

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM KAPLANAN
DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞE UYGULANAN MİKRO ARK
OKSİDASYON İŞLEMİNİN KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa AÇIKSÖZ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

ARALIK 2017

**SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM KAPLANAN DÜŞÜK
KARBONLU ÇELİĞE UYGULANAN MİKRO ARK OKSİDASYON
İŞLEMİNİN KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa AÇIKSÖZ
(506151436)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506151436 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Mustafa AÇIKSÖZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM KAPLANAN DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞE UYGULANAN MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİNİN KARAKTERİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sakin ZEYTİN
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : **15 Kasım 2017**

Savunma Tarihi : **20 Aralık 2017**





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bilgi ve deneyimleriyle her zaman bana destek olan, maddi ve manevi her türlü olanağı sağlayarak deneysel çalışmalarımızın ilerlemesini sağlayan ve bize bu yoğun temposunda her zaman vakit ayırıp yol göstererek farklı bakış açısı kazanmamızı sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Murat BAYDOĞAN’a çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan ve motive eden, kendimi geliştirmem için bana destek olan Arş. Gör. Yakup YÜREKTÜRK’e çok teşekkür ederim.

İyi ve kötü anlarımda yanımda olan, karşılıksız yardımlarını esirgemeyen lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca birlikte okuma ve çalışma şansım olan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca yanımda olan, sevgilerini ve desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen AİLEME,

Sonsuz teşekkür ederim.

Kasım 2017

Mustafa Açıksöz
Metalurji ve Malzeme Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1.GİRİŞ	1
2.ÇELİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1 Çelik ve Sınıflandırılması.....	3
2.1.1 Düşük karbonlu çelikler	3
2.1.2 Orta karbonlu çelikler	5
2.1.3 Yüksek karbonlu çelikler	5
3. ALÜMİNYUM KAPLAMA YÖNTEMİ	9
3.1 Alüminyum Kaplama Yöntemi ve Sınıflandırılması	9
3.1.1 Elektrolitik kaplama yöntemi.....	9
3.1.2 Örtme yöntemi	9
3.1.3 Vakum yöntemi.....	10
3.1.4 Sprey alüminyum kaplama.....	10
3.1.5 Gaz alüminyum kaplama	10
3.1.6 Sıcak daldırma alüminyum kaplama.....	10
3.2 Alüminyum Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması	10
3.3 Alüminyum Kaplamanın Kullanım Alanları.....	11
3.4 Sıcak Daldırma Alüminyum Kaplama Yöntemi	12
3.4.1 İntermetalik tabakanın oluşum mekanizması.....	14
3.4.2 Alüminyum kaplama işlemini etkileyen faktörler	17
3.4.2.3 Daldırma sıcaklığının etkisi	20
4. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİ	21
4.1 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi.....	21
4.2 Mikro Ark Oksidasyonunda Kullanılan Donanımlar	21
4.3 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Avantajları ve Dezavantajları.....	23
4.4 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Uygulama Alanları	24
5.SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM KAPLANMIŞ ÇELİĞE UYGULANAN MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİ	25
6.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
6.1 Numune Hazırlama İşlemleri	29
6.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplama (HDA).....	30
6.3 Mikro Ark Oksidasyonu.....	31

6.4 Metalografik Çalışmalar	31
6.5 Yapısal ve Morfolojik Yüzey Karakterizasyonu	32
6.6 Aşınma Deneyleri	33
6.7 Yüksek Sıcaklık Oksidasyon Deneyleri	34
6.8 Sertlik Deneyleri	34
7. DENEYSEL SONUÇLAR	37
7.1 Mikroyapı İnceleme ve Sonuçları	37
7.1.1 Optik mikroskop inceleme sonuçları	38
7.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplama Sonuçları	38
7.3 Mikro Ark Oksidasyonu Sonuçları	44
7.4 X-Işını Difraksiyon (XRD) ve Enerji Dağılımı Spektrometresi (EDS) Sonuçları	45
7.5 Sertlik Sonuçları	49
7.6 Aşınma Deneyi Sonuçları	54
7.7 Yüksek Sıcaklık Oksidasyon Deneyi Sonuçları	60
8. GENEL SONUÇLAR	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	67

KISALTMALAR

HDA	: Hot Dip Aluminizing
MAO	: Mikro Ark Oksidasyonu
SDA	: Sıcak Daldırma Alüminyumlama
EDS	: Energy-dispersive X-ray spectroscopy
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını analizi (EDS)
XRD	: X-Ray Difraksiyonu
OES	: Optik Emsiyon Spektroskopisi
PEO	: Plasma Electrolytic Oxidation
SEM	: Scanning Electron Microscope
PBR	: Pilling Bedworth Ratio



SEMBOLLER

°C	: Santigrat Derece
W	: Aşınma İzinin Genişliği
D	: Aşınma İzinin Derinliği



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [5].	4
Çizelge 2.2 : AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [5].	5
Çizelge 2.3 : SAE / AISI standartına göre çelik türleri [6].	6
Çizelge 2.4 : Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere olan etkileri [14].	7
Çizelge 3.1 : Farklı alüminyum kaplama yöntemlerinin kıyaslanması [6].	11
Çizelge 3.2 : Karbon miktarının kaplama kalınlığına etkisi [16].	19
Çizelge 5.1 : Şekil 5.4’de verilen noktaların kimyasal dağılımı (% ağı.).	28
Çizelge 6.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan düşük karbonlu çeliğin kimyasal bileşimi (% ağı.).	29
Çizelge 6.2 : Deneysel çalışmalarda alüminyumun kimyasal bileşimi (% ağı.).	31
Çizelge 7.1 : Şekil 7.4’de belirtilen noktaların EDS analizleri.	40
Çizelge 7.2 : MAO işlemi sonrası çizgi EDS analizinin sonuçları.	48
Çizelge 7.3 : Şekil 7.16’da gösterilen bölgelerin sertlikleri..	50
Çizelge 7.4 : Aşınma hızı ve bağıl aşınma hızı ilişkisi	53



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Fe-C faz diyagramı [2].	4
Şekil 3.1 : Fe-Al denge diyagramı[10]	13
Şekil 3.2 : Difüzyon mekanizmasının şematik gösterimi [14].	14
Şekil 3.3 : İntermetalik tabakanın büyüme mekanizması[10].	15
Şekil 3.4 : Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işleminde gerçekleşebilecek reaksiyonların şematik gösterimi [10].	16
Şekil 3.5 : İntermetalik tabakanın çelik içinde büyümesi.....	18
Şekil 3.6 : Saf alüminyuma daldırılmış 1040 çeliğinin daldırma süresine bağlı olarak kaplama kalınlıkları a)10dk b)20dk c)40dk d)60dk [16]. ...	20
Şekil 3.7 : a) 700 °C b) 750 °C c) 800 °C d) 850 °C e) 900 °C’de 5 dakika daldırılmış numunelerin kesit görüntüleri [2].	20
Şekil 4.1 : Tipik Bir Mikro Ark Oksidasyon Düzenegi 1) Güç Kaynağı 2) Karıştırıcı 3) Anot 4) Katot 5) Elektrolit 6) Soğutma Suyu.	22
Şekil 5.1 : (a) SDA işlemi uygulanmış ve (b) SDA-MAO işlemi uygulanmış çeliğin kesitinin SEM fotoğrafları [26]	26
Şekil 5.2 : Alüminyum kaplanmış çeliğin EDX analizi [26].	26
Şekil 5.3 : Ortalama anodik voltaj-zaman grafiği[27].	27
Şekil 5.4 : Kaplama kesiti boyunca element oranlarının değişimi [27].....	28
Şekil 6.1 : GNR Metal Lab optik emisyon spektrometresicihazı.....	30
Şekil 6.2 : MF – 1000 elektrikli ergitme fırını ve grafit pota.....	30
Şekil 6.3 : Mikro ark oksidasyon cihazı.....	31
Şekil 6.4 : Hitachi TM – 1000 taramalı elektron mikroskobu ve Leica ICC50 HD optik mikroskob.....	32
Şekil 6.5 : GBC MMA 027 model X-ışınları cihazı.....	33
Şekil 6.6 : Aşınma iz profilinin şematik gösterimi.....	33
Şekil 6.7 : Oksidasyon işlemi için kullanılan Protherm elektrikli fırın ve Mettler Toledo AB-54S hassas tartı.....	35
Şekil 6.8 : Wilson Tukon 1102 sertlik testi cihazı.....	35
Şekil 7.1 : AISI 1010 çeliğinin optik mikroyapı fotoğrafı.....	37
Şekil 7.2 : 750°C’de yapılan kaplama işlemleri sonrasında AISI1010 çeliğinin mikroyapıları.....	39
Şekil 7.3 : 850 °C’de yapılan kaplama işlemleri sonrasında AISI1010 çeliğinin mikroyapıları... ..	40
Şekil 7.4 : Alüminyum kaplanmış çeliğin tipik kesit görüntüsü.....	41
Şekil 7.5 : 750 °C’de 2,5 ve 10 dakika süre ile kaplanan ve farklı koşullarda	

soğutulan numunelerin SEM kesit görüntüleri.....	42
Şekil 7.6 : 850 °C’de 2,5 ve 10 dakika süre ile kaplanan ve farklı koşullarda soğutulan numunelerin SEM kesit görüntüleri.....	43
Şekil 7.7 : 750 °C’de alüminyum kaplanmış çeliklerin kaplama tabakalarının kalınlıklarının zaman ve soğutma ortamına bağlı olarak değişimi.....	44
Şekil 7.8 : 850 °C’de alüminyum kaplanmış çeliklerin kaplama tabakalarının kalınlıklarının zaman ve soğutma ortamına bağlı olarak değişimi ...	45
Şekil 7.9 : Mikro ark oksidasyon işlemiyle seramik kaplanmış alüminyum kaplı çeliklerin SEM kesit görüntüleri... ..	46
Şekil 7.10 : Seramik kaplamanın yüzey morfolojisi... ..	46
Şekil 7.11 : 850 °C’de alüminyum kaplanan çeliklerin mikro ark oksidasyon işlemi sonrasında SEM kesit görüntüsü.....	47
Şekil 7.12 : MAO işlemi sonrası oluşan seramik tabakaların kalınlıkları.....	47
Şekil 7.13 : 750°C’de alüminyum kaplandıktan sonra MAO uygulanan numunenin X-ışınları difraksiyonu	48
Şekil 7.14 : 850°C’de alüminyum kaplandıktan sonra MAO uygulanan numunenin X-ışınları difraksiyonu.....	48
Şekil 7.15 : MAO işlemi sonrasında kaplamanın kesiti boyunca element dağılımı	49
Şekil 7.16 : Sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler	50
Şekil 7.17 : Yüksek Al oranına sahip FeAl ₃ fazının Al tabaka içinde birikmesini gösteren kesit SEM görüntüsü.....	51
Şekil 7.18 : Aşınma hızı ve bağlı aşınma hızı değerleri.....	53
Şekil 7.19 : AISI1010 çeliğinin aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi	54
Şekil 7.20 : (a) SDA ve (b) SDA-MAO işlemlerine uygulanan numunelerin relatif aşınma hızı değerleri	55
Şekil 7.21 : 1000°C’de uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyonu deneyinin farklı süreler ve numuneler için yüzdece ağırlık değişimi	56
Şekil 7.22 : Yüksek sıcaklık oksidasyonu işlemi sonrasında birim sürede ağırlık değişimi grafiği.....	58
Şekil 7.23 : 1000°C’de 1, 6, 24 ve 48 saat süreyle uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyonu deney sonucunda oluşan oksit tabakalarının kesit SEM görüntüleri.....	59
Şekil 7.24 : 1000°C’de yüksek sıcaklık oksidasyonu deneyi sonrası yüzey morfolojisi. a)1 saat b) 48 saat alüminyum kaplanmış çelik c)1 saat d) 48 saat işlemsiz çelik için	59
Şekil 7.25 : İşlemsiz çeliğin 1000C’de yüksek sıcaklık oksidasyonu sonrası X-ışınları analiz sonucu	60
Şekil 7.26 : Al kaplanmış çeliğin 1000oC’de yüksek sıcaklık oksidasyonu sonrası X-ışınları analiz sonucu	60

SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM KAPLANAN DÜŞÜK KARBONLU ÇELİĞE UYGULANAN MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİNİN KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Alüminyum kaplanmış çelikler düşük karbonlu çeliklerle kıyaslandığında çok daha iyi fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahiptir. Alüminyum kaplanmış çelikler sıkça yüksek sıcaklık uygulamalarında, oksidasyon ve korozyon direncinin istendiği ortamlarda kullanılırlar. Bu çeliklerin tercih edilmesinin bir diğer sebebi ise paslanmaz çeliğe göre maliyetinin düşük oluşudur. Bu çalışmada doğrudan çelik altlığı uygulanamayan mikro ark oksidasyon işlemine uygun altlık oluşturmak için sıcak daldırma alüminyum kaplama işlemi uygulandı. Bu işlem uygulanırken kaplama sıcaklığı, süresi ve soğutma ortamının intermetalik ve kaplama tabakasının kalınlığına ve yapısına etkisi incelenmiştir.

Son yıllarda sürekli gelişim gösteren yüzey teknolojileri alanında önemli bir yere sahip olan mikro ark oksidasyon yöntemi ile her türlü alüminyum, magnezyum, titanyum ve alaşımlarına kolayca uygulanabilmekte ve yüzey özellikleri geliştirilebilmektedir. Mikro ark oksidasyon yöntemi geleneksel anodizasyon yöntemine benzemektedir ancak işlem parametreleri ve kullanılan yüksek akım/voltaj sayesinde daha gelişmiş kaplamalar elde edilebilmektedir. Bir elektrolit çözeltisi içerisine yerleştirilen anot numuneye yüksek değerlerde voltaj verildiğinde malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşumu başlar. Bu geleneksel bir anodik oksidasyon işlemidir. Yükselen voltaj ile birlikte kritik bir voltaj değerine ulaşılır. Bozunum voltajı (dielectric breakdown) olarak adlandırılan bu kritik eşik değeri aşıldığında malzeme yüzeyinde mikro boyutlarda arklar oluşmaya başlar. Bu işlem mikro ark oksidasyon işlemi olarak tanımlanır. Diğer kaplama yöntemlerine göre oluşturduğu oksit tabakasının kalınlığı, yüksek yapışma kuvveti, porozite miktarı, düşük maliyeti ve çevreye zararsızlığı ile avantajlı bir görünüm sergilemektedir.

Bu çalışmada sıcak daldırma alüminyum kaplama yöntemiyle farklı parametrelerde kaplanan AISI1010 kalite çeliklere mikro ark oksidasyon uygulanmasıyla elde edilen oksit tabakasının morfolojik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. Daha sonra bu numunelere sertlik deneyleri, aşınma direnci deneyleri ve yüksek sıcaklık oksidasyon deneyleri uygulanmıştır. Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanan çelikler ve mikro ark oksidasyonu yöntemi ile seramik kaplanan çelikler taramalı elektron mikroskobu kullanarak kalınlıkları ve yapıları incelenmiştir. XRD difraksiyon yöntemiyle faz analizi yapılmıştır. Ayrıca bu kaplamaların EDS analizi, aşınma ve oksidasyon dirençleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kıyaslamalı olarak değerlendirildikten sonra en uygun parametreler belirlenmiştir. Bu parametreleri

etkileyen faktörler göz önünde bulundurularak en iyi sonucun elde edildiği durumlar belirlenmiştir.



CHARACTERIZATION OF MICRO-ARC OXIDIZED UNALLOYED LOW-CARBON STEEL AFTER HOT-DIP ALUMINIZING PROCESS

SUMMARY

Aluminizing is a process through which the surface of a metallic component is coated with a layer of aluminum. This process provides a strong intermetallic layer between the steel and its aluminum coating. Aluminized steel has good formability and good heat reflectivity below 450 °C and also has better resistance to corrosion than low carbon steel. Because of that aluminized steel can't be used for high temperature application. Aluminized steel is generally used for mufflers, high pressure vessels, water heaters and heat exchanger in residential furnaces. In order to use aluminized steel components at higher temperatures, hybrid metal/oxide coating structure has been proposed recently.

Low carbon steel is one of the important material for structural application because of the lower cost. The hot-dip Al coating is one of the technique for improving the oxidation resistance of low carbon steel. To protect the steel substrate from oxidizing environment, the Al layer on top of steel substrate can be oxidized to aluminum oxide layer which has high melting point and great hardness by performing high temperature oxidation. Hot-dipped aluminized steel can be used as component of exhaust system. As we know, steel is used widely in industry but its performances in bearing wear and corrosion are not optimal. Recently, some researchers report that the PEO techniques can be applied to steel, with good adhesion achieved between the steel and ceramic coating.

There are two distinct ways of plasma electrolysis techniques for making ceramic coatings on steel surface from the viewpoint of electrodes. One is cathodic micro-arc electrodeposition where the steel is used as the cathode and cathodic discharges occur during treatment. Studies of this method are limited, but it appears that the coating content comes mainly from the electrolyte. The other technique exploits an anodic barrier layer on the substrate. Since the steel material has low passivation in PEO electrolytes, the anodic voltage does not increase with treatment time, and the anodic discharge cannot occur. In order to enhance the passivation of steel, an anodic barrier layer is first deposited on substrate by a separate process.

Micro-arc oxidation (MAO), also known as plasma electrolytic oxidation (PEO), is a new processing technique which can generating oxide coatings on light metals such as Al, Mg, Ti, etc. and their alloys. It can be used to grow thick, hard ceramic coatings. This technique can offer protection against wear, heat and corrosion. This technique can be used in automotive, aerospace, medicine application. But, MAO is not applicable to steel surface directly.

There are many indirect way to apply advanced surface modification techniques to steel surface. One of them is hot dipping and micro-arc oxidation hybrid method. Steel

surface prepared to MAO process by using HDA. So the hybrid method of MAO after HDA is very encouraging method to get ceramic coating on steel surface. Three different layer was obtained this hybrid coating method. Al-Fe intermetallic layer near the steel substrate, Al rich layer between Al-Fe intermetallic layer and as a top layer ceramic coating. The aluminum-rich intermetallic compounds are emerged in hot-dip aluminizing process; thereby it enhances the resistance of wear and oxidation on steel.

In this study, aluminum layer was prepared by HDA on AISI1010 steel surface and then ceramic surface was obtained on the aluminum layer by using MAO. Dry sliding wear tests were conducted to all aluminized and MAO'ed samples and uncoated sample at room temperature. The resistance to high temperature oxidation of aluminized steel was studied. The progress of the HDA and MAO behaviors was researched. The phase composition, the thickness of coated layers, the cross sectional micro hardness and surface morphology was investigated.

Circular samples of 1010 steel were used as the substrate for HDA in this study. The samples were cut to diameters of 5mm and 10mm length then prepared for HDA by grinding (120-400#) with abrasive paper. All the samples cleaned ultrasonically in phosphoric acid and acetone for 15 min separately and then dried. These samples were tied with stainless steel wire for dipping procedure.

As a hot dipping material, pure aluminum was utilized. Aluminum was heated to 750°C and 850°C in graphite melting pot using electric melting furnace. After the reaching desired temperature, flux added to the melted aluminum and waited for 15 min. At the end of the process, prepared samples are immersed into the molten aluminum for 2 min, 5 min and 10 min and cooled by air, furnace and water quenching. Micro arc oxidation performed 450 AC power supply for 5 min to the aluminum surface in order to build the ceramic coating which prepared with HDA for the MAO process. The solution prepared for the usage of coating confected as 4.5 g/l NaAlO₂ and 2 g/l KOH in the distilled water. Stainless steel container used as an electrolyte. Also stainless steel container used as a cathode and sample used as an anode. The samples which prepared for MAO were dipped for 5min at 750°C and 850°C then cooled by air, water and furnace.

The samples were mounted for metallographic examination. To observe the cross sectional micrograph, scanning electron microscope (SEM) were used. The sample used for the examinations are polished with silica paste after grinding with the SiC sandpaper (240-2500#). Thin gold film sprayed on the prepared samples for enhance the conductivity. The phase composition of coating layers examined by EDS. Crystallographic structure obtained by using X-ray diffraction.

Micro hardness measurements were conducted by a micro Vickers hardness tester (Wilson) at the maximum load of 25 g. At least ten measurements were done from every layer and then averaged.

Wear test samples of dimension diameter 5mm and length 10mm were prepared. The surface of the wear test samples cleaned by acetone before the tests. The wear tests are performed at a normal load of 3N corresponding to vertical movement of 2mm. The worn surfaces of the samples were examined using 3D optical profilometer and SEM.

The high temperature oxidation tests were done at 1000°C for 1h, 6h, 24h and 48h. The samples aluminized at 750°C for 5 min and quenched in water due to the highest thickness of Al layer and uncoated steel samples were placed into resistance furnace. The samples were heated in air to 1000°C over 1 hour heat-up period. After reaching

the required temperature, waited for 1h, 6h, 24h and 48h. Then, the samples were cooled to the room temperature in air.





1. GİRİŞ

Çelik, geçmişten günümüze en sık kullanılan yapısal malzeme olmuştur. Çeliğin sahip olduğu yüksek dayanım, elastisite, süneklik, tokluk gibi fiziksel özellikler ve bunun yanında kolay proses edilebilirliği sayesinde yapısal uygulamalarda en yaygın kullanılan malzeme çeliktir. Çeliğin bu bahsedilen iyi özelliklerinin yanı sıra, düşük yorulma dayanımı, gevrek kırılmanın ve burulmanın tahmin edilememesi, düşük korozyon direnci ve özellikle düşük karbonlu çelikler için yüksek sıcaklığa dayanımının az olması gibi istenmeyen özellikleri de vardır [1,2].

Çelik yüzeyinin özellikleri arttırmak için uygulanan çok farklı sayıda ileri yüzey modifikasyon işlemleri vardır. Son yıllarda sıkça kullanılmaya başlanan yöntemlerden bir tanesi de sıcak daldırma alüminyum kaplama ve mikro ark oksidasyonu işleminin birlikte yapılmasıdır [3]. Mikro ark oksidasyonu çelik yüzeye doğrudan uygulanamayacağı için ara bir işlem olarak alüminyum kaplama uygulanmaktadır. Bu sayede 3 farklı kaplama tabakası elde edilebilir. Çeliğin üzerinde sırasıyla Fe-Al intermetalik tabakası, Al zengin bölgesi ve en üstte seramik tabaka elde edilebilir [4].

Bu çalışmada tek parametrede uygulanan mikro ark oksidasyon işlemi ile yüzeylerinde oksit tabakası oluşturulmuş alüminyum kaplı AISI1010 çelik numunelerin yüzey mekanik özellikleri incelenmiştir. Uygulanan sıcak daldırma alüminyum kaplama yöntemine sıcaklığın, sürenin ve soğutma ortamının etkileri ve oluşan kaplama tabakaları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.



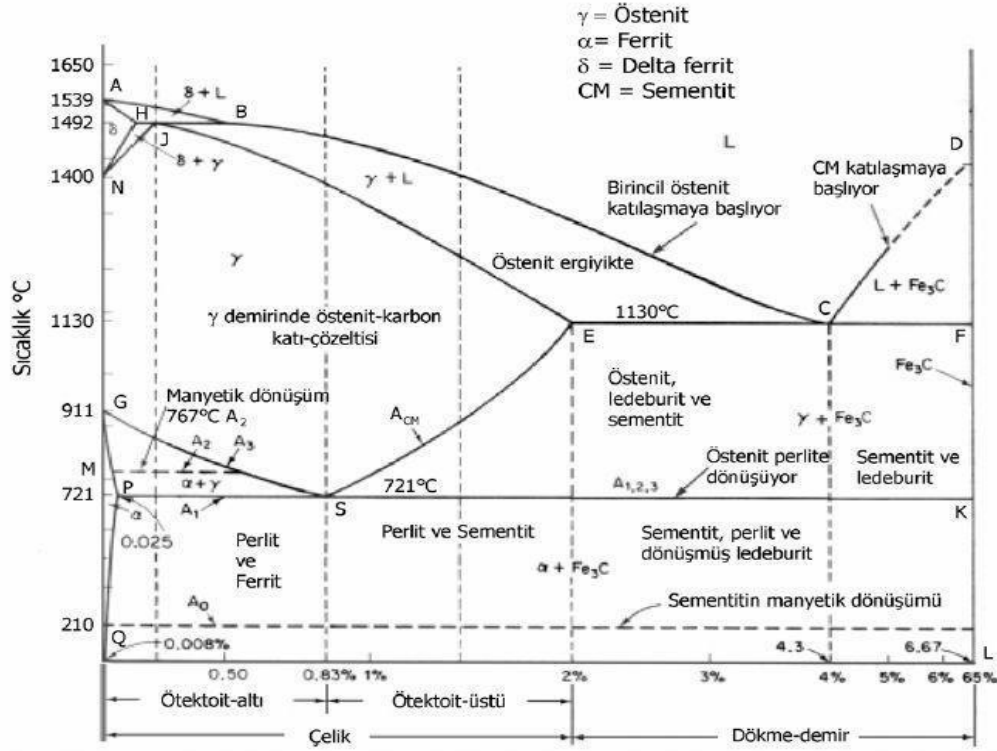
2. ÇELİKLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Çelik ve Sınıflandırılması

Çelik, demir ile genellikle % 0.2-2.1 oranlarında değişen karbon miktarının bileşiminden meydana gelen bir alaşımdır. Çelik alaşımındaki karbon miktarları çeliğin sınıflandırılmasında etkin rol oynar. Demir-karbon denge diyagramı Şekil 2.1’ de verilmiştir. Çeliğe farklı özellikler kazandıran içerdiği elementlerin kimyasal bileşimi ve çeliğin içyapısıdır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah, normalizasyon vs.) ile içyapı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelik elde edilir. Mangan (Mn), Fosfor (P), Kükürt (S) ve Silisyum (Si) üretim sırasında hammaddeden kaynaklanan elementler olup, çelik bünyesinde belirli oranlarda bulunur. Diğer elementler ise (Cr, Ni vs.) ferro-alyajlar halinde istenilen miktarlarda çelik bünyesine ilave edilir. Çelik demir cevherinden veya hurdadan geri dönüşüm ile iki şekilde üretilmektedir. Sıvı çelik üretildikten sonra döküm ile ingot olarak veya sürekli döküm yöntemi ile kütük veya blum olarak şekillendirilir [5].

2.1.1 Düşük karbonlu çelikler

Bu gruba % 0.20’ ye kadar karbon içeren çelikler dahil edilebilirler. Mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak yumuşak çelikler olarak da tanınırlar. Düşük karbonlu çelikler dünya çelik üretiminin en büyük miktarını kapsarlar. Özellikle, yassı mamuller ile inşaat sektörü ve temel yapılarda kullanılan çelik çubuk ve profiller düşük karbonlu çelikler sınıfındadırlar. Düşük karbonlu çelikler, düşük karbon içeriklerinden dolayı, ısıtıl işlem ile kütleli olarak yeterince sertleştirilemezler. Ancak sementasyon, nitrürleme v.b. yüzey sertleştirme işlemleri ile yüzeyleri sertleştirilebilir [4].



Şekil 2.1 : Fe-C faz diyagramı [2].

AISI 1010 çeliği içerdiği % 0,1 karbon oranıyla düşük karbonlu çelik sınıfına girmektedir. Bu çelik, düşük dayanımlı çelikler arasındadır ancak su verme ve temperleme işlemleri ile dayanımı artırılabilir. AISI 1010 gibi düşük karbonlu çelikler, soğuk başlı tutturaç ve civata yapımında kullanılırlar. AISI 1010 çeliklerinin işlenebilirlikleri, özellikle soğuk çekme ve soğuk işlenmiş durumlarda oldukça iyidir. AISI 1112 çeliği referans alındığında (% 100 işlenebilir olarak farz edilir), AISI 1010 çeliği % 55 işlenebilirlik oranına sahiptir. AISI 1010 Çeliği bütün standart kaynak yöntemleriyle kaynaklanabilir. Bu çelikler genelde tavlanmış ya da yüzeyi sertleştirilmiş hallerinde kullanılırlar [5]. AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri Çizelge 2.1’ de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [5].

Poisson Oranı	Elastik Modül (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
0.27-0.30	190-210	305	365	20

2.1.2 Orta karbonlu çelikler

Bu gruptaki çelikler % 0.20-0.60 arasında karbon içeren çeliklerdir. Karbon miktarına bağlı olarak orta derecede mekanik özelliklere sahiptirler. Bu grupta ki çeliklerin en büyük özellikleri, ısıl işlemle yeteri derecede sertleştirilebilmeleridir. Bu bakımdan orta karbonlu çeliklerin kullanım sahaları özellik arz eder. Özellikle makine imalat sanayinin tercih ettiği çeliklerdir. İşlenebilme ve şekil alabilme kabiliyetleri düşük karbonlu çeliklere göre daha düşüktür. Bu gruptaki çeliklerin kaynak kabiliyetleri de az karbonlu çeliklere nazaran düşüktür. Zira kaynak esnasında meydana gelen kontrolsüz ısıl etkiler çeliğin yapısal değişiminin de kontrolsüz olmasına sebebiyet verir. Bunun neticesinde malzemelerde hatalara sebep olabilir. Bu sebepten dolayı orta karbonlu çeliklerin özellikle alaşım elementi ihtiva edenlerinin kaynak işlemlerinde özel itina göstermek gerekir [4].

AISI 1040 çeliği düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek karbon (% 0.40) içerdiğinden dolayı orta karbonlu çelik sınıfına girmektedir. Bu çelikler yüksek dayanıma sahiptirler. Krank mili yapımında, kavrama ve soğuk başlı parçaların yapımında kullanılır. İşlenebilirliği iyidir, AISI 1112 çeliği referans alındığında (% 100 işlenebilir olarak farz edilir), AISI 1010 çeliği % 60 işlenebilirlik oranına sahiptir. AISI 1040 çeliği bütün kaynak yöntemleriyle kaynaklanabilir. Bu çelikler 850-950°C sıcaklıklarda ısıl işlemi takiben su verme ve temperlemeyle sertleştirilebilirler [5]. AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2 : AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [5].

Poisson Oranı	Elastik Modül (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzunluğu (%)
0.27-0.30	190-210	353	528	30.2

2.1.3 Yüksek karbonlu çelikler

% 0.60' dan daha fazla karbon ihtiva eden çeliklerdir. Normal halde yüksek mukavemetli ve sünekliği az olan çeliklerdir. Isıl işlemlerle sertleştirilebilmeleri sayesinde yüksek sertlik kazanırlar. Bu bakımdan aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliğe sahiptirler. İşlenme ve şekil alabilme kabiliyetleri, düşük ve orta karbonlu

eliklere göre daha düşüktür. Kaynak kabiliyetleri de düşük olup daha özel tekniklerle kaynakları yapılabilir. Bu gruptaki çelikler daha ziyade takım üretiminde kullanılırlar. Yüksek karbonlu çeliklerin bileşiminde bulunan karbon miktarının sınırı, demir-karbon denge diyagramı gereğince % 2'ye kadar çıkabilse de, tatbikatta uygulamada bu değeri % 1.2-1.4 ile sınırlıdır. Özellikle yüksek karbonlu çelikler, düşük ve orta karbonlu çeliklere göre daha kolay su alabilirler ve elde edilen martenzitik yapının sertliğı de daha fazladır [4].

Çizelge 2.3'de AISI standartına göre çeliklerin içerdikleri alaşım elementine göre türlerine ayrılması ve bu türlerin sembolleri görülmektedir. Çizelge 2.4'de alaşım elementinin mekanik özelliklere etkisi verilmiştir. Bu izelgede aynı eleşim elementinin östenitik ve perlitik çeliklerin mekanik özelliklerine ne şekilde etki ettiğı belirtilmiştir.

Çizelge 2.3 : SAE / AISI standartına göre elik türleri [6].

elik Türleri	
Sembol	Anlamı
1	Karbonlu elikler
2	Nikelli elikler
3	Nikel ve krom alaşımlı elikler
4	Molibdenli elikler
5	Kromlu elikler
6	Krom ve vanadyum alaşımlı elikler
7	Volframlı elikler
8	Mangan ve silisyum alaşımlı elikler
9	Silisyumlu elikler

Çizelge 2.4 : Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere olan etkileri [14].

Alaşım elementi	Sertlik	Mukavemet	Akma Noktası	Uzama	Kesit Daralması	Darbe Direnci	Elastisite	Yüksek Sıcaklığa Dayanım	Soğuma Hızı	Karbür Oluşumu	Aşınma Direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oksitlenme Eğilimi	Korozyon Davranımı
Si	+	+	++	-	~	-	++ +	+	-	-	---	-	-	-	○
Mn*	+	+	+	~	~	~	+	~	-	~	--	+	-	~	○
Mn**	---	+	-	+++	~	○	○	○	--	○	○	---	---	--	○
Cr	+	++	++	-	-	-	+	+	---	++	+	-	○	---	+++
Ni	+	+	+	~	~	~	○	+	--	○	--	-	-	-	○
Al	○	○	○	○	-	-	○	○	○	○	○	--	○	--	○
W	+	+	+	-	-	~	○	+++	--	++	++ +	--	--	--	○
V	+	+	+	~	~	~	+	++	-	+++ +	++	+	○	-	+
Co	+	+	+	-	-	-	○	++	++	○	++ +	-	~	-	○
Mo	+	+	+	-	-	-	○	++	--	+++	++	-	-	++	○
S				-	-	-	○	○	○	○	○	---	++ +	○	-
P	+	+	+	-	-	---	○	○	○	○	○	---	---	--	++
* perlitik çeliklerde ○ önemsiz + artırır ** östenitik çeliklerde ~ değiştirmez - azaltır															



3. ALÜMİNYUM KAPLAMA YÖNTEMİ

3.1 Alüminyum Kaplama Yöntemi ve Sınıflandırılması

Alüminyum kaplama yöntemi, metalik malzeme yüzeyinin alüminyum tabakası ile kaplanmasıdır. Çelik ve alaşımları, endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere en çok alüminyum kaplanan malzemelerdir [7]. Alüminyum kaplanmış çeliklerin şekillendirilebilirliği çok yüksektir ve derin çekilebilirlik, eğme gibi özelliklerin gerekli olduğu parçaların üretiminde kullanılabilirler. Aynı zamanda 450 °C altında ısıyı yansıtma özelliği vardır.

Alüminyum kaplanan alaşımsız ya da alaşımlı çeliklerin yüksek sıcak oksidasyon direncinde ve korozyon direncinde artış elde edilir [7].

Endüstriyel boyutlarda metal üzerine alüminyum kaplama işleminin çok sayıda farklı yöntemi vardır. Bunlar; elektrolitik kaplama, örtme, gaz, sprej ve sıcak daldırma alüminyum kaplama yöntemleridir.

3.1.1 Elektrolitik kaplama yöntemi

Bu yöntemde elektrotlar ya alüminyum klorür ya da etil bromit ve benzen batırılmış alüminyum içerir. Kaplanacak yüzey önce HCl çözeltisine daldırılarak temizlenir. Bu yöntemde kaplama hızı çok yavaştır. Yaklaşık olarak 30 dakikada 0.01 mm kaplama kalınlığına ulaşılabilir [2,8].

3.1.2 Giydirmeye (cladding) yöntemi

Örtme yöntemi, çelik ve alüminyum plakalarının soğuk sarma yöntemi ile sarılması sonucu arada metalik bir bağın oluşmasıyla elde edilen kaplamadır. Örtme kalınlığı genelde kaplanacak malzemenin kalınlığının %2-%5 kalınlığında olur [2,8].

3.1.3 Vakum yöntemi

Bu yöntemde, saf alüminyum yada alüminyum alaşımı önce buharlaştırılır daha sonra da kaplanacak yüzey üzerine yoğunlaştırılarak bir kaplama elde edilir. Alüminyum eritmek için 1400 °C'ye kadar çıkan elektron ışın cihazı ve $10^{-3} - 10^{-5}$ mmHg basıncında vakum odası gereklidir. Bunlara ek olarak kaplanacak yüzeyin 250-400 °C sıcaklığa ısıtılması gereklidir. Bu yöntemde çok iyi bir yapışma elde edilir [2,8].

3.1.4 Sprey alüminyum kaplama

İstenilen kalınlıkta alüminyum kaplama daha önceden temizlenmiş yüzeye püskürtülür. Bu yöntemde eritilmiş metal 25-60psi basınçla püskürtülür. Bu yöntemde kaplamanın yüzeye yapışması düşük olsa da kaplanacak yüzeyin pürüzlülüğü artırılarak yapışma da artırılabilir. Ayrıca kaplanan yüzeyi 850-1250 °C aralığında kısa bir süre tavlایarak da yapışma artırılabilir [7,8].

3.1.5 Gaz alüminyum kaplama

Bu yöntem sırasında metal yüzeye gaz fazındaki alüminyum klorür emdirilir. Bu karışım 45% Al, 45% Al₂O₃ ve 10% AlCl₃ 'e denk gelmektedir. Daha sonra metal ısıtılarak yüzeyde kaplama elde edilir.

Bu yöntem endüstriyel olarak yaygın kullanılan yöntemlerden biri değildir ve bunun nedeni zor ve kullanılan enerji bakımından masraflı bir yöntem olmasıdır [7].

3.1.6 Sıcak daldırma alüminyum kaplama

Bu yöntemde eritilmiş alüminyum içine kaplanacak metalin daldırılması ile bir kaplama elde edilir. Kaplamanın kalınlığı ve yapısı, kaplama sıcaklığı ve süresine bağlıdır. Endüstriyel olarak en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Kaplanacak yüzeyin temiz ve pürüzlü olması kaplamanın yüzeye yapışmasını arttıran etkilere sahiptir.

3.2 Alüminyum Kaplama Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Çelik yüzeyini alüminyum kaplamak için birçok yöntem olmasına rağmen, V.R.Ryabov'un yaptığı çalışmalar gösteriyor ki sıcak daldırma yöntemi

uygulanabilirliği yönünden en çok tercih edilen yöntemdir [6]. Çizelge 3.1’de 5 farklı kaplama yöntemi 4 farklı parametreye dayanarak kıyaslanmıştır.

Aşağıdaki tablo göz önüne alındığında sıcak daldırma yönteminin diğer yöntemlere göre neden daha çok tercih edildiği anlaşılabilir. Sıcak daldırma yöntemi çelik kaplamada kolay bir yöntem olmasına rağmen bazı durumlarda yüzey temizliği, cüruflaştırıcı gibi ekstra maliyetler çıkabilir.

Çizelge 3.1 : Farklı alüminyum kaplama yöntemlerinin kıyaslanması [6].

Yöntem	Kaplama kalınlığı* (mm)	Kaplama maaliyeti	Kaplama verimi	Kaplama hızı
Sıcak Daldırma	0.01-0.08	1	2	2
Örtme	0.01-0.13	2	3	1
Elektrolitik	0.003-0.05	3	1	3
Sprey	0.05-0.5	4	1	4

*1 en iyi sonucu temsil etmektedir.

3.3 Alüminyum Kaplamanın Kullanım Alanları

Alüminyum kaplanmış çelikler yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon ve korozyon direnci yüksek istenen alanlar başta olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Daha yüksek oksidasyon ve korozyon direncine sahip çelik kullanmak yerine alüminyum kaplanmış çelik kullanmak aynı zamanda maliyeti de ciddi oranda düşürmektedir. Bu çeliklerin en yaygın kullanıldığı alanlar şu şekildedir [9];

- Endüstriyel fırınlar
- Otomotiv egzozları ve susturucuları
- Su ısıtıcıları
- Şömine ve barbekü ısıtıcı ekipmanları

- Pişirme tepsileri

3.4 Sıcak Daldırma Alüminyum Kaplama Yöntemi

Sıcak daldırma yöntemiyle çelik yüzeyleri kaplama, alüminyum kaplamanın en eski yöntemlerinden biridir. Bu yöntem 4 ana basamaktan oluşur;

- Ön işlemler: Bu aşamada kaplanacak çelik yüzey mekanik ve kimyasal olarak kirden, yağdan ve pastan temizlenir.
- Cüruflaştırma: Kaplanacak çelikleri ergimiş alüminyuma daldırmadan önce yüzeyde oluşan oksitlerden kurtulmak için uygulanır. Ergimiş metale eklenen bir tuz karışımı bir süre bekletildikten sonra yüzeyde alınır ve bir sonrası aşamaya geçilir.
- Kaplama: Kaplanacak numune yapılacak çalışmanın parametrelerine göre bir süre ergimiş metal içine daldırılır.
- Kaplama sonrası işlemler: Kaplama aşamasından sonra elde edilen kaplanmış çelikler çeşitli ısı işlemlere ya da farklı soğutma koşullarında işlem görebilir.

Sıcak daldırma yöntemiyle Al kaplama işlemi sırasında Fe ve Al fazları arasında gerçekleşen difüzyon sonucunda Fe-Al intermetalleri oluşmaktadır. Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işlemi kendi içinde iki gruba ayrılır. Bunlar Al+%11Si alaşımıyla hazırlanan ‘‘tip 1’’ ve saf alüminyum ile hazırlanan ‘‘tip 2’’dir. 1.tip yöntemde daha iyi plastik özellikler elde edilirken düşük korozyon dayanımı vardır. 2.tip de ise daha iyi yansıtma ve korozyon direnci elde edilir ancak buna bağlı olarak daha kötü plastik özelliklere sahip olan bir kaplama oluşur [10].

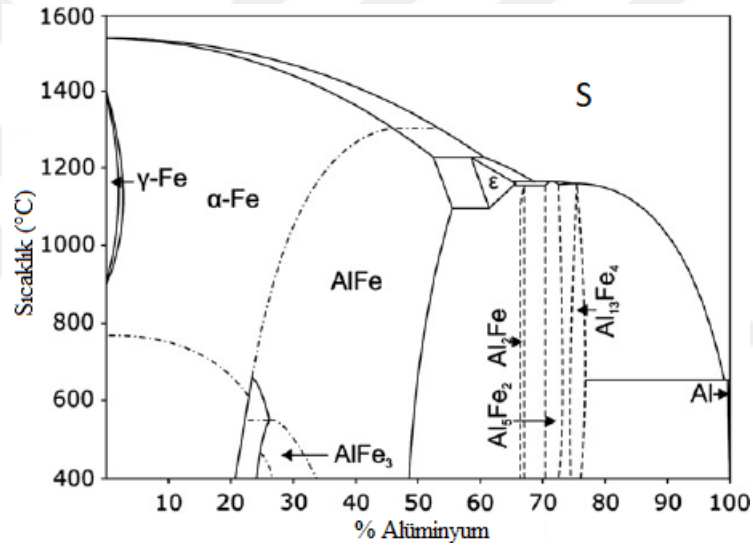
Alüminyum kaplama, çeliği yüksek sıcaklıkta oksidasyon ve korozyon direncini 1000 °C’ye kadar artırır. Kaplama sıcaklığında, ergimiş alüminyum ve çelik altlık arasında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda kaplama ve altlık arayüzeyinde sert ve kırılgan intermetalik tabaka oluşur. Bu durum çeliğin sünekliğini ve daha sonra uygulanacak dövme, eğme gibi plastik deformasyon kabiliyetini düşürebilir [11].

Bu intermetalik tabaka çelik içinde başlıca Fe_2Al_5 olmak üzere $FeAl$ ve $FeAl_3$ formunda parmaklı bir yapıda ilerler [12]. Fe, Al ile belli koşullar altında reaksiyona girerek $FeAl_2$, $FeAl_3$, Fe_2Al_5 , $FeAl$ ve Fe_3Al intermetaliklerini oluşturur. Çelik ile sıvı alüminyum arasındaki etkileşim Şekil 3.1’de verilmiştir.

FeAl_2 , FeAl_3 ve Fe_2Al_5 intermetalikleri yüksek alüminyum içerir ve kırılgandır [12]. Fe_3Al ve FeAl ise daha yüksek demir içeriğine olup, daha iyi aşınma, oksidasyon ve korozyon direncine sahiptir.

İntermetalik tabakanın kalınlığı daldırma sıcaklığı ve süresiyle doğrudan ilişkilidir. Altlık malzeme olan çeliğin karbon oranı ve çeliğin kompozisyonu intermetalik tabakanın büyümesini ve morfolojisini etkiler [13]. Aynı zamanda ergimiş alüminyumun viskozitesi ve altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğü kaplama kalınlığını etkiler.

Kaplama kalınlığı etkileyen diğer faktörler ise, altlık malzemenin daldırma hızı, altlık malzemenin sıcaklığı ve daldırma sonrası ergimiş metalden çıkartılma hızı olarak belirtilebilir.

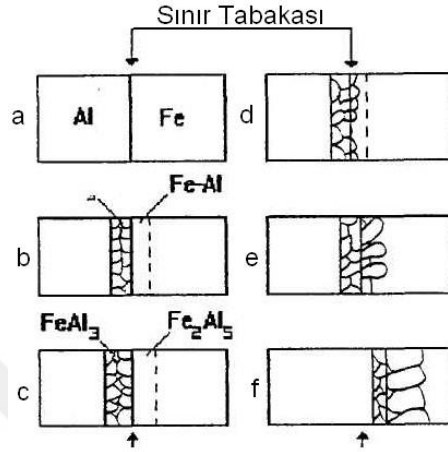


Şekil 3.1 : Fe-Al denge diyagramı [10].

Kaplama kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biri ise kaplanacak yüzeyin temiz olmasıdır. Eğer yüzey temiz değilse, ergimiş alüminyum yüzeyi tamamen ıslatamaz ve buna bağlı olarak yüzeyde kaplanmamış bölgeler bulunabilir. Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama yönteminin en önemli farklarından biri ise, yüzeyi alüminyumla kaplama sırasında oluşan reaksiyonlar sayesinde intermetalik tabaka oluşur ve tabakanın büyümesi soğuma sırasında da devam eder. Ayrıca bu intermetalik tabaka oluşurken alüminyumun çelik içine; demir atomlarının ise dışarıya doğru difüzyonu söz konusudur. İntermetalik tabakanın oluşum mekanizması bir sonraki başlıkta detaylı olarak anlatılacaktır.

3.4.1 İntermetalik tabakanın oluşum mekanizması

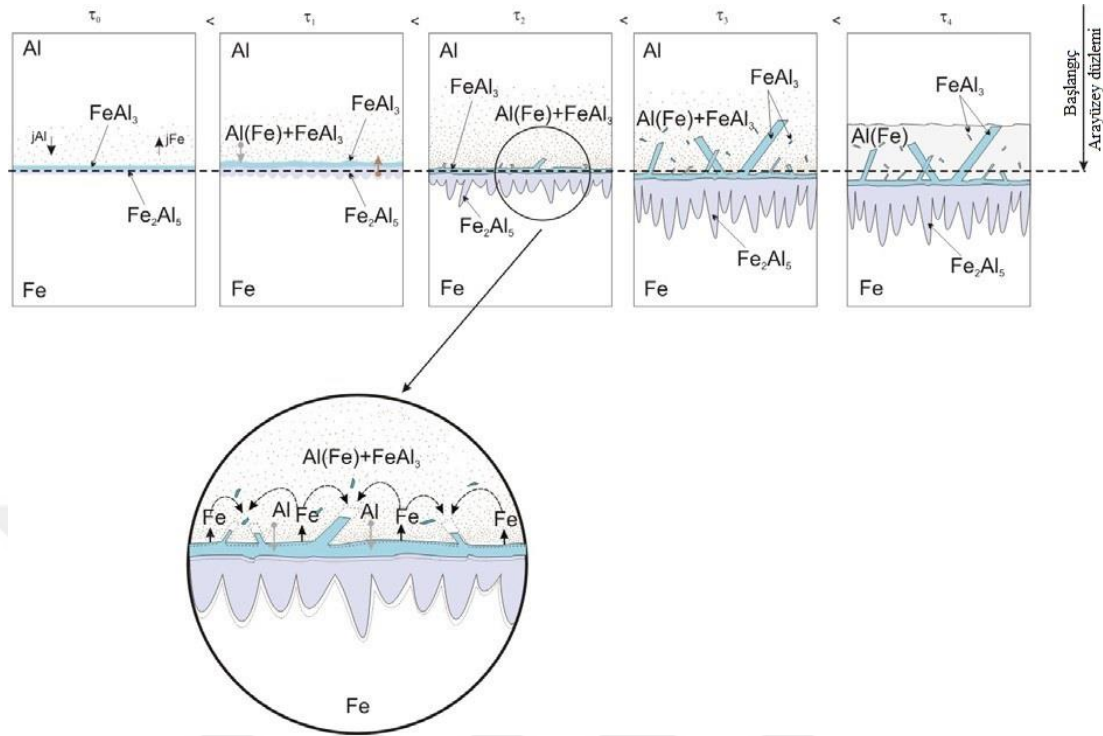
Alüminyum kaplamanın büyüme mekanizmasını açıklamak için kaplanacak metal ve alüminyum banyo arasında gerçekleşen difüzyon mekanizmalarını incelemek gerekir. Bu mekanizma Şekil 3.2’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2 : Difüzyon mekanizmasının şematik gösterimi [14].

Demir ve demir esaslı alaşımlar ile alüminyum banyo arasında meydana gelen reaksiyonlar, difüzyon tabakasının oluşum ve büyüme sürecine bağlı olarak farklı aşamalarda incelenebilir. Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama işleminde intermetalik tabakanın büyümesinin her bir aşaması Şekil 3.3’de gösterilmiştir. T_0 aşamasında kaplanacak olan “soğuk” metal sıvı alüminyum ile temas ettiğinde banyoda bölgesel olarak soğumalar (bazen banyo içinde katılaşma bile olabilir) gerçekleşir. Bu ısı transfer süreci daldırılan metal difüzyon için gerekli sıcaklığa ulaşana kadar devam eder. Difüzyon reaksiyonları başlayana kadar sıvı alüminyum ve metal arasındaki ısı transferi devam eder. Bu süreç boyunca metal ile alüminyum arasında ekzotermik reaksiyonlar devam eder. Fe-Al fazlarının oluşum reaksiyonları sırasında eş zamanlı olarak sıvı alüminyum metal yüzeyine yayılır. Reaksiyon enerjisinin beslenmesi ile birlikte yüzey oluşum prosesi yoğun şekilde devam eder. Katı-sıvı arayüzeyinde gaz absorpsiyonu olmadığı koşul kaplama büyümesi için daha uygundur. Bu koşulu sağlamak için flux kullanılır. Fe-Al fazlarından (FeAl_3 yada Fe_2Al_5) hangisinin metal yüzeyinde daha önce oluştuğunu açıklamak oldukça zordur. Literatürde yaygın olarak FeAl_3 fazının daha önce oluştuğu söylenmektedir [6,10]. Ancak, kaplamanın büyüme mekanizmasının tanımına bakıldığında, prosesin bu aşamasında Fe-Al denge diyagramında hangi fazın ilk olarak ortaya çıktığının

önemsiz olduğu görülmektedir. Metalin yüzeyi reaksiyon ürünleriyle kaplandığında sürecin ilk aşaması tamamlanmış olur.



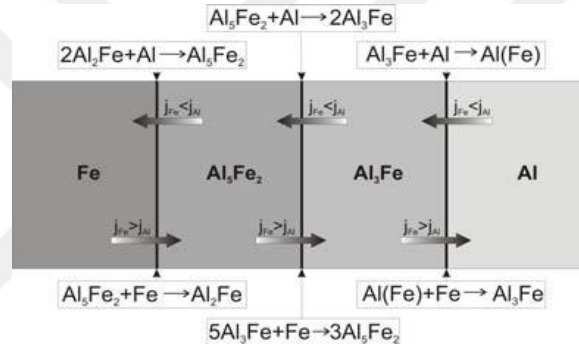
Şekil 3.3 : İntermetalik tabakanın büyüme mekanizması [10].

T_1 aşamasında, iki yönlü difüzyonun sonucu olarak, kristolagrafik latislerin fazları ile difüzyona uğrayan metallerin olduğu yapıların fazları farklıdır. Difüzyon reaksiyonları sırasında fazların oluşumu difüzyona uğrayan bileşenlerin konsantrasyonuna bağlı olarak devamsızlık gösterebilir. Bu nedenle homojen olmayan bölgeler vardır. Bu proses ayrıca şu aşamaları içerir;

- Faz sınırı alanında Fe ve Al'nin difüzyonu,
- Fe ve Al atomlarının faz sınırı boyunca difüzyonu nedeniyle var olan bazı bağları bozup aralarında yeni bağlar oluşturması,
- Yeni intermetalik fazların içinde elementlerin difüzyonu.

Bu aşama metalden alüminyuma ve alüminyumdan metale difüzyonun devamı olarak görülebilir. Bu nedenle kısa süre içerisinde ikili Fe-Al sistemleri oluşur. Fe-Al denge diyagramına göre, alüminyum kaplama işlemi için çıkılan sıcaklık değerlerinde, Al kaplamanın yapısı alüminyumun demir içinde katı çözeltisi ve artan alüminyum oranı ile intermetalik fazlar (Fe_3Al , $AlFe$, ζ - $FeAl_2$, η - Fe_2Al_5 , and θ - $FeAl_3$) içermelidir. Ayrıca bu aşamada katı faz metalik sıvı içinde çözünmeye başlar. T_1 aşamasıyla kaplamanın büyümeye başladığı aşama sona erer.

T₂ aşaması, yukarıda bahsedilen başlangıçtan sonra oluşan intermetalik tabakanın daha da büyüdüğü aşamadır. Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işleminde reaksiyonlar çok hızlı gerçekleşmesine rağmen büyümeyi çok daha yavaş olan difüzyon kontrol ettiği gözlemlenmiştir [10]. Yapılan çalışmalar, intermetalik tabakanın kalınlığını sadece 2 fazın kontrol ettiğini göstermiştir. Bunlar η -Fe₂Al₅ and θ -FeAl₃ fazlarıdır [15]. Fe-Al faz diyagramında görülen diğer fazların difüzyon katsayıları çok düşük olduğu için tabaka kalınlığını etkilemesi söz konusu değildir. Farklı intermetalik fazları arasında olabilecek reaksiyonlar Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Herbir fazın yerdeğiştirme yönünü tespit edebilmek için difüzyona uğrayan elementlerin difüzyon katsayılarını belirlemek gereklidir. Daha önce yapılan çalışmalarda tabakaların büyümesi alüminyum fluxı ve bunun altlık malzemeye difüzyonuna bağlıdır.



Şekil 3.4 : Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işleminde gerçekleşebilecek reaksiyonların şematik gösterimi [10].

FeAl₃ intermetalik fazı alüminyum banyosuyla temas halindedir ve banyodaki alüminyumun doygunluğuna bağlı olarak en dıştaki ince tabakada değişkenlik görülebilir. Tam tersi şekilde de alüminyum banyosuna intermetalik geçişi olarak banyonun konsantrasyonu değişebilir. Banyodaki alüminyum atomları metal yüzeye doğru difüzyona uğrarken faz sınırlarındaki intermetalik bileşiklerle de reaksiyona girebilir. Fe₂Al₅ fazının büyümesinde etkili olan reaksiyon şu olabilir;



FeAl₂ fazını kaplama mikroyapısında görmek mümkün değildir fakat bu fazın Fe₂Al₅ oluşumunda etkisi olduğu bilinmektedir.

FeAl₃ ve Fe₂Al₅ arayüzeyinde ise şu reaksiyonun gerçekleşmesi ile FeAl₃ fazının büyümesi gerçekleşir;



Bu difüzyon yolunu uzatır ve alüminyumun difüzyonu bu faz içinde kısalmır.

T₃ aşamasında proses hala devam etmektedir. Fe₂Al₅ fazı daldırma süresine bağlı olarak büyümeye devam eder. Ayrıca süreç devam ettikçe alüminyum banyo içinde çözünen demir atomlarının içeriği de artmaktadır. Difüzyon bölgesinde dinamik durumdaki bir denge oluşmaya başlar. Bu denge alüminyum atomlarının farklı intermetalik fazlara yaptığı difüzyon ve demir atomlarının alüminyuma yaptığı difüzyon miktarına bağlıdır.

T₄ aşamasında, işlem sonrası kaplama ürünleri elde edilmeye başlamıştır. Isı alışverişine bağlı olarak işlemin uygulandığı yüzeyde bir miktar ısı kaybının meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu aşamada, metal yüzeyi üzerinde oluşan sağlam intermetalik tabakalar görülmektedir.

3.4.2 Alüminyum kaplama işlemini etkileyen faktörler

Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işlemini etkileyen bir çok faktör vardır. Bu faktörler, intermetalik tabakanın kalınlığını, morfolojisini ve fazını etkilerler.

- Fe ve Al'un kaplama sırasında oluşturdıkları kimyasal reaksiyona bağlı olarak intermetalik tabakanın oluşumu.
- Kaplama arayüzeyleri daldırma süresi ve kaplama sıcaklığı tarafından etkilenir.
- Çeliğin karbon içeriği intermetalik tabakanın morfolojisini ve büyüme hızını doğrudan etkiler.
- Altlık malzemenin ıslanması ergimiş metalin viskozitesiyle etkilenebilir.
- Altlık malzemenin yüzey pürüzlülüğü kaplama kalınlığını etkiler.

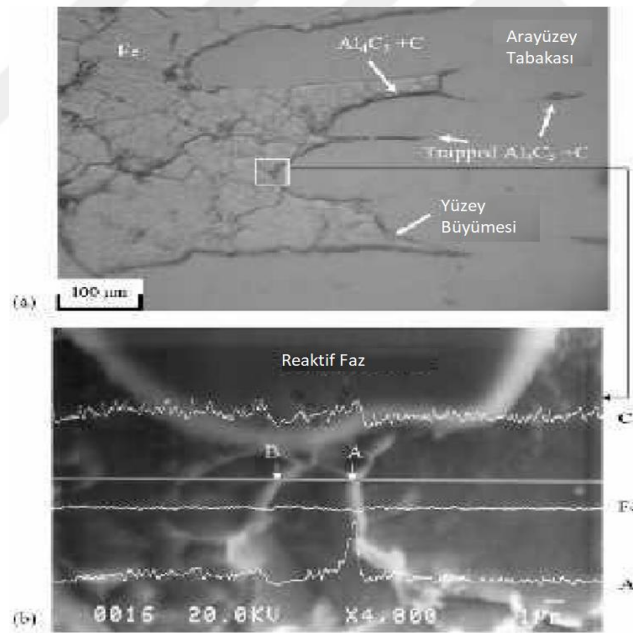
3.4.2.1 Karbon miktarının etkisi

Yapılan çalışmalarda altlık malzeme olarak kullanılacak çeliğin karbon içeriğinin kaplama kalınlığına doğrudan etkisi olduğu belirtilmiştir. Shih ve Shu-Hau'nun yaptıkları çalışmada düşük karbon miktarına sahip olan çeliğin kaplama kalınlığının daha çok olduğunu bulmuşlardır [16]. Karbon miktarının kaplama kalınlığına etkisini incelemek için 1020 ve 1040 çeliklerini sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kapladıktan sonra Çizelge 3.2'da karşılaştırmışlardır. 1020 çeliği 1040 çeliğine göre daha düşük karbon içeriği ve daha yüksek ferrit miktarına sahiptir.

Düşük karbonlu çelik yüzeyinde, yüksek karbonluya göre daha kalın intermetalik tabaka oluşmuştur. Bunun nedeni ise düşük karbonlu çelikte, ergimiş alüminyum ile reaksiyona girebilecek daha fazla ferritin bulunmasıdır. Intermetalik tabaka ferritin daha fazla olduğu arayüzeyde çok daha hızlı bir şekilde çelik içerisine ilerleyebilir. Ayrıca reaktif faz ferrit tane sınırları ile seçilimli difüzyon ve büyüme göstererek parmak şeklinde bir intermetalik yapı oluşturur. Bu yapı, yüksek karbonlu çelikte karşılaştırıldığında düşük karbonlu çelikte daha iyi gözlemlenir [2].

Şekil 3.2(a)'de intermetalik tabakanın ferrit yapısı içerisinde çıkıntılı büyümesi gösterilmiştir.

Şekil 3.5(b)'de parmak şeklinde yapının ucunda elektron probe mikroskop yöntemi ile Fe, C ve Al konsantrasyonları ölçülmüştür. Karbon oranının A ve B noktaları olan tane sınırlarında tane içine daha fazla olduğu ölçülmüştür. Alüminyum atomları ara tabakada ferrit tane sınırlarından tane içine difüzyon olur ve burada demir atomları ile reaksiyona girerek Fe-Al intermetaliklerini oluşturur.



Şekil 3.5 : İntermetalik tabakanın çelik içinde büyümesi. [2]

Çizelge 3.2 : Karbon miktarının kaplama kalınlığına etkisi [16].

Çelikler	1020	1040
Daldırma Süresi (dk)	Kaplama Kalınlığı (μm)	Kaplama Kalınlığı (μm)
3	--	16-22
10	82-136	45-50
20	91-200	114-136
40	200-318	227-236
60	291-336	264-282

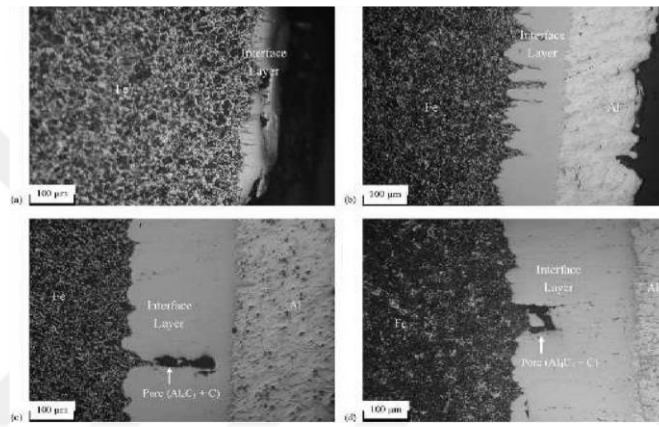
3.4.2.2 Daldırma süresinin etkisi

T. Shih ve T. Shu-Hau yaptıkları çalışmada daldırma süresinin kaplama mekanizması ve kaplama kalınlığı etkisini incelemişlerdir [16]. Şekil 3.3’de saf alüminyum içine 1040 çeliğinin 10,20,40 ve 60 dakika daldırma işlemi sonrasında oluşan kaplamalar verilmiştir. Kısa süre uygulanan daldırma işleminde kaplama kalınlığı değişken ve arayüzey değişkendir. Bazı bölgelerde daha kalın intermetalik tabaka varken bazı bölgelerde daha ince olduğu Şekil 3.3(a)’da görülmektedir.

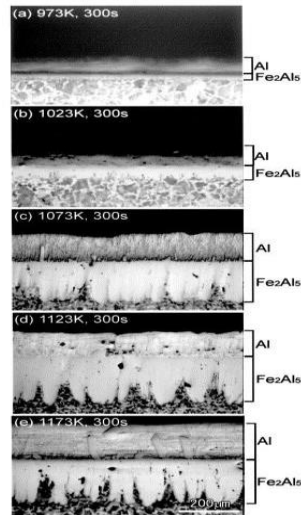
Daldırma süresi arttıkça arayüzey girintili çıkıntılı bir yapı haline gelir ve parmak şeklindeki yapı (şekil 3.6(b)) daha belirgin hale gelir. Daldırma süresi uzadıkça parmak şeklindeki yapı daha düzenli hale gelir fakat intermetalik tabakada Şekil 3.6 (c)’de görüldüğü gibi boşluklar oluşmaya başlamıştır.

3.4.2.3 Daldırma sıcaklığının etkisi

Daldırma sıcaklığının sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanan çelikler üzerine olan etkisi daha önce S.Kobayashi tarafından çalışılmıştır [17]. Yaptıkları çalışmada 5 dakika daldırma süresi için 700-900 °C aralığında daldırma sıcaklıkları seçilmiştir. Yaptıkları bu çalışma sonucunda artan daldırma sıcaklığıyla birlikte kaplama kalınlığının da arttığını belirtmişlerdir. Oluşan iki tabakanın kalınlıklarının kıyaslanmasında, Al tabakanın kalınlığı 100µm'den 200µm'ye ve Fe₂Al₅ tabakasının büyümesi 700 °C'den 800 °C'ye çıkıldığında doygunluğa ulaşmıştır. Şekil 3.7'de farklı sıcaklıklarda daldırılmış olan numunelerin kesit görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.6 : Saf alüminyuma daldırılmış 1040 çeliğinin daldırma süresine bağlı olarak kaplama kalınlıkları a)10dk b)20dk c)40dk d)60dk [16].



Şekil 3.7 : a)700 °C b)750 °C c)800 °C d)850 °C e)900 °C'de 5 dakika daldırılmış numunelerin kesit görüntüleri [2].

4. MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİ

4.1 Mikro Ark Oksidasyon İşleminin Tarihçesi

MAO işlemi, yaklaşık 50 yıl önce akademik araştırmalar şeklinde kullanılmaya başlamış ve halen gelişmekte olan bir tekniktir. Bu yöntem ile malzeme yüzeyinde poroz, kısmen kaba ve iyi yapılmış bir oksit tabakası elde edilen ileri bir yüzey işlemidir [18]. Bu yöntemle ilgili yapılan ilk çalışmalar Sovyetler Birliği tarafından ilk olarak akademik çalışmalarda, daha sonralarda ise denizaltı parçalarının üretimi ile askeri uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. 1970’li yıllarda Amerika’da ve 1980’lerin sonlarında ise tüm dünyada yaygın olarak kullanılan mikro ark oksidasyonu, günümüzde halen yaygın olarak çalışılan bir kaplama yöntemidir.

Günümüzde mikro ark oksidasyon işlemini tanımlamak için pek çok terim kullanılmaktadır. Bunlar; kıvılcım anodizasyonu (spark anodizing), anodik kıvılcım biriktirme (anodic spark deposition), mikro ark anodizasyon (micro arc anodizing), mikro plazma anodizasyonu (microplasma anodizing), mikro plazma oksidasyonu (mikro plasma oxidation), plazma elektrolitik oksidasyon (plasma electrlitic oxidation) ve elektroz plazma oksidasyon (elektro plasma oxidation) [19,20].

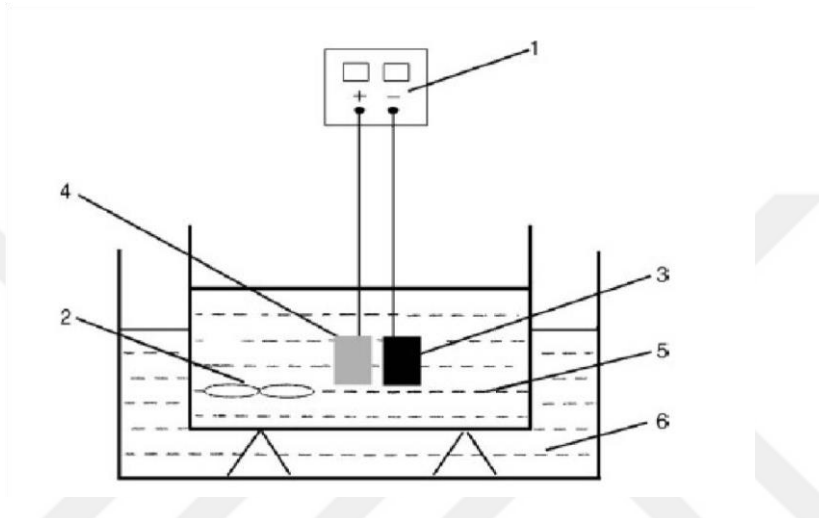
Amerika’daki pek çok patentli işleme ek olarak Avrupa, İsrail, Çin, Japonya ve Avustralya da mikro ark oksidasyon teknolojisi araştırma ve uygulamalarına katılmıştır [20,21]. Mikro ark oksidasyon yöntemi, alüminyum, titanyum, magnezyum gibi hafif metaller ve alaşımlarına uygulanabilir.

4.2 Mikro ark oksidasyonunda kullanılan donanımlar

Mikro ark oksidasyon işlemi en basit haliyle bir elektrik güç kaynağı, bir elektrolit havuzu, anot, katot ve soğutma sisteminden meydana gelmektedir. Tipik bir mikro ark oksidasyon işlemi düzeneği Şekil 4.1’ de gösterilmektedir. Mikro ark oksidasyon işlemi elektrolit çözelti içerisine daldırılmış anot numuneye negatif voltaj, katoda ise

pozitif voltaj verilmesi ile anot üzerinde ark oluşturulması ve numunenin yüzeyinin oksit kaplanması olarak tanımlanabilir [22].

Mikro ark oksidasyonu düzeneğinde kullanılan elektrolitler genelde bazik karakterlidir. Elektrolit sıcaklığı 10-60 °C aralığında kontrol edilmektedir. Prosesin gerçekleştiği tank paslanmaz çelikten yapılmıştır. Mikro ark oksidasyonu sırasında yüksek voltaj ve akım değerlerinden dolayı büyük miktarında ısı oluştuğundan, sıcaklığı belirli bir aralıkta tutmak için soğutma sistemi gereklidir.



Şekil 4.1 : Tipik Bir Mikro Ark Oksidasyon Düzeneği 1) Güç Kaynağı 2) Karıştırıcı 3) Anot 4) Katot 5) Elektrolit 6) Soğutma Suyu [22].

Anot olan numuneye negatif voltaj uygulanması ile malzeme yüzeyinde oksit filmi oluşumu başlamaktadır. Uygulanan voltaj belirli bir kritik değere ulaştıktan sonra malzeme yüzeyinde mikro boyutlarda arklar oluşmaya başlar. Mikro arkların oluşmaya başladığı voltaj değeri, bozunum voltajı olarak tanımlanmaktadır. Bu kritik değere ulaşıldığında malzeme yüzeyinde metal iyonları ile hidroksit iyonları zıt yönlerde hareket ederek oksit oluşumunu tekrar başlatırlar [22].

Malzeme yüzeyinde ark oluşumu için kritik potansiyel esasen elektrotun kutupsallığına, elektrodun malzemesi ve içerisinde bulunduğu elektrolitin içeriğine bağlıdır ancak sıcaklık, elektrolit konsantrasyonu ve yüzey geriliminden etkilenmez. Teorik analizler kıvılcım noktalarındaki yerel geçici sıcaklıkların, neredeyse güneşin merkezindeki sıcaklığa yaklaşarak birkaç bin Kelvin'e ulaşabildiğini belirtmektedir. Bu teknoloji alüminyum, çinko, titanyum alaşımları, bunun yanında magnezyum alaşımları gibi toprak alkali metalleri ile valf metalleri üzerine seramik kaplamalar üretmeyi mümkün kılmaktadır. Oluşan kaplamaların mikro sertlik, korozyon ve

aşınma direnci performansı geleneksel anodizasyon prosesleri ile oluşanlar ile karşılaştırılabilir.

Elektrolit kompozisyonu, pH, iletkenlik gibi çözüldüden kaynaklanan etkilerle birlikte mikro ark oksidasyonu parametreleri gibi diğer etkenler oluşan oksit tabakasının yapısını, morfolojisini ve kompozisyonunu değiştirmektedir. Yapılan çalışmalarda .çözeltinin kompozisyonu ve konsantrasyonu ile elektriksel parametrelerin oksit yapısı üzerinde önemli değişikliklere neden olduğunu gözlenmiştir [22].

4.3 Mikro ark oksidasyon işleminin avantajları ve dezavantajları

Mikro ark oksidasyon teknolojisi halen gelişmekte olan bir teknoloji olduğundan, malzeme yüzeyinde gelişen seramik filmin oluşum ve gelişim mekanizması ile oluşan oksit filmin özelliklerinin tam olarak anlaşılabilmesi için çok fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, mikro ark oksidasyon işleminin bir çok avantajı olduğu belirtilse de dezavantajları olduğu da bilinmektedir.

Mikro ark oksidasyon yöntemi, diğer yüzey işlemlerine göre işlem öncesi numune hazırlamanın önemi daha azdır. Bu nedenle proses hızı çok daha yüksektir. Aynı zamanda uygulanan yüzey hazırlama işlemlerindeki kimyasalların çevreye ve kaplama prosesine etkisi ortadan kaldırılmış olur. Mikro ark oksidasyon yöntemi, alüminyum, magnezyum, titanyum, zirkonyum gibi geniş bir malzeme grubuna ve şekilden bağımsız olarak kompleks parçalara bile kolayca uygulanabilen bir yöntemdir.

Mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan elektrotlar çevreye zararlı değildir ve ucuz karışımlardır. İşlem sonrasında elde edilen kaplama çok yüksek dayanıma ve sertliğe sahiptir. Bu avantajlar değerlendirildiğinde, mikro ark oksidasyon yöntemi diğer yöntemlere göre daha çok tercih edilmektedir.

Yukarıda bahsedilen avantajların dışında, diğer yöntemlerde de olduğu gibi mikro ark oksidasyonun da dezavantajları vardır. Seçilen parametrelere bağlı olarak yüksek enerji sağlayabilecek bir güç kaynağına ihtiyaç vardır. Kullanılan güç kaynağına bağlı olarak üretim süreci tehlikeli olabilir ve aynı zamanda maliyeti diğer geleneksel anodik oksidasyon yöntemlerine göre yüksek olabilir. İşlem sonrası elde edilen yüzey pürüzlü ve oldukça kırılmalıdır. Kullanım öncesi bu yüzeyin kaldırılması gerekmektedir ve bu da maliyeti arttıran bir diğer faktördür. Bu dezavantajlar mikro ark oksidasyonunun kullanım alanlarını kısıtlamaktadır.

4.4 Mikro ark oksidasyon işleminin uygulama alanları

Mikro ark oksidasyon işlemi, kalın seramik kaplama istenen uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Uçak-uzay endüstrisi, otomotiv endüstrisi, askeri uygulamalarda istenilen özellikleri karşılayabildiği için bir çok kullanım yeri bulmuştur. Uçak ve uzay sanayiinde yüksek sıcaklık dayanımları sayesinde uzay araçlarında ve roketlerde kullanılır.

Yüksek miktarda silisyum ve magnezyum içeren alüminyum alaşımlarının, geleneksel anodik oksidasyon ile kaplanması zor olduğu için mikro ark oksidasyon işlemi tercih edilir.

Mikro ark oksidasyon işlemi sonrası elde edilen seramik kaplamalar boya tabanı olarak kullanılabilir. Aynı zamanda güçlü asit ve bazlara karşı gösterdikleri dirençten dolayı kimya ve gıda sanayide kullanılırlar. Abrasif ve erozif aşınma görülen yerlerde yüksek aşınma dirençleri sayesinde kullanılabilirler. Mikro ark oksidasyon işlemi sonrası renkli seramik kaplamalar elde edilebilir ve bu sayede mimari uygulamalarda kullanılabilir. Mutfak eşyaları, tıp, implant, matbaa ve ambalaj sektöründe de kullanılır [23,24].

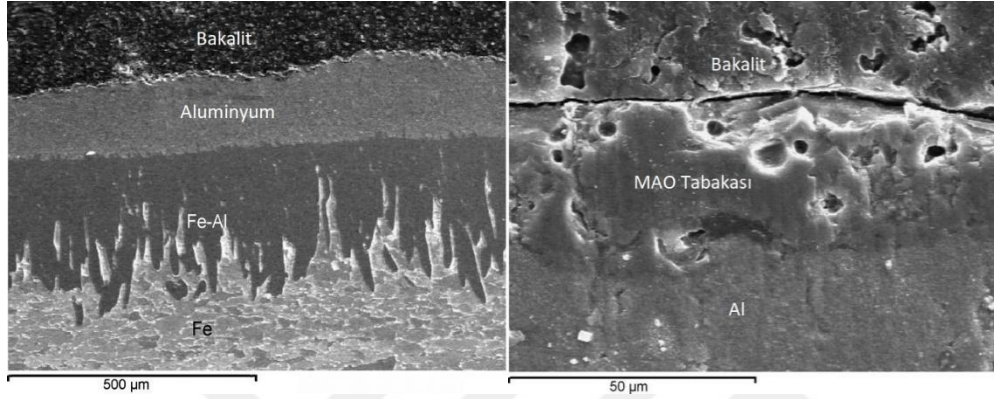
5. SICAK DALDIRMA YÖNTEMİ İLE ALÜMİNYUM KAPLANMIŞ ÇELİĞE UYGULANAN MİKRO ARK OKSİDASYON İŞLEMİ

Kharanagh ve arkadaşları [25] yaptıkları çalışmada ASTM A463 standartlarına uygun olarak alüminyum kaplanmış çeliğe 50, 300, 600 ve 1500 Hz olacak şekilde farklı frekanslarda mikro ark oksidasyon işlemi uygulamıştır. Elde edilen seramik yüzeyin özellikleri, aşınma ve korozyon direnci, taramalı elektron mikroskobu, pin-on-disk aşınma cihazı ve potansiyodinamik kutuplaşma deneyleri ile kıyaslanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, frekansın artması ile birlikte kaplama kalınlığı ve kaplama içindeki boşlukların boyutları küçülmüş ve boşluk yoğunluğu artmıştır. Korozyon direnci 50Hz'den 600Hz'ye kadar artarken, 600Hz'den 1500Hz'ye doğru çıktığında düşmüştür. 600Hz'de kaplanan numunenin sürtünme katsayısının düşmesi, düşük frekanslarda elde edilen yüzeyle kıyaslandığında 600 Hz'de daha yumuşak yüzey elde edildiğini göstermektedir.

Lihong ve arkadaşları [4] yaptıkları çalışmada Q235 çeliğini sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kapladıktan sonra mikro ark oksidasyonu işlemiyle seramik bir kaplama elde etmişlerdir. Seramik kaplanmış çelik daha sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile incelenmiş ve korozyon direnci ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda seramik yüzeyde boşaltım kanallarının (discharge channels) neden olduğu bir çok mikro çatlaklar ve boşluklar görülmüştür. Seramik tabakanın faz dağılımı amorf yapı ve Al_2O_3 kristallerinden oluştuğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda Al_2O_3 kristalinin κ - Al_2O_3 , θ - Al_2O_3 ve β - Al_2O_3 yapılarını içerdiği bulunmuştur. Oluşan Al_2O_3 kristallerinin boyutları 100nm'den 500nm'ye kadar değişkenlik göstermektedir. Yapılan korozyon direnci testleri sonucunda mikro ark oksidasyonu uygulanmış çeliklerin alüminyum kaplanmış çeliklerden çok daha iyi dirence sahip olduğu belirtilmiştir.

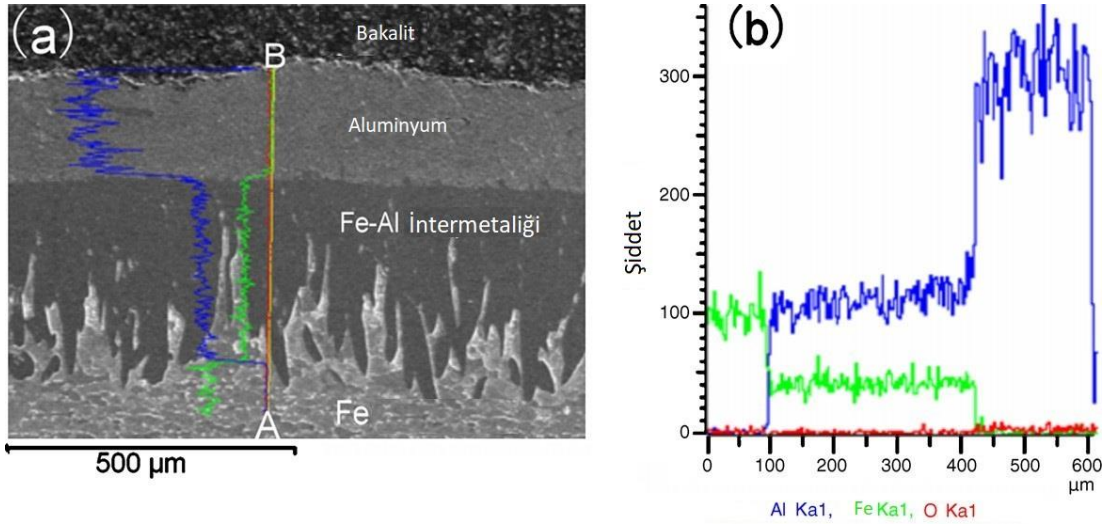
Gu ve arkadaşları [26] yaptıkları çalışmada %0.20 C'lu çelik boru altlık malzeme olarak kullanmışlardır. Bu çelik 15cm/dk hızla 700 °C sıcaklıkta ergitilmiş A7

alüminyum alaşımına 90 saniye süreyle daldırıl ve oda sıcaklığında soğutulmuştur. Mikro ark oksidasyon işlemi için 0.025, 0,066 ve 0,008M konsantrasyonlarında karıştırılmış NaOH, Na₂SiO₃ ve (NaPO₃)₆ çözeltileri kullanılmıştır. Bu birleşmiş proses çelik borunun içine koruyucu bir katman elde etmek için uygulanmıştır. Proses tamamlandıktan sonra karakterizasyon için EDX, SEM, XRD ve korozyon testleri uygulanmıştır.



Şekil 5.1 : (a) SDA işlemi uygulanmış ve (b) SDA-MAO işlemi uygulanmış çeliğin kesitinin SEM fotoğrafları [26].

Şekil 5.1’de her iki proses sonrasında kesitten çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir.

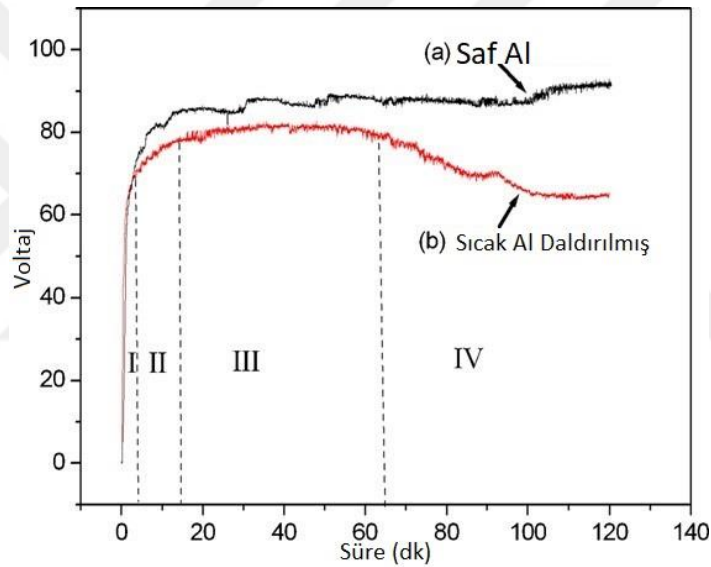


Şekil 5.2 : Alüminyum kaplanmış çeliğin EDX analizi [26].

Şekil 5.2’de kaplama kesidi boyunca kimyasal kompozisyonların değişimi verilmiştir. Bu proses sonucunda Al, Fe-Al intermetalik tabakası ve Al₂O₃ seramik tabakası elde edilmiştir ve üst üste gelen her iki kaplama tabakası birbirine metalurjik olarak

bağlıdır. Elde edilen kaplama korozyona karşı çok iyi direnç göstermiştir. Elde edilen bu sonuçların ışığında, çelik boruların iç yüzeyinde uygulanan proses sonucunda koruyucu bir tabaka elde edildiği belirtilmiştir [26].

Wu ve arkadaşları [27] yaptıkları çalışmada karakteristik ortalama anotik voltajın zamanla değişimini incelemiştir. Q235 çeliği önce sıcak daldırma yöntemi kullanılarak saf alüminyum ile kaplanmış, daha sonrasında 5kW DC güç kaynağı kullanarak 50Hz frekansta 16 g/l Na_2SiO_3 ve 2 g/l NaOH çözeltisinde mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmıştır. Bu proses sırasında anodik voltaj değerleri kaydedilmiştir. Proses sonrasında elde edilen numunenin XRD, SEM ve EDS kullanarak karakterizasyonu yapılmıştır.

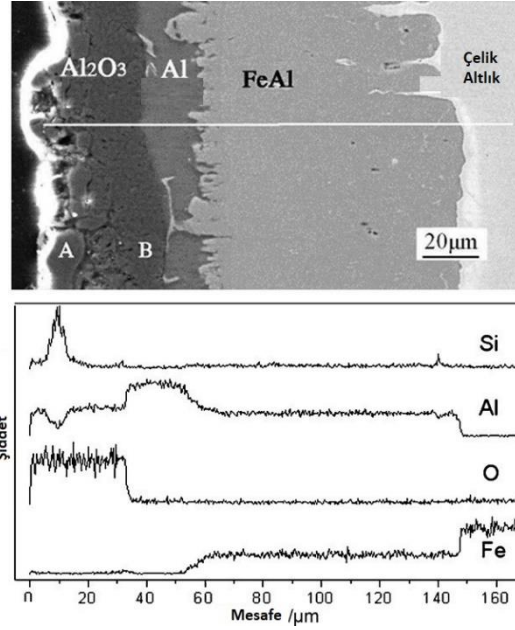


Şekil 5.3 : Ortalama anodik voltaj-zaman grafiği [27].

Şekil 5.3’de mikro ark oksidasyonunun başlangıcında ortalama anodik voltaj saf alüminyum ve alüminyum kaplanmış çelik için yaklaşık değerlere sahiptir. Ancak alüminyum kaplanmış çeliğin alüminyum tabakası bitip Fe-Al tabakası kullanılmaya başlandığında voltaj değerleri arasındaki fark ortaya çıkmaktadır.

Şekil 5.4 ve çizelge 5.1 alüminyum kaplanmış çeliğe uygulanan mikro ark oksidasyon işlemi sonrası kaplama kesiti boyunca elemental dağılım ve kimyasal dağılımı vermektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda Fe-Al intermetalik tabakasının mikro ark oksidasyon işlemi uygulanırken ortaya çıkan ortalama anodik voltaja olan etkisi belirtilmiştir. Mikro ark oksidasyon işlemi sırasında Al tabakası giderek incelerek

seramil tabakaya dönüşmektedir. Al tabakası tamamen harcandığında, mikro ark oksidasyonu için gerekli olan Al, Fe-Al tabakasından karşılanmaya başlar. Bu aşamada, seramik tabakanın oluşumu yavaşlar ve Al_2O_3 ve Fe-Al arayüzeyinde çatlaklar tespit edilir. Seramik kaplama ve çelik altlık kıyaslandığında, seramik tabakanın çok daha yüksek sertliğe, elastik toparlanmaya ve yüksek destekleme performansına sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.4 : Kaplama kesiti boyunca elemental oranların değişimi [27].

Çizelge 5.1 : Şekil 5.4’de verilen noktaların kimyasal dağılımı (% ağı.).

Noktalar	O	Al	Si	Fe
A	53	43	3.5	0.4
B	53	45	1.5	0.3

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada altlık malzeme olarak kullanılan düşük karbonlu çelik ilk olarak sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanmış ve daha sonra mikro ark oksidasyon işlemi uygulanmıştır. Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama işlemi farklı sıcaklık, süre ve soğutma koşullarında uygulanmıştır. Farklı sıcaklık, süre ve soğutma ortamının etkisini görmek amacı ile metalografi, aşınma, sertlik ve oksidasyon deneyleri alüminyum kaplanmış çeliğe uygulanmıştır. Seramik kaplanan numunelere ise aşınma, sertlik ve metalografi deneyleri uygulanmıştır.

6.1 Numune Hazırlama İşlemleri

Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işlemi ve daha sonra uygulanacak deneyler için düşük karbonlu çelik 5mm çapında ve 10mm uzunluğunda silindirik numuneler kesilmiştir. Bu numuneler kaplama öncesi 120-400 mesh arasındaki SiC zımparalarla zımparalanmıştır. Numuneler fosforik asit ve asetonla 15'er dakika ultrasonik olarak temizledikten sonra saf su ile yıkanıp kurutulmuşlardır.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, düşük karbonlu çelik malzemelerin spektral analiz yöntemiyle yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.1'de gösterilmektedir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan çeliğin kimyasal analizi Şekil 6.1'de görülen cihazda yapılmıştır.

Çizelge 6.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan düşük karbonlu çeliğin kimyasal bileşimi (% ağı.).

Fe	C	Mn	Si	S	P
Kalan	0.097	0.64	0.1	0.042	0.034



Şekil 6.1 : GNR Metal Lab optik emisyon spektrometresi cihazı

6.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplama (SDA)

Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama (SDA) prosesinde saf alüminyum kullanılmıştır. Bu yöntemde kullanılan alüminyumun spektral analiz yöntemiyle yapılan kimyasal analiz sonuçları Çizelge 6.2’de gösterilmektedir. Alüminyum ergitme işlemi, 750 °C ve 850 °C sıcaklıklarında Şekil 6.2’de görülen elektrikli ergitme fırınında yapılmıştır. İstenilen sıcaklığa ulaşıldıktan sonra ergimiş metalin yüzeyine cüruflaştırıcı karışım atılarak 15 dakika beklenmiştir. Ergimiş alüminyum hazır hale geldikten sonra hazırlanan numuneler 2,5 ve 10 dakika sürelerle daldırılmıştır. Her bir sıcaklık ve süre parametresi için üçer numune kaplanarak sırasıyla; havada, suda ve fırında soğutulmuştur.



Şekil 6.2 : MF – 1000 elektrikli ergitme fırını ve grafit pota.

Çizelge 6.2 : Deneysel çalışmalarda alüminyumun kimyasal bileşimi (%ağ.).

Al	Si	Fe	Mg	Cu
99.670	0.072	0.118	0.0039	0.001

6.3 Mikro Ark Oksidasyonu

Mikro ark oksidasyon işleminde kullanılan cihaz Şekil 6.1’de görülmektedir. Cihaz 30 kW gücünde olup alternatif akımla çalışmaktadır. Bu çalışmada mikro ark oksidasyon işlemleri 450V pozitif ve 80 negatif voltaj değerinde 5 dakika süreyle uygulanmıştır. Kullanılan elektrolitik çözelti içerisinde 4.5 g/l NaAlO₂ ve 2 g/l KOH bileşikleri bulunmaktadır. Bu düzenekte kaplanacak yüzey anot ve kaplanacak olan solüsyonu içinde bulunduran paslanmaz çelik katot olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6.3 : Mikro ark oksidasyon cihazı

6.4 Metalografik Çalışmalar

Metalografik çalışmalarda, farklı parametrelerde SDA yöntemiyle kaplanan çeliklerin kesit ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. MAO uygulanmış alüminyum kaplı çeliklerin kesit görüntüleri, aşınma ve oksidasyon deneylerinin incelemeleri yapılmıştır.

Kaplama kalınlıkları ve mikro yapının kantitatif özellikleri için kaplanan numunelerden Leica DM750M optik mikroskobu yardımı ile farklı bölgelerden farklı büyütmelemlerde görüntüler alınmıştır.

Numuneler sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1200 ve 2500 mesh zımpara kademelerinden numune yüzeyinde çizik olmayacak şekilde SiC ile zımparalanmıştır. Daha sonra silika ile parlatırıştır. Mikroyapı incelemeleri için parlatılmış numuneler alkolle temizlenip %5 Nital ile dağlanmıştır. Kaplama kalınlıklarını ölçmek için parlatılan numuneler alkolle temizlendikten sonra inceleme için hazır hale getirilmiştir.

Daha ileri kesit ve yüzey incelemeleri için Hitachi TM-1000 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM incelemelerinde numunenin iletkenliğini arttırmak için yüzey altın ile kaplanmıştır. Parlatıldıktan sonra altın kaplanan numuneler SEM ile kesit ve yüzeyden incelenmiştir. Metalografik çalışmalarda kullanılan cihazlar Şekil 6.4’de gösterilmektedir.



Şekil 6.4 : Hitachi TM – 1000 taramalı elektron mikroskobu ve Leica ICC50 HD optik mikroskobu.

6.5 Yapısal ve Morfolojik Yüzey Karakterizasyonu

Sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama işlemi ve mikro ark oksidasyon işlemi sonrası yapılan yüzey karakterizasyon işlemleri; makro ve mikro yüzey incelemeleri, kesit incelemeleri, X-ışınları incelemeleri, EDS, sertlik testleridir. XRD incelemeleri Şekil 6.5’de görülen GBC MMA 027 model X-ışınları cihazında CuK α tüp kullanarak, 20-80° arasında 0,1’lik artışlar ile taranarak gerçekleştirilmiştir.

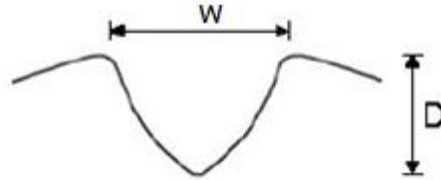


Şekil 6.5 : GBC MMA 027 model X-ışınları cihaz

6.6 Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri Oscillating TRIBOtester marka deney cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney sırasında aşındırıcı bilya numune yüzeyinde 2mm’lik uzunlukta periyodik olarak hareket etmiştir. Aşınma testi için kaplanmamış 1010 çeliği, alüminyum kaplanmış çelik ve mikro ark oksidasyonu ile elde edilen seramik yüzey kullanılmıştır. Deneylerde aşındırıcı bilya olarak 6mm çapında Al_2O_3 kullanılmış olup, deneyler 3 N yük altında 6 mm/s aşınma hızında ve 50 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.

Aşınma deneylerinin sonrasında numunelerin aşınma yüzeyleri optik mikroskopla incelenmiştir. Aşınma direncinin bir ölçüsü olarak aşınma iz hacimini belirlemek amacıyla numune yüzeyinde aşınma izinin genişlik (W) ve derinliği (D), Veeco Dektak 6M model yüzey profilometresi aracılığıyla ölçülmüş ve aşınma iz hacmi Eşitlik 6.1 ile hesaplanmıştır.



Şekil 6.6 : Aşınma iz profilinin şematik gösterimi.

$$A = \frac{\pi \cdot W \cdot D \cdot \zeta}{4 \cdot S \cdot F} \quad (6.1)$$

Eşitlik (6.1)'de

A: Aşınma hızı, mm^3/Nm

W: Aşınma izinin genişliği, mm

D: Aşınma izinin derinliği, mm

Ç: Aşınma izinin uzunluğu, mm

S: Toplam kayma mesafesi, m

F: Deney yükü, N olarak tanımlanmıştır.

6.7 Yüksek Sıcaklık Oksidasyon Deneyleri

Yüksek sıcaklık oksidasyon deneyleri için en yüksek alüminyum tabaka kalınlığına sahip olan numune ve işlemsiz çelikler seçilmiştir. 750 °C'de 5 dakika süreyle alüminyum kaplanan ve suda soğutulan çelik en kalın ve uniform alüminyum tabakasına sahip olduğu için bu deney için seçilmiştir. Bu numunelere 1, 6, 24 ve 48 saat süreyle 1000 °C'de hava ortamında yüksek sıcaklık oksidasyon deneyi uygulanmıştır. Numunelerin fırına koyulmadan önce ve deney sonrasında ağırlıkları ölçülerek ağırlık değişimleri hesaplanmış ve kıyaslanmıştır. Ağırlık değişimlerinden yola çıkarak her bir numune için oksidasyon hızı hesaplanmıştır. Daha sonra numunelerin yüzey ve kesit görüntüleri SEM ile çekilmiştir. Yüksek sıcaklık oksidasyonu deneyinde kullanılan cihazlar Şekil 6.7'de verilmiştir.

6.8 Sertlik Deneyleri

Mikro sertlik ölçümleri için Şekil 6.8'de görülen Tukon 1102 marka sertlik cihazı 200 gr yük altında matris yapıların sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde elmas piramit uç kullanılmıştır. Her numuneden 5 veri alınmış ve bunların aritmetik ortalamaları rapor edilmiştir.



Şekil 6.7 : Oksidasyon işlemi için kullanılan Protherm elektrikli fırın ve Mettler Toledo AB-54S hassas tartı.



Şekil 6.8 : Wilson Tukon 1102 sertlik testi cihazı.



7. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde AISI 1010 çeliğine uygulanan sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplama ve mikro ark oksidasyonu ile elde edilen kaplamaların morfolojik ve yapısal karakterizasyon çalışmalarıyla, sertlik, aşınma ve oksidasyon deneylerinin sonuçları verilerek işlem parametrelerinin söz konusu özelliklere etkisi incelenmiştir.

7.1 Mikroyapı İnceleme ve Sonuçları

Çalışmada AISI 1010 çeliği kullanılmış olup Şekil 7.1’de görüldüğü üzere yapının ferritik-perlitik olduğu gözlemlenmiştir.

AISI 1010 çeliğine yüzey özelliklerini iyileştirmek için sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplanmıştır. Bu işlem 750°C ve 850°C’de 2,5 ve 10 dakika süreyle uygulanmış ve kaplanan numuneler hava, su ve fırın ortamlarında soğutulmuştur.



Şekil 7.1 : AISI 1010 çeliğinin optik mikroyapı fotoğrafı.

7.1.1 Optik mikroskop inceleme sonuçları

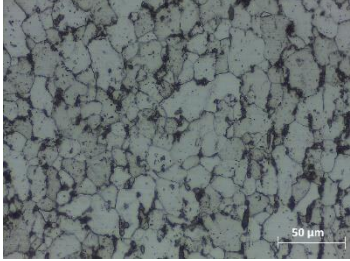
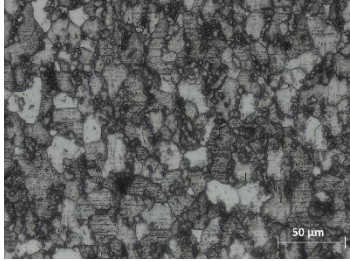
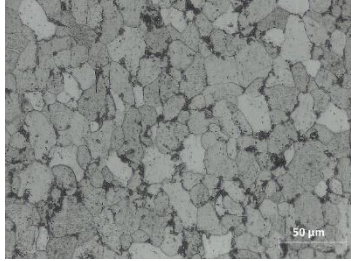
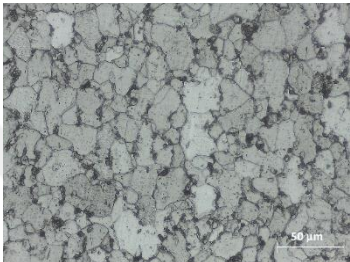
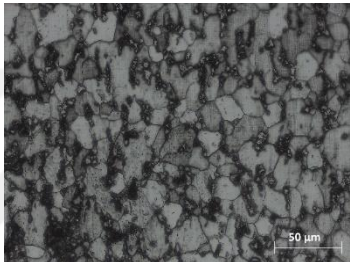
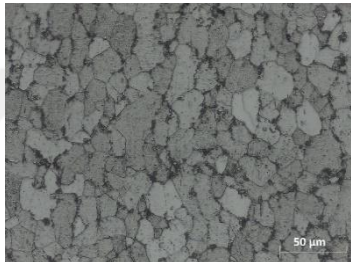
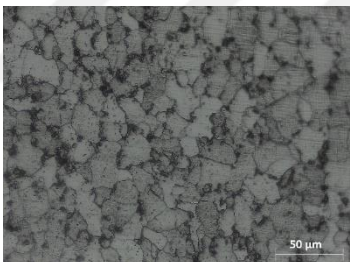
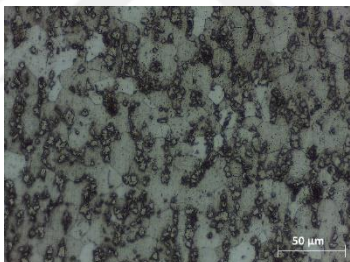
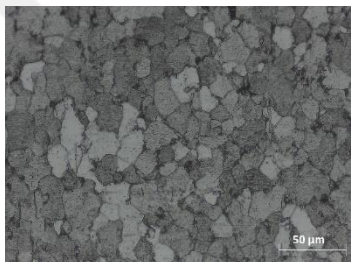
Farklı sıcaklık ve sürelerde kaplanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları 750°C ve 850 °C kaplama sıcaklıkları için Şekil 7.2 ve 7.3’de görülmektedir.

Kaplama işlemi sonra havada ve fırında soğutulan numunelerde ferritik-perlitik yapı gözlemlenirken suda soğutulan numunede martenzitik yapı olduğu gözlemlenmiştir. 750 ve 850°C’de yapılan kaplamalar sonrası yapılan mikroyapı incelemelerinde havada ve fırında soğutulan numunelerin tane boyutları ortalama olarak sırasıyla 11,50 ve 14,48 µm ölçülmüştür. Sıcaklık farkının havada ve fırında soğutulan numunelerin tane boyutlarına etki etmediği görülmüştür. Suda soğutulan numuneler için ise, 750 °C’de kaplanan numunenin ortalama tane boyutu 9,42 olarak hesaplanırken 850 °C’de kaplanan numune soğutma sonrasında tamamen martenzitik yapıya dönüşmüştür.

7.2 Sıcak Daldırma Yöntemi ile Alüminyum Kaplama Sonuçları

Sıcak daldırma yöntemi ile alüminyum kaplama işlemi sonrası altlık malzeme olarak kullanılan AISI1010 çeliği üzerinde intermetalik tabaka ve alüminyum tabaka olmak üzere 2 farklı kaplama tabakası elde edilir. İntermetalik tabakas Al atomlarının çelik altlığa difüzyonu sonucunda oluşur. İntermetalik tabaka, alüminyum atomlarının dağılımına ve arayüzdeki difüzyon reaksiyonlarına bağlı olarak farklı bileşiklerde Al-Fe intermetalikleri içerir. Bu tabakanın oluşumunda Al atomlarının içeri doğru, Fe atomlarının dışarı doğru difüzyonu söz konusudur. Şekil 7.4’de sıcak daldırma alüminyum yöntemi ile kaplanmış çeliğin tipik kesit görüntüsü verilmiştir. Kaplama kesiti boyunca alüminyum dağılımını belirlemek için 1.noktadan 4.ye noktaya kadar çizgi EDS uygulanmış ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7.1’de verilmiştir.

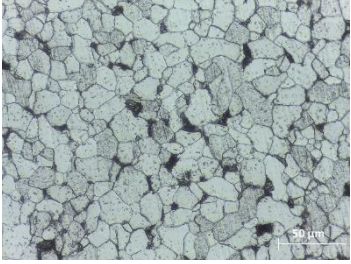
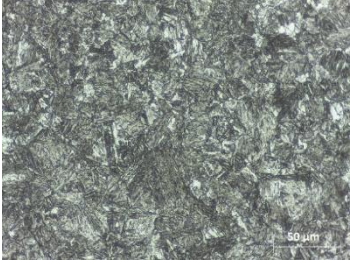
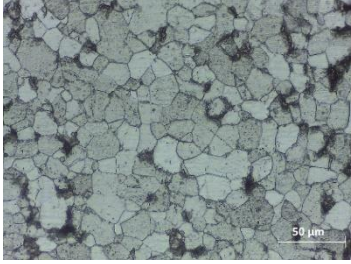
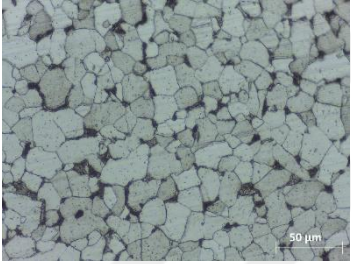
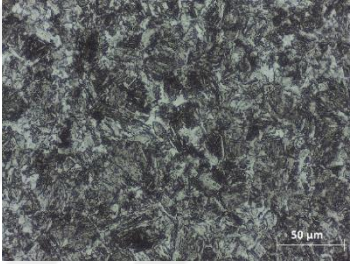
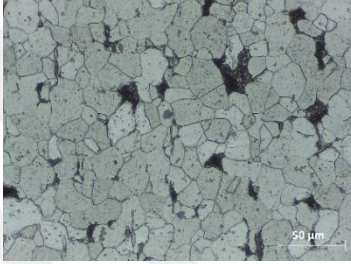
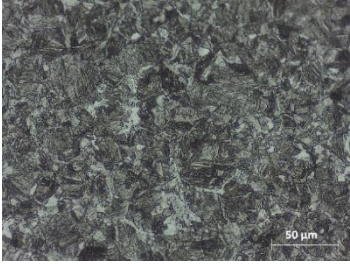
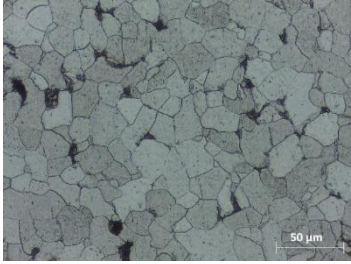
Kaplama tabakalarının morfolojileri, kaplama sıcaklığı, süresi ve kaplama sonrası numunenin soğutulma koşuluyla doğrudan orantılıdır. Şekil 7.5 ve 7.6’da sırasıyla 750 °C ve 850 °C’de ve sürelerde uygulanan sıcak doldurma yöntemi ile alüminyum kaplama işlemi sonrasında farklı soğutma ortamlarına bağlı olarak değişen kaplama morfolojilerinin kesit görüntüleri gösterilmiştir.

	Havada Soğutma	Suda Soğutma	Fırında Soğutma
2 dakika			
5 dakika			
10 dakika			

Şekil 7.2 : 750°C’de yapılan kaplama işlemleri sonrasında AISI1010 çeliğinin mikroyapıları.

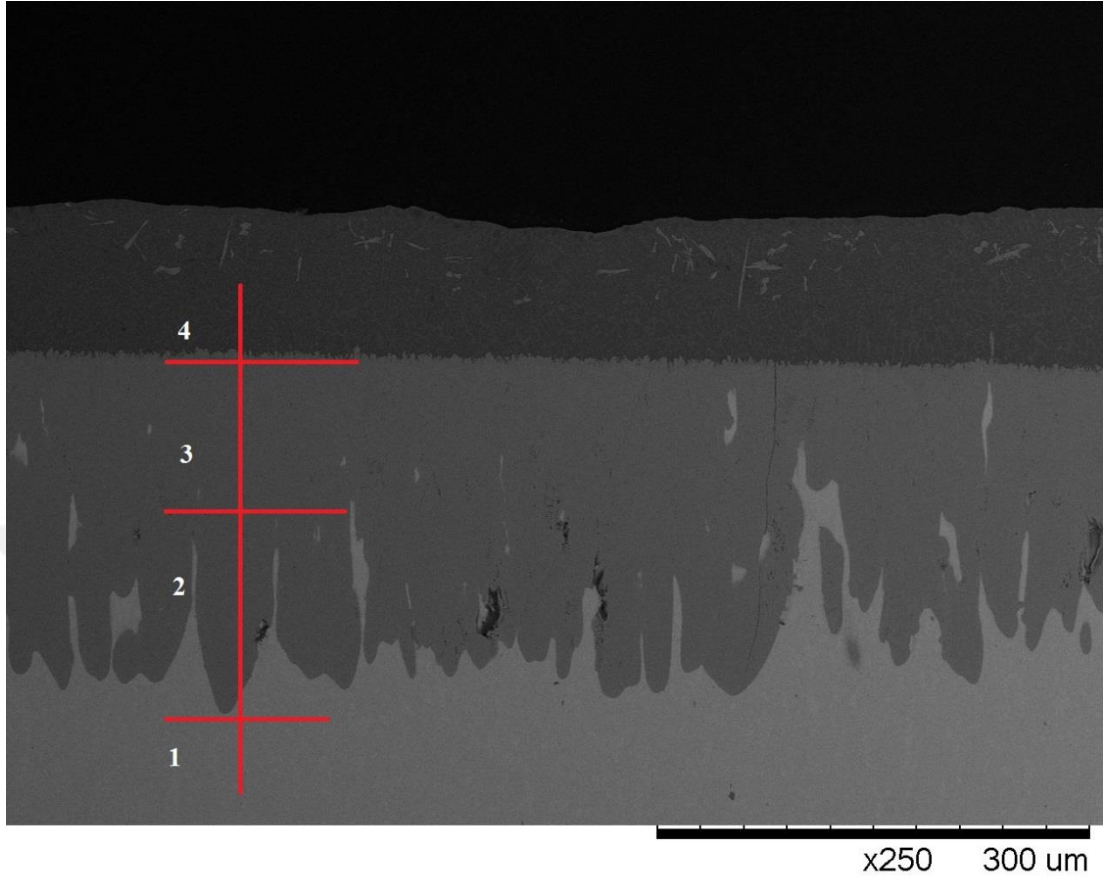
Suya daldırılan numunede difüzyona zaman olmadığı için elde edilen Al tabakasının diğer soğutma koşullarıyla kıyaslandığında daha kalın olduğu gözlemlenmiştir. Fırında soğutulan numunede ise difüzyon hızı sıcaklık ile arttığı için Al tabakası ince, difüzyon tabakasının kalın olduğu gözlemlenmiştir. Havada soğutulan numunede ise

difüzyon ve Al tabakaları dengelidir. Ayrıca daldırma sıcaklığının artışı bütün koşullar için difüzyon tabakasının kalınlığını arttırmıştır.

	Havada Soğutma	Suda Soğutma	Fırında Soğutma
2 dakika			
5 dakika			
10 dakika			

Şekil 7.3 : 850°C’de yapılan kaplama işlemleri sonrasında AISI1010 çeliğinin mikroyapıları.

Kaplama tabakalarının kalınlıkları artan daldırma sıcaklığı ve daldırma süresi ile artmıştır. İntermetalik tabaka ve çelik altlık arayüzeyinde Kirkendall etkisine bağlı olarak yüksek sıcaklıkta uygulanan SDA

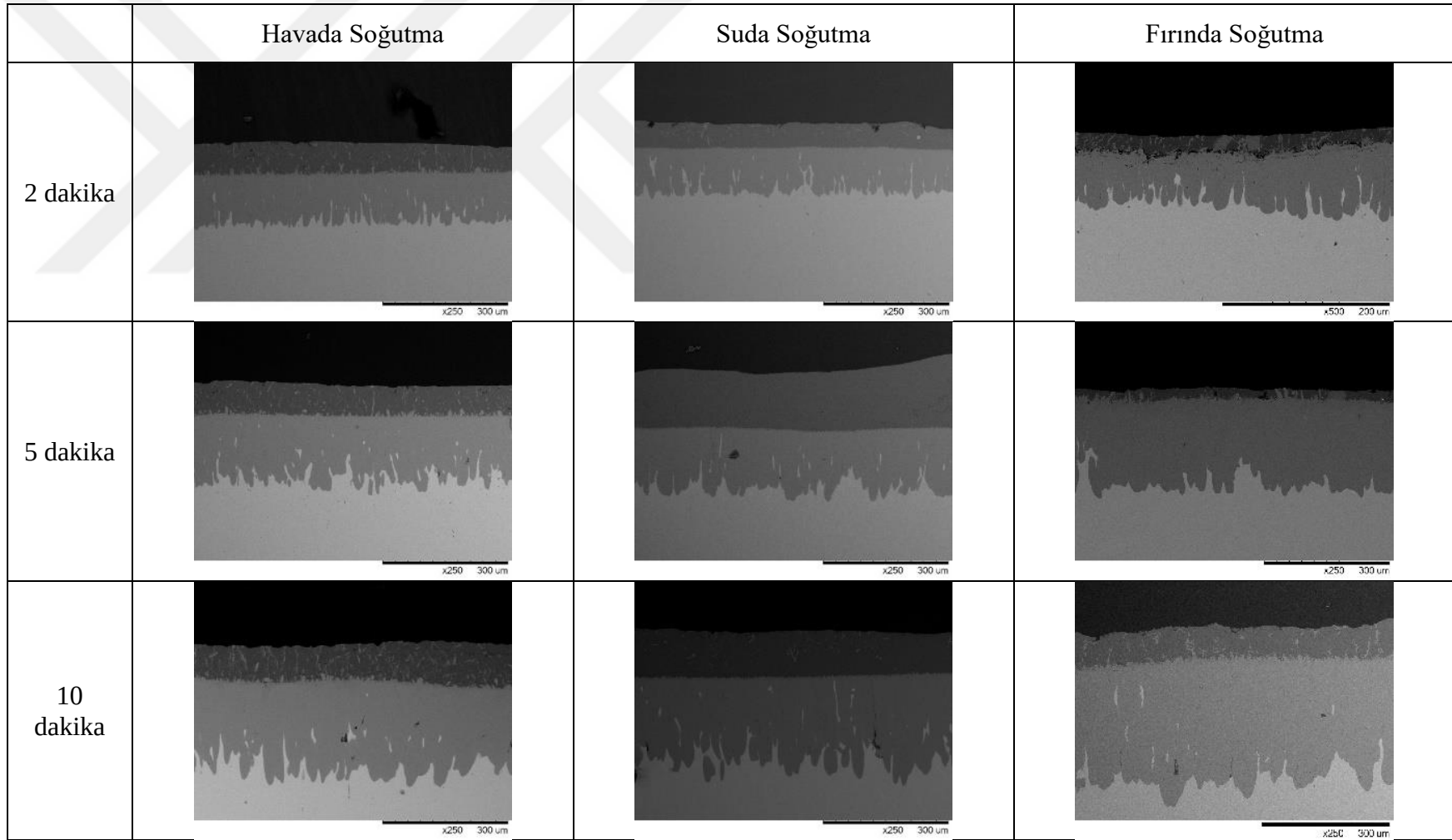


Şekil 7.4 : Alüminyum kaplanmış çeliğin tipik kesit görüntüsü.

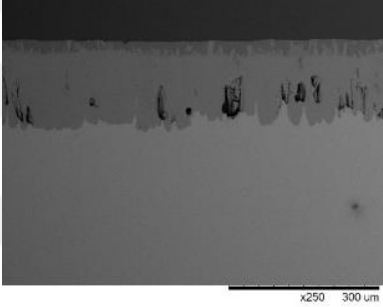
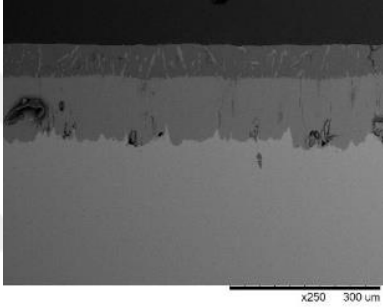
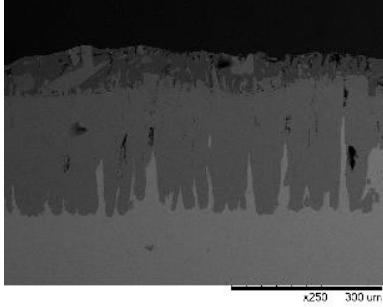
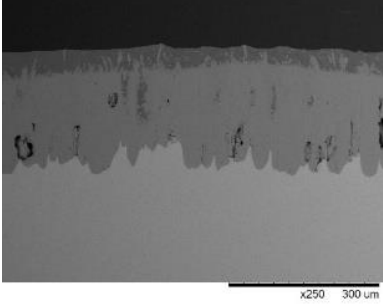
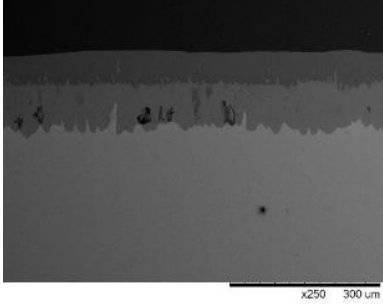
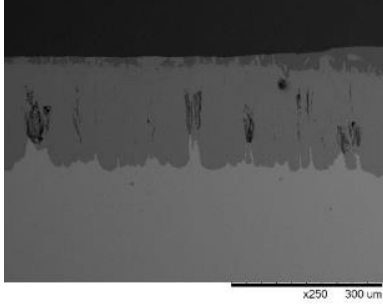
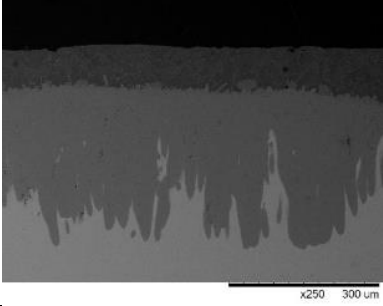
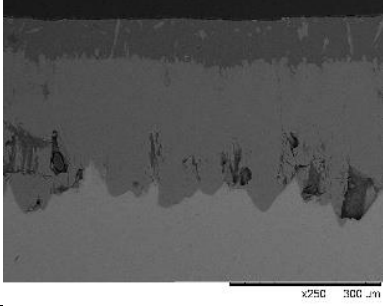
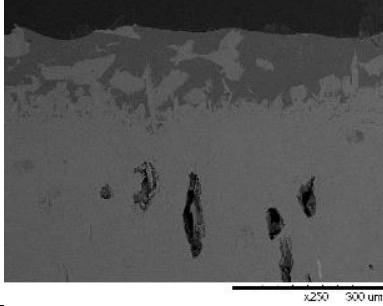
Çizelge 7.1 : Şekil 7.4’de belirtilen noktaların EDS analizleri

Noktalar	1.Nokta	2.Nokta	3.Nokta	4.Nokta
Al (%Kütlece)	-	60	65	99
Fe (%Kütlece)	99	40	35	-
Faz	Fe	Fe ₂ Al ₅	FeAl	Al

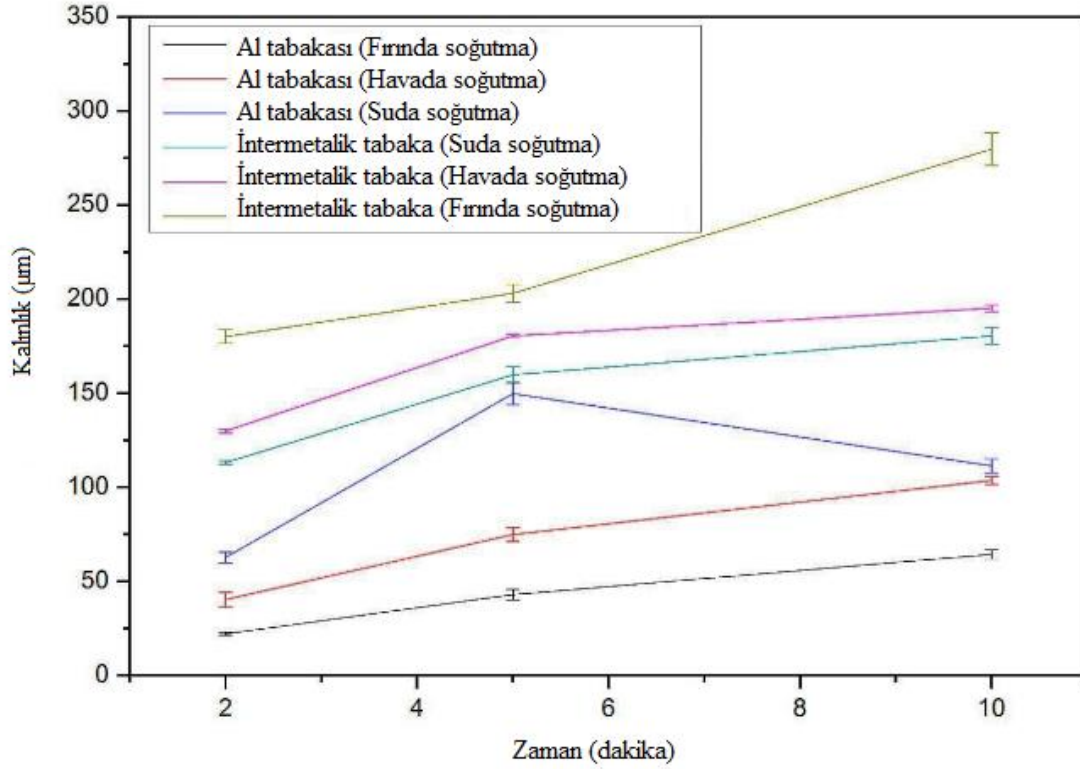
işlemi sonrasında yapıda boşluklar oluşmuştur [28]. Kirkendall etkisine göre, Fe ve Al atomlarının farklı difüzyon oranları nedeniyle boşluklar oluşmuştur. Şekil 7.7 ve 7.8’de daldırma sıcaklığının, daldırma süresinin ve soğutma koşulunun kaplama tabakalarının kalınlıklarına etkisi grafiksel olarak özetlendirmiştir.



Şekil 7.5 : 750 °C’de 2,5 ve 10 dakika süre ile kaplanan ve farklı koşullarda soğutulan numunelerin SEM kesit görüntüleri.

	Havada Soğutma	Suda Soğutma	Fırında Soğutma
2 dakika			
5 dakika			
10 dakika			

Şekil 7.6 : 850 °C’de 2,5 ve 10 dakika süre ile kaplanan ve farklı koşullarda soğutulan numunelerin SEM kesit görüntüleri.

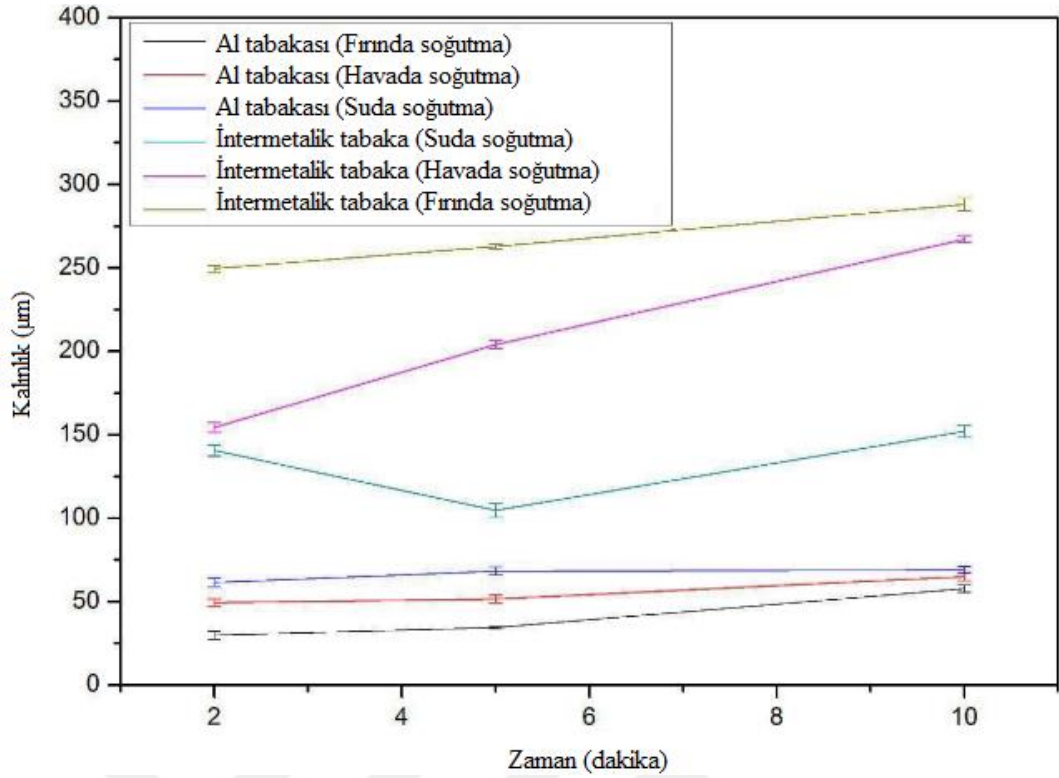


Şekil 7.7 : 750 °C’de alüminyum kaplanmış çeliklerin kaplama tabakalarının kalınlıklarının zaman ve soğutma ortamına bağlı olarak değişimi.

7.3 Mikro Ark Oksidasyonu Sonuçları

Mikro ark oksidasyon işlemi, 750 ve 850°C’de 5 dakika süreyle sıcak kaplama yöntemiyle alüminyum kaplanmış çeliklere uygulanmıştır. Şekil 7.9’da mikro ark oksidasyonu ile oluşturulan seramik kaplamanın taramalı elektron mikrokobuyla çekilmiş kesit görüntüleri verilmiştir. Çelik altlığın üzerinde 3 tabaka kaplama görülmektedir. Bunlar sırasıyla; çelik yüzeyin üzerinde Fe-Al intermetalik tabakası, saf Al tabakası ve en üstte seramik tabakadır.

Şekil 7.10’da mikro ark oksidasyonu ile seramik kaplanmış numunenin yüzey morfolojisi verilmiştir. Bu seramik kaplama, küresel oksitler ve MAO işleminin tipik boşluklu yapısına sahiptir. Seramik kaplamada mikro çatlaklar oluşabilir [27]. Mikro çatlaklar işlem sırasında gerçekleşen erime-katılaşma ve hızlı ısınma-soğuma nedeniyle oluşan termal stres sonucu oluşmaktadır[4][27][29]. Bu mikro çatlaklar yüzey morfolojisinde gözlemlenmiştir. Seramik kaplama 3-10 µm boyutlarında sıkı paketlenmiş tanelere sahiptir. Küresel tanelerin üniform olmayan dağılımı nedeniyle tanelerin büyümesi sırasında boşaltım kanalları oluşmaktadır. Al üzerinde oluşan seramik kaplamanın yoğunluğu Al’dan daha fazladır.



Şekil 7.8 : 850 °C’de alüminyum kaplanmış çeliklerin kaplama tabakalarının kalınlıklarının zaman ve soğutma ortamına bağlı olarak değişimi.

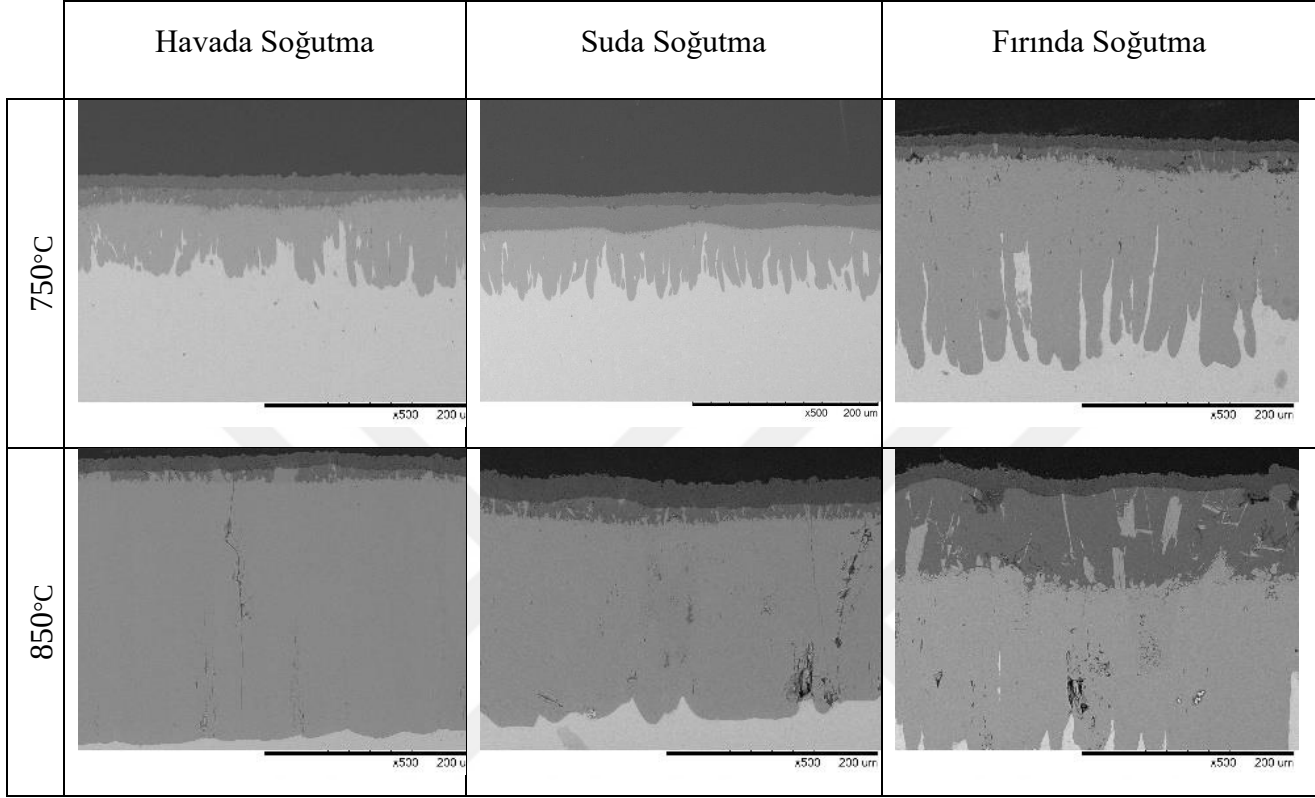
Çelik ve Al arasında görülen difüzyon tabakası, seramik tabaka ve Al tabaka arasında görülmez. MAO işlemi sırasında Al tabakasının kalınlığı oksidasyon nedeniyle azalır. 850°C’de alüminyum kaplama işleminde Al tabakasında yüksek difüzyon oranı nedeniyle Fe-Al intermetalikleri bulunmaktadır. Şekil 7.11’de seramik tabaka ve intermetalik arasında oluşan çatlaklar gösterilmiştir ve bu çatlakların nedeni intermetalikğin gevrekliğidir.

Seramik kaplamaların kalınlıkları şekil 7.12’de verilmiştir. Görüldüğü üzere kalınlıklar, MAO işlemi öncesindeki Al tabakanın kalınlıklarına bağlı olarak 15-25 µm arasında değişmektedir.

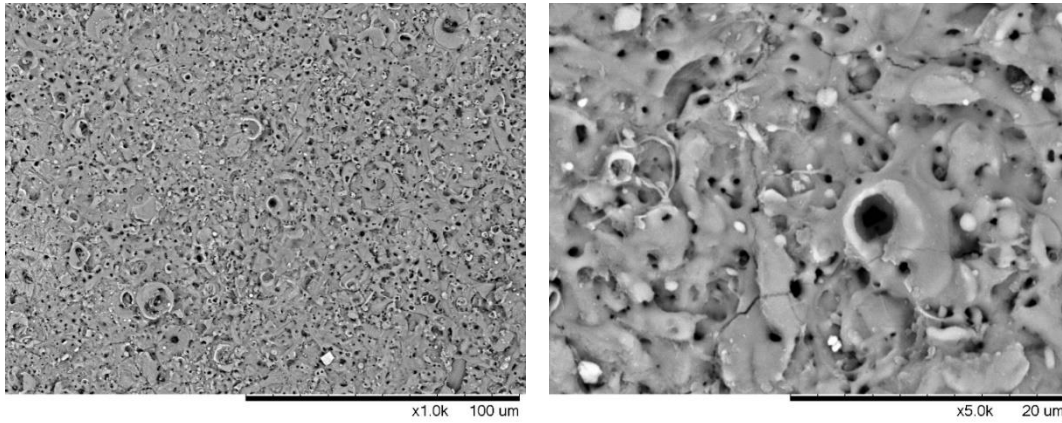
7.4 X-Işını Difraksiyon (XRD) ve Enerji Dağılımı Spektrometresi (EDS) Sonuçları

SDA ve MAO prosesleri sonrasında elde edilen fazlar Şekil 7.13 ve 7.14’de 750°C ve 850°C kaplama sıcaklıkları için sırasıyla verilmiştir. XRD analizleri sonucunda Al, Al-Fe intermetalikleri ve Al_2O_3 pikleri gözlemlenmiştir. MAO işleminin uzun süreli uygulanmaması sebebiyle seramik tabaka ince ve porozlu bir yapıdadır. Bu nedenle X-ışınları seramik tabakayı geçerek Al tabakasına ulaşır. Bunun sonucu olarak da Al

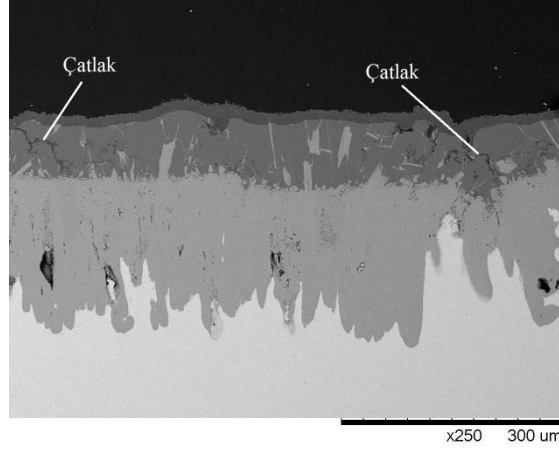
pikleri XRD analizlerinde görülebilir. Ayrıca seramik tabaka $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ içerir. MAO işlemi sırasında sıcaklık binlerce dereceye ulaştığı için Al_2O_3 erir ve farklı formlarda katılaşır.



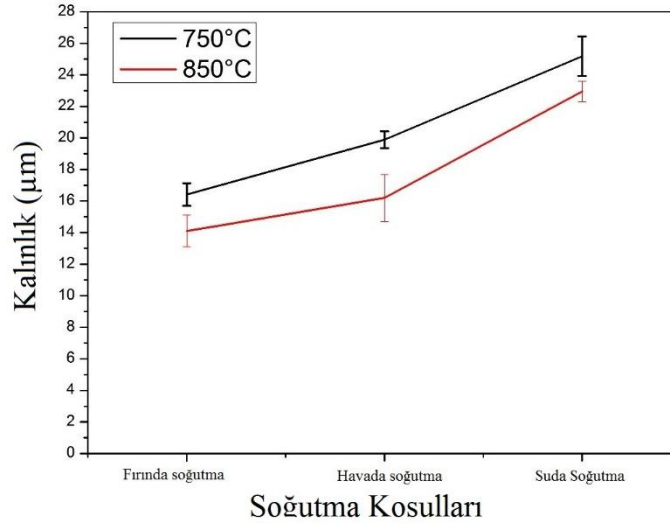
Şekil 7.9 : Mikro ark oksidasyon işlemiyle seramik kaplanmış alüminyum kaplı çeliklerin SEM kesit görüntüleri.



Şekil 7.10 : Seramik kaplamanın yüzey morfolojisi.

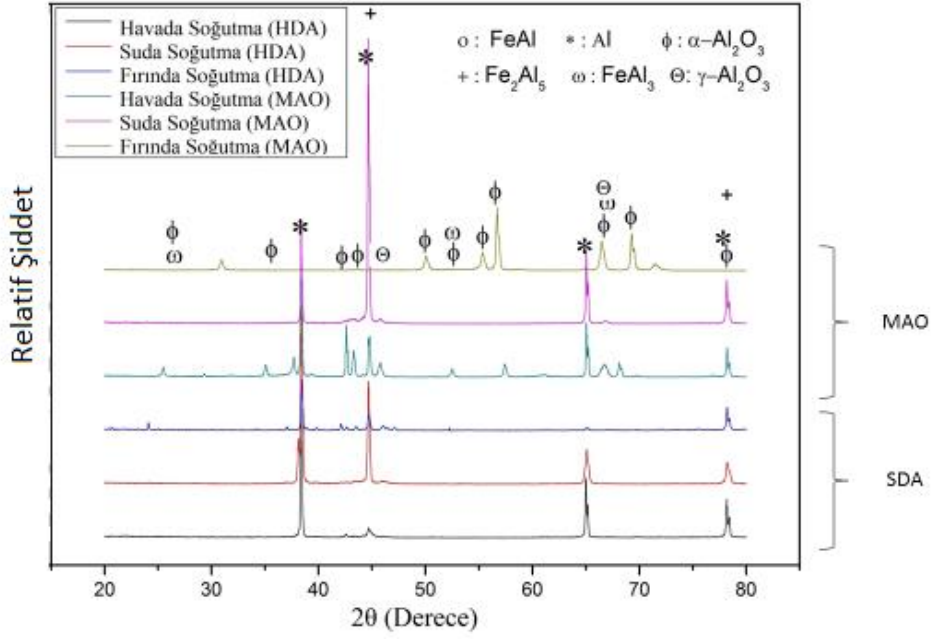


Şekil 7.11 : 850°C’de alüminyum kaplanan çeliklerin mikro ark oksidasyon işlemi sonrasında SEM kesit görüntüsü.

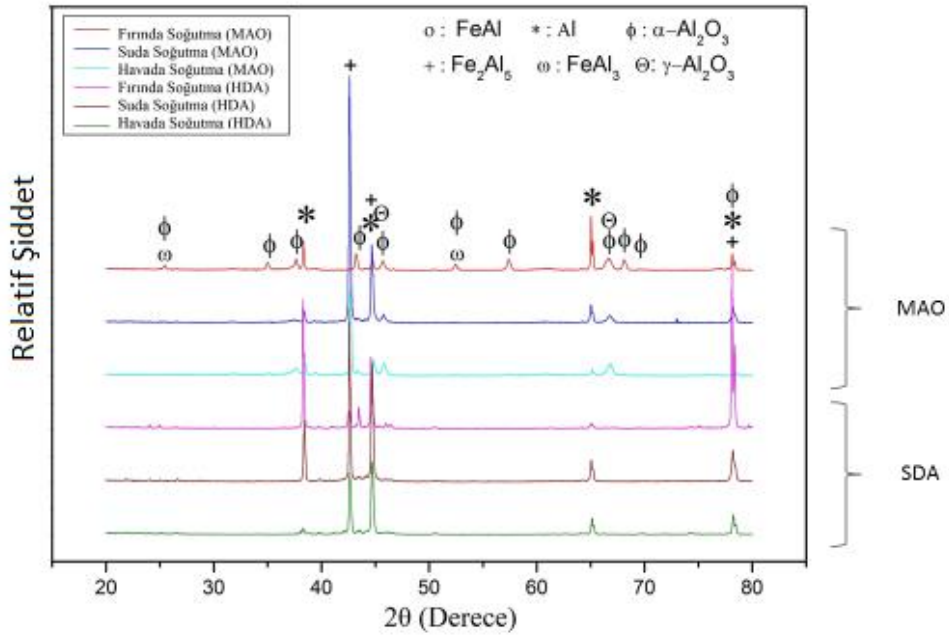


Şekil 7.12 : MAO işlemi sonrası oluşan seramik tabakaların kalınlıkları.

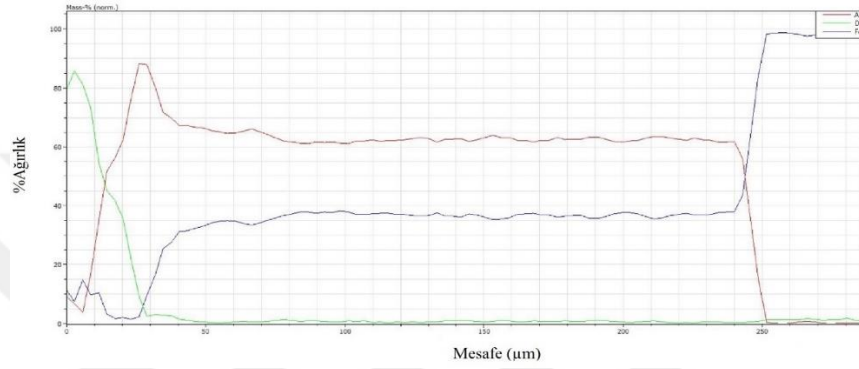
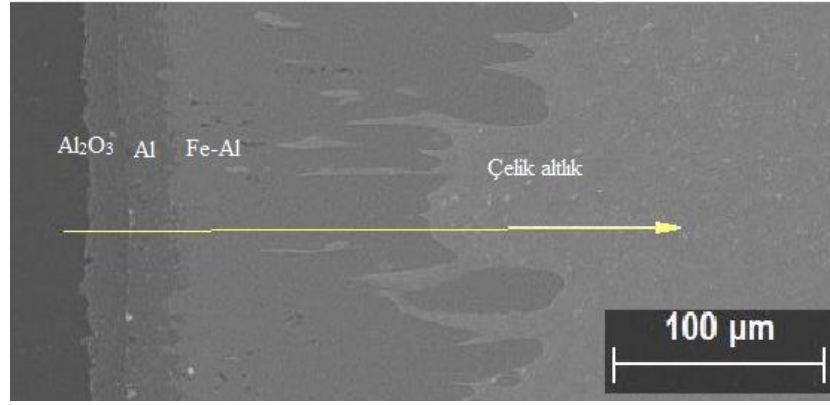
Şekil 7.15’de MAO işlemi sonrasında elde edilen kaplama tabakalarının kesiti boyunca yapılan elementel analizin sonuçları verilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları tablo halinde Çizelge 7.2’de verilmiştir. EDS analizinin sonuçlarından yola çıkarak Al yüzdesinin çeliğe doğru gidildikçe azaldığı gözlemlenmiştir. Çeliğin difüzyonuna bağlı olarak intermetalik tabaka farklı fazlarda oluşmuştur. X-ışınları difraksiyonunda görülen $FeAl_3$ fazının EDS sonuçlarında görülmemesinin nedeni bu fazın şekil 7.16’da gösterildiği gibi biraraya gelerek bir bölgede toplanmasıdır. EDS analizinin daha sağlıklı sonuçlar vermesi için bu bölgelerden nokta EDS yapılarak $FeAl_3$ fazı tespit edilmiştir. Bu faz %85 Al oranına sahiptir ve alüminyumca zengin olan kaplama tabakasında görülmektedir.



Şekil 7.13 : 750°C’de alüminyum kaplanan ve MAO uygulanan numunelerin X-ışınları difraksiyonları.



Şekil 7.14 : 850°C’de alüminyum kaplanan ve MAO uygulanan numunelerin X-ışınları difraksiyonları.



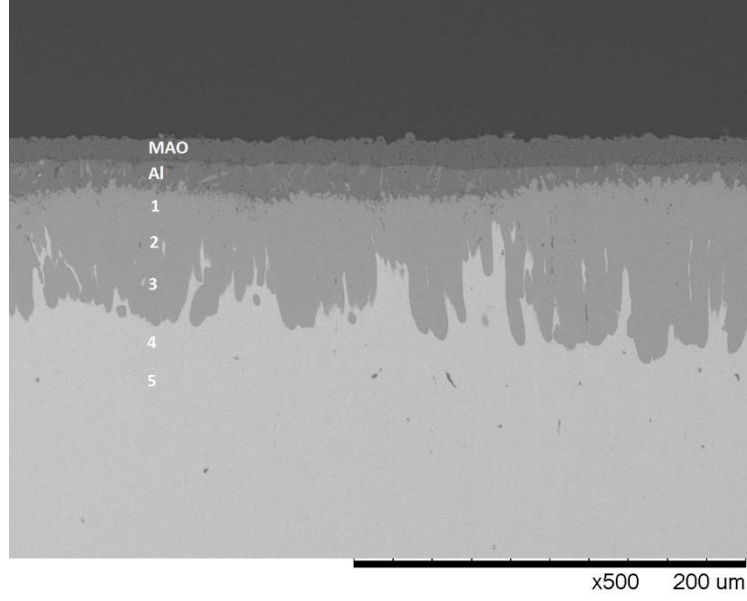
Şekil 7.15 : MAO işlemi sonrasında kaplamanın kesiti boyunca element dağılımı.

Çizelge 7.2 : MAO işlemi sonrası çizgi EDS analizinin sonuçları

Element (ağ. %)	Yüzeyden itibaren mesafe (µm)				
	0-20	20-50	50-75	75-200	200-
Al	60	90	65	60	-
Fe	-	-	35	40	99
O	40	-	-	-	-
Faz	Al ₂ O ₃	Al	FeAl	Fe ₂ Al ₅	Fe

7.5 Sertlik Sonuçları

SDA ve MAO uygulanmış düşük karbonlu çeliğin Vickers sertlik sonuçları Çizelge 7.3’de görülmektedir. Bu çizelge oluşturulurken Şekil 7.16’de gösterildiği gibi kaplama kesiti 7 farklı bölgeye ayrılmıştır. Her bölgeden en fazla 5 sertlik ölçümü yapılarak ortalaması verilmiştir. Bu sayede sertlik değerlerinin kaplama kesiti boyunca nasıl değiştiği gösterilmiştir.



Şekil 7.16 : Sertlik ölçümlerinin yapıldığı bölgeler.

Çizelge 7.3 : Şekil 7.16’de gösterilen bölgelerin sertlikleri.

Daldırma Sıcaklığı (°C)	Soğutma Koşulu	Daldırma Süresi (dk)	Sertlik (HV _{0,025})						
			MAO*	Al	1.Bölge	2. Bölge	3. Bölge	4. Bölge	5. Bölge
750	Havada Soğutma	2		55 ±3	550 ±8	624 ±12	720 ±30	159 ±5	125 ±5
		5	1002 ±15	56 ±3	574 ±20	645 ±16	791 ±25	164 ±4	122 ±5
		10		55 ±3	577 ±13	647 ±15	754 ±15	164 ±4	124 ±3
750	Suda Soğutma	2		52 ±2	507 ±20	677 ±20	779 ±18	210 ±15	206 ±10
		5	1000 ±28	51 ±4	499 ±15	620 ±16	707 ±15	228 ±15	194 ±12
		10		55 ±2	514 ±9	619 ±14	806 ±8	226 ±8	197 ±14
750	Fırında Soğutma	2		55 ±1	550 ±10	645 ±6	766 ±5	166 ±4	126 ±2
		5	1005 ±18	57 ±3	556 ±10	652 ±7	774 ±8	170 ±3	130 ±3
		10		59 ±4	564 ±11	662 ±4	784 ±5	175 ±2	133 ±2
850	Havada Soğutma	2		51 ±4	524 ±20	627 ±15	763 ±12	156 ±4	125 ±5
		5	1006 ±11	55 ±2	526 ±10	642 ±10	801 ±12	160 ±5	130 ±5
		10		58 ±2	531 ±11	651 ±15	796 ±6	156 ±3	125 ±6
850	Suda Soğutma	2		64 ±2	538 ±20	654 ±9	741 ±15	348 ±5	256 ±4
		5	1006 ±18	65 ±3	543 ±3	653 ±5	755 ±10	354 ±6	254 ±5
		10		65 ±2	550 ±12	651 ±6	751 ±14	362 ±10	266 ±9
850	Fırında Soğutma	2		55 ±2	525 ±10	600 ±5	772 ±8	168 ±5	134 ±2
		5	999 ±12	56 ±1	532 ±10	603 ±6	773 ±8	169 ±3	133 ±4
		10		56 ±2	546 ±4	608 ±3	778 ±5	172 ±6	136 ±3

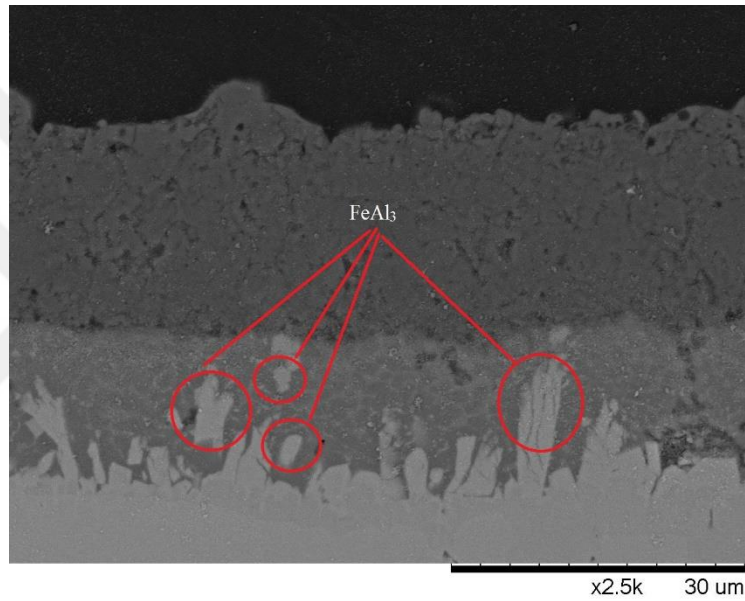
Şekil 7.16’de 1.bölge olarak belirtilen bölge, daha önce yapılan EDS analizleri sonucunda FeAl intermetalik fazı olarak belirtilmişti. Bu fazın Al içeriği Fe₂Al₅ fazından daha fazla olduğu için 2. ve 3.bölge olarak belirtilen bölgelerin sertliği daha yüksektir.

4. ve 5.bölgeler ise altlık malzeme olan AISI1010 çeliğinden alınmıştır. Bu iki bölge arasındaki sertlik farkının nedeni ise 4.bölgede az da olsa Al atomunun difüzyonudur.

Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda farklılık yaratan bir diğer neden ise numunelere SDA işlemi sonrası uygulanan soğutma koşuludur. Havada ve fırında soğutulan numunelerin sertliklerinde bir değişim oluşmazken, suda soğutulan numunelerin sertliklerinde artış görülmektedir.

7.6 Aşınma Deneyi Sonuçları

İşlem uygulanmamış çelik, sıcak daldırma yöntemiyle alüminyum kaplanmış çelik ve mikroark oksidasyonu uygulanmış numunelerin, oda sıcaklığındaki aşınma hızının kaplama sıcaklığına ve soğutma ortamına bağlı değişimi Şekil 7.17’de gösterilmiştir.



Şekil 7.17 : Yüksek Al oranına sahip $FeAl_3$ fazının Al tabaka içinde birikmesini gösteren kesit SEM görüntüsü.

Şekil 7.18’de MAO işlemi sonrasında elde edilen aşınma hızının, alüminyum kaplanmış yüzeyin aşınma hızlarına göre çok daha az olduğu görülmektedir. Aşınma deneyi sonrasında profilemetre cihazıyla yapılan analizler sonucu hesaplanan aşınma hızı değerleri, işlemsiz çelik için mm^3/Nm iken SDA işlemi sonrasında kaplama ve soğutma koşuluna bağlı olarak 267,55 ve 588,62 mm^3/Nm arasında değişmektedir. MAO işlemi sonrasında ise hesaplanan aşınma hızı değerleri 5,86 ve 17,33 mm^3/Nm arasında değişmektedir. Yani MAO işlemiyle beraber alüminyum kaplanmış çeliğin aşınma direnci artmıştır. MAO ve SDA işlemleri kendi içlerinde incelendiğinde kaplama sıcaklığının aşınma direncine bir katkısı olmadığı görülmektedir. Ancak her iki işlem için de soğutma ortamlarının aşınma direncine etki ettiği görülmektedir. SDA işlemi için $750^{\circ}C$ ve $850^{\circ}C$ ’de yapılan kaplamalar için en iyi aşınma direncini gösteren

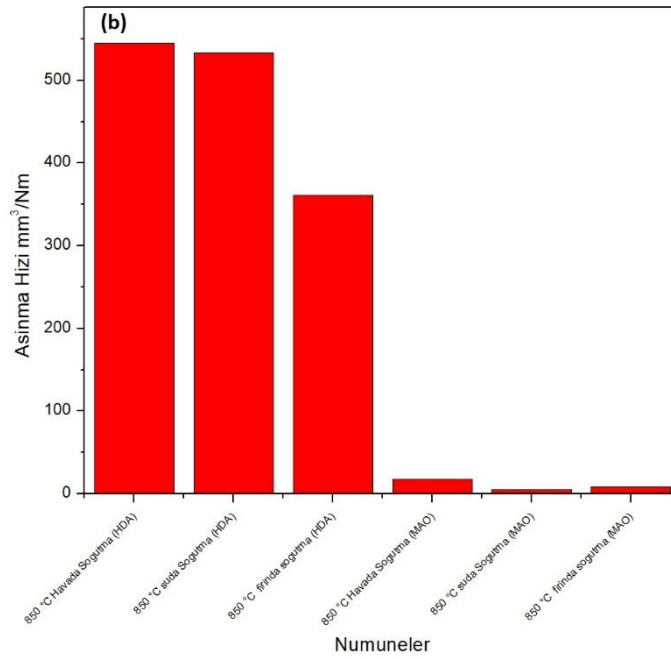
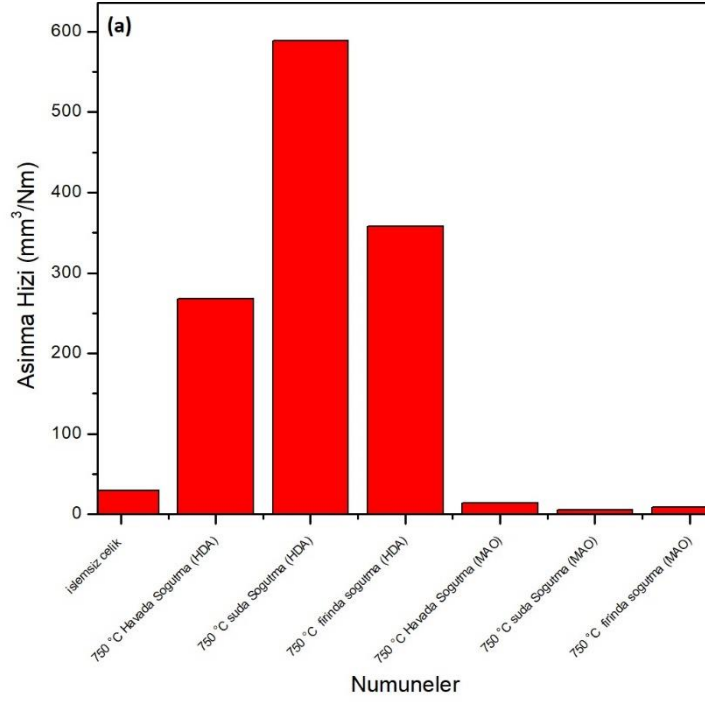
koşul fırında soğutma olmuştur. Bunun nedeni ise, SDA işlemi sonrasında fırında soğutma sırasında difüzyonun devam etmesi sonucu kalın bir intermetalik tabaka ve ince Al tabakası olmasıdır. Alüminyum tabakasının aşınmasının hemen ardından intermetalik tabaka aşınma karşı direnci arttırmıştır. Suda soğutma koşulunda ise en yüksek aşınma hızı elde edilmiştir. Bunun nedeni de SDA işlemi sonrası oluşan kalın Al tabakasıdır. MAO işlemi sonrasında elde edilen seramik tabakaların aşınma direnci incelendiğinde ise, SDA işlemi sonrası suda soğutulan ve ardından MAO işlemi uygulanan numunenin aşınma direncinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise MAO işlemi sonrasında elde edilen en kalın seramik tabakanın bu numunede elde edilmesidir. SDA işlemi sonrasında havada ve fırında soğutulan numunelere uygulanan MAO işlemi sonrasında elde edilen seramik tabakaların aşınma dirençlerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 7.4’de aşınma işlemi sonrası elde edilen aşınma hızları verilmiştir. İşlemsiz çeliğin aşınma hızı 1 olacak şekilde kabul edildiğinde diğer numunelerin bağıl aşınma hızları çizelgede verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde, SDA işlemi aşınma hızını arttırırken MAO işlemi aşınmayı yavaşlatmıştır.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olan aşınma testinin sonucunda elde edilmiş olan sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimi Şekil 7.19 ve 7.20’de verilmektedir. Alüminyum kaplanmış haldeki çelik numuneler zamana bağlı olarak sürtünme katsayısı hızlı bir şekilde artarken, herhangi bir işlem uygulanmamış çelik ve MAO işlemi sonrası seramik kaplanan numunelerde ise bu eğilim daha düşüktür.

Şekil 7.19’de herhangi bir işlem uygulanmamış çelik numunenin ortalama sürtüne katsayısı 0.42 olduğu görülmektedir. 750°C’de SDA işlemi sonrasında ortalama sürtünme katsayılarının havada, suda ve fırında sırasıyla 0.64, 0.61 ve 0.69 olacak şekilde arttığı ancak daha sonra uygulanan MAO işlemiyle beraber ortalama sürtünme katsayılarının yine sırasıyla 0.39, 0.24 ve 0.40 olacak şekilde işlemsiz çelik numuneden daha düşük olduğu görülmektedir. 850°C’de SDA işlemi sonrasında ortalama sürtünme katsayılarının havada, suda ve fırında sırasıyla 0.66, 0.54 ve 0.9 olacak şekilde arttığı ancak daha sonra uygulanan MAO işlemiyle beraber ortalama sürtünme katsayılarının yine sırasıyla 0.25, 0.2 ve 0.29 olacak şekilde işlemsiz çelik numuneden daha düşük olduğu görülmektedir. SDA işlemi sonrasında uygulanan soğutma koşulları kıyaslandığında ise sürtünme katsayısının kaplama kalınlığıyla

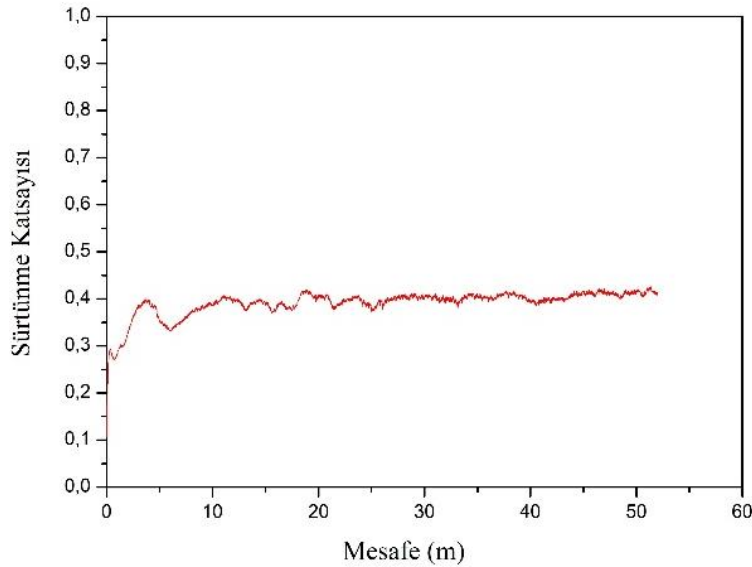
değiştii gör÷lmektedir. SDA işlemi sonrasında en kalın Al tabakası suda soğutulan numunelerde elde edildiğı için aşınma deneyleri sonucunda en yüksek aşınma hızı ve sürtünme katsayısı bu numunelerde gör÷lmektedir. MAO işlemi sonrasında ise en kalın seramik tabaka suda soğutulan numunelerde elde edilmiştir ve bu nedenle en düşük aşınma hızı değeri ve sürtünme katsayısı bu numunelerde gör÷lmektedir.



Şekil 7.18 : Aşınma hızı ve bağıl aşınma hızı değeri. (a) 750 °C (b) 850 °C

Çizelge 7.4: Aşınma hızı ve bağıl aşınma hızı ilişkisi

Numune	Aşınma Hızı (mm ³ /Nm)	Bağıl Aşınma Hızı
İşlemsiz Çelik	30	1
750 °C Havada Soğutma (HDA)	267,66	8,92
750 °C Suda Soğutma (HDA)	588,62	19,62
750 °C Fırında Soğutma (HDA)	357,58	11,91
850 °C Havada Soğutma (HDA)	544,5	18,15
850 °C Suda Soğutma (HDA)	533,5	17,7
850 °C Fırında Soğutma (HDA)	360,72	12,04
750 °C Havada Soğutma (MAO)	14,53	0,48
750 °C Suda Soğutma (MAO)	5,86	0,19
750 °C Fırında Soğutma (MAO)	9,33	0,311
850 °C Havada Soğutma (MAO)	17,33	0,57
850 °C Suda Soğutma (MAO)	5,33	0,17
850 °C Fırında Soğutma (MAO)	8,13	0,271

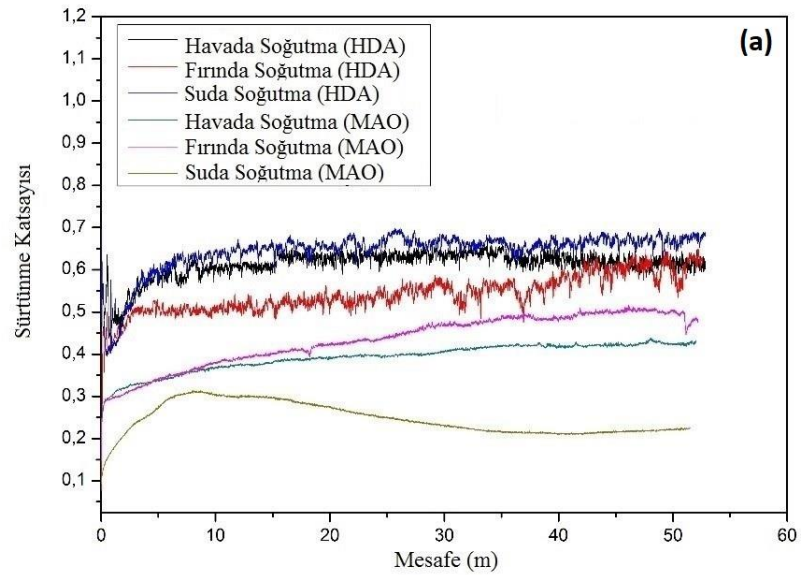


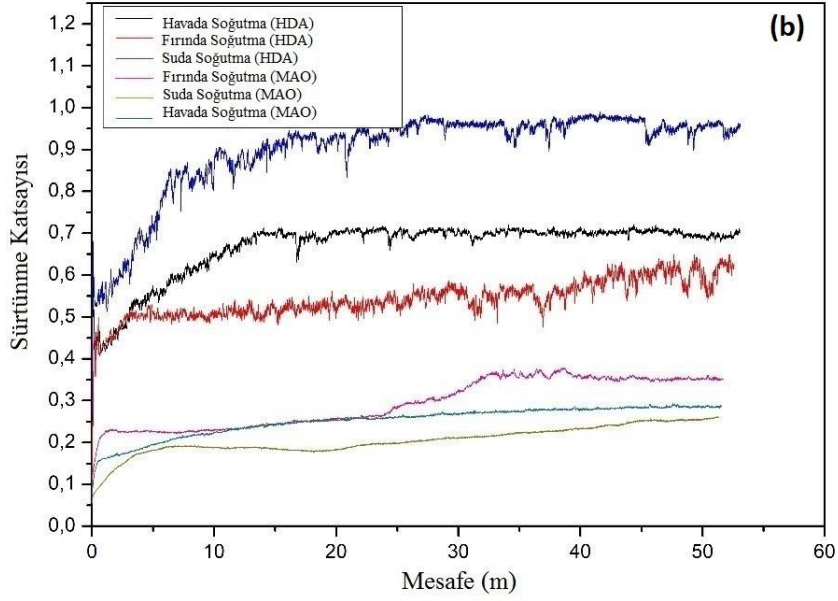
Şekil 7.19 : AISI1010 çeliğinin aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi.

7.7 Yüksek Sıcaklık Oksidasyon Deneyi Sonuçları

Herhangi bir işlem uygulanmamış AISI1010 çeliği ve SDA yöntemiyle Al kaplanmış çelik numunenin yüksek sıcaklık oksidasyon direncini belirlemek için 1,6,24 ve 48 saat süreyle 1000°C'de deney uygulandı. Şekil 7.21'de SDA yöntemiyle Al kaplanmış ve işlemsiz çeliğin zamanı göre yüzdece ağırlık değişimi verilmektedir. 1 saatlik deney sonucunda iki koşul için ağırlık değişimi 7.23 kat fark ediyorken 48 saatlik deney sonucunda bu fark 1.92 kata düşmektedir. Yüksek sıcaklık oksidasyon işlemi sırasında

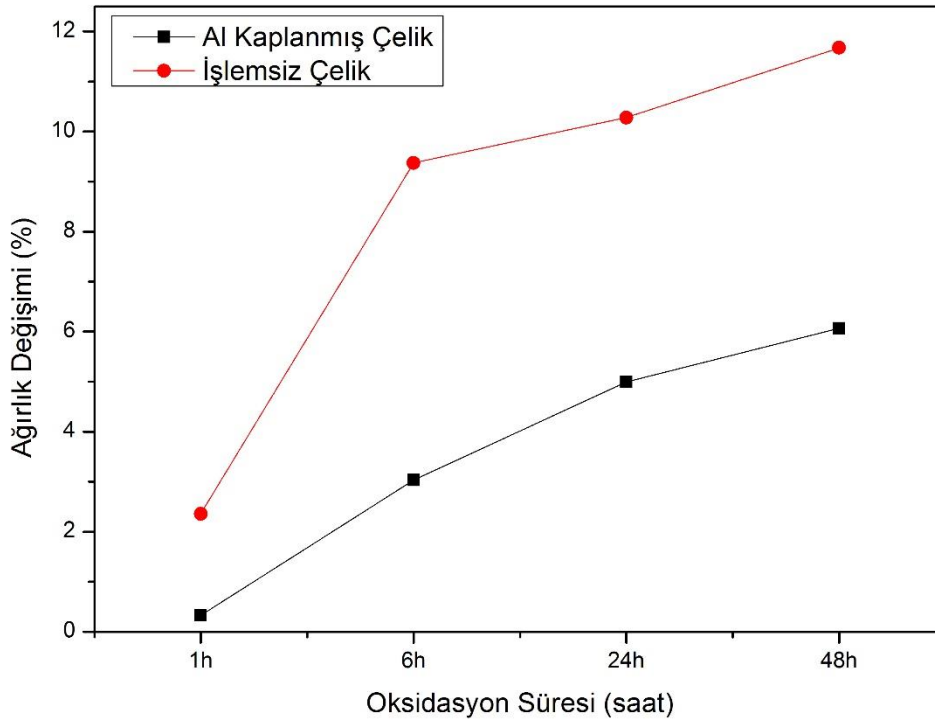
Al kaplanmış çeliğin oksidasyon direnci, yüzeyinde oluşan oksit tabakası sayesinde artmıştır. Al oranı olarak zengin olan oksit tabakasının kalınlığı oksidasyon süresinin artmasıyla artmaktadır. Şekil 7.22’de yüksek sıcaklık oksidasyon deneyi sonrası işlemsiz çelik ve Al kaplanmış çelik numunelerde elde edilen oksit tabakalarının SEM kesit görüntüleri verilmiştir. SDA yöntemiyle kaplanan çelikte elde edilen saf Al tabakasının alüminyum oksit tabakasına değiştiği görülmektedir. Bu oksit tabakası çelik yüzeye oksijen girmesini engeller ve yüksek sıcaklıkta yüksek oksidasyon direnci sağlar.





Şekil 7.20 : a) 750°C ve b) 850°C SDA ve SDA-MAO işlemlerine uygulanan aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi.

Alüminyum oksit tabakasının kalınlığının her bir oksidasyon süresi için değişmediği görülmektedir. Ancak Fe_2Al_5 ve FeAl_2 yapıları FeAl yapısına dönüşmektedir. Yüksek sıcaklık oksidasyon deneyi süresince Fe atomları dışarıya, Al atomları içeriye doğru difüzyon hareketi gerçekleştirirler. Kesit görüntüleri, Al oranı olarak zengin olan tabakanın FeAl ve FeAl_2 yapısındaki intermetaliklere dönüştüğünü göstermektedir.



Şekil 7.21 : 1000°C’de uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyonu deneyinin farklı süreler ve numuneler için yüzdece ağırlık değişimi.

İşlemsiz çeliğe uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyon deneyi sonrası yapılan incelemelerde oksit tabakasının 3 farklı oksitten oluştuğu belirlenmiştir. Bunlar; Fe_2O_3 (hematit), Fe_3O_4 (magnetit) ve FeO (wüstit) oksitleridir. Wüstit oluşuktan sonra devam eden oksidasyon işlemiyle birlikte $4\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Fe}$ reaksiyonu sonucunda wüstit -altlık malzeme arayüzeyinde magnetitler oluşur. Bu yapı Şekil 7.23’de görülmektedir.

Oksitin koruyucu olup olmamasını anlamak için Pilling-Bedworth (P-B) oranına bakılır. P-B oranları “1” den düşük olan metaller de oksit filmi gözenekli olur ve metal yüzeyini örtmediği için koruyucu değildir. Bu oran “1” den büyük olduğunda film oluşurken bünyesinde baskı gerilmeleri oluşur. P-B oranı 2–3’den büyük ise, oksit filmi çatlayabilir ve yüzeyden dökülebilir; bu durumda metal yüzeyi yine korumasız kalır. İdeal P-B oranı “1” dir. Koruyucu yüzey oksitleri, P-B oranı 1 ile 2 arasında olan metallerde oluşmaktadır.

SDA yöntemiyle alüminyum kaplanan çeliğin yüksek sıcaklık oksidasyon işlemi sonrasında yüzeyinde görülen Al_2O_3 oksit tabakasının P-B oranı hesaplandığında 1,28 olduğu görülmektedir. Aynı şekilde işlemsiz çelik numuneye uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyonu işlemi sonrasında oluşan oksit yapıların P-B oranları hesaplandığında sırasıyla Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ve FeO için 5,4, 4,93 ve 1,77 bulunmuştur.

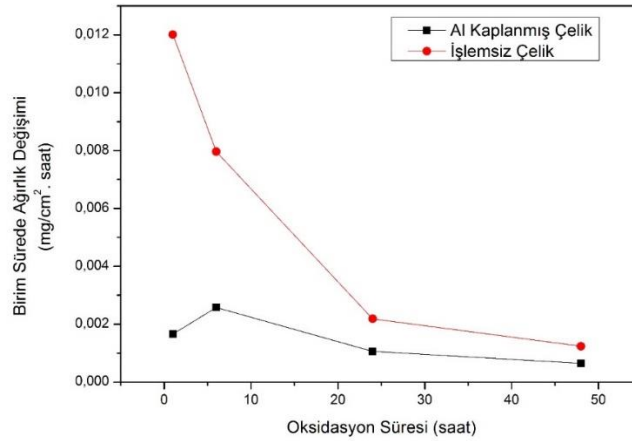
Kirkendall etkisine bağlı olarak Fe-Al intermetalik tabakası ve çelik altlık arasında boşluklar oluştuğu görülmektedir. Bu boşluklar 1 saatlik yüksek sıcaklık oksidasyonu işleminden sonra Şekil 7.23’de çelik ve intermetalik tabaka arasında görülen siyah bölgelerde oluşmaya başlamıştır. Bu boşlukların büyümesiyle çatlakların oluşabileceği hatta bu çatlak sonucunda tabakaların birbirinden ayrılabilceği tahmin edilmektedir. Alüminid içinde görülen siyah bölgeler ise yüksek sıcaklık oksidasyonu sırasında oluşan oksitlerdir.

Yapılan oksidasyon deneyleri sonucunda elde edilen verilerle oksidasyon kinetiği hakkında bilgi sahibi olunabilir. Oksidasyon kinetiğini belirleyebilmek için ağırlık değişimi ve süre arasındaki bağlantı kullanılır. Oksidasyon kinetiğinin belirlenmesinde kullanılan bu grafik lineer, parabolik ve logaritmik olabilir[30].

Şekil 7.22’de alüminyum kaplanmış çeliğin birim saatte ağırlık değişimi incelendiğinde 6.saatte kadar ağırlık artış hızının arttığı ve daha sonrasında düşmeye başladığı görülmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklık oksidasyonu işleminin başlarında Al_2O_3 ’ in çok hızlı oluşması ve zamanla oksijen atomlarının oksit tabakanın kalınlaşmasıyla difüzyonunun azalmasıdır.

İşlemsiz çelikte oksidasyon oranı alüminyum kaplanmış çeliğe göre çok daha fazladır. Şekil 7.22’de görüldüğü gibi başlarda oksidasyon oranı çok fazlayken artan süreyle birlikte bu oran azalır ve oksidasyonun yavaş olduğu aşamaya girilmiş olur. Bunun nedeni oluşan oksit tabakasından iyonların geçişinin zorlaşması ve buna bağlı olarak oksit tabakanın kalınlığında değişimin azalmasıdır.

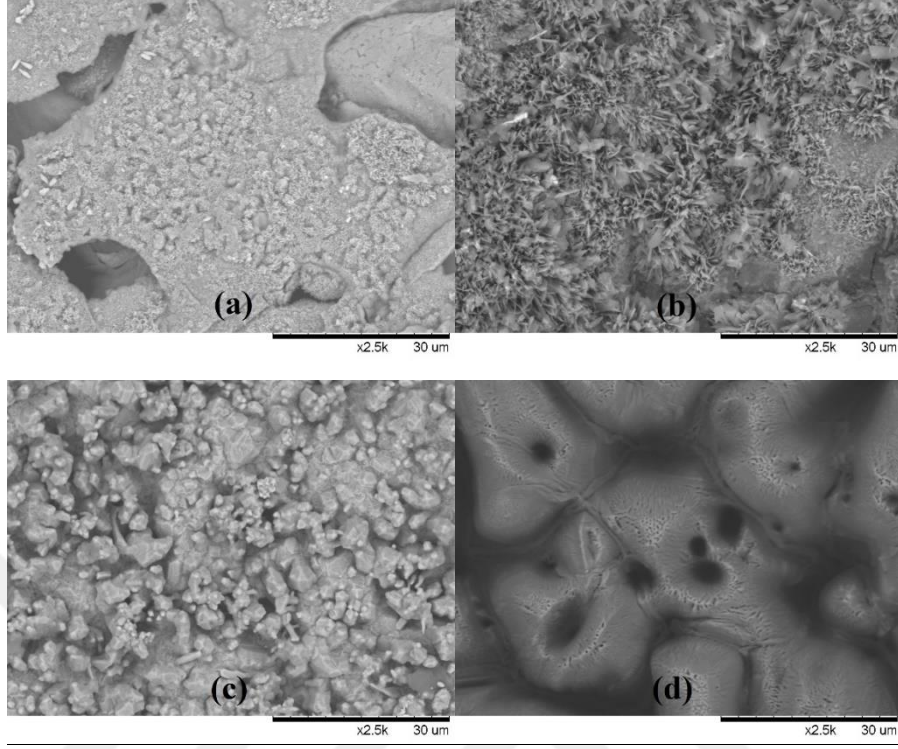
Şekil 7.24’de SDA işlemiyle alüminyum kaplanan çeliğe uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyon işlemi sonrası oluşan yüzey morfolojisi verilmiştir. Oluşan oksit tabakası yoğun bir yapıdadır ve Al_2O_3 yapısındadır. Bu oksit tabaka, çeliğe uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyon işlemi sonrası elde edilen oksit tabakasından daha fazla boşluğa sahiptir.



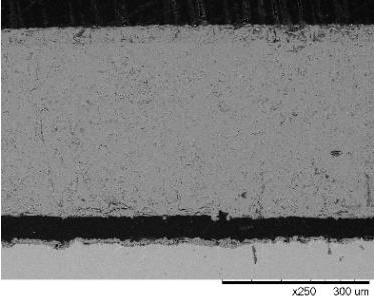
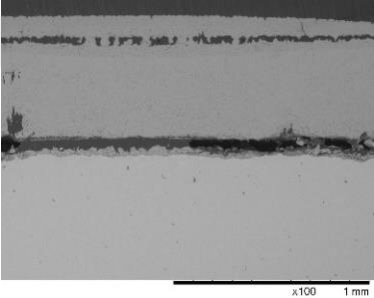
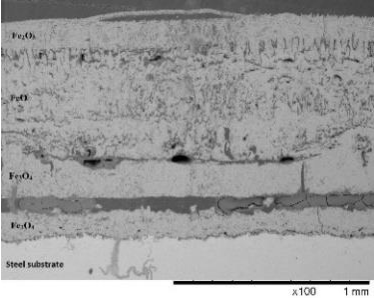
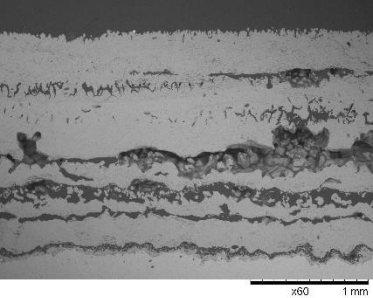
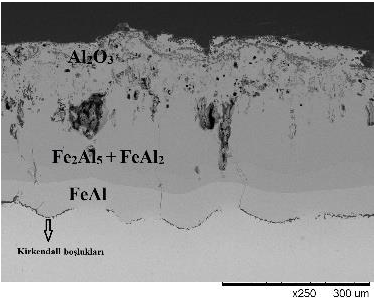
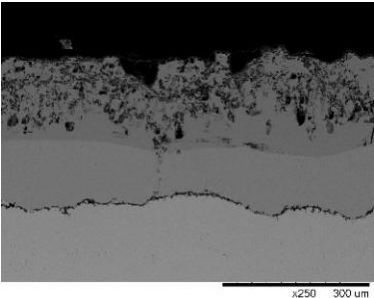
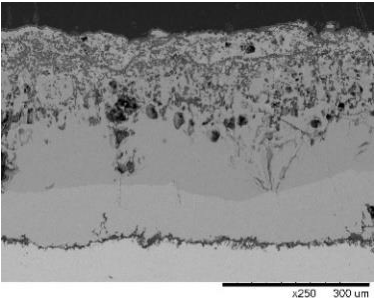
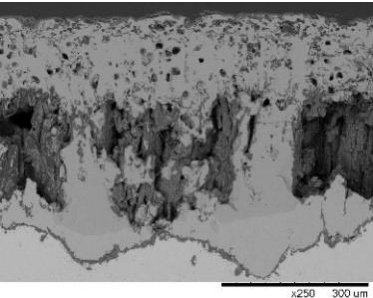
Şekil 7.22 : Yüksek sıcaklık oksidasyonu işlemi sonrasında birim alan ve sürede ağırlık değişimi grafiği.

Şekil 7.25’de 1 ve 48 saat süreyle $1000^{\circ}C$ ’de yüksek sıcaklık oksidasyonu uygulanmış AISI1010 çeliğinin X-ışınları analizi verilmiştir. Fe_3O_4 (manyetit), FeO (wüstite) ve Fe_2O_3 (hematit) oksit fazları tespit edilmiştir. Şekil 7.26’de ise 1 ve 48 saat süreyle $1000^{\circ}C$ ’de yüksek sıcaklık oksidasyonu uygulanan Al

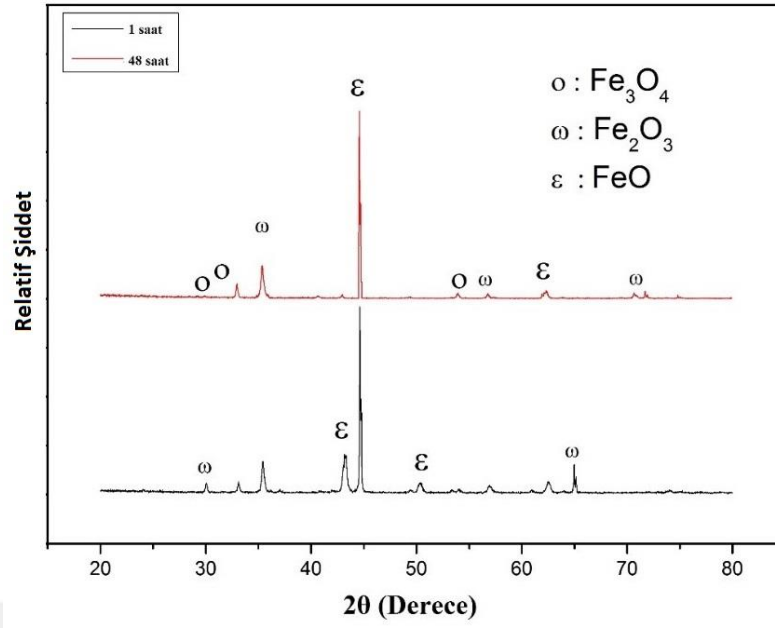
kaplanmış çeliğin X-ışınları analizi verilmiştir. Bu numunelerde Al_2O_3 fazı tespit edilmiştir.



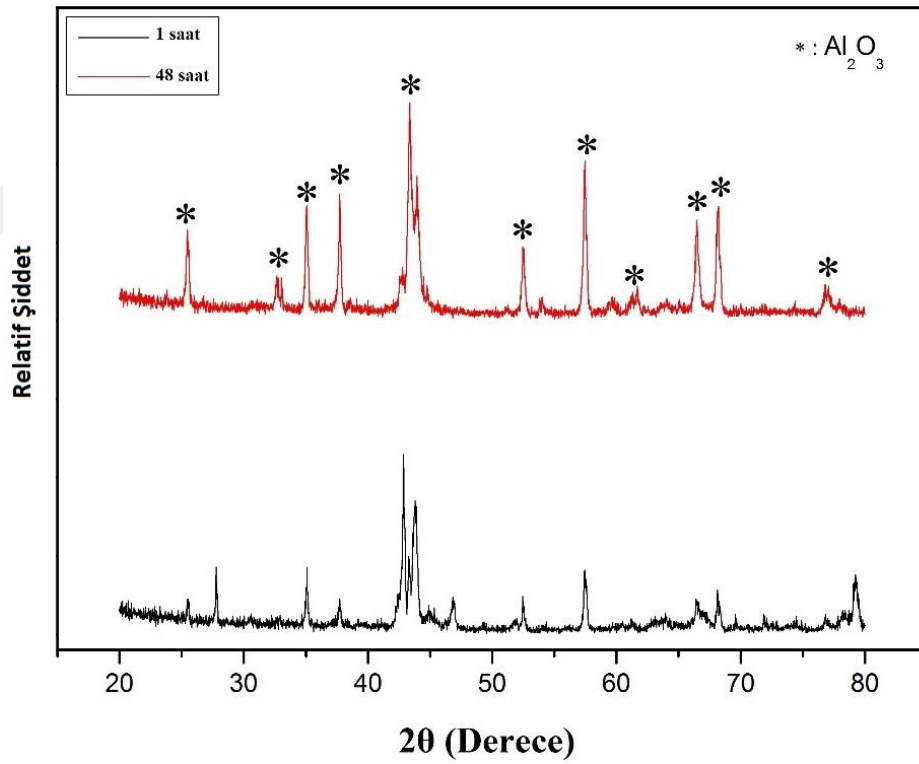
Şekil 7.24 : 1000°C’de yüksek sıcaklık oksidasyonu deneyi sonrası yüzey morfolojisi. a) 1 saat b) 48 saat alüminyum kaplanmış çelik c) 1 saat d) 48 saat işlemsiz çelik için.

	1 saat	6 saat	24 saat	48 saat
İşlemsiz Çelik				
Al kaplanmış Çelik				

Şekil 7.23 : 1000°C’de 1,6,24 ve 48 saat süreyle uygulanan yüksek sıcaklık oksidasyonu deney sonucunda oluşan oksit tabakalarının kesit SEM görüntüleri.



Şekil 7.25 : Yüksek sıcaklık oksidasyonu sonrası işlemsiz çeliğin XRD paterni.



Şekil 7.26 : Yüksek sıcaklık oksidasyonu sonrası SDA işlemi uygulanmış çeliğin XRD paterni.

AISI1010 çeliğinin Vickers sertliği 108 HV_{0.2} olmakla beraber yapılan ölçümlerle standart değerlerle uyum halindedir.

Çizelge 7.3’de SDA işlemi sırasında difüzyonun etkisiyle meydana gelen farklı intermetalik fazların sertliklerindeki farklılık görülmektedir. Bu farklılık intermetalik tabakaların içerdiği Fe atomlarının yüzdesine bağlı olarak ortaya çıkar. Fe atomu arttıkça sertlikte artış olduğu görülmektedir.



8. GENEL SONUÇLAR

Düşük karbonlu AISI1010 çeliği, 750 °C ve 850 °C’de sıcak daldırma yöntemiyle 2, 5 ve 10 dakika süreyle alüminyum kaplanmış ve hava, su ve fırın olmak üzere 3 farklı ortamda soğutulmuştur. Alüminyum kaplanmış çelik daha sonrasında MAO yöntemi ile Al_2O_3 kaplanmıştır. Bu işlemler sonrasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir :

- SDA yönteminde sıcaklık ve sürenin artışının kaplama kalınlığını arttırdığı görülmektedir. Ancak sıcaklığın artmasıyla yapıda Kirkendall etkisine bağlı olarak boşluklar görülmektedir. Bu boşluklar 850 °C’de bütün daldırma süreleri ve soğutma koşullarında görülmektedir.
- SDA işlemi sonrasında uygulanan soğutma koşullarının kaplama morfolojisine doğrudan etki ettiği görülmektedir. Suda soğutulan numunelerde Al tabakasının daha kalın olduğu; fırında soğutulan numunelerde ise intermetalik tabakanın daha kalın olduğu görülmektedir.
- SDA yöntemi ile kaplanan çeliğin yüzeyinde difüzyona bağlı olarak sırasıyla Fe_2Al_5 , $FeAl$ ve Fe_3Al intermetalikleri oluşmuştur.
- MAO işlemi sonrasında elde edilen Al_2O_3 tabakasında mikro boşluklar olduğu görülmektedir.
- İşlemsiz çeliğe uygulanan aşınma deneyi sonrası elde edilen aşınma hızı 30 mm^3/Nm iken SDA uygulanmış çeliklerin aşınma hızları soğutma koşullarına bağlı olarak 10-20 kat arasında artmaktadır.. MAO uygulanmış numunelerde ise aşınma hızı değerleri 2-6 kat arasında azalmaktadır. SDA işlemi aşınma direncini düşürürken MAO işlemi aşınma direncini arttırmıştır.
- İşlemsiz çeliğin yüksek sıcaklık oksidasyon direnci, SDA yöntemiyle kaplanmış çeliğinkine oranla çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni yüksek sıcaklık sonrası oluşan FeO , Fe_3O_4 ve Fe_2O_3 oksitlerinin koruyuculuğunun $\alpha-Al_2O_3$ oksitinden daha düşük olmasıdır.
- İntermetalik tabakada farklı sertlik değerlerinin bulunduğu görülmektedir. Bunun nedeni farklı fazlardaki intermetaliklerin içindeki Fe miktarıdır. Saf

alüminyum tabasına yakın olan FeAl intermetaliğinin ertliğı 550 ± 20 HV_{0,025} iken çelik tabakasına yakın Fe₂Al₅ intermetaliğinin sertliğı 750 ± 20 HV_{0,025}'dir.



KAYNAKLAR

- [1] **Lu, L., Zhang, J., Shen, D., Wu, L., Jiang, G. and Li, L.**(2012). *J. Alloys Compd.*, vol. 512, no. 1, *TEM analysis and wear resistance of the ceramic coatings on Q235 steel prepared by hybrid method of hot-dipping aluminum and plasma electrolytic oxidation*, pp. 57–62.
- [2] **Isiko, M. B.** (2012). *Aluminizing of plain carbon steel*. (Master Thesis). Norwegian University of Science and Technology, Department of Materials Science and Engineering.
- [3] **Wu Q, Xia Y., Li, G., and Xu, F.** (2007). *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* (English Ed., vol. 17, no. 5), *Finite element analysis on stresses field of normalized layer thickness within ceramic coating on aluminized steel*, 934–939,
- [4] **Lu, L. H., Shen, D. J., Zhang, J. W. and Guo, C. H.** (2012). *Appl. Mech. Mater.*, vol. 152–154, *TEM Analysis and Corrosion Resistance of the Ceramic Coatings on Q235 Steel Prepared by Hybrid Method of Hot-Dipping Aluminum and Plasma Electrolytic Oxidation*, 40–45.
- [5] **Poweliet, D., and Monroe, R.** (2006). *Steel Founders' Society of America, Steel Alloys*, Crystal Lake, Illinois pp. 24–29, 2006.
- [6] **Robert, R.V.,** (1985) *Aluminizing of Steel*, New Delhi : Oxonian Press
- [7]. **Furqan, A., Ali, L., Shuja, M. S. and Hasan, F.** (2008). *Pak. J. Engg. & Appl. Sci. Vol. 2 Effect of Coating-thickness on the Formability of Hot Dip Aluminized Steel*.
- [8] **ASM (1982)**, *Aluminum coating of steel, AMS metals Hand Book, on Surface Cleaning, Finishing and Coating*. ASM International material.
- [9] **Richards, H. C. R.W., Jones, R. D., Clements P. D. and Clarke, H.** (1994). *Int. Mater. Rev.*, vol. 39. *Metallurgy of continuous hot dip aluminizing*, 191.
- [10] **Liberski, P., Gierrek, A., Kania, H., Podolski, P. and Tatarek, A.** (2208). *Formation of coatings from a liquid phase on the surface of iron-base alloys*, vol. 8, no. 4, pp. 93–98.
- [11] **Bindumadhavan, S. M. P.N.** (2000). *Surf. Coat. Technol.*, vol. 127, *Aluminizing of plain carbon steel*, 251–258.
- [12] **Massalski, L. K. T.B., Okamoto, H. and Subramanian,P.R. Ed.** (1990) ASM International material, *Phase diagrams*.
- [13] **Zaki, M. Y.** (2011)“Aluminizing of plain carbon steel,” *Unpubl. Res.*,

- [14] **Sedat, K. ve Sinan, K.** (2015) The Effect of Hot Dip Aluminizing on the Corrosion Resistance,” sayı. 11, no. 2, *TM Malzemelerin Korozyon Direncine Sıcak Daldırma Alüminyum Kaplamanın Etkisi*, 241–251.
- [15] **Glasbrenner, H.** (1998). J. Nucl. Mater., vol. 257, *Comparison of hot dip aluminized F28-mod. steel after different subsequent heat treatments.*, 274–281.
- [16] **Shih, H. T.** (2007). J. Mater. Sci. Eng., vol. 454–455, *The parameter of alumizing steel*, 329–356.
- [17] **Auer, W. and G.Eggeler,** (1986). J. Mater. Sci., vol. 21. *Influence of silicon on growth of alloy layer during hot-dip aluminizing*, 9.
- [18] **Chen, F., Shi, J., Wang, Y., Yan, L., and Zhang, F.** (2006). Mater. Lett., *Preparation and properties of hydroxyapatite-containing titania coating by micro-arc oxidation.*
- [19] **Metalast,** (2000). Met. Tech. Bull., *Micro arc oxidation process.*
- [20] **Erokhine, R. Voevodin and A., Schmertzler, A.** (1996). US Patent No. 5720866, ARA Coating, Inc. 5,720,866.
- [21] **M. W. Edith and S., Benno, R.** (1990) “US Patent,” 4,978,432.
- [22] **Li, J., Wan, J., Wan, L., and Feng K.** (2004). Sol. Energy Mater. Sol. Cells, *Study on the preparation of titania films for photocatalytic application by miro-arc oxidation.*
- [23] **İsa M.Ö.** (2009) *2024 alüminyum alaşımasının mikro ark oksidasyon yöntemiyle kaplanması ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi.*
- [24] **Salih, Ç.** (2009). *6082 Kalite Alüminyum Alaşımasının Mikro Ark Oksidasyon Yöntemiyle Yüzey Modifikasyonu.*
- [25] **Kharanagh, V. J., Sani, M. A. F., and Rafizadeh, E.** (2014). Surf. Eng., vol. 30, no. 3, *Effect of current frequency on coating properties formed on aluminised steel by plasma electrolytic oxidation.* 224–228.
- [26] **Gu, W. C.** (2007). J. Alloys Compd., vol. 430, no. 1–2, *Preparation of ceramic coatings on inner surface of steel tubes using a combined technique of hot-dipping and plasma electrolytic oxidation.* 308–312.
- [27] **Wu, Z., Xia, Y., Li, G. and Xu, F.** (2007) Appl. Surf. Sci., vol. 253, no. 20 *Structure and mechanical properties of ceramic coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation on aluminized steel.* 8398–8403.
- [28] **Zhang, Z. G., Peng, Y. P., Mao, Y. L., Pang, C. J. and Lu, L. Y.** (2012). Corros. Sci., vol. 55, *Effect of hot-dip aluminizing on the oxidation resistance of Ti-6Al-4V alloy at high temperatures.* 187–193.
- [29] **Fuyan Sun, X. N. I. and Guang W.** (2014). Metall. Mater. Eng., vol. 8, no. 3, *Titanium-Aluminum Oxide Coating on Aluminized Steel.* 195–199.
- [30] **Guang-ming C., Zao. L., Xiao-jiang L., Bin S.** (2014). J. Iron Steel Res. Int., vol. 21(3), *Morphology of Oxide Scale and Oxidation Kinetics of Low Carbon Steel.* 335–341.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Mustafa AÇIKSÖZ
Doğum Yeri ve Tarihi : Kağızman / 21.02.1992
Adres : Barış Mah.. Şişlikent Apt. No:27 Daire:45 Beylikdüzü
E-posta : mustafa.aciksoz92@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2010-2014, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve
Malzeme Mühendisliği
Yükseklisans : 2014-2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Malzeme
Mühendisliği