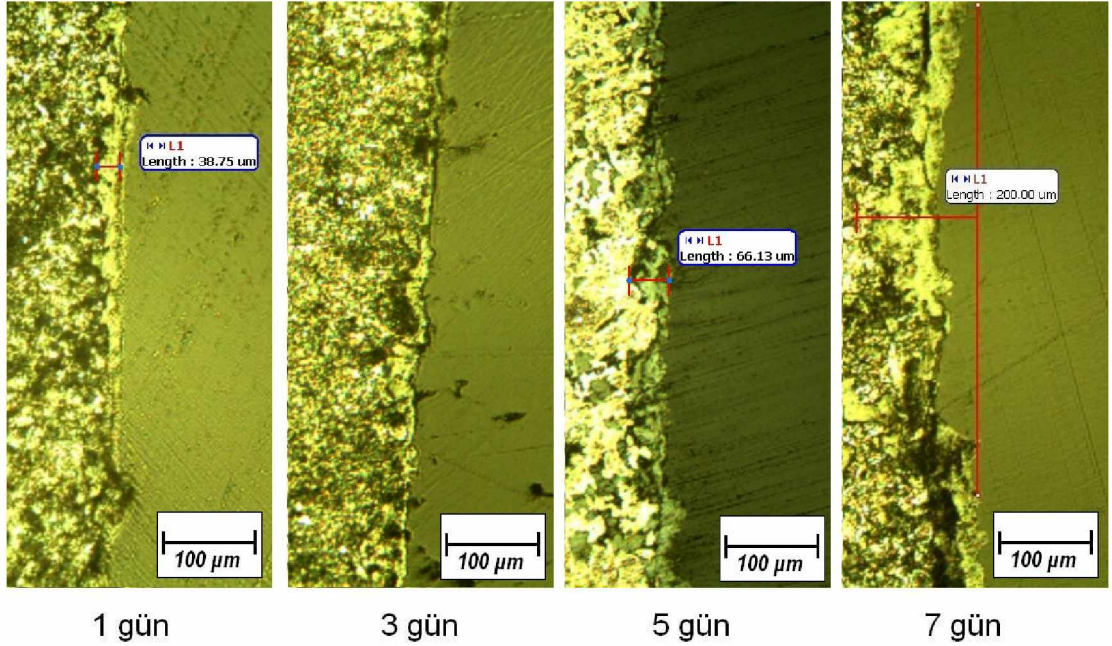
Şekil 5.10. Kaplamasız numunelerin yüzeyinde zamana bağlı korozyon ilerlemesi.

Kaplanmamış numunelerin yüzeyinde 24. saat sonunda ilk korozyon gözlenmiştir. Numunelerde, 1 haftalık periyot neticesinde %0,6 ile 4,4 arasında bir değişen oranda kütle

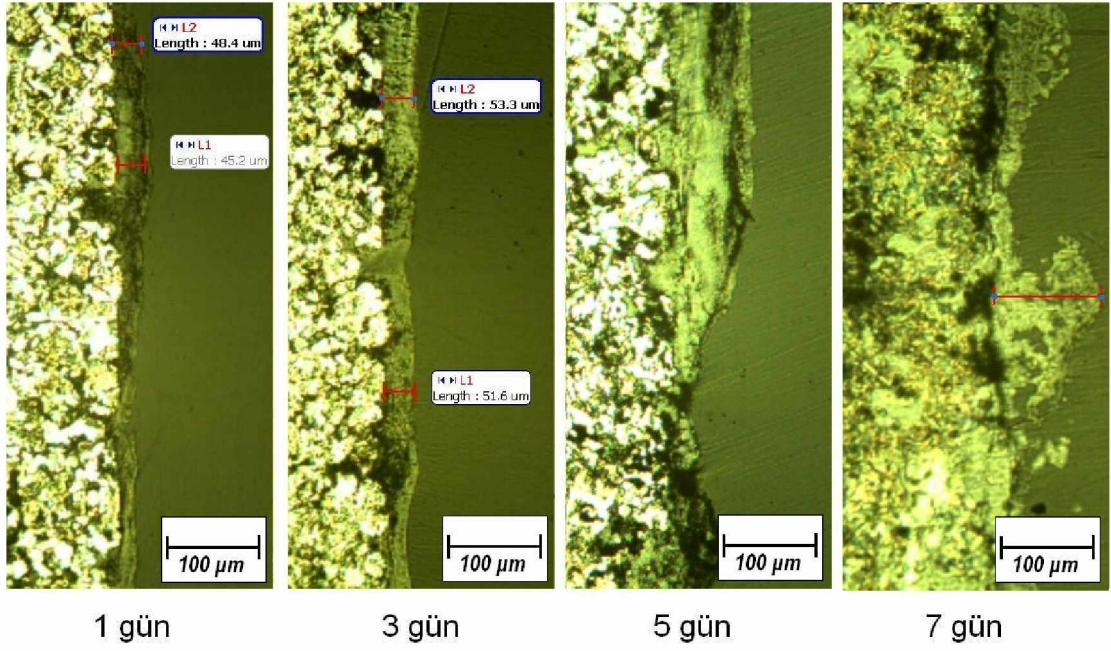
kaybı belirlenmiştir. Oluşan bu kütle kaybı kesitten alınan mikroyapı resimlerinde de açıkça görülebilmektedir. Noktasal olarak bazı bölgelerde çukurcuk korozyonun oluşumu gözlenmiştir. Bu çukurcukların maksimum derinliği 100µm geçmemektedir. Bu tip korozyon çok küçük çözelti miktarlarıyla, dar bölgeler üzerinde kontamine olması ile oluşur.



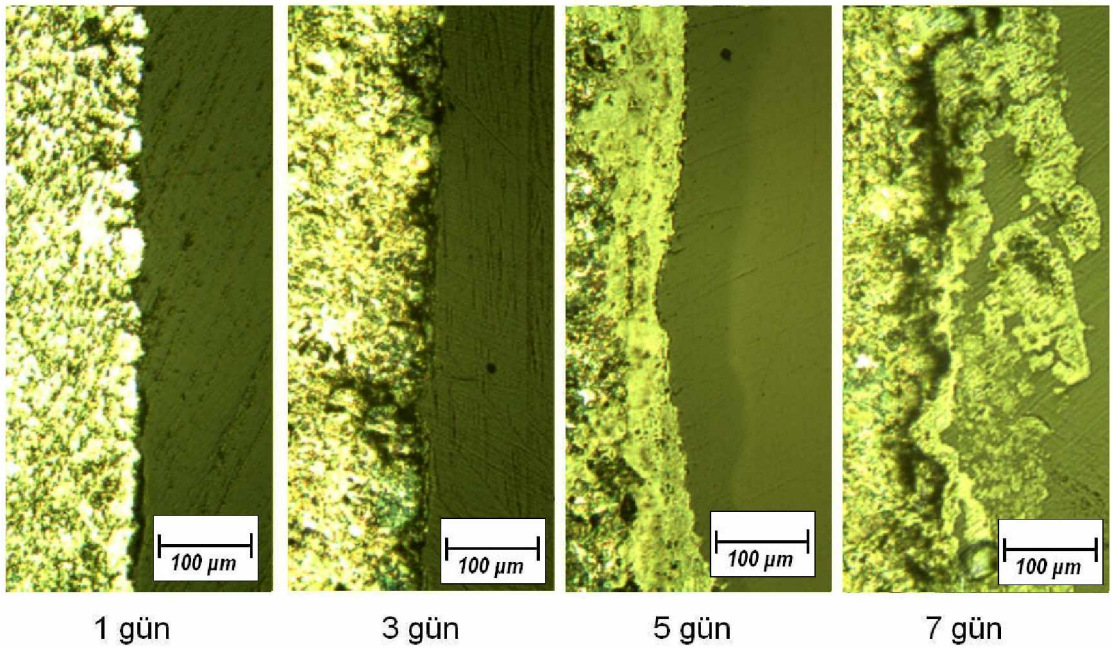
Şekil 5.11. A Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.



Şekil 5.12. B Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.



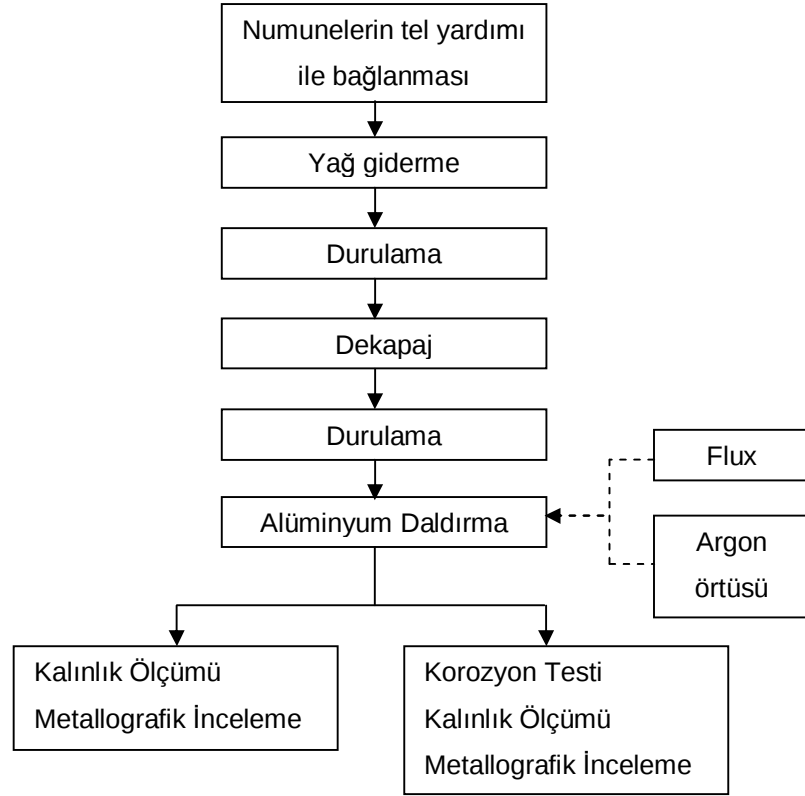
Şekil 5.13. C Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.



Şekil 5.14. D Numunesine ait zamana bağlı içyapıda oluşan korozyon ilerlemesi.

5.3. Toz Metal Parçaların Alüminyum Kaplanması

Bu çalışmada toz-metal parçaların sıcak daldırma ile alüminyum kaplama yönteminde, kaplama kalınlığının değişimi çeşitli parametrelere bağlı olarak incelenmiştir. Yapılan kaplama deneyleri Şekil 5.15.'te verilen deney sürecine göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.15. Numunelere sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama süreci.

Kaplama işlemi üç ana adımda toplanabilir;

- 1-Numunelerin yüzey hazırlama işlemleri
- 2-Alüminyum ile kaplama işlemleri
- 3-Metalografik incelemeler

5.3.1. Yüzey Hazırlama İşlemleri

Kaplanacak numuneler kolayca potaya girip çıkması için, bir tel üzerinde salkım oluşturacak şekilde bağlanır. Yüzeylerde bulunan yağ ve kirleri gidermek için Hydronet Base marka endüstriyel yağ giderici kullanılmıştır. Deneyde kullanılan yağ giderici modeli, yine bu çalışmada kullanılan Dekapaj tipine göre seçilmiştir. Üreticinin belirttiği tip seçimine göre, Korozyon giderici asit, HCL kullanımı için Hydronet-base ve H_2SO_4 kullanımı için Hydronet-S modeli yağ giderici kullanılmıştır. Her iki tip yağ giderici asidik Ph bölgesinde çalışarak metal yüzeyindeki yağ ve kir kalıntılarını çözerek banyo dibinde çökeltir. Banyo çözeltisi ph değeri 1,8 olacak şekilde yaklaşık

% 90 temiz kullanma suyu üzerine % 10 oranında Hydronet karıştırılarak 30 °C ile 35 °C'de hazırlanır. Zaman içerisinde yağ giderici özellikleri bozulmaktadır. Endüstride yağ alma havuzlarının bozulan Ph değeri, havuz dibindeki tortuların alınması ve dozaj pompası ile sürekli Ph kontrollü oranlarda üzerine yeni çözücü eklenerek önlenmektedir. Bu çalışmada laboratuvar şartlarında küçük numuneler ile çalışıldığı için beher kaplarında yapılan işlemlerde bozulma daha yavaş olmaktadır. Her numune serisi için beher kaplarındaki yağ giderici sıvılar yenilenmiştir. Numuneler, beher içerisinde 30-35 °C' de bulunan yağ giderme çözeltisine, 5-15 dk süreyle daldırılmıştır. Yağ alma çözeltisinden çıkarılan numuneler, durulamak için 40-50 °C 'deki sıcak suya daldırılmıştır. Buradan çıkarılan numune, yüzeyinde kalan çözelti artıklarının ve çeşitli pisliklerin giderilmesi için temiz bir bezle silinmiştir. Daha sonra numuneler dekapaj işlemine tabi tutularak yüzeylerindeki oksitler giderilmiştir. Dekapaj banyosu olarak iki ayrı çözelti kullanılmıştır.

1- Endüstride dekapaj işleminde yaygın olarak kullanılan H_2SO_4 çözeltisi ile yapılan işlemde, endüstriyel uygulamalar örnek alınarak, piyasada bulunan %8-10'luk H_2SO_4 çözeltisi oda sıcaklığında hazırlanmış, numunelerin yüzeylerindeki oksit durumuna göre 1-5 dk arasında değişen sürelerde daldırılmıştır. Daha sonra numuneler su ile durulanıp temiz bir bezle silinerek kurutulmuştur.

2- Bu yöntemde, ticari kalitedeki hidroklorik aside eşit miktarda su katılarak hazırlanan %14'lük HCl çözeltisi kullanılmıştır. 1. yöntemden farklı olarak dekapaj işlemi oda sıcaklığındaki çözeltiye, numunelerin 1-5 dk daldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Dekapaj çözeltisinden çıkarılan numuneler suda durulanıp temiz bir bezle silinerek kurutulmuştur.

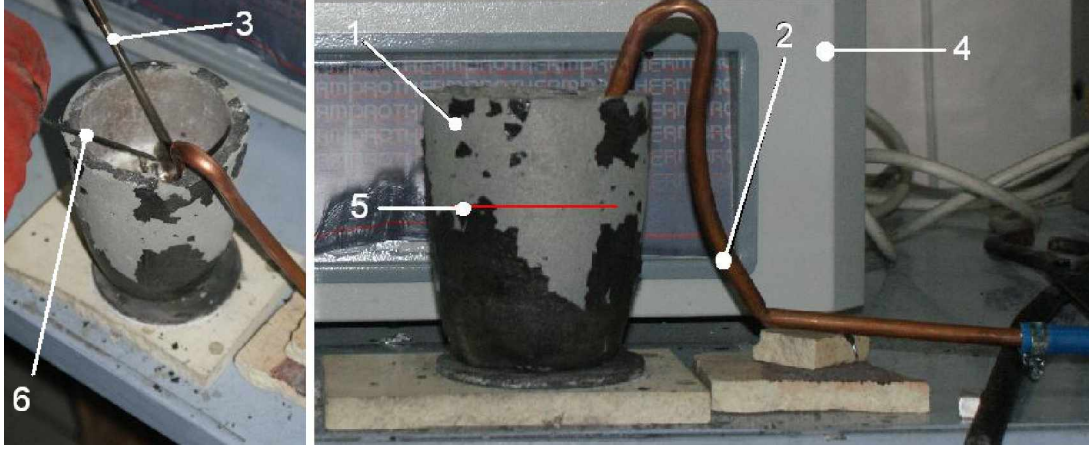
Başlangıçta her iki çözelti de kullanılmasına rağmen, her ikisinin de aynı derecede etkin olduğu görülünce, sonraki numunelerin hazırlanmasında H_2SO_4 çözeltisi kullanılmıştır. Son olarak yüzeyi temizlenen numunelerin yüzeyleri flakslanmıştır. Flaks olarak saf suda çözülmüş NaCl ve KCl çözeltisi kullanılmıştır. Karışım oda sıcaklığında derişik olacak şekilde hazırlanmıştır. Karışım oranı ağırlıkça %44 NaCl ve % 56 KCl içerir. Yüzeyleri temizlenen numuneler çözeltiye daldırılarak argon ortamında kurutulmuştur.

5.3.2. Kaplama İşlemi

Kaplama deneylerinde, maksimum 1200 °C sıcaklığa çıkabilen Protherm marka rezistanslı tav fırını kullanılmıştır. Fırın haznesi 120x150x150 (mm) ölçülerindedir; 2000W gücünde, 220V - 6.5A - 50Hz ile çalışmaktadır. Sıcaklık kontrolü K tipi termokupl ile sağlanmıştır ve düzenli rejimde $\pm 1^\circ C$ hassasiyete sahiptir. Alüminyumı ergitmek için, 90 mm. iç çap, 140 mm' lik yüksekliğinde ve 10 mm. et kalınlığına sahip grafit pota kullanılmıştır. Daldırma sırasında ergiyik alüminyumun sıcaklığını ölçmek için 0-1200 °C aralığında ölçüm yapabilen krom kılıflı K tipi

Ni-NiCr termokupl teli kullanılmıştır. Termokupl 'un ölçtüğü analog sıcaklığı dijital veriye dönüştüren (GEMO PC107) endüstriyel proses kontrol cihazı kullanılmıştır. Cihazın ölçme aralığı K tip T/C için 0 -1300 °C olup duyarlılığı ± 1 °C 'dir

y



- | | |
|----------------------------------|--------------------|
| 1- Grafit Pota | 4- Fırın |
| 2- Argon Örtüsünü Sağlayan Üfleç | 5- Banyo Seviyesi |
| 3- K tipi termokupl | 6-Toz metal Numune |

Şekil 5.16. Kaplama deney düzeneği.

Kaplama işleminin gerçekleştirildiği deney düzeneği Şekil.5.16'da görülmektedir. Potaya her deneyde yaklaşık 500 g. katı banyo malzemesi şarj edilmiştir. Kaplanacak her seri için potadaki alüminyum yüzeyden ve dipten temizlenmiş, eksilen alaşım miktarı kadar üzerine eklenmiştir. Bu şekilde daldırma banyosu içerisinde çözülmüş maddelerin ve tabanda oluşacak Dros tabir edilen $FeAl_3$ çökeltilerinin kaplama üzerindeki etkileri bertaraf edilmek amaçlanmıştır. Katı şarj ergidikten sonra, banyo sıcaklığı dengeye gelene kadar beklenmiştir. PLC kontrollü fırın ile kademeli olarak ısınarak cihaz üzerinde bulunan PLC kontrol ekranından banyo denge sıcaklığının ± 1 °C hassasiyette ölçülmüştür. Kaplama işlemi için fırın dışına alınan potanın sıcaklığını ölçmek için ise banyo içersine üzeri krom kılıf kaplı K tipi Ni-NiCr termokupl daldırılmıştır. Termokupl bir PLC cihaz ile entegredir. Ancak gerek potanın dış ortama yaptığı ısı transferi, gerek yüzeyde oluşan argon atmosferinden kaynaklanan ısı kayıpları ve gerekse numunelerin banyoya soğuk olarak daldırılmaları nedeniyle, banyo sıcaklığında ± 10 °C'lik oynamalar olmuştur. Kısa daldırma sürelerinde banyo sıcaklığındaki oluşan bu değişimleri minimuma indirmek için banyo daldırma sıcaklığının 25 °C üzerinde olacak şekilde ısıtılmıştır. Kaplama öncesinde yüzeydeki atıkların gelberi yardımı ile alınıp argon örtüsü oluşturulana kadar geçen sürede oluşan ısı kaybı ile sıcaklık dalgalanmaları önlenerek banyo sıcaklığının hemen hemen sabit kalması sağlanmıştır. Daha uzun daldırma sürelerinde oluşan sıcaklık dalgalanmaları önlemek için numuneler daldırmanın hemen sonrasında tekrar fırına konulmuştur. Ve daldırma boyunca fırında bekletilmiştir.

Kaplama deneylerinde üç parametre seçilerek, bunların kaplamaya ve kalınlığına etkileri incelenmiştir. Bu parametreler;

1-Prosesin uygulandığı sıcaklık (700 ve 750 °C)

2-Daldırma Süresi (30 s ve 5 dak.)

3-Kaplanacak Toz metal Numunenin bileşimi (0,01; 0,21; 0,41 ve 0,76 % C)

Dört farklı karbon bileşime sahip toz metal numuneler, aynı alüminyum alaşım kullanılarak, 700 ve 750 °C sıcaklıklarda hazırlanmış banyoya, 30s ile 5 dk sürelerinde daldırılmıştır. Numuneler uçlarına takılı oldukları çelik telin kanca şeklinde bükülmesi ile pota kenarına asılarak deney süresince banyo içinde sabit tutulmuştur. Telin kanca boyu numunenin pota dibine değmesini engelleyecek boyda ayarlanmıştır. Bu şekilde pota dibinde oluşan dros tabir edilen (FeAl_3) çökeltinin numune ile temas etmesi engellenmiştir. Belirlenen süre boyunca banyoda tutulan numuneler çıkarılırken, yüzeyinde biriken fazla alüminyumun akması için banyo üzerinde 5 s bekletilmiştir. Bu sırada TM üzerinde kalan alüminyum katılaşmaya başlarken numuneler potadan dışarı çıkarılmış ve ortam sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır.

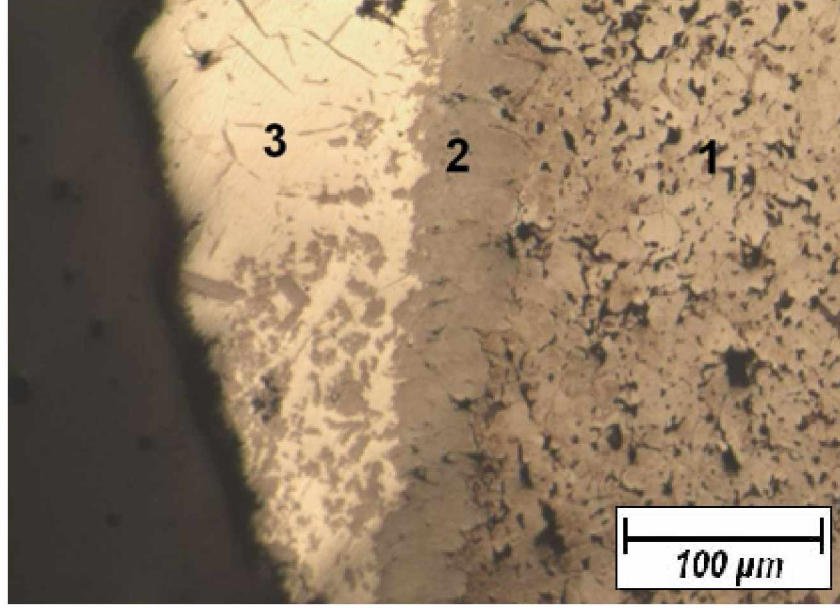
Numuneler banyoya daldırılmadan ve çıkarılmadan önce banyo yüzeyinde oluşan oksit tabakası, ile potadan dökülen grafit parçaları, gelberi ile alınarak numune yüzeyine yapışıp kirletmeleri engellenmiştir. Ayrıca alüminyum banyosu üzerinde kullanılan Flux yardımı ile fırın içerisinde yüzeyde oluşacak oksitlenmenin de önüne geçilmiştir.

5.3.3. Mikroyapıların İncelenmesi

Bu çalışmada, kaplanan parçalarda kaplama kalınlığı ve oluşan intermetalik alaşım tabakasının kalınlığının ölçülmesi için metalografik yöntemler kullanılmıştır. Kaplanmış numunelerin kesitleri alınarak, mikroskobik inceleme için epoksi ile kalıplanmış ve sırası ile parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulmuştur.

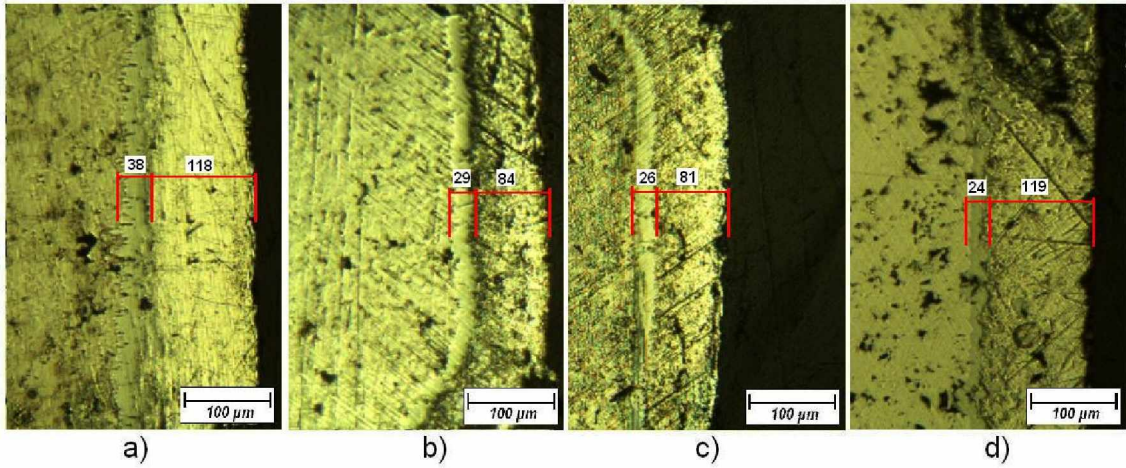
Numunelerin dağlanmasında, alüminyumla kaplanmış çeliklerin metalografik incelenmesinde yaygın olarak kullanılan bir dağlama re-aktif olan Nital kullanılmıştır. Alaşım tabakasının incelenmesi amacıyla da, alüminyum alaşımlarının dağlanmasında kullanılan Keller dağlama reaktif kullanılmıştır. Dağlanmış numunelerin kaplama ve alaşım tabakası kalınlığı Nikon eclipse LV100 mikroskobunda ölçülmüştür. Bu mikroskobun üzerinde yer alan Clemex görüntüleme sistemi ile fotoğraflanmış ve ölçeklendirilmiştir. Yine aynı cihazın yazılımı yardımıyla görüntülerde istenilen mesafe arası ölçülmüştür.

Kaplama kalınlığını saptamak için, her numunede, farklı noktalarından görüntülenmiş, bu görüntülerde tabakaların farklı yerlerinden en az 10 ölçüm alınarak ortalaması alınmıştır. kaplama sonrası oluşan intermetalik alaşımların kalınlığını ölçmek için Nikon Eclips LV 100 model optik mikroskop ve iç yapı fotoğraflaması için Moticam 1000 ve Clemex marka dijital kamera kullanılmıştır. Şekil 5.21’de A numunesine ait (750 °C - 5dk) şartlarında oluşan, alüminyum ve intermetalik fazlar gösterilmiştir.

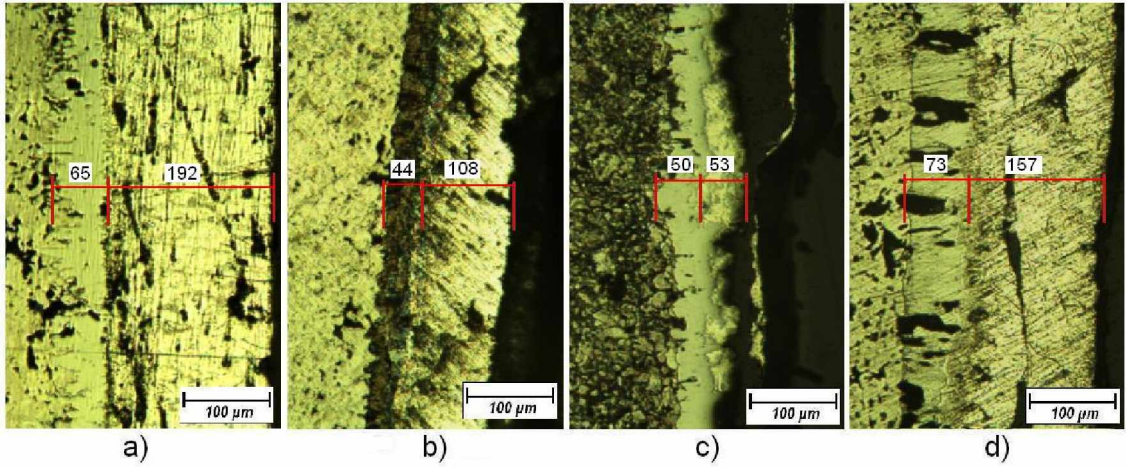


Şekil 5.17. A numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (750 °C - 5dk.).

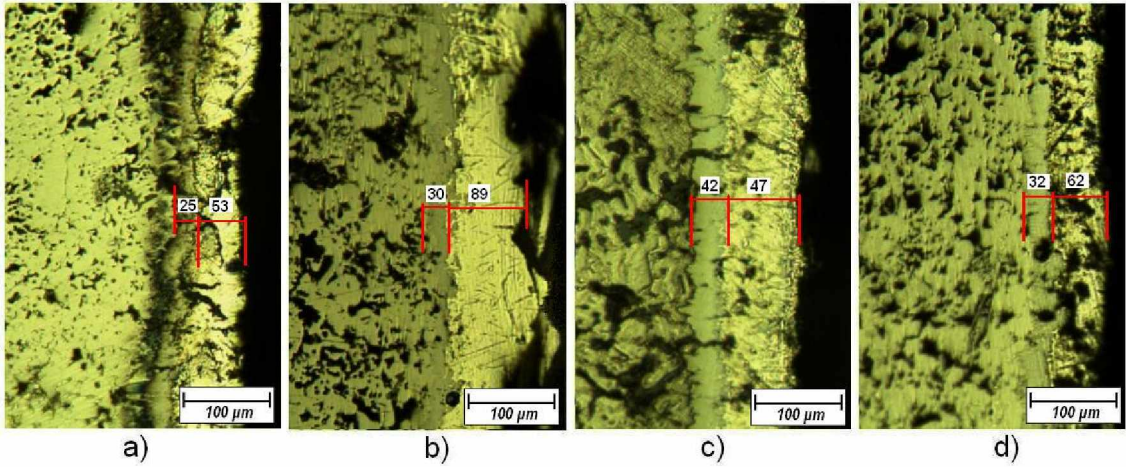
1) Demir esaslı ana malzeme, 2) Fe-Al intermetalik faz oluşum, 3) Alüminyum dış kaplama



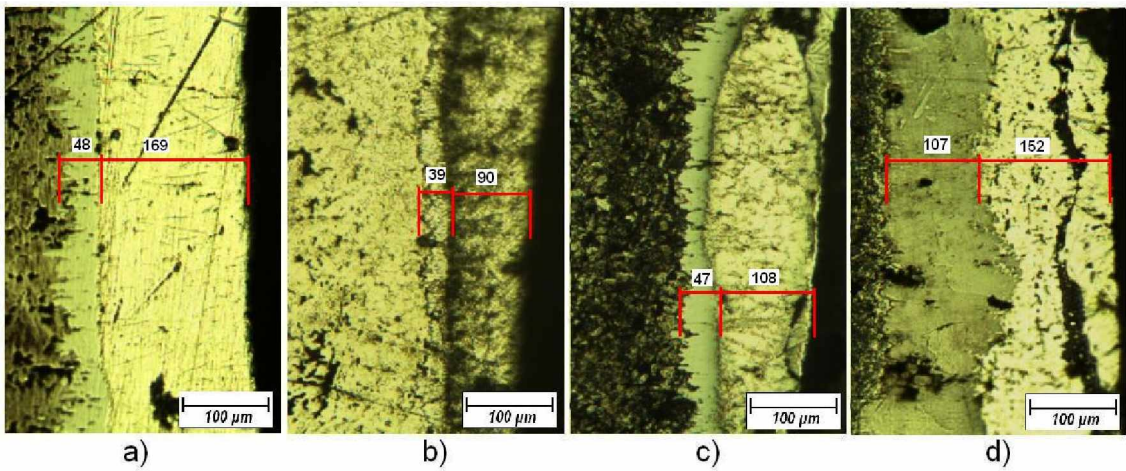
Şekil 5.18. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (700°C- 30 s).



Şekil 5.19. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (700°C- 5 dk).



Şekil 5.20. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (750°C- 30 s).



Şekil 5.21. A,B,C,D numunesi kaplama sonrası oluşan mikroyapı, (750°C- 5 dk).

Sıcak daldırma işlemi dört grup üzerinde, iki farklı sıcaklık ve daldırma süreleri (700–750 °C ; 30s- 5dk) uygulanmıştır. Daldırma neticesinde, bu dört grup TM numunelerin yüzeylerinde farklı kalınlıklarda alüminyum ve intermetalik alaşım tabakası elde edilmiştir. Oluşan bu tabaka kalınlıkları, elde edilen mikro yapı görüntüleri üzerinde, piksel verilerinin işlenmesi ile sayısal hale getirilmiştir. Tabaka kalınlıklarına ait bu sayısal veriler Tablo 5.7. ve Tablo 5.8. 'de verilmiştir.

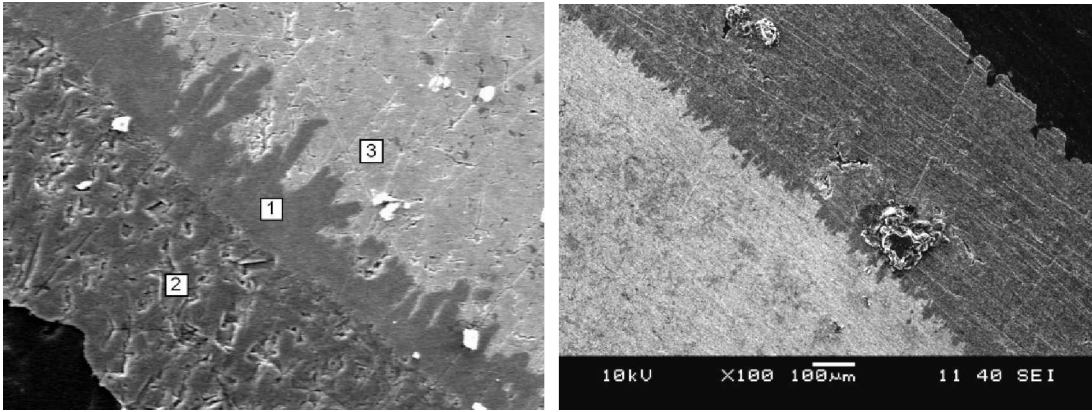
Tablo 5.7. Alüminyum tabaka kalınlığı (µm)

Sıcaklık(°C)	Süre	A	B	C	D
T1 700	30"	118	84	81	119
	5'	192	108	53	157
T3 750	30"	53	89	47	62
	5'	169	90	108	152

Tablo 5.8. İntermetalik ara tabaka kalınlığı (µm)

Sıcaklık (°C)	Süre	A	B	C	D
T1 700	30"	38	29	26	24
	5'	65	44	50	73
T3 750	30"	25	30	42	32
	5'	48	39	47	107

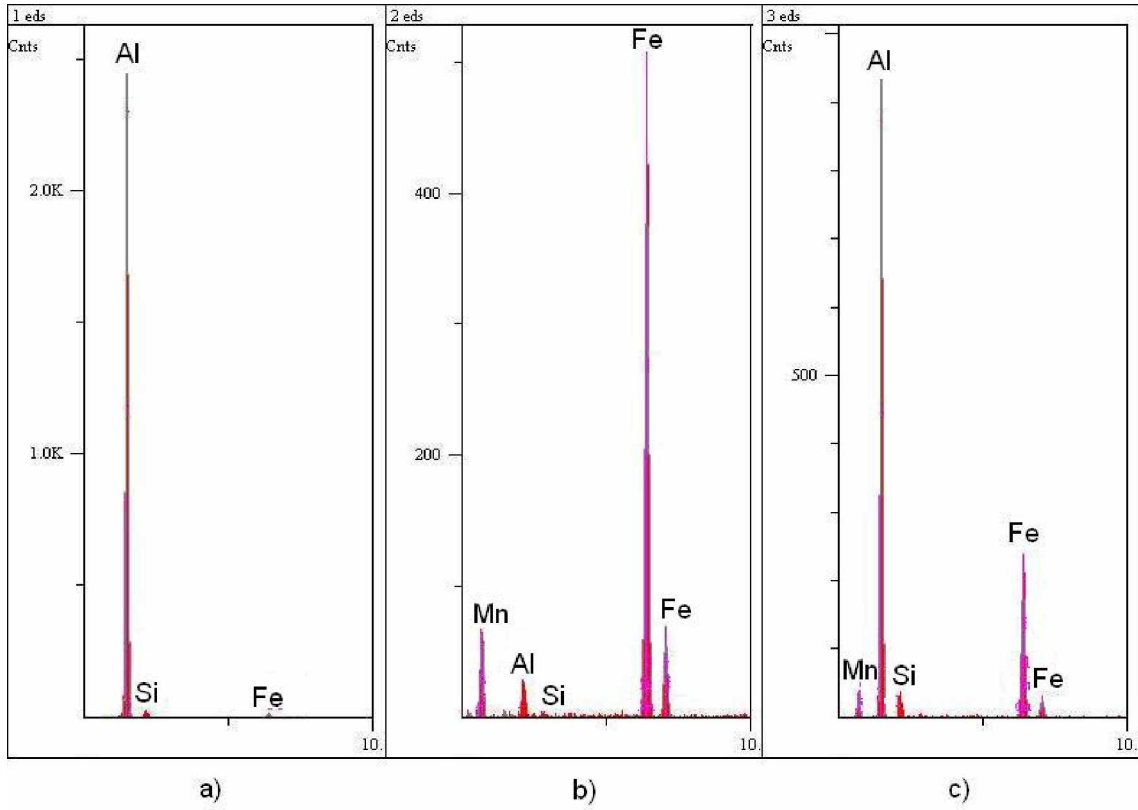
A ve D numunelerine 700 °C ve 5dk şartları altında oluşan mikroyapılar, SEM analizleri uygulanarak intermetalik faz sınırlarının ve kaplama kalınlığı belirlenmiş ve EDS ile intermetalik ve kaplama tabakasındaki madde değişimleri incelenmiştir. EDS verileri numune üzerine 100 s ve 20kV ile elde edilmiştir.



Şekil 5.22 A numunesine ait SEM görüntüsü, (700 °C - 5dk)

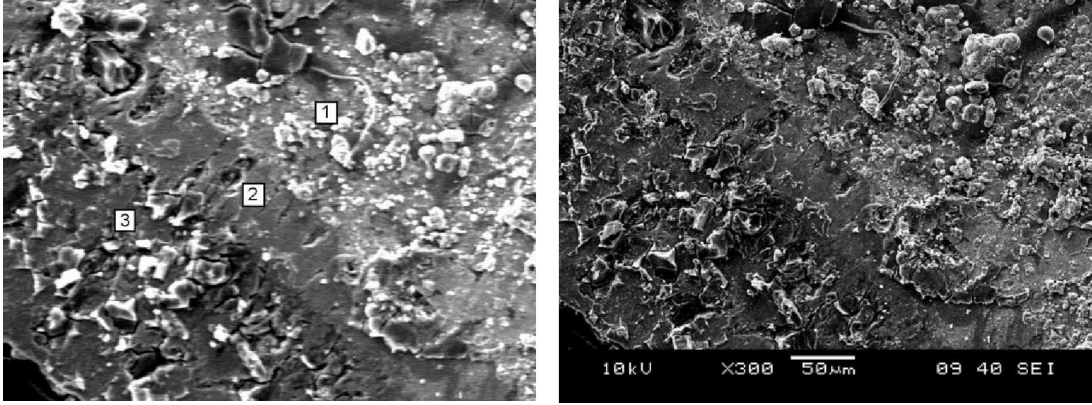
Tablo 5.9. A numunesine ait EDS analizi, moleküler yoğunluk grafiği, (700 °C - 5dk).

Tablolardaki veriler şekil 6.22 üzerinde a)1, b)2 ve c)3 numaralı noktaları belirtmektedir.



Tablo 5.10. A numunesine ait EDS analizi, elementlerin % ağırlık tablosu, (700 °C - 5dk).

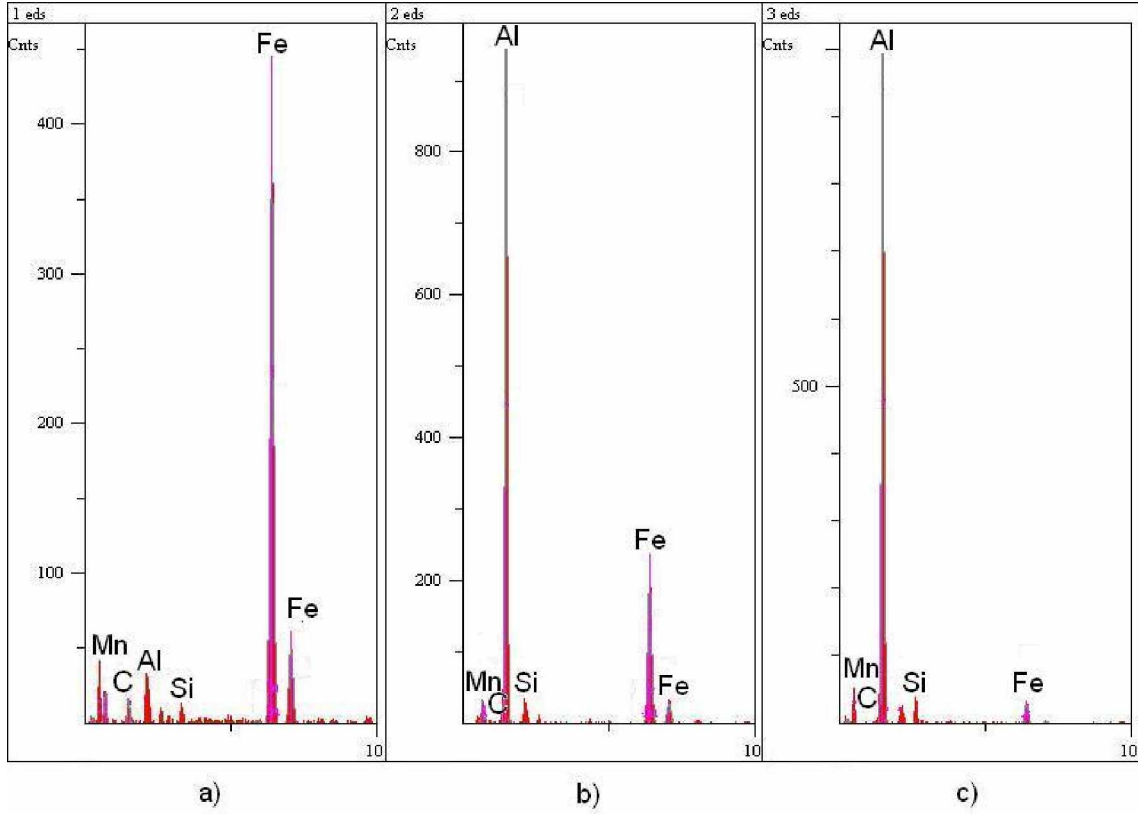
	a	b	c
Al	98,471	1,106	74,213
Fe	1,377	89,494	23,002
Si	0,152	0,457	0,132
C	-	8,672	2,430
Mn	-	0,271	0,223



Şekil 5.23 D numunesine ait SEM görüntüsü, (700 °C - 5dk).

Tablo 5.11. D numunesine ait EDS analizi, moleküler yoğunluk grafiği, (700 °C - 5dk).

Tablolardaki veriler şekil 6.23 üzerinde a)1, b)2 ve c)3 numaralı noktaları belirtmektedir.



Tablo 5.12. D numunesine ait EDS analizi, elementlerin % ağırlık tablosu (700 °C - 5dk).

	a	b	c
Al	3,899	75,530	73,751
Fe	83,736	24,169	3,978
Si	0,170	0,191	0,019
C	11,739	-	22,203
Mn	0,456	0,110	0,049

5.3.4. Kaplama Kusurlarının Belirlenmesi

Kaplama sonrasında oluşan kusurların belirlemek için hatalı kaplanan numuneler yüzeysel ve mikroyapısal olarak incelenmiştir. Uygun dekapan kullanılmadığı, argon örtüsünün yetersiz kaldığı veya daldırılan parçalara gerekli ön işlem (yağ giderme, asitle pickling vs..) uygulanmadığı her koşulda kaplamanın yüzeyden ayrıldığı gözlemlenmiştir.

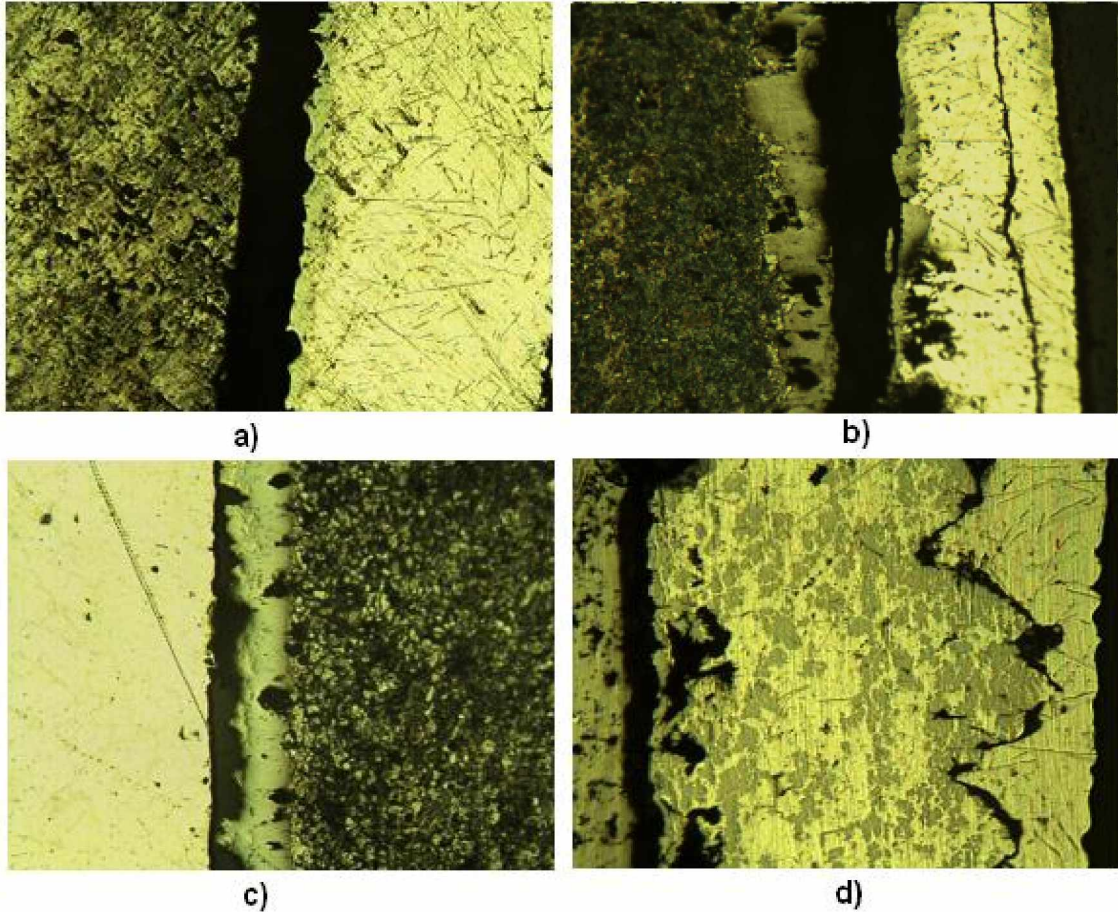


Şekil 5.24. D numunesinin 750 °C - 5dk şartlarında kaplamada oluşan kusurlar.

a) normal kaplanmış ve b) Kaplama kusuru olan numuneler.

Uygun şartlarda sıcak daldırma ile kaplama işlemi gerçekleştiğinde yüzeyde iyi tutunma, parlaklık gibi özellikler gösterirken, kusurlu kaplamalarda pullanma, çatlama ve renkte matlık gibi özellikler gösterir. Kaplamalarda oluşan ayrılmalar, görünürde soğuma sırasında alüminyum kaplama ile kaplanan demirin farklı genleşmesinden kaynaklanmaktadır. Aslında, daldırma sırasında banyo yüzeyinde oluşan alüminyum oksit tabakasının kaplanacak metal ile arasında bariyer oluşturması ve alüminyumun metali ıslatamaması veya metalin yüzeyinde oluşan korozyon ve yağ vb. artıklarda kaplama kalitesini etkilemiştir. Yapılan ön çalışmalarda 700 °C den daha düşük sıcaklıklarda, banyo yüzeyinde alüminyumun katılaştığı ve yüzeyde oksit olduğu gözlenmiştir. Bu tabakanın kaplama üzerinde olumsuz etkileri görülmüştür. Benzer şekilde 750°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise grafit potanın yanarak aşınması hızlanmıştır. Aşınan potanın toz halinde parçalanarak alüminyum üzerinde birikinti yaptığı gözlenmiştir. Bu kalıntılarda gelberi yardımı ile temizlenmediğinde kaplama üzerinde topaklanmaya sebep olmaktadır. Deneyler sırasında karşılaşılan zorluklardan birisi de toz metalin sahip olduğu gözenekli yapısıdır. Daldırılacak numunenin yüzeyine uygulanan asitle korozyon giderme işleminden sonra doğrudan kurutularak argon örtüsü altında alüminyuma daldırıldığında, toz metalin sahip olduğu poroziteli yapıda kalmış olan HCl artıkları yüksek sıcaklıktan dolayı yanarak yüzeyde yeşil renkli korozyon tabakası oluşturmaktadır. Bu korozyon tabakası alüminyum ile metal arasında ıslanmaya engel olmaktadır. Bunu önlemek için asitle yüzey temizliğinden sonra numune saf su ile durulanmıştır. Ancak yapılan denemelerde de saf suyunda benzer şekilde kaplamayı olumsuz etkilediği görülmüştür. Su yerine saf etil alkol ile durulama olumlu netice verse de, alkolün tam olarak poroziteli yapıdan uzaklaştırılamaması ve bazen daldırmaya başlamadan numune içindeki kalıntının tutuşma sıcaklığını geçerek yanması ve yüzeyde siyah korozyon tabakası oluşturması da kaplamayı olumsuz etkilemektedir. Numunelerin dışarıda kurutulması ise temizlenmiş yüzeylerinde yeni noktasal korozyon

oluşumlarına sebep olmaktadır. Argon örtüsü altında kuruyuncaya kadar ön ısıtmaya tabi tutulması gibi çözümler yetersiz kalmıştır. Saf su ile durulanan numuneler, ağırlıkça %44 NaCl ve % 56 KCl saf su ile doyuncaya kadar karıştırılarak hazırlanan çözeltiye daldırılır. Numuneler daha sonra yüzeyde bir korozyon oluşumuna fırsat vermeden elektrikli ısıtıcı yardımı ile hemen kurutup daldırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu yöntem diğerlerine nispeten çok daha olumlu netice verdiği görülmüştür. Numune yüzeyinde birikmiş olan NaCl ve KCl banyoya daldırma sırasında alüminyum ile reaksiyona girerek alüminyum ile demir arasında dekapan vazifesi görmekte ve demir yüzeyinden hemen ayrılarak alüminyumun demiri ıslatması sağlanmış olmaktadır. Bazı kaplama hatası olan numunelerinde kesitlerinden alınan mikroyapı görüntüleri ile bu ayrılmaların oluş mekanizmaları incelendiğinde kaplamanın yüzeyden dört farklı şekilde ayrıldığı görülmüştür. Şekil 5.25, a) 'da Alüminyum kaplamanın kırılğan intermetalik faz ile birlikte yüzeyden ayrılması, Şekil 5.25, b) 'de intermetalik fazın yine kırılğan bir yapıya sahip olmasından dolayı ortadan ikiye ayrılması Şekil 5.25, c) 'de demire tutunan intermetalik fazdan alüminyum kaplamanın faz sınırı boyunca ayrılması, Şekil 5.25, d) 'de ise alüminyumda çözünen intermetalik fazın parçalanması görülmektedir.

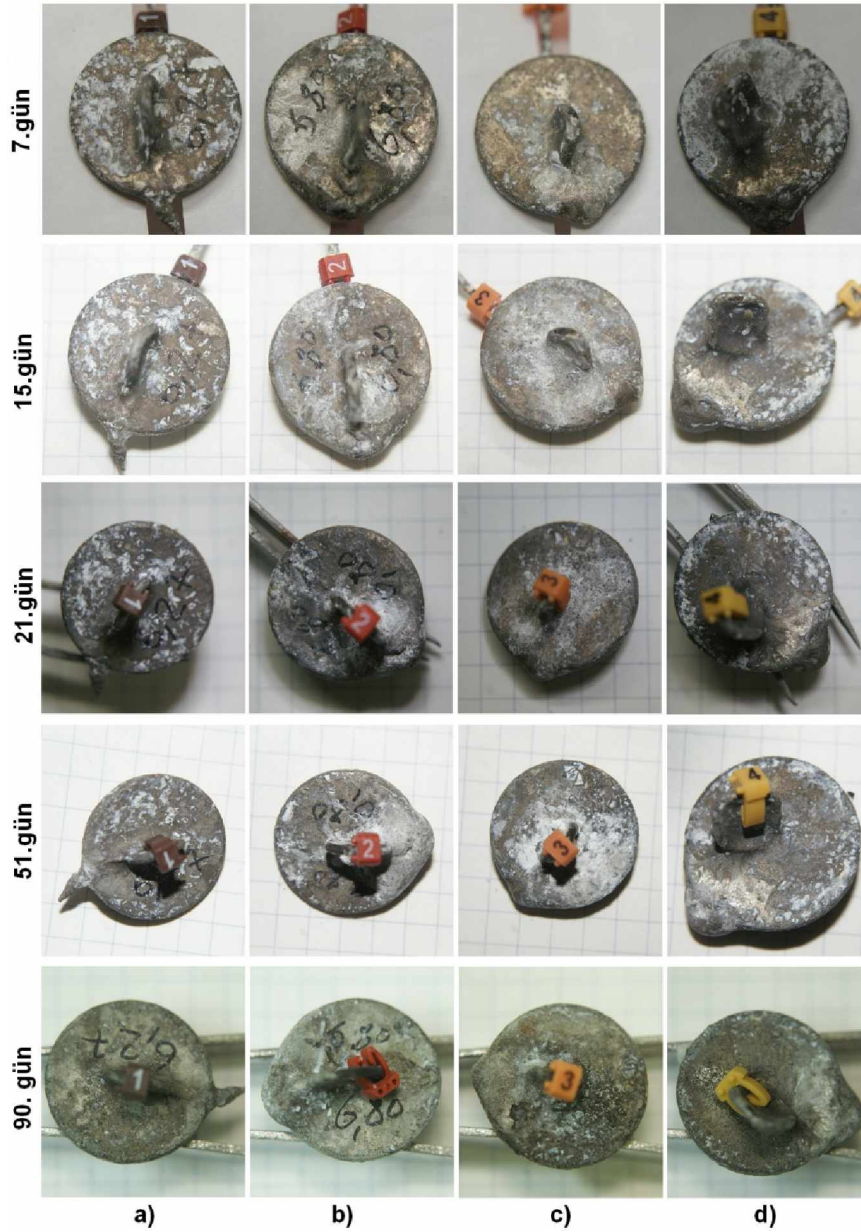


Şekil 5.25. Kaplama kusurları olan numunelere ait mikroyapılar.

a) B numunesi (700 °C- 5dk), b) D numunesi (750 °C - 5dk), c) C numunesi (750 °C - 5dk) , d) C numunesi (700 °C - 30s).

5.3.5. Kaplanmış Numunelerin Korozyon Testi

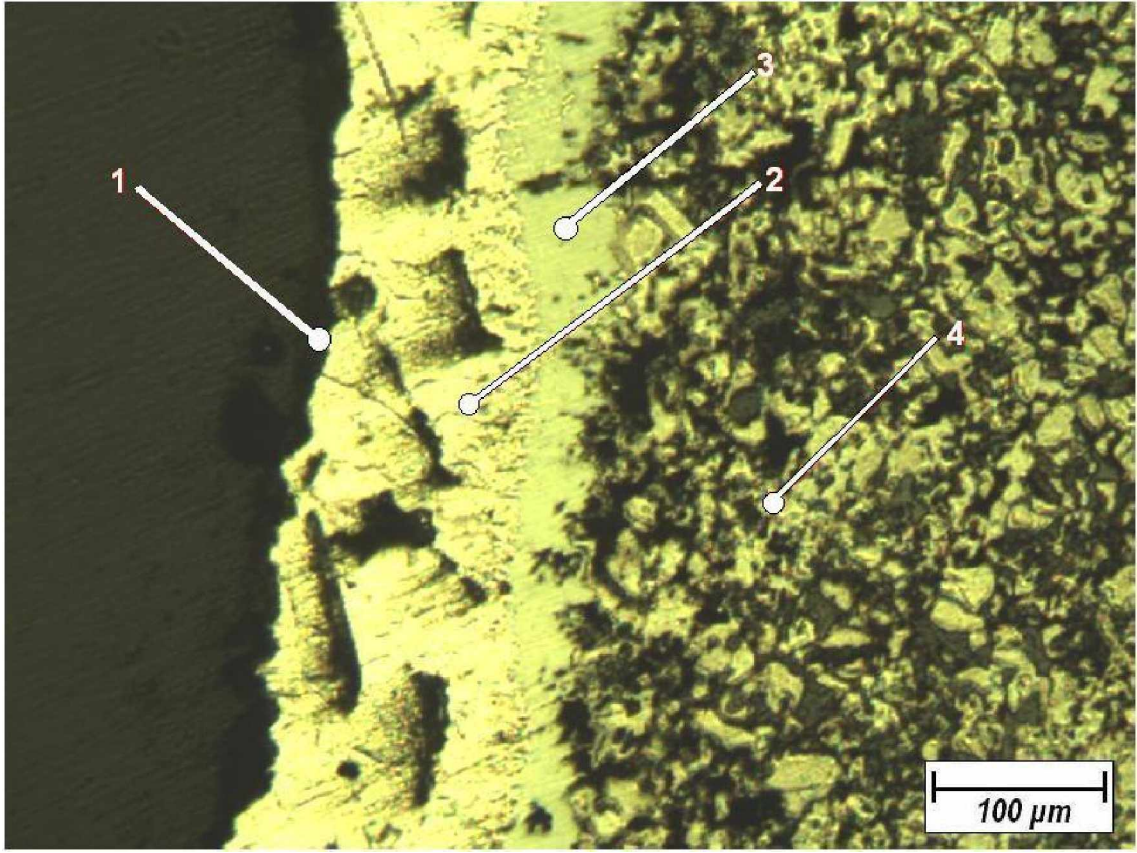
Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanmış numunelerin korozyon direncini belirlemek için korozyon testi uygulanmıştır. Test için 750°C, 5dk şartlarında kaplanan A,B,C,D serisi seçilmiştir. Korozyon testinde kullanılan cihaz ve diğer parametreler ise bölüm 5.2.5'te belirtilen şartlarda alınmıştır. Test periyodu olarak bir hafta ve toplam 90 gün seçilmiştir. Oluşan kütle değişimi 5.2.1'de belirtilen yöntem ve cihaz kullanılarak belirlenmiştir. Yüzeyde ve yüzeyden içeri doğru oluşan korozyon ilerlemesi ise 5.2.4'te belirtilen yöntem ve cihazlarla belirlenmiştir. Deney sonucu elde edilen kütesel değişim ve başlangıç ağırlığına göre en uzun sürede oluşan % değişim Tablo 5.9 'da verilmiştir.



Şekil 5.26. Kaplamalı numunelerde zamana bağlı yüzeyde oluşan korozyon ilerlemesi.

Tablo 5.13. Korozyon sonucu oluşan kütle kaybı (% değişim).

		Başlangıç	3 gün	7 gün	10 gün	15 gün	20 gün	50 gün	90 gün	% kütle kaybı
Ağırlık ölçüm (g)	A	6,27	6,44	6,43	6,42	6,44	6,50	6,53	6,48	3,35
	B	6,80	6,92	6,91	6,91	6,93	6,95	6,95	6,92	1,76
	C	6,33	6,46	6,45	6,44	6,46	6,48	6,54	6,47	2,21
	D	6,73	7,02	6,97	6,97	6,98	6,99	7,02	7,01	4,16



Şekil 5.27. 90 gün korozyon testi uygulanan B (750°C, 5dk) numunesine ait mikroyapı.
 1) Al₂O₃ fazı, 2) Alüminyum dış kaplama, 3) Fe-Al intermetalik faz oluşum, 4) Demir esaslı B numunesi.

Metalografik işlemler sürecinde parça üzerindeki pudra şeklindeki beyaz pitting oksit dökülerek ayrılmış ancak epoksi içerisinde boşluk bırakmıştır. Oluşan bu boşluktan var olan alüminyumoksit tabakanın kalınlığını belirlemek mümkündür. Alüminyum tabakada yüzey boyunca derinlemesine oluşan pitting korozyonu da açıkça görülebilmektedir. Alüminyum tabaka içerisinde ara faza dik doğrultuda mikro çatlak oluşumları gözlenmiştir.

5.4. Deney Sonuçları ve İrdelenmesi

- 1) Kimyasal bileşimindeki % 0,01; 0,21; 0,41 ve 0,76 karbon oranlarına sahip demir esaslı TM parçalar, farklı sıcaklık ve sürelerde sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanmıştır. Bu yöntemdeki değişkenlerin kaplama özelliklerine etkisi makroskobik ve mikroskobik yönden incelenmiştir.
- 2) Aynı üretim koşullarında elde edilen TM içerisindeki karbon oranının artmasına bağlı olarak, yoğunluğuna etkisi olmadığı (Tablo 5.3), sertlik değerlerinde ise belirgin bir şekilde artış olduğu görülmüştür (Şekil 5.6.). Bu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir (Tablo 5.5). Mikroyapı incelemelerinde kimyasal bileşimdeki elementlerin homojen bir şekilde yapıda dağıldığı ve porozite oluşumunun çok az olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.8.). TM numunelerin korozyon direncini belirlemek için, 7 gün süre ile yoğun tuz ortamında korozyon testi uygulanmıştır. Test neticesinde oluşan kütle kaybı sırası ile D, A, B ve C numunelerinde oluşmuştur. Buna göre kimyasal bileşimin korozyon üzerinde belirgin bir etkisi görülmemiştir (Tablo 5.6). Korozyon sonrası alınan yüzey ve içyapı görüntülerinde çukurcuk tipi korozyon oluşumu gözlemlenmiştir (Şekil 5.10 - Şekil 5.14).
- 3) Kaplama öncesi yüzey hazırlama işlemlerinin kaplama özellikleri üzerinde doğrudan etkisi görülmüştür. Uygun yüzey hazırlama işlemlerine dikkat edilmediği koşullarda kaplamalarda pullanma ve çatlama neticesinde kopmalar gözlemlenmiştir (Şekil 5.24).
- 4) Alüminyum kaplanan TM numunelerde yüzeyde oluşan Al tabakanın intermetalik ara tabaka ve dış kaplamadan oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 5.17'de Toz metallerin alüminyum ile kaplanması sonucu oluşan yapı görülmektedir. Şekil 5.22- Şekil 5.23 SEM görüntülerinde belirlenen noktalardan alınan EDS verilerinden (Tablo 5.9- Tablo 5.12) elde edilen sonuçlara göre yüzeyde oluşan alüminyum tabakadan, TM malzeme içerisine doğru alüminyum elementlerin difüzyonu olduğunu göstermiştir.
- 5) Daldırma sıcaklığı ve süresinin, intermetalik ara tabakası ve alüminyum kaplama kalınlığına ve yapısına olan etkileri mikroskobik olarak incelenmiştir. TM numunelerin, daldırma sıcaklığı 700 °C ve 750 °C, daldırma süresi 30 s ve 5 dak olarak uygulanmıştır. Buna göre daldırma sıcaklığının ve süresindeki artışın ara alayım tabakası oluşumunu arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 5.18.- 5.21.), (Tablo 5.7. ve Tablo 5.8.). Bu işlemlerde etkin olan difüzyon mekanizmasında, sıcaklık ve süre parametrelerinin intermetalik ara tabaka oluşumunda etkin olduğu görülmüştür. Yüzeyde oluşan alüminyum tabaka kalınlığı ise, daldırma sıcaklığının artışına bağlı olarak azalmıştır (Şekil 5.18 - 5.21), (Tablo 5.7 ve Tablo 5.8).
- 6) Malzemenin kimyasal bileşimindeki karbon içeriğindeki artışın intermetalik ara tabaka kalınlığını çok az arttırdığı belirlenmiştir (Tablo 5.7 ve Tablo 5.8).
- 7) Kaplanmış TM numunelere 90 günlük tuz korozyon testi uygulanması sonucunda kütle kaybının B,C,A ve D şeklinde arttığı belirlenmiştir (Tablo 5.13). Korozyon testi süresince yapılan yüzey incelemelerinde, yüzeylerde beyaz renkli sert alüminyumoksit tabakasının 7. gün sonunda oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.26). Korozyon sonrası elde edilen yüzey ve içyapı görüntülerinde yüzeyde pitting tipi korozyon oluştuğu ve içe doğru kılcal çatlaklar halinde nüfuz

ettiği belirlenmiştir (şekil 5.26 - şekil 5.27). Buna göre alüminyum kaplanan TM numuneler, yoğun tuz ortamında korozyona karşı iyi direnç göstermiştir.

8) Kaplama sırasında daldırılan sıvı alüminyum üzerinde oluşan oksit tabakasının kaplama özelliklerine doğrudan etkisi belirlenmiştir. Kaplama hatası olan numunelerde yapılan mikroyapı incelemelerinde kaplamanın pullanma, çatlama ve kopmalar halinde yüzeyden ayrıldığı grlmştir (şekil 5.25).

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tip 2 prosesine uygun olarak, demir esaslı TM malzemelerin, 700 ve 750 °C'de ergimiş Etial 171 alüminyum içerisinde 30 s ve 5 dak süre ile bekletilerek yüzeylerin kaplanması gerçekleştirilmiştir [18]. Böylece demir esaslı TM malzeme üzerinde intermetalik ara tabaka ve yüzeyde alüminyum tabakası şeklinde oluşan kaplamalar elde edilmiştir. Bu kaplamanın, numunelerin korozyon direncini belirgin şekilde arttırdığı gözlemlenmiştir [6, 18-50].

Bu çalışmamızda TM malzemelerin karbon içeriğine bağlı değişimin, literatüre uygun olarak alaşım tabakası kalınlığını çok az arttırdığı belirlenmiştir [15]. Kaplama parametrelerinden daldırma süre ve sıcaklığındaki artış, daha fazla element difüzyonu sağlayarak intermetalik ara tabaka kalınlığını arttırdığı belirlenmiştir [3, 6, 15, 21].

Daldırılan TM yüzeylerinde ve ergiyik alüminyum yüzeyinde oluşan oksitlenmenin, elde edilen kaplamanın kalitesine etkisi olduğu belirlenmiştir. Yapılan mikroskobik incelemelerde, dış yüzeyde oluşan alüminyum kaplama ile intermetalik ara tabakada oluşan boşluklar ve çatlaklar gibi yapısal hatalardan kaynaklanan ayrılmalar ve dökülmelere rastlanmıştır [6, 15, 18, 21].

KAYNAKLAR

- [1] Sasaki, T., Yakou, T., Features of intermetallic compounds in aluminized steels formed using aluminum foil , journal of materials processing technology 197 (2008) 89–95
- [2] W. J. Cheng , C. J. Wang , Growth of intermetallic layer in the aluminide mild steel during hot-dipping, Surface & Coatings Technology 204 (2009) 824–828
- [3] M.V. Akdeniz, A.O. Mekhrabov, T. Yilmaz, Scripta metall. Mater. 31 (1994) 1723.
- [4] C.M. Cotell, J.A. Sprague, F.A. Smidt, Metals handbook, on surface engineering, vol. 5, ASM international, materials park, OH, 1999, p. 346.
- [5] S.H. Hwang, J.H. Song, Y.S. Kim, Mater. Sci. Eng. A390 (2005) 437.
- [6] E. Arabacı, Çelik bantların sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanması, Yüksek lisans tezi, metalürji Müh., 1994
- [7] Babayev Y. , 2009. “Toz Metalürjisi ile üretilmiş İki metal parçanın difüzyon kaynağıyla Birleştirilmesinde Sıcaklığın kaynak bölgesine etkisinin İrdelenmesi”, Journal of Qafqaz University, number:25, 92-100.
- [8] Anonim, introducing PM, <http://www.pickpm.com/intropm/intropm.asp?locarr=1>
- [9] TTMD, <http://www.turkishpm.org/>
- [10] R. Ünal, “Toz Metalürjisi”, Dumlupınar Üniversitesi, http://mf.dpu.edu.tr/~runal/toz/tozuretmi/powder_product.html
- [11] İ. Çiftçi “Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve İşlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması”, doktora tezi, Gazi Üniversitesi, 2003, Ankara.
- [12] Anonim, <http://www.turkcebilgi.com/kaplama/ansiklopedi>
- [13] R.M German, 1994. Powder metallurgy science, 2nd edition, Metal Powder Industries Federation, USA.
- [14] M. Vural, İTÜ Makina Fak. İmalat Mühendisliği Böl. , www.itu.edu.tr/~vuralmu/ch16.pdf
- [15] V.R Ryabov, Aluminizing of steel (Aitirovanie Stall). Metallurgiya publishers, Moskow, 1973.
- [16] Metals handbook, 8th edition, Vol.2 "Heat treating, cleaning and finishing". ASM. 1964.
- [17] K.N. Strafford, P.K. Datta, C.G. Googan, “ Coatings and surface treatment for corrosion and wear resistance“, Ellis Horwood Limited, 1984, pp. 103-115.
- [18] R.W. Richards et al, “Metallurgy of continuous hot dip aluminizing”, International Materials Review, Vol. 39 (5), 191-212, 1994.
- [19] ‘Metals Handbook’, 9th edn. Cilt 5 , 333-347 ;1982, Metals Park. OH. American Society for Metals
- [20] A. Gierek and L.Bajka: Giesserei, 1977,64,391
- [21] S.G. Denner, R.D. Jones, R.J. Thomas, “ Hot Dip aluminising of steel strip ”, Iron and Steel International, June, 1975, pp. 241-252.

- [22] P. Liberski*, A. Gierek, H. Kania, P. Podolski, A. Tatarek , “ Formation of coatings from a liquid phase on the surface of iron-base alloys”, Archives of Foundry Engineering, ISSN (1897-3310) Volume 8 Issue 4 / 2008 93 – 98 18/4
- [23] W.R. Ryabov, “Alitirowanije stali, Miettallurgija” , Moskwa, 1975 (in Russian).
- [24] W.R. Ryabov, “Aluminizing of steel” ; Oxonian Press. New Delhi, 1985.
- [25] L. Bajka, Mechanizm powstawania dyfuzyjnych powłok aluminiowych uzyskiwanych metodą ogniowo-zanurzeniową na białym żeliwie podeutektycznym Praca doktorska, Politechnika Śl., 1973 (in Polish).
- [26] P. Liberski, Fizykochemiczne podstawy racjonalnego kształtowania zanurzeniowych powłok aluminiowych na żelazie. Hutnictwo z.64 Gliwice 2002 (in Polish).
- [27] P. Liberski, Wpływ krzemu w kąpielach do aluminiowania zanurzeniowego na wzrost i własności warstw w nich otrzymanych, Praca doktorska, Pol. Śl., 1985 (in Polish).
- [28] I. Najdich, “Metal-ceramic interfaces: Control of wetability, adhesion and mechanical strength”, Procc. The 4th European Confer. EUROMAT 95 Eds. Associazione Italiana Di Metallurgia 1995 Vol. 2 Symposium E 6 pp.437-440.
- [29] A. Gierek, L. Bajka, “Aluminering en alternativ metod fill forzinkning. Korrosionsinstitutet”. Stockholm, 1976 Bulletin nr 77, s. 3-19.
- [30] L. Bajka, “Structure and mechanism of forming of aluminum diffusion coatings on a hypo-eutectic white cast iron”. Scandinavian of Metalurgy, 1975, vd. 4, No 5, 225-230.
- [31] A. Gierek, L. Bajka, “Aluminiowanie zanurzeniowe-własności i zastosowanie”. Problemy projektowe 1976, nr 12, 3-12 (in Polish).
- [32] A. Gierek, L. Bajka, P. Liberski, “Blei-Aluminum-uberzuga auf Gusseisen”. Schwarzer Maschinenmarkt 1977 30 Marz, 9403 Goldach, 64-66.
- [33] A. Gierek, L. Bajka, “Kształtowanie struktury dyfuzyjnych powłok aluminiowych na stopach Fe-C na przykładzie żelaza Armco i białego żeliwa podutektycznego”, Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, PWN 1977, z. 1, 7-20.
- [34] G. Eggeler, H. Vogel, J. Friedrich, H. Kaesche, Pract. Met. (1985) 163-170.
- [35] T. Sendzimir: U.S. Patent No 2 110 893, 1938
- [36] J. A. Thornton and H. F. Graf: Metall. Trans. 1976, 7B, 607
- [37] A.Hrbek: Met Finish. J. Aug 1961, 298
- [38] N. E. Cook: in ‘Proc. 3rd int. Hot dip galvanizing conf. Oxford, 1954, 11-27, 1955, London Zinc Development Association.
- [39] H Bablik: in ‘Proc. 5th int. Hot dip galvanizing conf. Holland and Belgium, 1958, 115-155, 1959, London Zinc Development Association.
- [40] H.E. Townsend, L. Allegra Mater Pref. 1987, 26, (7) 37
- [41] M. L. Hughes: Sheet Met. Ind. Feb. 1956, 87
- [42] M. L. Hughes and D.P. Moses: Mettallurgia.Sept. 1953, 105
- [43] W. Gao and G. Li: Heat. Treat. Met. (China), june 1991, 11-15
- [44] M. Arora: Trans. Saest, Jan-Mar 1974,9,13

- [45] Patermarakis, G., Moussoutzanis, K., (2003): "A Transport Phenomenon Analysis Criterion Predicting Pitting Appearance During Al Anodizing In Sulphate Electrolytes", Chemical Engineering Communications, 190 (5): p. 1018–1040.
- [46] G. Kasaplar, (2007): "Aluminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Okzalik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi", Çukurova U. Fen Bil. Ens., Y L. Tezi.
- [47] H.Y. Lee, S.H. Jung, S.Y. Lee, Y.H. You, K.H. Ko, (2005): "Correlation between Al₂O₃ particles and interface of Al-Al₂O₃ coatings by cold spray", Applied Surface Science. Vol. 252, No. 5, pp. 1891-1898.
- [48] A. Temel, (2002): "Alüminyum Alaşımlarının Korozyonu", Makine Metal Teknolojileri Dergisi, S.117.
- [49] Y. Zhang, B.A. Pint, G.W. Garner, K.M. Cooley, J.A. Haynes, (2004): "Effect of cycle length on the oxidation performance of iron aluminide coatings", Surface and Coatings Technology, Vol. 188-189, pp 35-40.
- [50] A. Pasinli, N. S. Köksal, Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanan çelik malzemelerde yüksek sıcaklık oksidasyonunun incelenmesi, DEÜ Müh. Fak. Fen ve Mühendislik Dergisi CİLT: 11 SAYI: 31 YIL: 2009
- [51] Wheeling-Nisshin, Inc., Aluminum-Coated Steel Sheet. Type I Product Description.
- [52] Höganäs P.M. Company / <http://www.hoganas.com>
- [53] Mayda Toz Metal Sanayi, NOSAB - Bursa / www.maydatozmetal.com
- [54] Nuray Metal Aluminyum Sanayi, Doğanlar -İzmir / www.nuraymetal.com.tr
- [55] T.K.F. Metal Kaplama Kim. ve Mak. Sanayi, Bornova -İzmir / www.tkfmatal.com

ÖZGEÇMİŞ

Sedat KOÇANAOĞULLARI, 11.06.1975 'te İzmir'de doğmuştur. 1993 yılında Karşıyaka Gazi Lisesinden, 2001 yılında Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun olmuştur. 2005 yılında Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İmalat ve Konstrüksiyon bölümünde Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.