



**ALÜMİNYUM PARÇALARIN
BOR İÇEREN MALZEMELER İLE KAPLANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail GÜNDÜZ

**Danışman
Prof. Dr. Atilla EVCİN**

NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ

ANABİLİM DALI

Ekim 2022

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÜMİNYUM PARÇALARIN
BOR İÇEREN MALZEMELER İLE KAPLANMASI**

İsmail GÜNDÜZ

Danışman

Prof. Dr. Atilla EVCİN

**NANOBİLİM VE NANOTEKNOLOJİ
ANABİLİM DALI**

Ekim 2022

TEZ ONAY SAYFASI

İsmail GÜNDÜZ tarafından hazırlanan “Alüminyum Parçaların Bor İçeren Malzemeler ile Kaplanması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 28 / 10 / 2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Atilla EVCİN

Başkan : Prof. Dr. İbrahim GÜNEŞ
Giresun Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Prof. Dr. Atilla EVCİN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Dr. Öğretim Üyesi İsmail YILDIZ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, İncehisar MYO

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

28 / 10 / 2022

İmza

İsmail GÜNDÜZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM PARÇALARIN BOR İÇEREN MALZEMELER İLE KAPLANMASI

İsmail GÜNDÜZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Nanobilim ve Nanoteknoloji Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Atilla EVCİN

Alüminyum ve alaşımları dayanıklı ve ekonomik olmalarından dolayı günümüzde otomotiv, havacılık ve uzay, inşaat, gibi çeşitli alanlarda tercih edilmektedir. Bu metalin birçok alanda tercih edilmesine rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunların başında ilk akla gelen korozyon direncinin ve aşınma direncinin düşük olmasıdır. 1946 senesinde ilk olarak bu dezavantaja yönelik çalışmayı iki arkadaş olan Riddel ve Brinnel tarafından gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada akımsız yöntem kullanarak alüminyum yüzeyine nikel kaplayarak yüzeyde sert, aşınmaya ve korozyona dirençli bir tabaka oluşturdular. Tercih edilen bu yöntemde herhangi bir elektrik kaynağına ihtiyaç gerekmemektedir. Ayrıca bu yöntemin diğer yüzey kaplama yöntemlerine göre en büyük avantajı kaplamanın tüm yüzeyde homojen ve sabit kalınlıkta kaplamalar elde edilebilir olmasıdır.

Yapılan bu çalışmada Al. 2024 ve 7075 alaşımlarının yüzeylerine akımsız Ni-B kaplanması hedeflenmektedir. Yapılan literatür çalışmaları sonucunda uygun bir Ni-B banyosu hazırlanmıştır. Kaplama yapılacak olan alüminyum alaşımları banyoya alınmadan önce belirli ön işlemlerden geçirilerek kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Kaplama parametresi olarak farklı kaplama süreleri ile çalışılmıştır. 10 dk, 20 dk, 30 dk, 60 dk ve 90 dk' kaplama sürelerine sahip numuneler hazırlanmış ve 400⁰C'de 2 saat tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan kaplama ve tavlama işlemlerinden sonra numuneler SEM, XRD faz analizi, korozyon testi ve sertlik testleri yapılaması üzere analiz laboratuvarına gönderildi.

Gelen sonuçlar doğrultusunda kaplamaların yüzeyde başarılı bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Yapılan XRD testinin sonuçları doğrultusunda elde ettiğimiz Ni-B kaplamadaki fazlar literatürdeki Ni-B kaplamalar neticesinde elde edilen fazlarla uyduğu gözlemlenmiştir.

Al. 2024 ve 7075 alaşımlarının korozyon dirençlerinin ölçülmesinde galvanostat-potansiyostat (GAMRY G750TM) kullanılmış ve %3.5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan her iki alaşımda da yapılan kaplamaların korozyona karşı direnç gösterdiği ve böylelikle istenilen hedefe ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

Al. 2024 ve 7075 alaşımlarının Vicker sertlik testi ölçümlerinde mikro vickers sertlik ölçer (Shimadzu HVM-G-20) kullanılmıştır. Yapılan analiz 50 gr yük altında 10 sn süreyle her numune için 5 adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde her iki alaşımda da gerçekleştirilen kaplamaların sertlik değerleri saf numuneye göre fazla olduğu, literatürdeki değerlerle uyduğu ve istenen hedefe ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

2022, xiv + 81 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sodyum bor hidrür, Al. 7075-2024, Akımsız kaplama.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

COVERING ALUMINUM PARTS WITH BORON CONTAINING MATERIALS

İsmail GÜNDÜZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Nanoscience and Nano Technology

Supervisor: Prof. Atilla EVCİN

Because aluminum and its alloys are durable and economical, they are preferred in various fields such as automotive, aviation and space, construction. Although this metal is preferred in many areas, it also has some disadvantages. The first thing that comes to mind is the low corrosion resistance and wear resistance. In 1946, the first study on this disadvantage was carried out by two friends, Riddel and Brinnel. In their study, by using electroless method, they coated the aluminum surface with nickel and formed a hard, wear and corrosion resistant layer on the surface. In this preferred method, no electricity source is required. In addition, the biggest advantage of this method compared to other surface coating methods is that the coating can be coated with homogeneous and constant thickness on the entire surface.

In this study, Al. Electroless Ni-B coating is aimed on the surfaces of 2024 and 7075 alloys. As a result of the literature studies, a suitable Ni-B bath was prepared. Before the aluminum alloys to be coated are taken into the bath, they are made ready for coating by undergoing certain pre-treatments. As a coating parameter, different coating times were studied. Samples with coating times of 10 min, 20 min, 30 min, 60 min and 90 min were prepared and annealed at 400⁰C for 2 hours.

After the coating and annealing processes, the samples were sent to the analysis laboratory for SEM, XRD phase analysis, corrosion test and hardness tests.

According to the results, it was observed that the coatings formed on the surface successfully. It was observed that the phases in the Ni-B coating, which we obtained in

accordance with the results of the XRD test, matched with the phases obtained as a result of the Ni-B coatings in the literature.

A Potentiostat/Galvanostat (GAMRY G750TM) was used to measure the corrosion resistance of 2024 and 7075 Al alloys and was carried out in 3.5% NaCl solution. From the results obtained, it was observed that the coatings made on both alloys showed resistance to corrosion and thus the desired target was achieved.

A Micro Vickers Hardness Tester (Shimadzu HMV-G-20) was used for Vicker hardness test measurements of 2024 and 7075 alloys. The analysis was carried out 5 measurements for each sample for 10 seconds under 50 g load. When the results obtained are examined, it has been observed that the hardness values of the coatings performed on both alloys are higher than the pure sample, they match the values in the literature and the desired target has been achieved.

2022, xiv + 81 pages

Keywords: Sodium boron hydride, Al. 7075-2024, Electroless coating.

TEŞEKKÜR

Tez alıŐması sűresince maddi ve manevi her tűrlű desteęini esirgemeyen, tez amacının belirlenmesinde ve tez aŐamalarında bilgi birikimini ve tecrűbelerini benimle paylaŐan aynı zamanda lisans ve yűksek lisans eęitimim boyunca her konuda öneri ve eleŐtirileriyle yardımlarını gűrdűęűm saygı deęer danıŐman hocam Sayın Prof. Dr. Atilla EVCİN 'e en içten samimi duygularıyla teŐekkűrlerimi sunarım.

Bu tez çalıŐmamda ilgili analizlerin yapımında saęlamıŐ olduęu yardımlardan dolayı Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK ve DAYTAM bűnyesinde gűrev yapan tűm hocalarıma en içten samimi duygularıyla teŐekkűrlerimi sunarım.

Bu tez çalıŐması boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, hep yanımda olduklarımı hissettiren aileme ve arkadaŐlarıma teŐekkűr ederim.

İsmail GŪNDŪZ
Afyonkarahisar 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Alüminyum	3
2.1.1 Alüminyumun Genel Özellikleri.....	4
2.2 Alüminyum Alaşımları	5
2.3 Alüminyum Alaşımlarını ve Dövme Alüminyumları Tanımlama Sistemi.....	7
2.4 Alüminyum Alaşımlarını ve Dökme Alüminyumları Tanımlama Sistemi.....	8
2.4.1 Alüminyum Döküm ve Külçe	9
2.4.2 Alüminyum Alaşımlı Dökümler ve Külçe	9
2.5 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlı Ürünlerin Çapraz Referansı	10
2.5.1 Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	13
2.5.1.1 Al. 2024-T3 (4.4Cu-1.5Mg-0.6Mn).....	15
2.5.1.2 Al. 7075 (5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr)	17
2.6 Yüzey Kaplama.....	19
2.6.1 Gazlı Hal Kaplama Prosesleri	21
2.6.1.1 Kimyasal buhar biriktirme (CVD)	21
2.6.1.2 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)	23
2.6.2 Erimiş veya Yarı Erimiş Hal	25
2.6.2.1 Termal Sprey Kaplama.....	25
2.6.2.2 Kaynak Kaplama	26
2.6.3 Çözelti Hali	27
2.6.3.1 Akımlı Kaplama (Electrophoretic Coating)	27
2.6.3.2 Akımsız Kaplama (Electroless coating)	30
2.7 Akımsız Nikel Kaplama Banyosu Bileşenleri	33

2.7.1 Nikel İyonları Kaynağı.....	33
2.7.2 İndirgeyici Maddeler.....	33
2.7.2.1 Aminoboran Banyosu.....	33
2.7.2.2 Sodyum Borhidrür (NaBH ₄) Banyosu.....	34
2.7.2.3 Hidrazin (N ₂ H ₄ .H ₂ O) Banyosu.....	36
2.7.3 Enerji.....	36
2.7.4 Kompleks Yapıcı Maddeler	36
2.7.5 Hızlandırıcı Kimyasallar	37
2.7.6 Dengeleyiciler	38
2.8 Elektrosuz Nikel Bor Kaplamalar	39
2.8.1 Morfolojik Özellikleri	39
2.8.2 Isıl İşlem Görmemiş Ni-B Kaplamanın Yapısı.....	40
2.8.3 Fiziksel Özellikleri.....	41
3. MATERYAL ve METOT	43
3.1 Tercih Edilen Substrat	43
3.2 Ön İşlemler	43
3.2.1 Alüminyuma Uygulanan Ön İşlemler.....	44
3.3 Akımsız Ni-B Banyosunun Hazırlanması.....	46
3.4 Kaplamaların Karakterizasyon İşlemleri	49
3.4.1 SEM Analizi.....	49
3.4.2 XRD Analizi	49
3.4.3 Korozyon Testi.....	50
3.4.4 Vickers Sertlik Testi.....	50
3.4.5 Yüzey Pürüzlülüğü Testi.....	51
4. BULGULAR.	52
4.1 Akımsız Ni-B Kaplı Numunelerin Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi.....	52
4.2 Akımsız Ni-B Kaplı Numunelerin XRD (X-Işını Kırınımı) Sonuçları	62
4.3 Korozyon Testi Sonuçları	66
4.4 Sertlik Testi Sonuçları	70
4.5 Yüzey Pürüzlülüğü Testi Sonuçları	72
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	72
6. KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	81

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al.	Alüminyum
Å	Angstrom
Ar	Argon
CH ₃ COO	Asetat
Cu	Bakır
B	Bor
GPa	Cıgapaskal
Zn	Çinko
dk	Dakika
Fe	Demir
Ni ₂ B	Di nikel borür
C ₂ H ₄ (NH ₂) ₂	Etilendiamin
°F	Fahrenayt
Ga	Galyum
gr	Gram
Ag	Gümüş
AgCl ₂	Gümüş klorür
Hv	Hardness Vickers
He	Helyum
N ₂ H ₄	Hidrazin
N ₂ H ₄ .H ₂ O	Hidrazin hidrat
HF	Hidrojen florür
in.	İnç
°K	Kelvin
kg	Kilogram
I _{cor}	Korozyon akım yoğunluğu
E _{cor}	Korozyon potansiyeli
Pb	Kurşun
L	Litre
Li	Lityum
Mg	Magnezyum
Mg ₂ Si	Magnezyum silikat
Mn	Mangan
Max.	Maksimum
MPa	Mega paskal
m	Metre
µA	Mikro amper
µm	Mikro metre
mm ²	Milimetre kare
mV	Mili volt
min.	Minimum
nΩ	Nano ohm
N	Newton
Ni	Nikel

Simgeler (Devamı)

Ni(CH ₃ CO ₂) ₂	Nikel asetat
Ni ₃ B	Nikel borit
NiOH	Nikel hidroksit
NiCL ₂ .6H ₂ O	Nikel klorür hegzahidrat
NiSO ₄ .6H ₂ O	Nikel sülfat hegzahidrat
HNO ₃	Nitrik asit
Ω	Ohm
C ₃ H ₆ O ₂	Propionat
°C	Santigrat
cm ³	Santimetre küp
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
NaBH ₄	Sodyum bor hidrür
NaH ₂ PO ₂	Sodyum hipofosfit
NaCl	Sodyum klorür
(CH ₂) ₂ (CO ₂ H) ₂	Süksinat
W	Tungsten
TiCH ₃ COO	Talyum asetat
TiNO ₃	Talyum nitrat
Ti	Titanyum
TiO ₂	Titanyum dioksit
V	Volt
~	Yaklaşık
wt%	Yüzde ağırlıkça
%	Yüzde
W	Watt

Kısaltmalar

LPCVD	Alçak basınçlı kimyasal buhar biriktirme
Atm	Atmosfer
APCVD	Atmosferik basınçlı kimyasal buhar biriktirme
UHVCVD	Çok yüksek vakumlu kimyasal buhar biriktirme
rpm	Dakikadaki devir sayısı
DC	Doğru akım
DEAB	Di etil amino boran
DMAB	Di metil amino boran
EPD	Elektroforetik kaplama
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu
IAC	İyon Destekli Kaplama
II	İyon İmplantasyonu
IBAD	İyon Işını Destekli Biriktirme
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
PA	Plazma Destekli
pH	Potansiyel hidrojen
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TUAM	Teknoloji uygulama ve araştırma merkezi

Kısaltmalar (Devamı)

HVAH	Yüksek hızlı hava yakıtı
HVOF	Yüksek hızlı oksji yakıt
XRD	X-Işınım kırınım



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Yüzey kaplama yöntemlerinin genel bir sınıflandırması.	20
Şekil 2.2 (a) yüzey değişikliklerinin derinlikleri ve kaplama kalınlıkları ve (b) yüzey teknolojileri için işleme sıcaklıkları için tipik aralıklar	21
Şekil 2.3 Altı aşamalı CVD sisteminin şematik diyagramı.....	22
Şekil 2.4 CVD Fırını.	23
Şekil 2.5 Isı kaynağı olarak elektron ışını kullanan bir fiziksel buhar biriktirme (PVD) makinesinin şematik görünümü	24
Şekil 2.6 PVD Fırın.....	25
Şekil 2.7 Tipik yüksek hızlı oksijen-yakıt proses düzeni.....	26
Şekil 2.8 Şematik plazma sprej kaplama düzeni ve parçaları	26
Şekil 2.9 ABD Patentinde TiO ₂ 'nin elektroforetik birikimi	28
Şekil 2.10 Elektroforetik biriktirme şeması	28
Şekil 2.11 Elektroforetik bir hücrenin şeması.....	29
Şekil 2.12 Temel EPD işleme parametreleri	30
Şekil 2.13 Elektrolit kaplamalarda tortu kalınlığı dağılımının şematik sunumu.....	32
Şekil 2.14 Akımsız kaplamalarda tortu kalınlığı dağılımının şematik sunumu	32
Şekil 2.15 Alüminyum substrat üzerinde akımsız bir Ni-B kaplamasının SEM mikrografı.	39
Şekil 2.16 4 saat boyunca 180 0C'de ısıl işleminden sonra alüminyum substrat üzerinde akımsız Ni-B kaplaması.	39
Şekil 2.17 Ni-B kaplamasının XRD (X-ışını difraksiyonu) paterni.....	40
Şekil 2.18 a) Yapısında ağırlıkça %4.31 B içeren Ni-B kaplamanın TEM (transmisyon elektron mikroskobu) mikrografı b) a da ki TEM mikrografa karşılık gelen SAD paterni.	41
Şekil 3.1 Gamry korozyon hücresi.	50
Şekil 3.2 Gamry Instruments, Warminster, USA.....	50
Şekil 3.3 Shimadzu HMV-G-20 Vickers sertlik cihazı.....	51
Şekil 4.1 Saf Alüminyum 2024 ve 7075 SEM görüntüsü.	53
Şekil 4.2 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 10dk (A ₁) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.	54

Şekil 4.3 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 20dk (A ₂) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.	55
Şekil 4.4 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 30dk (A ₃) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.	56
Şekil 4.5 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 60dk (A ₄) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.	57
Şekil 4.6 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 90dk (A ₅) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.	58
Şekil 4.7 Al. 7075 alaşımının saf haldeki kesit görüntüsü.	59
Şekil 4.8 Al. 7075 alaşımının 10dk (A ₁) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.	59
Şekil 4.9 Al. 7075 alaşımının 20dk (A ₂) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.	60
Şekil 4.10 Al. 7075 alaşımının 30dk (A ₃) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.	60
Şekil 4.11 Al. 7075 alaşımının 60dk (A ₄) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.	61
Şekil 4.12 Al. 7075 alaşımının 90dk (A ₅) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.	61
Şekil 4.13 Al. 2024 saf ve 10 dk'lık (A ₁) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.	63
Şekil 4.14 Al. 2024 20 dk (A ₂) ve 30 dk'lık (A ₃) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.	63
Şekil 4.15 Al. 2024 60 dk (A ₄) ve 90 dk'lık (A ₅) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.	64
Şekil 4.16 Al. 7075 saf 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.	64
Şekil 4.17 Al. 7075 10 dk (A ₁) ve 20 dk'lık (A ₂) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.	65
Şekil 4.18 Al. 7075 30 dk (A ₃) ve 60 dk'lık (A ₄) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.	65
Şekil 4.19 Al. 2024 potansiyostatik eğrileri.	67
Şekil 4.20 Al. 2024 potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.	67
Şekil 4.21 Al. 7075 potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.	68
Şekil 4.22 Al. 2024 zamana karşı sertlik değeri.	71
Şekil 4.23 Al. 7075 zamana karşı sertlik değeri.	71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Alüminyumun metalinin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	5
Çizelge 2.2 Alüminyum alaşımlarının güçlendirme mekanizmalarına göre sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.3 Ana alaşım elementlerine göre gruplanmış alüminyum alaşımları.....	8
Çizelge 2.4 Dövme saf (alaşımsız) alüminyum ve dövme alüminyum alaşımlarının bileşimi	10
Çizelge 2.5 Alüminyum alaşımlarının tipik fiziksel özellikleri	13
Çizelge 2.6 (Devam) Alüminyum alaşımlarının tipik fiziksel özellikleri	14
Çizelge 2.7 Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının nominal yoğunlukları	14
Çizelge 2.8 Çeşitli alüminyum alaşımlarının tipik mekanik özellikleri	15
Çizelge 2.9 Alaşım 2024'ün tipik çekme özellikleri	16
Çizelge 2.10 Alaşım 2024-T3'ün tipik mekanik özellikleri	16
Çizelge 2.11 Alaşım 2024-T3'ün tipik mekanik özellikleri.	17
Çizelge 2.12 Elektrik iletkenliği: 20 °C'de (68 °F)	17
Çizelge 2.13 Elektriksel direnç	17
Çizelge 2.14 Çeşitli sıcaklıklarda alaşım 7075 için tipik çekme özellikleri.	18
Çizelge 2.15 Alaşım 7075'in çekme özellikleri.....	18
Çizelge 2.16 Termal İletkenlik.....	18
Çizelge 2.17 Elektrik iletkenliği ve direnç: 20 °C'de (68 °F).	18
Çizelge 3.1 Ni-B kaplama banyosu bileşenleri.	46
Çizelge 3.2 Ni-B kaplama banyosu parametreleri.....	46
Çizelge 3.3 Ni-B kaplama banyosu bileşenleri ve parametreleri.	48
Çizelge 4.1 Korozyon testinde tercih edilen başlangıç parametreleri.	66
Çizelge 4.2 Al. 2024 tafel eğimleri ile hesaplanan korozyon değerleri	68
Çizelge 4.3 Al. 7075 tafel eğimleri ile hesaplanan korozyon değerleri	69
Çizelge 4.4 Al. 2024.zamana karşı sertlik değerleri.....	70
Çizelge 4.5 Al. 7075.zamana karşı sertlik değerleri.....	70
Çizelge 4.6 Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri.	72

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Alüminyum 2024 alaşımı.....	43
Resim 3.2 Alüminyum 2024 / 7075 alaşımlarının hazırlanması.....	44
Resim 3.3 Alüminyum 2024 / 7075 alaşımların ön işlemleri.	45
Resim 3.4 Alüminyum 2024 / 7075 alaşımların ön işlemleri.	46
Resim 3.5 Kaplama banyosu kurulumu.	47
Resim 3.6 Kaplama banyosu kurulumu.	48
Resim 3.7 LEO 1430 VP.....	49
Resim 3.8 Rigaku Miniflex 600 X-Ray Diffractometer.	49
Resim 5.1 NaOH ile korozyona uğrayan Al. 2024.	72
Resim 5.2 NaOH ile korozyona uğrayan Al. 2024.	73

1. GİRİŞ

Alüminyum yeryüzünde bol miktarda bulunan metallere aittir. Bu metalin yüksek mukavemet, iletkenlik, ekonomik açıdan ucuz olması gibi birçok avantaj bulundurmamasıyla piyasada geniş bir ticari ürün yelpazesine sahiptir. Bu özelliği sayesinde piyasada uzay-havacılık, otomobil, kimya, inşaat, elektrik gibi birçok endüstriyel alanlarda tercih edilmektedir. Bu ürünün avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan en başta korozyon direncinin ve aşınma direncinin düşük olmasıdır. Bir yüzey kaplama yöntemlerinden olan akımsız kaplama yöntemi günümüzde çok fazla tercih edilmektedir. Bu yöntem ekonomik ve kaplama verimi bakımından diğer yüzey kaplama yöntemlerine göre daha avantajlıdır. 1946 senesinde ilk olarak bu dezavantaja yönelik çalışmayı iki arkadaş olan Riddel ve Brinnel tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapmış oldukları çalışmada akımsız Ni kaplamayı kullanarak kaplanan yüzeyin bazı özelliklerinde iyileştirmelere sebep olmuşlardır. Bu yöntem günümüze kadar gelerek Ni iyonuna ek olarak B, W, Pb, Ti gibi farklı elementler eklenmiş ve farklı özelliklerde kaplama banyoları elde edilmiştir.

Bu yöntem sadece metal malzemelerde değil metalik olmayan materyallerde de kullanılmaktadır. Ayrıca akımsız kaplamanın diğer yöntemlere en büyük avantajı altlık yüzeyinde homojen ve dengeli olarak kaplamanın gerçekleştirilebilir olmasıdır. Bu özellik sayesinde piyasada talep oranı artmaktadır (Vitry, Electroless Nickel-Boron Deposits: Synthesis, Formation and Characterization; Effect of Heat treatments; Analytical Modeling of the Structural Stat, 2009).

Bu tez çalışmasında alüminyum alaşımı olan 7075 ve 2024 tercih edilmiş olup bunların korozyona ve tahribata karşı olan direnci iyileştirmek/artırmak hedeflenmektedir. Hedeflenen özellikleri elde etmek için akımsız Ni-B banyoları tercih edilecektir. Nikel iyonunun korozyona karşı direnç gösterdiği yıllardır bilinmekte olup buna ek olarak bor iyonu eklenecektir. Yapılan literatür çalışmaları neticesinde bor mineralinin korozyona karşı çok iyi direnç gösterdiği ve tahribata karşı dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Hazırlanacak olan Ni-B banyosunda nikel iyonu olarak nikel klorür hekza hidrat ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) tercih edilirken bor kaynağı olarak hem de banyoda indirgeyici kaynak olarak sodyum bor hidrür (NaBH_4) tercih edilmiştir. Kaplama süresinin kaplama özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Isıl işlem yani tavlama sonucunda üretilen

akımsız Ni-B kaplamaların, mikro yapısına, sertlik değerine ve korozyon direncine olan etkisi incelenmiştir.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Alüminyum

Alüminyumun geniş kullanım özellikleri, çok çeşitli endüstriyel koşullarda tercih edilmesine izin vermektedir. Alüminyumun bünyesinde, biri düşük ağırlığı olmak üzere birçok avantajı vardır. 2,71 g/cm³ yoğunluğa ve çeliğinkinin üçte biri özgül ağırlığına sahiptir.

Korozyon direnci, alüminyumun bir başka avantajıdır. Alüminyumun yüzey katmanında gerçekleşen oksit kaplama, alüminyumu korozyona karşı korur. Bu koruyucu kaplamanın kalınlığı eloksal kaplama veya anotizasyon işlemleri ile arttırılabilir. Hatta, bu oksit tabakası alkali eriyikleri tarafından yok edildiğinde, tabakanın koruyucu işlevi kaybolabilir. Neticede, inşaatta kullanılan sıva ve harç gibi yapısında kireç barındıran yapı malzemeleri asla alüminyum ile temas halinde bulunmamalıdır (Yüksel, 1991).

Saf halde bulunan alüminyum, diğer metallere göre yüksek düzeyde elektriksel iletkenliğe sahiptir ve bakırın elektrik iletkenliğinin %60'ı kadardır. Özgül ağırlığı bakırın üç katından fazla olduğundan, alüminyum birim ağırlık başına daha yüksek oranda elektriği iletme potansiyeline sahiptir. Neticede, yüksek gerilim hatlarında bünyesinde çeliksels taşıyıcılar bulunduran en uygun iletken alüminyumdur.

Alüminyum, yüzeyinde ortalanmış bir kübik kafese benzer bir yapıya sahip olduğundan dolayı plastikler gibi şekil değiştirebilmektedir. Alüminyum ve alaşımları zehirli olmadıkları için gıda sektöründe de yaygın olarak tercih edilmektedir.

Silikon, bakır, berilyum ve magnezyum alüminyum ve alaşımları üretiminde en temel dört elementtir. Bu dört element bir arada buldukları zaman katı eriyik oluştururlar. Endüstride iki tip alüminyum alaşımı tercih edilmektedir: döküm alaşımlar ve dövme alaşımlar. Alüminyum alaşımının dayanıklılığını arttırmada katı eriyik sertleştirmeye ek olarak soğuk şekillendirme ve çökeltme ile sertleştirme işlemleri de ek olarak eklenebilir. Dövme bakır alaşımlarını sertleştirilmesinde tercih edilen teknik, genellikle yaşlandırma sertleştirme olarak bilinen çökeltme sertleştirmesidir (Onaran, 2003).

İkinci fazın tane sınırında çökmesi için tek fazlı katı eriyik alaşımının doygunluk

sıcaklığına kadar soğutulması gerekmektedir. Soğutma işleminin hızlı gerçekleşmesi sonucunda ikinci fazda ayrışma gözlemlenemez ve bunun neticesinde bakırca aşırı doymuş tek faz gerçekleşir. Alaşımın dikkatli bir şekilde ısıtılması ve mikroskop altı seviyede çökeltilmesi sonucunda sert bir metal ve dayanıklı metal açığa çıkar. Bu işleme literatürde “yaşlanma sertleşmesi” veya “çökme” olarak yer almaktadır. Havacılık sanayisinde bakır içeren alüminyumun haricinde sıklıkla mangan ve magnezyum içerikli alüminyum alaşımları da tercih edilmektedir.

Magnezyum içerikli alüminyum alaşımları tuzlu deniz sularına karşı dayanıklı yapıya sahiptir ve işlenmesinin kolay olmasının yanı sıra alaşımın pekleşmesi sonucunda gücü artmaktadır. Bu özellikleri sayesinde tekne ve diğer deniz araçlarının imalatında tercih edilmektedir.

Silikon içerikli alüminyum alaşımlarının döküm özellikleri gayet iyidir fakat güç olarak zayıf durumdadır. Bu durumun iyileştirilmesi için yapısına magnezyum elementi katılabilir. Yapısında magnezyum, silikon ve bakır barındıran alüminyum alaşımları şekillendirilmesinde kokil olarak adlandırılan metal kalıplar kullanılmaktadır. Bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda güçlerini mihafaza ettikleri için genellikle otomobil endüstrisinde pistonların imalatı için tercih edilmektedir (Bargel & Schulze, 1985).

2.1.1 Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyumun diğer metallere göre avantajlarından bazıları şunlardır (Cayless, 1992):

- Alüminyum ve alaşımlarının korozyona olan dirençliliği sayesinde kara, su ve hava gibi birçok ortamda yer alan veya alacak olan mimari projelerde tercih edilmektedir.
- Alüminyum ve alaşımlarının düşük olan yoğunluklarına göre sahip oldukları yüksek mukavemet özelliği sayesinde birçok mimari yapı/inşaat alanında arzulanan bir malzeme olarak ön görülmektedir.
- Ekstrüzyon teknolojisinin istenilen her türlü profili üretebilme özelliği sahip olması sayesinde otomobil, kapılar ve pencere karoserleri için farklı profil serileri tasarlanmıştır.

Çizelge 2.1 Alüminyumun metalinin mekanik ve fiziksel özellikleri (Cayless, 1992).

Yoğunluk	2.71 g / cm ³
Elastiklik modülü	65 GPa
Genleşme katsayısı	23.9 [10 ⁻⁶ /K]
Erime sıcaklığı	660 °C
Kopma uzaması	4-50 [%]
Çekme dayanımı	40-180 [N / mm ²]
Elektrik iletkenliği	36 [m / Ωmm ²]

2.2 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları kendi arasında döküm bileşimler ve dövme bileşimler olmak üzere iki gruba ayrılırlar. İki grupta yer alan birçok alaşım faz çözünürlüğün den ötürü uygulanan ısı işleme yanıt verirler. Bu işlemler ise su verme, çökeltme veya yaş sertleştirme, çözelti ısı işleme olarak adlandırılmaktadır. Diğer dövme bileşimli alaşımlar özelliklerini geliştirebilmek için çeşitli tavlama prosedürlerinin yanında mekanik indirgeme yoluyla sertleştirmeye dayanmaktadır. Bu tür alaşımlara ise iş sertleştirme denilmektedir. Bazı döküm alaşımları genelde ısı işlem görmemiş ve sadece döküm halinde olan veya çökeltme/çözelti etkisinde olmayan termal olarak değişkenlik göstermiş koşullarda tercih edilir (Grant, 1997).

Dövme ve döküm alaşım terminolojileri gelişmiştir ve gelişmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının bulunduğu en yaygın ülke Amerika Birleşik Devletleri olarak bilinmektedir. Bulunan alaşımları tanımlamada kullanılan sistemler döküm ve dövme alaşımları için farklı terminolojileri kullanmaktadır fakat sistemi basitleştirmek için bulunan alaşımları kendi arasında ailelere ayırmaktadır. Dövme alaşımları için aşağıda belirtilen dönem bileşim ailelerini belirlemede dört basamaklı bir sistem kullanmaktadır:

- 1xxx Kontrollü, alaşım içermeyen (saf halde) alüminyum
- 2xxx Alaşımında bakırın ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır, diğer elementlerden ise magnezyumda belirtilebilir
- 3xxx Alaşımında manganezin ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır
- 4xxx Alaşımında silikonun ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır

- 5xxx Alaşımında magnezyumun ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır
- 6xxx Alaşımında magnezyum ve silikonun ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır
- 7xxx Alaşımında çinkonun ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır fakat diğer elementlerden ise magnezyum, zirkonyum, bakır ve kromda belirtilebilir
- 8xxx Farklı bileşimleri karakterize edebilme özelliğine sahip olan kalay ve bazı lityum bileşimlerinin dahil olduğu alaşım ailesi
- 9xxx ileriye yönelik ayrıldı

Döküm bileşimlerinde ise dövme bileşimlerinin aksine üç basamaklı bir sistem ve ardında ondalık bir değer kullanılmaktadır. “.0” ile belirtilen ondalık değer bize döküm alaşım limitlerini bildirmektedir. “.1” ve “.2” ondalık değer ise eritme işleminden sonra kimyasalların döküm spesifikasyon şartlarına uygun olması ve neticelenmesi gereken külçe bileşimleri bildirmektedir. Döküm bileşimli alaşım aileleri şu şekildedir (Grant, Registration Record of International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, 1989):

- 1xx.x Kontrollü, alaşım içermeyen (saf halde) alüminyum
- 2xx.x Alaşımında bakırın ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır, diğer elementlerinde kullanılabileceği alaşımlardır
- 3xx.x Alaşımında silikonun ana elaman olarak rol aldığı fakat magnezyum ve bakır gibi diğer elementlerinde tercih edildiği alaşımlardır
- 4xx.x Alaşımında silikonun ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır
- 5xx.x Alaşımında magnezyumun ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır
- 6xx.x Kullanılmamış
- 7xx.x Alaşımında çinkonun ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır fakat magnezyum ve bakır gibi diğer elementlerinde tercih edildiği alaşımlardır
- 8xx.x Alaşımında kalayın ana elaman olarak rol aldığı alaşımlardır
- 9xx.x Kullanılmamış

Çizelge 2.2 Alüminyum alaşımlarının güçlendirme mekanizmalarına göre sınıflandırılması (Grant, 1997).

Alaşım	Alaşım serisi
İşlenerek sertleştirilebilir alaşımlar	
Saf alüminyum (Al)	1xxx
Alüminyum-Mangan (Al-Mn)	3xxx
Alüminyum-Silikon (Al-Si)	4xxx
Alüminyum-Magnezyum (Al-Mg)	5xxx
Alüminyum-Demir (Al-Fe)	8xxx
Alüminyum-Demir-Nikel (Al-Fe-Ni)	8xxx
Çökelme ile sertleşebilen alaşımlar	
Alüminyum-Bakır (Al-Cu)	2xxx
Alüminyum-Bakır-Magnezyum (Al-Cu-Mg)	2xxx
Alüminyum-Bakır-Lityum (Al-Cu-Li)	2xxx
Alüminyum-Bakır-Silikon (Al-Cu-Si)	6xxx
Alüminyum-Çinko (Al-Zn)	7xxx
Alüminyum-Çinko-Magnezyum (Al-Zn-Mg)	7xxx
Alüminyum-Çinko-Magnezyum-Bakır (Al-Zn-Mg-Cu)	7xxx
Alüminyum-Lityum-Bakır- Magnezyum (Al-Li-Cu-Mg)	8xxx

2.3 Alüminyum Alaşımlarını ve Dövme Alüminyumları Tanımlama Sistemi

Alüminyum alaşımlarını ve dövme alüminyumları tanımlama için dört basamaklı bir sayısal tanımlama sistemi tercih edilmektedir. Aşağıda gösterilen bu dört basamaklı tanımlama sisteminde ilk basamak grubu göstermektedir:

2xxx ila 7xxx serileri için alaşım grupları en yüksek ortalama yüzdelik değerde bulunan alaşım elementi tarafından belirlenmektedir. Bir istisnai durum olarak, magnezyum silisiti (Mg_2Si) oluşturmak için mevcut magnezyum ve silikon oranlarının baskın olduğu 6xxx serisi alaşım grubu olarak gösterilir. Bir başka istisnai durum ise alaşımın daha öncesinde yazılarak belirtilmiş bir alaşımın modifikasyonu olarak belirtildiği durumlarda yapılmaktadır. Birden fazla element için en yüksek ortalama yüzdelik değer aynıysa, grup tercihi grup sıralamasına binaen yapılır: magnezyum silisit, bakır, çinko, mangazen, silikon, magnezyum veya diğerleri (Smart, 1986).

Alüminyumun sahip olduğu 1xxx grubunda yer alan 10xx serisi saf olan alaşımlar için kullanılmaktadır. Dört basamaklı tanımlama sisteminde son iki basamak alüminyumun

yüzdeler olarak minimum miktarını belirtmektedir. Bu haneler, en yakın %0.01'e kadar ifade edildiği zaman, minimum alüminyum yüzdesinin ondalık noktasının sağındaki iki hane ile aynıdır. Sıfırdan farklı olarak ikinci hanelere sahip olan tanımlamalarda (1'den 9'a kadar tam sayılar, gerektiğinde ardışık olarak atanır), bir veya daha fazla münferit safsızlığın özel kontrolünü gösterir.

Alüminyum alaşımlarında 2xxx'den 8xxx'e kadar olan gruplarda ise ikinci rakam alaşım modifikasyonunu göstermektedir. Eğer ikinci hane sıfır olursa bu alaşımın orijinal hali olduğunu göstermektedir. 1'den 9'a kadar olan ardışık tam sayıların atanmaları ile alaşımın orijinal modifikasyonunu gösterir. Önerilen bir bileşimin sadece önceden belirlenmiş bir alaşımın modifikasyonu mu yoksa tamamen özgün bir alaşım olup olmadığını belirlemede belli kurallar oluşturulmuştur. 2xxx ve 8xxx gruplarında bulunan son iki hane herhangi bir özellik belirtmemektedir yalnızca grup içerisinde farklı olan alüminyum alaşımlarını tanımlamayı sağlar (Kaufman & Rooy, 1989)

Çizelge 2.3 Ana alaşım elementlerine göre gruplanmış alüminyum alaşımları (Gensure & Potts, 1983).

Alüminyum (Saf Al), $\geq 99.00\%$	1xxx
Bakır (Cu)	2xxx
Mangan (Mn)	3xxx
Silikon (Si)	4xxx
Magnezyum (Mg)	5xxx
Magnezyum ve silikon (Mg ve Si)	6xxx
Çinko (Zn)	7xxx
Diğer elementler	8xxx
Kullanılmayan seriler	9xxx

2.4 Alüminyum Alaşımlarını ve Dökme Alüminyumları Tanımlama Sistemi

Alüminyum alaşımlarını ve döküm alüminyumları tanımlama için dört basamaklı bir sayısal tanımlama sistemi tercih edilmektedir ve aynı zamanda bu dört basamaklı sistemde ondalık nokta yer almaktadır. Bu sistemde ilk hane alaşımın hangi gruba ait olduğunu göstermektedir.

2xx.x ila 8xx.x serileri için alaşım grupları en yüksek ortalama yüzdelik değerde bulunan alaşım elementi tarafından belirlenmektedir. Kayıtlı alaşım elementleri için en büyük ortalama yüzde birden fazla olması ortak ise alaşım grubunun belirlenmesinde

sıralama takip edilir. Bu sıralama ilk gelen element ile başlar. İkinci iki hane ise alüminyumun belirli bir alaşımını tanımlar veya 1xx.x serisinde alüminyumun saflığını belirler. Ondalık basamak ile ayrılan son rakam ise alüminyumun külçe veya döküm olduğunu göstermektedir. Alüminyumun saf (alaşımsız) haldeki kirliliklerinin seviyeleri veya orijinal bir alaşımın modifikasyonu sayısal gösterimden önce belirli harflerle gösterilmektedir. Bu seri harfler, A ile başlar ve alfabetik sırayla atanırlar. Fakat, bu serilerde I, O, Q ve X kullanılmamaktadır. Önerilen bir bileşimin sadece önceden belirlenmiş bir alaşımın modifikasyonu mu yoksa tamamen özgün bir alaşım olup olmadığını belirlemede belli kurallar oluşturulmuştur (Polmear & Couper, 1993).

2.4.1 Alüminyum Döküm ve Külçe

1xx.x grubunu incelediğimizde, 1'den sonraki iki hane minimum orandaki alüminyum yüzdesini göstermektedir. Bu haneler, en yakın olarak %0.01 olarak ifade edildiği zaman, minimum alüminyum yüzdesinde ondalık noktanın sağ tarafında bulunan hane ile aynıdır. Tanımlamada kullanılan son rakam ise alüminyumun ürün formunu göstermektedir. Örneğin: 1xx.0 gösterimi döküm olduğunu ve 1xx.1 gösterimi külçe olduğunu ifade eder (Bloch, 1961).

2.4.2 Alüminyum Alaşımli Dökümler ve Külçe

2xx.x ve 9xx.x alaşım gruplarını incelediğimizde, gruplandırmadaki 2 ve 9'dan sonra gelen iki basamağın özel bir anlam taşımamaktadır sadece grup içerisinde farklı alaşımları ayırt etmeyi sağlar. Gruplandırmada ondalık noktanın sağında bulunan son rakam ise alüminyumun ürün formunu göstermektedir. Örneğin: xxx.0 gösterimi döküm olduğunu ve xxx.1 gösterimi külçe olduğunu ifade eder (Bloch, 1961).

2.5 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımli Ürünlerin Çapraz Referansı

Çizelge 2.4 Dövme saf (alaşımatsız) alüminyum ve dövme alüminyum alaşımlarının bileşimi (USA Patent No. 4142571, 1979).

Kompozisyon, wt%	Alüminyum Alaşımları				
	Al. 1040 (A91040)	Al. 2024 (A92024) (AlCu ₄ Mg ₁)	Al. 5754 (A95754) (AlMg ₃)	Al. 6061 (A96061) (AlMg ₁ SiCu)	Al. 7075 (A97075) (AlZn _{5.5} MgCu)
Si	0.3	0.5	0.40	0.40-0.8	0.40
Fe	0.5	0.5	0.40	0.7	0.50
Cu	0.10	3.8-4.9	0.10	0.15-0.40	1.2-2.0
Mn	0.05	0.30-0.9	0.5	0.15	0.30
Mg	0.05	1.2-1.8	2.6-3.6	0.8-1.2	2.1-2.9
Cr	-	0.10	0.30	0.04-0.35	0.18-0.28
Ni	-	-	-	-	-
Zn	0.10	0.25	0.20	0.25	5.1-6.1
Ga	-	-	-	-	-
V	0.05	-	-	-	-
Belirtilen elementler	diğer	(k)	0.10-0.6 (Mn+Cr)	-	(y)
Ti	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05
Belirtilen diğer elementler	Her Toplam	0.03	0.05	0.05	0.05
Alüminyum (Min.)	99.40	Rem	Rem	Rem	Rem

(k) Tedarikçi veya üretici ve alıcı bunu kabul ettiğinde ekstrüde ve dövme ürünler için maksimum% 0,20'lik bir (Zr + Ti) sınırı kullanılabilir.

(y) Tedarikçi veya üretici ve alıcı bunu kabul ettiğinde ekstrüde ve dövme ürünler için maksimum% 0,25'lik bir (Zr + Ti) sınırı kullanılabilir.

1xxx Serisi. \approx %99,00 veya daha yüksek saflıktaki alüminyum, özellikle kimya ve elektrik gibi alanlar başta olmak üzere birçok uygulama alanlarına sahiptir. Alüminyumdaki bu sınıflar, korozyona karşı üstün direnç, termal ve elektriksel iletkenlikte yüksek performans, düşük mekaniksel özellikler ve işlenebilir liliğin mükemmel olması ile karakterize edilebilir. Gerinim sertleştirme sayesinde 1xxx alüminyumun mukavemet özelliğinde orta düzeyde artışlar elde edilebilir. Alaşımda silikon ve demir ana eleman olarak yer almaktadır. Bu alaşımın çok fazla kullanım alanı mevcuttur ama genelde tipik olarak ambalaj folyosu, ısı eşanjörleri, mimari uygulamalar, kimyasal ekipman, dekoratif süslemeler, reflektörler, elektrik iletkenleri ve kapasitörler gibi alanlarda daha sık kullanılmaktadır (Pickens & Review, of Aluminum Powder Metallurgy for High-Strength Applications, 1981).

2xxx Serisi. 2xxx serisi bakırın ana element olarak rol aldığı alaşımlardır ve aynı zamanda bu seride bakırın yanına ilaveten magnezyum elementi de kullanılmaktadır. Bu serideki alaşımları ısıtılma tabii tuttuğumuz zaman optimum seviyede özellikler elde edilmiş olur. Bazı durumlarda, çöktürme ısıtılma işlemi yani yaşlandırma işlemi uygulanarak alaşımların mekanik özelliklerinde iyileştirmeler yapmak mümkündür. Çöktürme ısıtılma işlemi sayesinde mekanik özelliklerinin yanı sıra uzama kaybı ve akma mukavemeti de artmaktadır.

2xxx serisinde bulunan alaşımların korozyona karşı göstermiş oldukları direnç diğer alaşımlara göre düşüktür hatta bazı koşullar altında kendi taneleri arasında korozyona maruz kalabilme riskleri bulunmaktadır. Bu sebepten ötürü, levha şeklinde bulunan bu alaşımlar çoğunlukla saflık yüzdesi yüksek olan alüminyumla veya korozyon direnci gayet derecede yüksek olan 6xxx serisinin sahip olduğu magnezyum-silikon alaşımı ile kaplanmaktadır.

2xxx serisinde bulunan alaşımlar, yüksek mukavemet-ağırlık oranları gerektiren yapılar ve parçalar için idealdir ve bu özellikten dolayı genelde kamyon süspansiyonları, kanat kaplamaları, kamyon, yapısal parçalar, uçak gövdesi, uçak tekerlekleri ve üstün performans gerektiren parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Kaynaklanabilirlik açısından incelediğimizde 2219 alaşımı buna uygun değildir ancak bu serideki bazı alaşım grupları üstün işlenebilirliğe sahiptir (Pickens & Review, of Aluminum Powder Metallurgy for High-Strength Applications, 1981).

3xxx Serisi. 3xxx serisi manganezin ana element olarak rol aldığı alaşımlardır. Bu alaşımların ısıtılma işlemi görmemiş haldeki mukavemet oranı 1xxx seri alaşımlara göre %20 daha fazladır. Manganez elementi alüminyuma saf halde sınırlı olarak ($\approx 1,5$) eklendiği için sadece birkaç alaşım içerisinde ana element olarak yer almaktadır. Bu alaşımlardan bazıları 3003, 3x04 ve 3105 gibi türlerdir. Bu üç alaşım türünün iyi işlenebilirliği ve orta seviyede mukavemet özelliği bulunduğu için piyasada ısıtılma eşanjörleri, mobilyalar, çatı kaplama, içecek kutuları, dış cephe, otoyol işaretleri, depolama tankları, pişirme kapları, tenteler ve diğer mimari yapılar gibi alanlarda

yaygın olarak kullanılmaktadır (Pickens & Review, of Aluminum Powder Metallurgy for High-Strength Applications, 1981).

4xxx Serisi. 4xxx serisi silikonun ana element olarak rol aldığı alaşımlardır. Silikon elementi alaşımda herhangi bir gevreklik oluşturmadan erime sıcaklığı aralığını önemli ölçüde düşmesine neden olduğu için tercih edilmektedir. Bu sebeple, alüminyum-silikon (Al-Si) alaşımları, ana metalden ve kaynak telinden daha düşük seviyede erime aralığının gerek duyulduğu alüminyumun birleştirilmesi işleminde sert lehim alaşımı olarak kullanılmaktadır. Bu seride bulunan alaşımların neredeyse çoğu ısıl işleme tabi tutulmazlar fakat ısıl işleme tabi tutulan alaşımların kaynaklanmasında kullanıldıkları için ısıl işleme sınırlı ölçüde tepki verirler. İçerisinde uygun miktarda silikon barındıran alaşımlara anodizasyon (eloksal kaplama) uygulandığı zaman rengi koyu griden kömür rengine (siyaha dönük) dönüşüm yapar ve bu sebeple anodizasyon görmüş 4xxx alaşımlar mimari uygulamalarda talep görmektedir. Otomotiv sektöründe kullanılan dövme motor pistonların üretiminde yüksek aşınma direnci ve düşük termal genleşme katsayısına sahip olan alaşım 4032 tercih edilmektedir (Grant, 1997).

5xxx Serisi. 5xxx serisi magnezyumun ana element olarak rol aldığı alaşımlardır ve aynı zamanda bu seride magnezyumun yanına ilaveten mangan elementi de kullanılmaktadır. Magnezyum tek kullanıldığı zaman alaşım orta seviye mukavemete sahip iken mangan ile kullanıldığında yüksek seviyede mukavemete sahip olmaktadır ve ayrıca orta veya yüksek mukavemete sahip olan bu alaşımlar işlenerek sertleştirilebilen türdendir. Magnezyum elementinin alaşıma katmış olduğu sertleştirici özellik mangan elementininkinden %0,45 daha fazladır. Bu seride bulunan alaşımların tuzlu su ortamlarında korozyona karşı göstermiş oldukları direnç ve kaynak özellikleri yapılan çalışmalar sonucunda yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Bu seri alaşımlar çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Bunlar; çeşitli ev aletleri, vinç parçaları, otomotiv parçaları, kutular, dekoratif süsler/süslemeler, mimari yapılar, kriyojenik tanklar, tekne, gemi ve sokak lambaları gibi alanlarda kullanılmaktadır (Grant, 1997).

6xxx Serisi. 6xxx serisi magnezyum silisitinin (Mg_2Si) ana element olarak rol aldığı

alaşımlardır. Bu alaşımlar yapısında belirli oranlarda magnezyum ve silikon bulundurmaktadır. Bu seri alaşımlar kaynaklanabilirlik, işlenebilme, şekillendirilebilme ve korozyona karşı direnç gösterme gibi özellikleri bulunmaktadır. Fakat 2xxx ve 7xxx seri alaşımları kadar yüksek güç performansına sahip değildir. 6xxx seri alaşımları köprü korkulukları, kaynaklı yapılar, mimari alanlar, ulaşım ekipmanları ve bisiklet çerçeveleri gibi farklı uygulama alanlarına kullanılmaktadır (Pickens & Review, of Aluminum Powder Metallurgy for High-Strength Applications, 1981).

7xxx Serisi. 7xxx serisi çinkonun ana element olarak rol aldığı alaşımlardır. Bu alaşımlar yapılarında genellikle \approx %1 ila %8 arasında çinko bulundurmaktadır. Bileşiminde sadece çinko barındıran alaşımların mukavemet özelliği düşük iken düşük miktarda magnezyum, bakır ve krom gibi diğer elementlerin eklenmesi sonucunda orta ila çok yüksek mukavemete sahip alaşımlar elde edilmektedir. 7xxx alaşım türleri genellikle yüksek gerilim parçaları, mobil ekipmanlar ve gövde yapıları gibi alanlarda kullanılmaktadır (Grant, 1997).

2.5.1 Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

Çizelge 2.5 Alüminyum alaşımlarının tipik fiziksel özellikleri (Jones, 1969-1970).

		Alaşım					
		Al. 1060	Al. 2024	Al. 5657	Al. 6061	Al. 7075	Al. 8030
Ortalama termal genişleme katsayısı(a)	$\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$	23.6	23.2	23.75	23.6	23.6	23.6
	$\mu\text{in.}/\text{in.} \cdot ^\circ\text{F}$	13.1	12.9	13.2	13.1	13.1	13.1
Yaklaşık erime aralığı(b)(c)	$^\circ\text{C}$	645-655	500-638	638-657	580-650	475-635	645-655
	$^\circ\text{F}$	1195-1215	935-1180 ^e	1180-1215	1080-1205 ^(d)	890-1175 ^(g)	1190-1215
Tavlama		O	O, T3, T4, T361, T6, T81, T861	A11	O, T4, T6	T6	H221
Termal iletkenliği 25 $^\circ\text{C}$ 'de	$\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$	234	193	205	180	130	230
					154	167	

Çizelge 2.6 (Devam) Alüminyum alaşımlarının tipik fiziksel özellikleri (Jones, 1969-1970).

(77 °F)	Btu in./ft ² · h · °F	1625	1340	1420	1250 1070 1160	900	1600
Elektrik iletkenliği 20 °C'de (68 °F), %IACS	Eşdeğer hacim Eşdeğer ağırlık	62	50	54	47 40 43	33	61
Elektriksel direnç 20 °C'de (68 °F)	Ω· mm ² /m Ω· circ mil/ft	0.028	0.035	0.0315	0.0365 0.043 0.040	0.0515	0.028
		17	21	19	22 26 24	31	17

(a) Coefficient from 20 to 100 °C (68 to 212 °F).

(b) Melting ranges shown apply to wrought products of 6.35 mm (1/4in.) thickness or greater.

(c) Based on typical composition of the indicated alloys.

(d) Eutectic melting can be completely eliminated by homogenization.

(e) Eutectic melting is not eliminated by homogenization.

(f) Although not formerly registered, the literature and some specifications have used T736 as the designation for this temper.

(g) Homogenization may raise eutectic melting temperature 10 to 20 °C (20 to 40 °F) but usually does not eliminate eutectic melting.

Çizelge 2.7 Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının nominal yoğunlukları (Storchheim, 1978).

Alaşım	Yoğunluk	
	g/cm ³	lb/in. ³
1060	2.705	0.0975
2024	2.78	0.101
5657	2.69	0.097
6061	2.70	0.098
7075	2.81	0.101
8030	2.71	0.098

Çizelge 2.8 Çeşitli alüminyum alaşımlarının tipik mekanik özellikleri (Storchheim, 1978).

Alaşım ve Tavlama		Al. 1060- O	Al. 2024- T3	Al. 5657- H25	Al. 6061- T6, T651	Al. 7075- T6, T651
Maksimum Çekme	MPa	70	485	195	310	570
Mukavemeti	Ksi	10	70	28	45	83
Akma Mukavemeti	MPa	30	345	165	275	505
	Ksi	4	50	24	40	73
50 mm'de uzama (2in.), %	1.6 mm (1/16in.) Numune kalınlığı	43	18	7	12	11
	1.3 mm (1/2in.) Numune kalınlığı	---	---	---	17	11
Sertlik HB(a)		19	120	50	95	150
Max. kesme Mukavemeti	MPa	50	285	105	205	330
	Ksi	7	41	15	30	48
Yorulma dayanıklılık sınırı(b)	MPa	20	140	---	95	160
	Ksi	3	20	---	14	23
Esneklik modülü(c)	GPa	69	73	69	69	72
	10 ⁶ psi	10.0	10.6	10.0	10.0	10.4

(a) 500 kg load and 10 mm ball.

(b) Based on 500,000,000 cycles of completely reversed stress using the R.R. Moore type of machine and specimen.

(c) Average of tension and compression moduli. Compression modulus is about 2% greater than tension modulus.

2.5.1.1 Al. 2024-T3 (4.4Cu-1.5Mg-0.6Mn)

Kimyasal Bileşim; Kompozisyon sınırları; 0.5 Si maks. 0.50 Fe max, 3.8 ila 4.9 Cu, 0.30 ila 0.9 Mn, 1.2 ila 1.8 Mg, 0.10 Cr max, 0.25 Zn max, 0.15 Ti max, 0.05 max diğer (her biri), 0.15 max diğerleri (toplam), bal Al (Zeerleder, 1953).

Uygulamalar

- Uçakta bulunan bazı parçalar
- Perçin
- Donanım
- Kamyon tekerleklerinin iç kısmı
- Vida üretim makinesi ürünleri
- Makine dişlileri
- Silindirler
- Pistonlar

ve diğer çeşitli yapısal uygulamalar.

Mekanik özellikleri:

Çizelge 2.9 Alaşım 2024'ün tipik çekme özellikleri (Benjamin, 1976).

Tavlama	Sıcaklık		Çekme mukavemeti		Akma mukavemeti		Uzama, %
	°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi	
T3	-196	-320	586	85	427	62	18
	-80	-112	503	73	359	52	17
	-28	-18	496	72	352	51	17
	24	75	483	70	345	50	17
	100	212	455	66	331	48	16
	149	300	379	55	310	45	11
	204	400	186	27	138	20	23
	260	500	76	11	62	9	55
	316	600	52	7.5	41	6	75
	371	700	34	5	28	4	100

Çizelge 2.10 Alaşım 2024-T3'ün tipik mekanik özellikleri (Benjamin, 1976).

Tavlama	Çekme Mukavemeti		Akma Mukavemeti		Uzama, % ^(a)	Sertlik HB ^(b)	Kesme Mukavemeti		Yorulma dayanıklılık sınırı ^(c)	
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi
T3	485	70	345	50	18	120	285	41	140	20

(a) 1,6 mm (1/16in.) kalınlığında numune.

(b) 500 kg yük; 10 mm top.

(c) 5 × 108 döngü tamamen tersine çevrilen stres; R.R. Moore tipi test.

Kütle özellikleri:

Yoğunluk: 2.77 g/cm³ (0.100 lb/in.³) at 20 °C (68 °F).

Çizelge 2.11 Alaşım 2024-T3'ün tipik mekanik özellikleri (Patent No. 429207929, 1981).

Tavlama	İletkenlik	
	W/m · K	Btu/ft · h · °F
T3	120	69

Elektrik özellikleri:

Çizelge 2.12 Elektrik iletkenliği: 20 °C'de (68 °F) (Patent No. 429207929, 1981).

Tavlama	İletkenlik %IACS
T3	30

Çizelge 2.13 Elektriksel direnç (Patent No. 429207929, 1981).

Tavlama	Direnç nΩ · m
T3	57

2.5.1.2 Al. 7075 (5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.23Cr)

Kimyasal Bileşim; 1.20 ila 2.0 Cu, 2.1 ila 2.9 Mg, 0.30 Mn max, 0.40 Si max, 0.50 Fe max, 0.18 ila 0.28 Cr, 5.1 ila 6.1 Zn, 0.20 Ti max, 0.05 max diğer (her biri), 0.15 max diğerleri (toplam), bal Al

Uygulamalar

Çok yüksek oranda mukavemete ve korozyona karşı göstermiş olduğu direncin iyi olması gerektiren uçak parçalarında ve diğer yüksek stresli yapısal uygulamalar da tercih edilmektedir (Patent No. 429207929, 1981).

Mekanik özellikleri:

Çizelge 2.14 Çeşitli sıcaklıklarda alaşım 7075 için tipik çekme özellikleri (IncoMAP, 1989).

Tavlama	Sıcaklık		Çekme mukavemeti		Akma mukavemeti (0.2%offset)		Uzama, %
	°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi	
T6, T651	-196	-320	703	102	634	92	9
	-80	-112	621	90	545	79	11
	-28	-18	593	86	517	75	11
	24	75	572	83	503	73	11
	100	212	483	70	448	65	14
	149	300	214	31	186	27	30

Çizelge 2.15 Alaşım 7075'in çekme özellikleri (IncoMAP, 1989).

Tavlama	Çekme Mukavemeti		Akma Mukavemeti		Uzama, % ^(a)	Sertlik HB ^(b)	Kesme Mukavemeti		Yorulma dayanıklılık sınırı ^(c)	
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi
T6, T651	572	83	503	73	11	150	331	48	159	23

Kütle özellikleri:

Yoğunluk: 2.80 g/cm³ 0.101 lb/in.³), 20 °C (68 °F)

Çizelge 2.16 Termal İletkenlik (Jangg & Kutner, 1977).

Tavlama	İletkenlik	
	W/m · K	Btu/ft · h · °F
T6, T651	130	75

Elektrik özellikleri:

Çizelge 2.17 Elektrik iletkenliği ve direnç: 20 °C'de (68 °F) (Jangg & Kutner, 1977).

Tavlama	Direnç (nΩ · m)	İletkenlik (%IACS)
T6, T651	52.2	33

2.6 Yüzey Kaplama

Son zamanlarda sürtünmeye, aşınmaya ve yağlanmaya karşı mukavemetli olan tribolojik kaplamalar hızla gelişmektedir. Bu gelişimin en büyük sebeplerinden birisi morfolojik, yapı ve bileşim gibi istenilen özellikleri sağlayabilen yeni kaplama yöntemlerinin bulunmasından kaynaklanmaktadır.

Bu kaplama yöntemlerinin ana ilkleri yaklaşık olarak 60 yıldır bilmesine rağmen ticari olarak ancak son zamanlarda piyasaya çıkmaktadır.

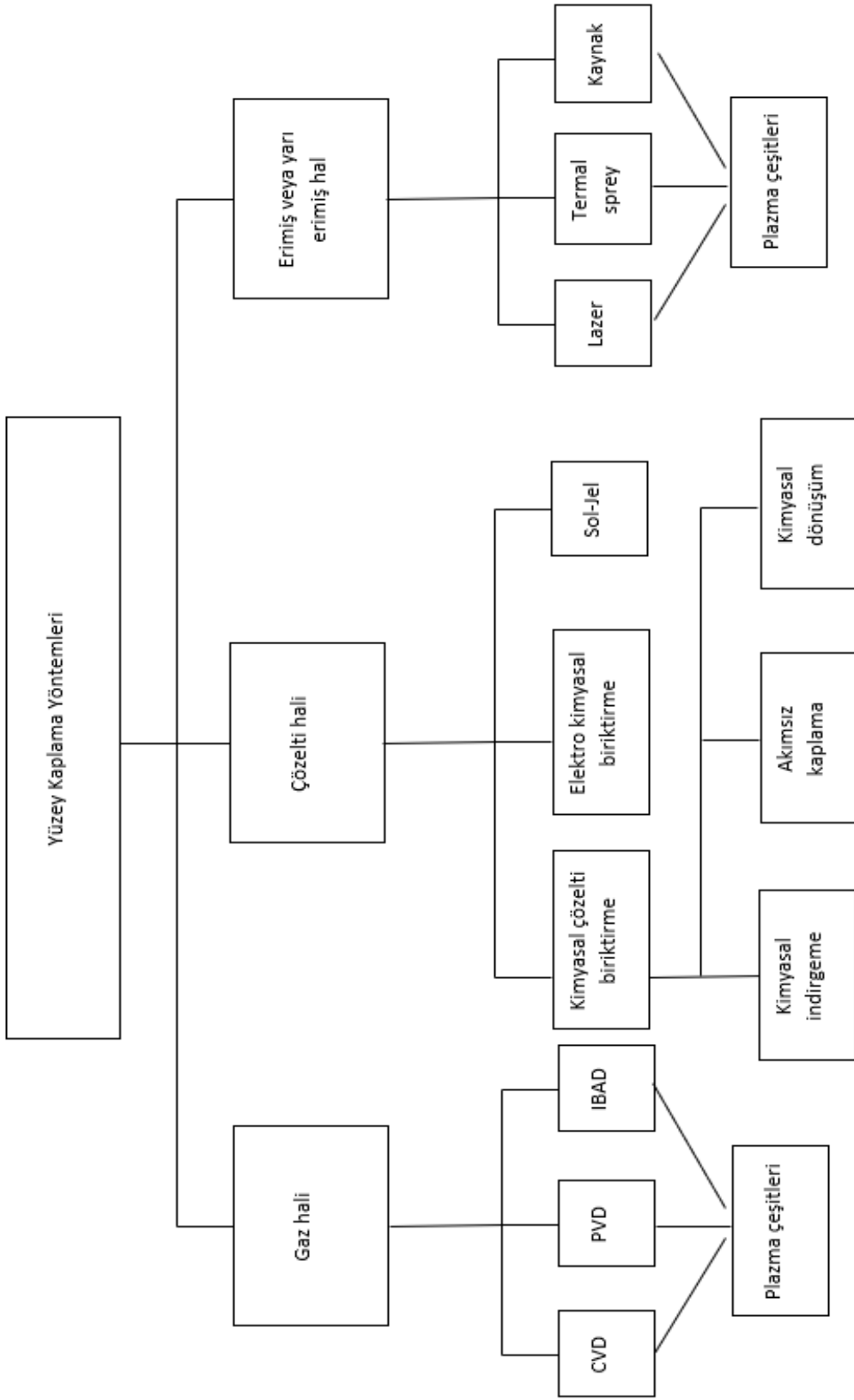
- Proses kontrolü ve ilgili elektronik teknolojileri
- Plazma fiziği ve kimyası
- Yüksek akım ve yüksek gerilim teknolojisi
- Vakum teknolojisi

Yukarıda belirtilen ileri teknoloji türleri son birkaç yıla kadar kullanımı çok zordu genellikle problem oluşturmaktaydı fakat son zamanlarda gelişen teknoloji sayesinde birçoğunun oluşturduğu problemler çözüldü ve artık bu ileri teknoloji türleri çeşitli mühendislik sektörlerine önemli ölçüde faydalar sunmaktadır.

Rickerby ve Matthews (1991) tarafından geliştirilen “biriktirme süreçlerinin sınıflandırılması” sistemi hala günümüzde de kullanılmaktadır. Bu sistem dört aşamadan oluşmaktadır (Carlsson, 1991):

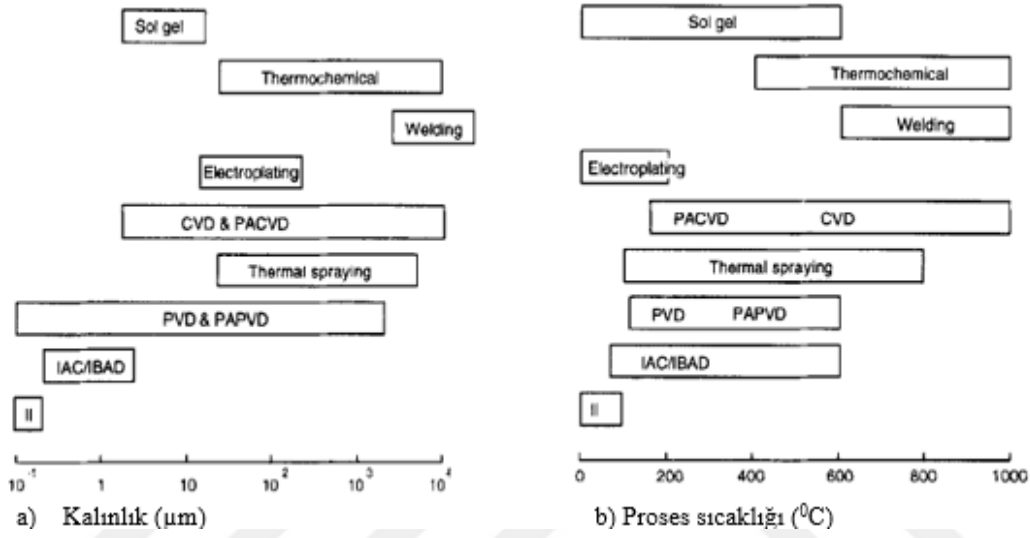
- Gaz hali süreçleri
- Çözüm durumu süreçleri
- Erimiş veya yarı erimiş hal süreçleri
- Katı hal süreçleri

Bu dört süreç diğer kaplama yöntemlerinin temeli sayılmaktadır. Yani, yüzey kaplama yöntemleri bu dört sürece açılmakta olup diğer kaplama yöntemleri de bu dört süreçten açığa çıkmaktadır.



Şekil 2.1 Yüzey kaplama yöntemlerinin genel bir sınıflandırması.

PA = Plazma Destekli
CVD = Kimyasal Buhar Biriktirme
PVD = Fiziksel Buhar Biriktirme
IBAD = İyon Işını Destekli Biriktirme
IAC = İyon Destekli Kaplama
II = İyon İmplantasyonu



Şekil 2.2 (a) yüzey değişikliklerinin derinlikleri ve kaplama kalınlıkları ve (b) yüzey teknolojileri için işleme sıcaklıkları için tipik aralıklar (Carlsson, 1991).

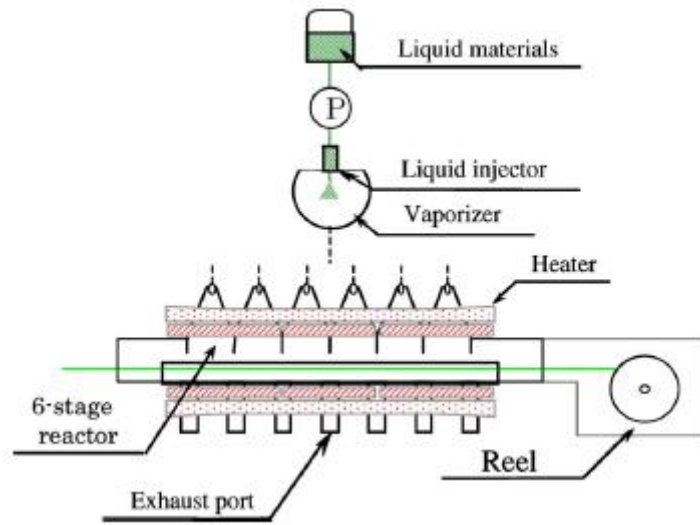
2.6.1 Gazlı Hal Kaplama Prosesleri

2.6.1.1 Kimyasal buhar biriktirme (CVD)

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi gaz halinde kaplama yapma yöntemlerinden biridir. Bu proseste altlık üzerine kaplama işlemi yüksek vakumlu ortamda gerçekleşmektedir. Gerçekleştirilen bu kaplamalar yüksek kalitede, yüksek dirençte ve sağlam kaplamalar olduğundan yarı iletken endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir (Sojoudi, Nemani , & Mullin, 2019), (Mori, Watanabe, & Kashima, 2006). Aşınma ve korozyon ile sürekli temas halinde bulunan mekanik parçaların direncini artırmak için yapılan kaplamalarda CVD yönteminde tercih edilebilir. Bu kaplama sürecinde, sistemde bulunan vakum pompası ne kadar açığa çıkan kimyasal gazları çekse de kaplanacak olan plaka (substrat) kaplanmak istenen uçucu kimyasalların reaksiyonlarına maruz kalacaktır ve

bazı durumlarda açığa yan ürünlerin çıkma ihtimali bulunmaktadır. CVD prosesini gösteren ve anlatan bir şekil aşağıda gösterilmektedir.

Proseste, kaplanacak olan substrat cihazın haznesine düz bir şekilde yerleştirilir ve sonra kaplanmak istenen gaz haldeki kimyasallar cihazın sağ tarafından sisteme beslenir. Kaplamada gerçekleşecek olan reaksiyonların hızlı ve kolay şekilde gerçekleşmesi için sistemin sıcaklığı bir ısıtıcı ile yüksek tutulur. Yüksek sıcaklık sayesinde kaplama işlemi gerçekleştirilir. Açığa çıkan gazlar sistemden uzaklaştırılır.



Şekil 2.3 Altı aşamalı CVD sisteminin şematik diyagramı (Vernardou, Pemble, & Sheel, 2004).

CVD kaplama işlemi en çok bilinen ve tercih edilen üç farklı türe sahiptir. Bunlar;

- Atmosferik basınçlı kimyasal buhar biriktirme (APCVD)
- Alçak basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD)
- Çok yüksek vakumlu kimyasal buhar biriktirme (UHVCVD)

CVD kaplama türleri kendi aralarında da sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırılma

- Alt tabaka ısıtması
- Kullanılan malzemelerin özellikleri
- Plazma türleri

vb. gibi sebepler ile yapılmaktadır (Li, Mann, & Rolandi, 2004).

Tercih edilen uygulama alanlarından dolayı kimyasal buhar biriktirme yönteminin

(CVD) fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemine göre avantajları olduğu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. CVD işlemi 900 °C gibi yüksek sıcaklıkta gerçekleştiği için sıcaklığa duyarlı substratlar bu yöntemde tercih edilmez fakat PVD de bu tür hassas substratlar için bilgisayar kontrollü ısıtıcı lazerler gibi alternatif çözümler bulunmaktadır (Fotoyatti & Namdari, 2019), (Fotoyyati & Wayne, 2018).



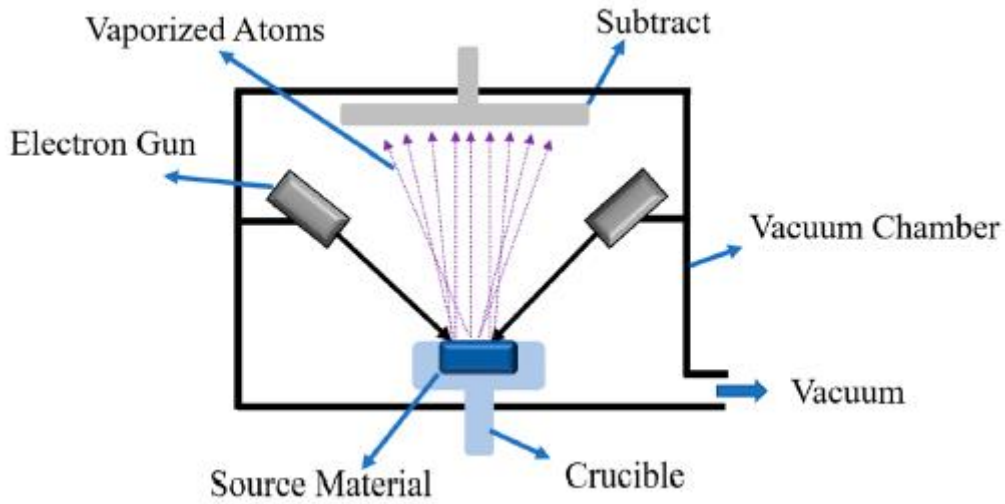
Şekil 2.4 CVD Fırını.

2.6.1.2 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme yöntemi, aşınmaya ve korozyona maruz kalan malzemelerin direncini artırmak için yüzeye gerçekleştirilen kaplama proseslerinden biridir (Prengel , Pfouts, & Santhanam, 1998). Bu kaplama yönteminin avantajlarından bir tanesi mekanik ve korozyon gibi özelliklerinin kaplama katmanı ile isteğe bağlı olarak ayarlanabilir olmasıdır.

PVD yöntemi, yüksek vakumlu ortamda gerçekleşmekte olup katı/sıvı malzemelerin bir buhar fazına geçmesi ve ardından bu buharın metal substrat üzerine yoğun bir film olarak yoğunlaşması ile gerçekleşmektedir. PVD kaplamanın en bilinen türleri buharlaştırma ve püskürtme yöntemleridir. PVD yönteminde oluşan kaplama kalınlığı sistem gereği ince oluşmaktadır fakat seçilen malzeme çok katmanlı yapı oluşturmak için seçilecek olursa kaplamanın katman sayısı artırılabilir. Dekoratif uygulama alanlarının yanı sıra birçok korozyona, aşınmaya uğrayan parçaların kaplanmasında da kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekilde PVD makinesinin elektron ışını saçma anındaki görüntüsünün temsili hali bulunmaktadır. Bu yöntemde kaplamanın oluşmasında

fiziksel bir buharlaşma işlemi hakimdir. Bu buharlaşma işleminde ihtiyaç duyulan termal enerji; ısıtma teli, elektron ışını, molekül ışını, lazer ışını vb. gibi çeşitli besleme türleri tarafından sağlanmaktadır (De Damborenea, Navas, & Garcia, 2007). Termal enerjiyi sağlayan besleme türleri, katı veya sıvı halde bulunan malzemelerin atomlarını buharlaşma noktalarına kadar ısıtmaktadır. Isıtılma sonucunda buharlaşan atom taneleri, vakumlu ortamda belli bir mesafe yol aldıktan sonra substrat üzerine çökme yani kaplama işlemi gerçekleşir.



Şekil 2.5 Isı kaynağı olarak elektron ışını kullanan bir fiziksel buhar biriktirme (PVD) makinesinin şematik görünümü (De Damborenea, Navas, & Garcia, 2007).

Bu konuda yapılan çalışmalar incelendiğinde, PVD kaplamalardaki malzeme bileşimleri araştırılmış ve ana kaplama malzemesinin substratın korozyon özelliğine önemli ölçüde etki ettiği iddia edilmiştir. Örneğin; Mathew ve ark. tek katmanlı Ti içerikli (TiC_xO_y) ve Zr içerikli (ZrC_xO_y) olan bu iki farklı bileşimli kaplamaların korozyon üzerindeki etkisini araştırdı. Yaptıkları araştırmalar sonucunda Ti içerikli kaplama grubunun Zr içerikli gruba göre korozyona karşı daha iyi direnç sağladığını gözlemlediler. Ti içerikli kaplama grubunda da kaplama bileşiminde 0,55-0,79 oranında oksijen barındıran kaplamaların daha iyi direnç sağladığını iddia etmişlerdir (Mathew, Ariza, & Rocha, 2008).

Fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi optik, havacılık, otomotiv, ateşli silahlar ve biyomedikal aletler gibi birçok uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Substrat

üzerinde oluşan kaplama tabakası korozyon direnci ve yüksek oranda sertlik sunarken, herhangi bir inorganik veya organik malzemeden yapılması istenen kaplamaya elastikiyet gibi avantaj sunar (Mattox, 2010). Polimer bazlı malzemeler için PVD prosesi zordur. Çünkü, biriktirme işlemi sırasında kullanılan polimerin bozulmasına sebep olur (Luff & White, 1970), (Takeno, Okui, & Kitoh, 1991).

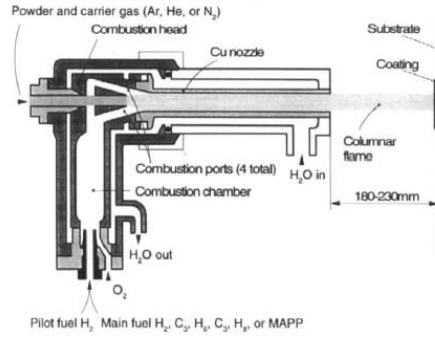


Şekil 2.6 PVD Fırın (Luff & White, 1970).

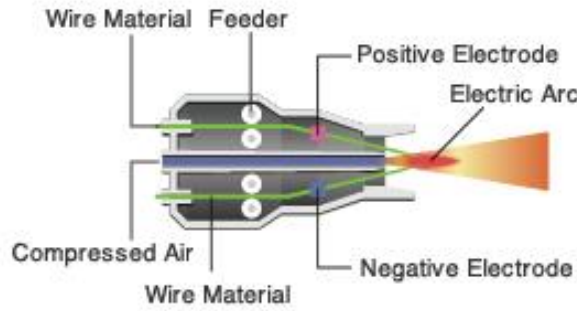
2.6.2 Erimiş veya Yarı Erimiş Hal

2.6.2.1 Termal Sprey Kaplama

Termal sprej kaplama yöntemi, kaplanması istenilen malzeme kimyasal yanma veya plazma deşarjı gibi bir enerji kaynağı ile ısıtılarak eritilir. Daha sonra oluşan eriyik partikülleri gaz veya atomizasyon jetiyle hızlandırılır. Hızlanan eriyik partikülleri substrat üzerine püskürtülerek koruyucu tabaka oluşturulur. Bu yöntemle elde edilen kalınlık diğer kaplama yöntemlerine (CVD, PVD, elektrokaplama vb.) nazaran daha kalındır ($\approx 20\mu\text{m}$ ile birkaç mm arasında değişim gösterebilir). Termal sprej kaplamalarda ham madde olarak metalik alaşımlardan plastik, seramik ve bazı kompozit malzemelere kadar çeşitlilik göstermektedir (Pawlowski, 2008). Bu kaplama yöntemi kendi arasında proses özelliklerine göre çeşitlere ayrılmaktadır. Bunlar; sıcak/soğuk, plazma, alev ve tel ark püskürtme, yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF), patlama ve yüksek hızlı hava yakıtı (HVAH).



Şekil 2.7 Tipik yüksek hızlı oksijen-yakıt proses düzeni (Pawlowski, 2008).



Şekil 2.8 Şematik plazma sprey kaplama düzeni ve parçaları (Joukar, Mehta, & Marks, 2017).

2.6.2.2 Kaynak Kaplama

Çeşitli metal ve seramik kompozitleri kaplamak için farklı kaynak kaplama yöntemleri kullanılabilir. En yaygın olarak tercih edilen iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar, ark kaynağı ve oksiasetlen torçudur. Bu teknik birçok metale uygulanabilir fakat erime noktası 1100 °C'nin altında olan metallerin (demir dışında) kaplanmasında pek tercih edilmez. Bu yöntemde oluşan kaplamaların kalınlıkları 1.5 ile 6 mm arasındadır. Kaplamada genellikle aşınma direncini artırmaya yönelik olan malzemeler tercih edilir. Genellikle demir, kobalt ve nikel matrisinde dağılmış krom, tungsten veya bor karbür içermektedir. Darbe direncini artırmak için kullanılan kaplamalar genellikle hemen sertleşebilen kübik yapıdaki çeliğin bir fazı olan ostenitik yapılara sahiptirler. Bu yapılar genellikle yumuşaktır (≈ 170 Hv) fakat herhangi bir darbeye maruz kaldığı zaman ≈ 550 Hv ye kadar sertleşmektedir.

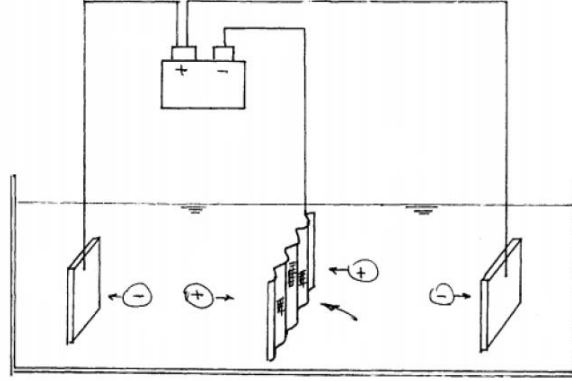
2.6.3 Çözelti Hali

2.6.3.1 Akımlı Kaplama (Electrophoretic Coating)

Elektroforetik (Akımlı) biriktirme yöntemi çok çeşitli teknik alanlarda tercih edilen elektrokimyasal bir kaplama yöntemidir. EPD yöntemi genellikle yapısında iki elektrot (anot-katot) barındıran hücrelerde gerçekleştirilir fakat bazen farklı uygulamalarda üç elektrotlu hücreler tercih edilmektedir (Scott, 2001). Akımlı kaplama, inorganik malzemeler için alışılmış kaplama yöntemidir. EPD, aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere, bir süspansiyonda bulunan yüklü parçacıkların, ortama uygulanan bir DC elektrik alanı içerisinde zıt yükün diğer kaplanacak olan elektrota doğru hareketine dayanan yöntemdir. EPD prosesi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk adımda gerçekleşen olay elektronlar arasında bir elektrik alan oluşmaktadır. Bu alan içerisinde yüklü parçacıklar zıt yüklü olan elektrota doğru hareket etmektedir. Bu adım “elektroforez” olarak adlandırılmaktadır. İkinci adım ise, hareket eden parçacıkların zıt yüklü elektrotta toplanması ve nispeten kompakt ve homojen bir film oluşturması olayıdır. Bu adım “birikme” olarak adlandırılmaktadır (Corni, Ryan, & Boccaccini, 2008).

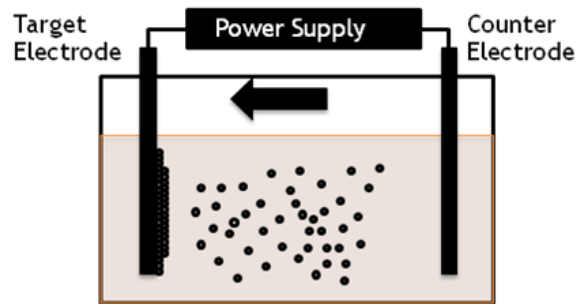
Elektroforetik yöntemi aktif bir şekilde kullanabilmek için gerekli bazı şartlar mevcuttur. Bunlardan en önemli olanı elektriksel alan uygulandığında yüklü parçacıkların zıt yüklü elektrota doğru rahat ve serbestçe hareket etmesini sağlayan kararlı bir süspansiyon (çözelti) elde etmek gerekmektedir. Ancak EPD'nin proses mekanizması ile ilgili farklı bir makalede (Pickard, 1968) “şarj etme, taşıma ve toplama” olmak üzere bu üç adımdan bahsetmektedir. EPD yönteminde, polimer, meral, seramik ve cam gibi katı malzemeler, ince toz formda ($\approx 30\mu\text{m}$) veya kolloidal süspansiyon formunda kullanılabilir. Substrat üzerine biriktirme (kaplama) işlemi gerçekleştirildikten sonra oluşan tortunun sağlamlığını artırmak ve gözenekliliğini ortadan kaldırmak için kaplı substrat tavlama işlemine tabi tutulur. Tavlama işlemi kaplamanın laboratuvar ölçeğinden endüstriyel ölçeğe geçişini kolaylaştırır. Akımlı kaplama yönteminin diğer kaplama yöntemlerine göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar; karmaşık şekilleri kaplama, biriktirme süresinin kısa oluşu, ayarlana bilir kaplama kalınlığına sahip olunma gibi örnekler verilebilir. Bu yöntemde 1nm den 1m ye

kadar çeşitli inorganik malzemeleri kaplama özelliği bulunmaktadır (Boccaccini A. R., 2006), (Sarkar & Nicholson, 1996).



Şekil 2.9 ABD Patentinde TiO_2 'nin elektroforetik birikimi (Boccaccini A. R., 2006).

Elektroforez, 1740 tarihinde Hintli bilim insanı olan G.M tarafından yaptığı sıvı sifon deneyi ile keşfedildi. 1807 tarihinde Rus bilim insanı Reuss, suda bulunan parçacıkların elektrik alan kaynaklı hareketini gözlemleyen ilk kişi oldu. 1933 tarihinde EPD yöntemi, elektron tüpü uygulamalarında platinden oluşan bir katot üzerine toryum dioksitin biriktirilmesi işleminde bir yayıcı olarak kullanıldı. EPD yöntemi son 25 yıldır akademik camia ve sanayi sektörlerinde oldukça revaçta olup bunun üzerine çok çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöntem sayesinde düzenli ve kaliteli kaplamaların üretilmesi ve ayrıca lamine, monolitik ve derecelendirilmiş bağımsız yapıya sahip nesnelerin şekillendirilmesinde kullanılabileceği ön görülmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda kompozit üretimi için gözenekli yapıya sahip materyallerin ve dokuma fiber preformların sızdığı gözlemlenmiştir (Boccaccini & Kaya, Electrophoretic deposition infiltration of 2-D metal fibre-reinforced cordierite matrix composites of tubular shape, 2002).

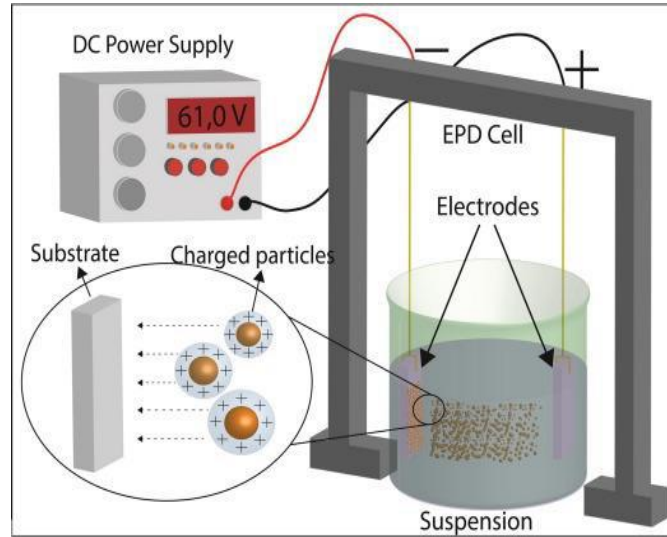


Şekil 2.10 Elektroforetik biriktirme şeması (Trusty & Bocaccini, 1998).

EPD kaplamalar, günümüzde savunma, otomotiv, beyaz eşya, gıda, demir-çelik vb. gibi birçok sanayi sektöründe kullanılmaktadır.

Gal-Or ve ark. grafit elektrot kullanarak substrat yüzeyine silisyum karbür (SiC) ve silisyum oksit (SiO₂) parçacıklarının gözenekler içerisine sızmasını yani substrat üzerine kaplanmasını gözlemlədiler. Gözenekler içerisine iyi bir sızma işleminin gerçekleşmesi için dış kaplamadaki partikül artışının azaltılması gerekmektedir. Gerçekleşecek olan sızma işlemi daha düşük voltajlı bir ortamda ve yüksek partikül konsantrasyonu içerisinde olduğunda kaliteli bir sızma gerçekleşeceğini yaptıkları çalışmalar sonucunda tespit ettiler (Gal-Or, Liubovich, & Haber, 1992).

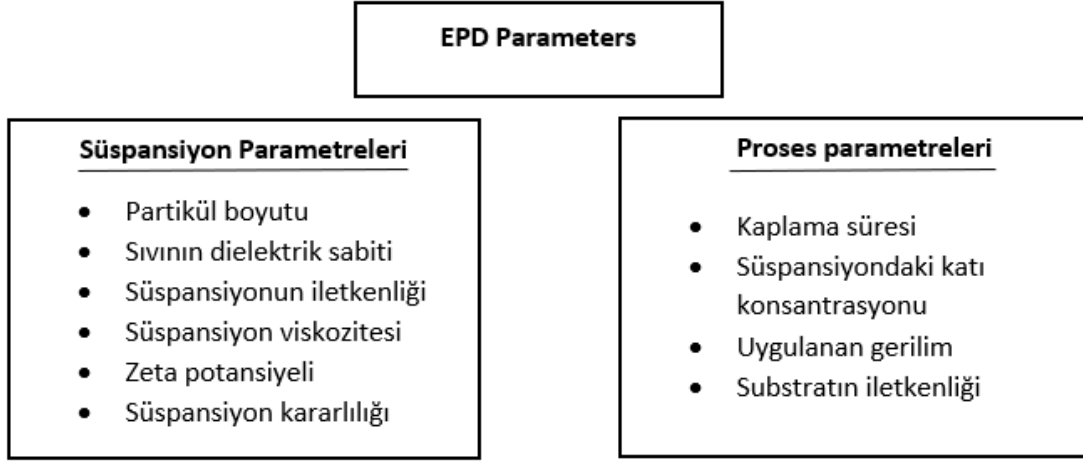
Diğer bir uygulama ise genelde kompozit üretiminden bilinen matris malzeme ile lif formlarının sızma işlemidir. İletken halde olan lifler için ön kalıp doğrudan biriktirme elektrotu olarak vazife alır, ancak iletken olmayan liflerde ise ön kalıp iletken olan bir elektrotun önüne yerleştirilir. Uygulamalarda EPD nin sıklıkla tercih edilmesindeki en büyük avantaj kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi diğer yöntemlere kıyasla daha düşük maliyete sahip olmasıdır (Amrollahi, Krasinski, & Tayebi, 2016).



Şekil 2.11 Elektroforetik bir hücrenin şeması (Amrollahi, Krasinski, & Tayebi, 2016).

Proses parametreleri:

Besra ve Liu tarafından yaptıkları araştırmada elektroforetik kaplamayı (EPD) etkileyen kritik faktörler olan voltaj, kaplama süresi ve süspansiyonu incelemiştirler (Avcu, Baştan, & Abdullah, 2019).



Şekil 2.12 Temel EPD işleme parametreleri (Avcu, Baştan, & Abdullah, 2019).

Toz ve süspansiyon haldeki formların fiziksel özellikleri dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. EPD kaplamanın kalitesini parçacık yüzey kimyası, gerilim altında bulunan yüzey ve sıvı ara yüzey davranışı, toz-toz veya toz-numune yüzey ağlarının oluşturulması tanımlamaktadır (Filiatre, Pignolet, & C, 2017). Kontrollü-homojen dağılmış ve substrat yüklü tozlara sahip olan sabit bir çözelti, EPD kaplama için önem taşımaktadır. Sabit durumdaki süspansiyonlar, flakülasyon eğilimi göstermezler, bu durum daha yoğun ve daha güçlü yapıştırılmış kaplamaların oluşumunu sağlarken, flakülasyon çözeltileri hızlı bir şekilde çöker ve düşük yoğunluğa sahip substrata yapışan kaplamanın oluşumuna neden olur (Larsson, Hill, & Duffy, 2012).

2.6.3.2 Akımsız Kaplama (Electroless coating)

Akımsız nikel kaplama, nikel elementinin ekstra bir kaynaktan elektrik akımı kullanmadan biriktirilmesidir. Bu yöntemle çok çeşitli metaller kaplanmaktadır. Çünkü, galvanizli nikel aşınmaya ve korozyona karşı yüksek direnç göstermektedir (Sankara Narayana, Baskaran, & Parthiban, 2004). Bu metaller için en çok aranan bir özelliktir.

Akımsız kaplama yöntemi düşük işçilik maliyeti ve basit prosesi sayesinde akademik ve endüstriyel uygulamalarda çok tercih edilmektedir.

Akımsız kaplamanın tercih edilebilir olmasını sağlayan bazı özellikler (Agarwala, 2003):

- Kaplanacak olan parçanın şekil ve boyutun önem taşımadığı sadece çözelti içerisinde bulunması sonucu tüm yüzeylerinde homojen şekilde tek tip kaplama tabakasının elde edilmesinin mümkün olması ($\pm 2.5\mu\text{m}$)
- Aşınma ve korozyona karşı çok iyi direnç göstermesi
- Lehimlenebilirlik özelliğinin bulunması
- Düşük oranda sürtünme katsayısına sahip olması
- Manyetik özelliklerinin bulunması
- Camsı ve mikro kristal tortular oluşturması
- Yüksek sertlik değeri olması
- Yüksek yansıtma (yansıma) sağlaması

gibi örnekler verilebilir.

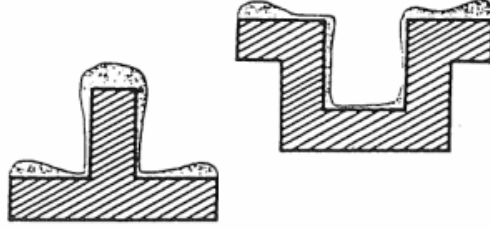
Akımsız nikel kaplamanın sınırlamaları (Dadvand, 2002);

- Kimyasalların yüksek maliyette olması
- Kırılma kırılma söz konusu olması
- Elektroforetik kaplama yöntemine kıyasla düşük kaplama oranına sahip olması

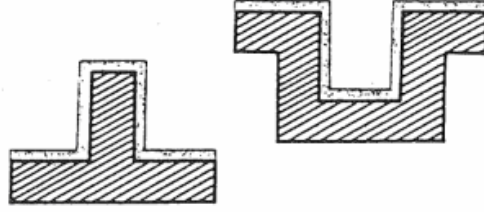
Banyo kompozisyonu ve özellikleri:

Akımsız nikel kaplamaların üretimi, katalitik bir yüzeye nikel iyonlarının kimyasal indirgenmesiyle gerçekleştirilir. Biriktirme işlemi, indirgeme reaksiyonu için katalitiktir. İndirgeme reaksiyonu, kaplanacak olan substratın banyo içerisinde bulunduğu sürece veya çözelti metal iyonlarını çözüne kadar sürmektedir (Agarwala, 2003). Otokatalitik indirgeme reaksiyonunun tercih edilmesinin avantajı, kullanılan numunenin kalınlık ile ilgili olan varyasyondan bağımsız olarak, kaplamanın kalınlık ve içerik bakımından uniform hale getirilebilir olmasıdır. Yöntemde elektrik akımı

kullanılmadığı için kaplama işlemi numune için tek tiptir. Kullanılan substratın (numune) tamamı yani tüm yüzey alanları çözeltiliye (banyo) daldırıldığında tüm yüzeylerde iyon birikme olasılığı aynıdır.



Şekil 2.13 Elektrolit kaplamalarda tortu kalınlığı dağılımının şematik sunumu (Kaya, 2007).



Şekil 2.14 Akımsız kaplamalarda tortu kalınlığı dağılımının şematik sunumu (Kaya, 2007).

Akımsız Nikel kaplama banyolarının gerçekleşmesi için iyon kaynağı tuzu, hızlandırıcı, indirgeyici vb. gibi farklı kimyasallara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kimyasalların her biri farklı işlerde tercih edilir. Aşağıda kullanılan kimyasallar anlatılmıştır. Bunlar (Sudagar, Lian, & Sha, 2013):

- Nikel iyonlarının kaynağı olarak nikel sülfat (NiSO_4) veya nikel klorür (NiCl_2) tuzları tercih edilir.
- Banyoda Nikel iyonlarının indirgenmesi için elektron sağlayan bazı indirgeyici maddeler kullanılır.
- Reaksiyonun sağlanması için banyonun ısıtılması gerekmektedir.
- Reaksiyonda kullanılan serbest nikeli kontrol etmek için kompleks yapıcı maddeler kullanılır.
- Kaplama (biriktirme) esnasında açığa çıkan hidrojen kaynaklı pH değişikliklerini telafi etmek için tamponlama maddesi kullanılır.
- Gerçekleşen reaksiyonun hızını artırmak için hızlandırıcılar kullanılır.

- Birikintinin kaplanacak numunenin yüzeyinde ve tahmin edilen oranda olmasını sağlamak için indirgeme reaksiyonunu kontrol eden stabilizatörler kullanılır.

2.7 Akımsız Nikel Kaplama Banyosu Bileşenleri

2.7.1 Nikel İyonları Kaynağı

Akımsız nikel kaplama yöntemlerinde nikel iyonlarının kaynağı olarak en çok nikel sülfat (NiSO_4) tercih edilmektedir ancak nikel klorür (NiCl_2) ve nikel asetat ($\text{Ni}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$) gibi diğer nikel tuzlarının da kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Korozyona karşı direnç özellikli kaplamalarda daha çok nikel sülfat ve nikel klorür kullanılmaktadır. Bu tarz kaplamalarda nikel asetat maalesef nikel sülfat ve nikel klorür kadar iyi performans gösterememektedir. Nikel asetatın en büyük avantajı diğerlerinden daha ekonomik olmasıdır (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009).

2.7.2 İndirgeyici Maddeler

Akımsız nikel kaplama banyolarının kurulmasında bazı indirgeyici maddeler kullanılmaktadır. Bunlar; sodyum hipofosfit (NaH_2PO_2), N-dimetil aminoboran (DMAB), H-dietil aminoboran (DEAB), Sodyum borhidrür (NaBH_4), hidrazin (N_2H_4) vb. gibi örnekler verilebilir (Agarwala, 2003).

2.7.2.1 Aminoboran Banyosu

Akımsız nikel kaplama banyolarında kullanılan iki çeşit amino boran türü bulunmaktadır. Bunlar;

1. N-Dimetil amino boran (DMAB [$(\text{CH}_3)_2\text{NHBH}_3$])
2. H-Dietil amino boran (DEAB [$(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NHBH}_3$])

Genellikle DMAB Amerika Birleşik Devletleri'nde tercih edilirken DEAB ise Avrupa ülkeleri tarafından tercih edilmektedir. DMAB herhangi bir sulu çözeltide çözünebilirken DEAB kaplama çözeltisinin (banyosunun) içerisine daldırılmadan önce

etil alkol (etanol) ile karıştırılmalıdır. Amino boranlar geniş bir pH aralında etkili olan indirgeyicilerdir. Aynı zamanda kaplama banyosunun pH değeri daha düşük değere sahiptir ve bu sayede H⁺ oluşumu gerçekleşerek kaplama başarılı bir şekilde gerçekleşir. Substratın pH değerinde artış gerçekleştikçe nikel birikimi artar. Amino boran banyolarının pH değerleri ≈ 6-9 aralığında olup çalışma sıcaklığı 50-80 °C aralığındadır. Ayrıca bu banyolar sıcaklık 30 °C'nin altında olması gereken çalışmalarda da kullanılmaktadır. Bu sayede amino boran banyoları katalitik özellikte olmayan plastik gibi malzemelerin kaplanmasında kullanılabilir. Ametal ürünlerin biriktirilme oranı sıcaklık ve pH'a bağlı olarak 7-12 µm/h arasında değişim göstermektedir. Amino boran banyolarındaki bor miktarı %0,4 ile %5 arasında değişmektedir (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009).

2.7.2.2 Sodyum Borhidrür (NaBH₄) Banyosu

Sodyum bor hidrür iyonu, akımsız nikel kaplama banyolarında kullanılan en güçlü indirgeyici ajandır. Bor hidrür banyolarının hidrolizi asidik veya nötr ortamlarda çok hızlı gerçekleşir. Bu banyolarda nikel iyonlarının bulunması sonucu nikel borür ortaya çıkmaktadır. Eğer banyon (çözeltinin) pH değeri 12-14 arasında tutulursa açığa nikel borür yerine sadece nikel elementi çıkmış olur. Yapılan araştırmalar sonucunda 1 mol sodyum bor hidrür yaklaşık olarak 1 mol nikel iyonunu azaltmaktadır. Genel olarak 1 kg nikeli (Ni) azaltmak için yaklaşık 600 gr sodyum bor hidrür (NaBH₄) gerekmektedir (Delaunois & Lienard, Heat treatments for electroless nickel-boron plating on aluminium alloys, 2002). Substrata akımsız yolla bor hidrürlü nikel emdirilmiş tortularda yaklaşık olarak %3-8 arasında bor içermektedir.

Meydana gelebilecek olan nikel hidroksit (NiOH) çökmesini önlemek için pH 12-14 aralığında etkili bir kompleks ajan/ajanlar olan etilen diamin (C₂H₄(NH₂)₂) kullanılmalıdır. Fakat kullanılan bu kompleks ajan/ajanların kullanılması reaksiyon ve birikme hızını azaltır. Çalışma sıcaklığı 90-95 °C arasında olduğunda kaplama hızı 25-30 µm/h arasında değişmektedir. İndirgeme esnasında çözeltinin pH da sürekli olarak düşüş gözlenir ve bu olayın dengelenmesi için aynı düşüş hızıyla alkali hidroksit takviyesi gereklidir. Banyonun pH değeri 12'nin altına düştüğünde çözeltide ayrışma

meydana gelir. Bu banyolardaki alkali oranının yüksek olması alüminyum numunelerinin kaplanmasında zorluk oluşturmaktadır (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009)



2.7.2.3 Hidrazin (N₂H₄.H₂O) Banyosu

Hidrazin maddesi (N₂H₄.H₂O), ayrıca çöktürmek istenilen nikel birikintilerini oluşturmada yardımcı olur. Hidrazin banyosunun (çözeltinin) çalışma koşulları genelde sıcaklığı 90-95 °C ve pH'ı 10-11 aralığında tercih edilmektedir. Biriktirme hızı ise yaklaşık 12µm/h. Hidrazin maddesinin yüksek sıcaklıklarda göstermiş olduğu kararsızlıklar nedeniyle bulunduğu banyo çözeltileri de kararsız yapı eğilimindedir ve bunu kontrol altında tutmak kolay değildir (Agarwala, 2003). Hidrazin ile dekompoze edilen solüsyonun oluşturduğu çöktürde yüksek miktarda nikel iyonu (≈ %97-99) içermesine rağmen metalik bir görünüme sahip değildir. Oluşan tortu kırılğan yapıya, düşük korozyon direncine ve yüksek gerilim gibi özelliklere sahiptir. Hidrazin emdirilmiş tortuların sertlikleri hipofosfit ve bor hidrür kaplamalarında olduğu gibi tavlama ile artmaz.

2.7.3 Enerji

Enerji, kaplama hızını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir ve ayrıca akımsız nikel banyolarının içerdiği ısı enerjisi veya sıcaklık miktarıdır. Kaplama banyosunun sıcaklığı enerji içeriğinin bir ölçüsüdür. Çökelme hızı 65 °C'nin altında düşmekte olup sıcaklık arttıkça hız artmaktadır fakat 100 °C'nin üzerinde kararsızlaşır ve bozunma olayı başlar. Bu olay çoğu kaplama sistemleri için geçerlidir (Agarwala, 2003), (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009).

2.7.4 Kompleks Yapıcı Maddeler

Nikel banyolarında metal redüksiyonunu (indirgenmesini) ve birikimini önlemek için kullanılan katkı maddelerine “kompleks yapıcı maddeler” denilmektedir. Bu maddeler genelde organik asitler ya da tuzlardan oluşmaktadır. Fakat, sadece bazik çözeltilerde tercih edilen inorganik pirofosfat anyonları ve banyoların pH'nı kontrol etmede kullanılan amonyum iyonları kompleks yapıcı madde olarak kullanılmamaktadır. Kompleks yapıcı maddelere (Mallory & Hajdu, 1990);

- Asetat (CH_3COOH)
- Süksinat ($((\text{CH})_2(\text{COOH})_2)$)
- Propionat ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$)
- α -hidroksi propionat ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$)
- Hidroksi asetat ($\text{CH}_2(\text{OH})\text{COOH}$)
- Etilendiamin ($\text{C}_2\text{H}_4(\text{NH}_2)_2$)
- Amino asetat ($\text{CH}_2(\text{NH}_2)\text{COOH}$)
- Malonat ($\text{CH}_2(\text{COOH})_2$)
- Beta amino propionat ($((\text{CH}_2)_2\text{NH}_2\text{COOH})$)
- Malat ($\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})(\text{COOH})_2$)
- Pirofosfat ($((\text{HO})_2\text{P}(\text{O}))_2\text{O}$)

gibi örnekler verilebilir.

2.7.5 Hızlandırıcı Kimyasallar

Nikel banyolarında metal redüksiyonunu (indirgenmesini) ve birikimini önlemek için kullanılan kompleks yapıcı maddeler kaplama hızını düşürmektedir. Oluşan bu sorunun giderilmesi yani kaplama hızının artırılması için banyo içerisine (çözeltiye) küçük miktarlarda “hızlandırıcı” adında organik maddeler eklenir ve kaplama hızı artırılır. Çözeltiye katılan bu hızlandırıcılar hipofosfitte bulunan fosfor ve hidrojen atomlarının bağını zayıflatarak hidrojenin ayrılmasını ve katalitik yüzey tarafından emilmesini sağlar (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009). Hızlandırıcı maddelere;

- Çözünür florürler
- Süksinik asit ($((\text{CH}_2)_2(\text{CO}_2\text{H})_2)$)
- Karbonik asitler
- Belirli çözücüler

gibi örnekler verilebilir.

2.7.6 Dengeleyiciler

Akımsız nikel kaplama banyoları, stabilizatör eklenmeden yani normal çalışma koşullarında uzun süre çalışabilecek durumdadırlar ancak banyo belli bir süreden sonra bozunma riski taşımaktadır. İndirgeme reaksiyonu kontrol edildiğinde çökeltme istenilen hızda ve sadece kaplanmak istenen substrat üzerinde gerçekleşir. Banyo içerisinde bulunan birçok kolloidal partiküller emilir ve Ni in yüzeyde çökmesine engellemiş olur. Banyo içerisinde açığa çıkan H₂ gazı ve ayrılmış olan ince siyah çökeltilerin hacmindeki artış banyonun bozulmasından önce meydana gelmektedir. Meydana gelen bu çökeltiler, kullanılan indirgeyici maddeye ve nikel parçacıklarına bağlı olarak yapısında ya nikel fosfat (Ni₃O₈P₂) ya da nikel borür (NiB) içerir.

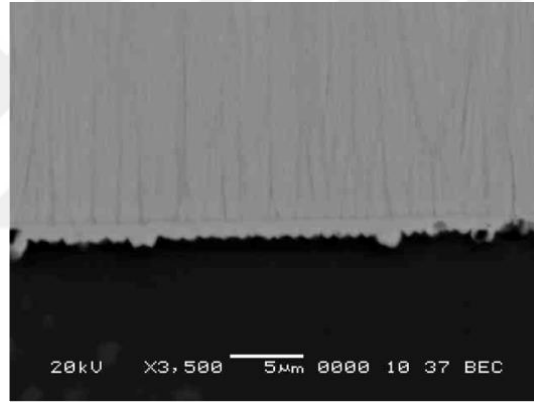
Stabilizatör olarak bilinen kimyasal maddeler (ajanlar) çözeltinin içerisindeki Ni iyonlarının hidroksitlerle bağlanıp çökmesini engellemektedir. Eğer stabilizatör olmazsa nikel iyonları hidroksitlerle bağlanır ve banyo içerisinde bozunmalar meydana gelir. Bu dengeleyicilerin etkin bir şekilde kullanılması için banyo üzerinde çalışan kimyager veya mühendisin öncelikle meydana gelen problemlerin dengeleyiciler ile çözülebileceğini teşhis etmesi gerekmektedir. İkinci olarak, katalitik aktivitenin negatif kayıplarını önlemek için kullanılacak olan dengeleyicinin kaplama banyosuna uygunluğunu belirlemelidir. Üçüncü olarak, iki veya daha fazla miktarda stabilizatör kullanıldığında, bunlardan birisinin diğer stabilizatörleri azaltmadığından veya engellemediğinden emin olmak çok önemlidir. Son olarak ise, kullanılacak olan dengeleyici yalnızca kaplama işlemini etkileyecek bir davranışta olmalıdır (Mallory & Hajdu, 1990).

Kaplama banyoları içerisinde kullanılacak mükemmel verimlilikte dengeleyiciler bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi talyum nitrattır (Tl(NO₃)₃). Ancak göstermiş olduğu toksit ve çevresel problemlerden dolayı talyum nitrat yerine kurşun tungsten kullanılabilir. Örneğin; talyum nitrat Ni-B-Tl üçlü alaşım oluşumunu etkiler. Banyo içerisinde kurşun tungsten kullanıldığında tortular yapısında kurşun tungsten içermez ancak %2,5-10 arasında bor içerir (Delaunois & Lienard, Heat treatments for electroless nickel-boron plating on aluminium alloys, 2002).

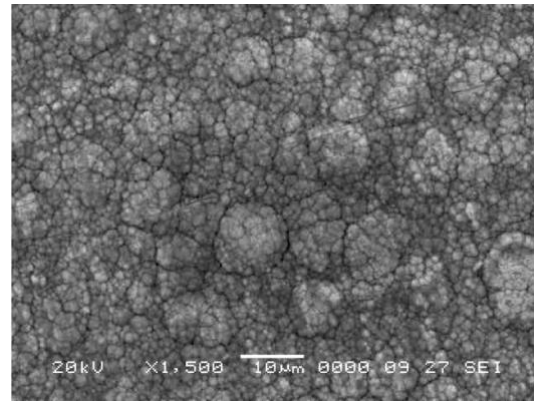
2.8 Elektrozsuz Nikel Bor Kaplamalar

2.8.1 Morfolojik Özellikleri

Akımsız Ni-B kaplamalar morfolojik olarak karnabahar yapısına benzemektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça bu yapı üst üste birikme sonucunda kaybolarak düz bir yapıya sahip olur ve bu istenmeyen bir durumdur. Çünkü kaplamanın dayanımı düşmektedir. Oluşan kaplamanın karnabahar yapısına sahip olmasını bor bileşeni sağlamaktadır. Delaunois, F. ve Lienard, P. yapmış oldukları çalışmada akımsız yöntem kullanarak alüminyum alaşımına Ni-B kaplama gerçekleştirdiler. Şekil 2.16 da Ni-B kaplama çalışmasının morfolojik görüntüsü yer almaktadır (Delaunois & Lienard, Heat treatments for electroless nickel-boron plating on aluminium alloys, 2002).



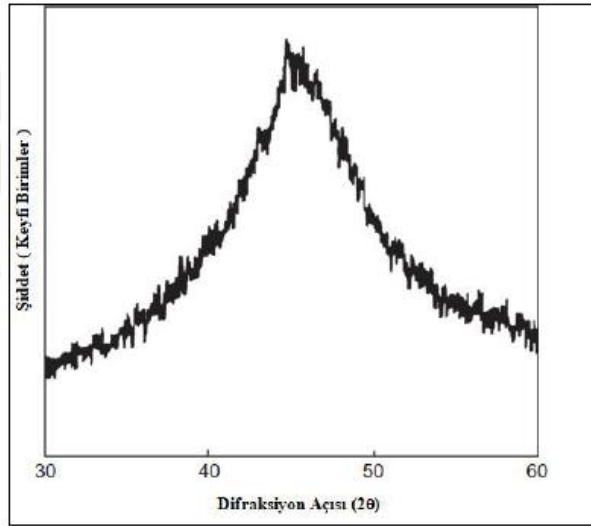
Şekil 2.15 Alüminyum substrat üzerinde akımsız bir Ni-B kaplamasının SEM mikrografı.



Şekil 2.16 4 saat boyunca 180 °C'de ısıtılma işleminden sonra alüminyum substrat üzerinde akımsız Ni-B kaplaması.

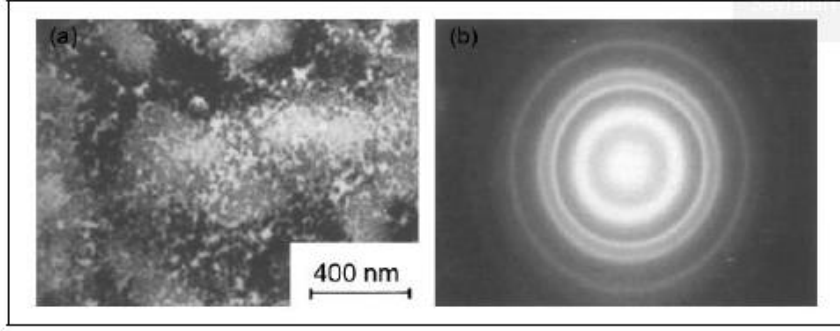
2.8.2 Isıl İşlem Görmemiş Ni-B Kaplamanın Yapısı

Akımsız yöntem tercih edilerek oluşturulan Ni-B kaplamaların yapısı bireşim yönteminin bir neticesidir: Akımsız kaplama gerçekleştirilmesi için gerekli olan enerji sistemin denge konumuna gelmesi için yeterli oranda değildir. Sonuç olarak baktığımızda Ni-B kaplamalar aslında nikel içerisinde bor miktarının süper doymuş haldeki katı çözeltisidir. Akımsız Ni-B kaplamalarının tane boyutu bor içeriği ile değişmektedir. Bor içeriğinin artması kaplamanın tane boyutunu azaltmaktadır ve XRD (X-ışını difraksiyonu) verileri ile önerilen bor içeriği kütlece (ağırlıkça) $\approx 5\%$ in üzerinde olduğu zaman amorf yapıda olduğu kabul edilmektedir. Şekil 2.17 de XRD verileri gösterilmektedir.



Şekil 2.17 Ni-B kaplamasının XRD (X-ışını difraksiyonu) paterni (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009).

Ayrıca, bir çok bilim insanının yapmış oldukları araştırmalar sonucunda kaplama yüzeylerine benzer (paralel) olarak ve kesit görüntülerinin TEM (transmisyon elektron mikroskobu) ile yüksek oranda bor bileşeni içeriğine sahip Ni-B kaplamalar şekil 2.17 ve şekil 2.18’de gösterilmiştir. Sonuç olarak incelediğimizde, Ni-B kaplamaların tane boyutları bor içeriği ile değişim göstermektedir. Eğer kaplamada bor içeriği artırılacak olursa tane boyutunda azalma gözlenecektir (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009).



Şekil 2.18 a) Yapısında ağırlıkça %4.31 B içeren Ni-B kaplamanın TEM (transmisyon elektron mikroskobu) mikrografi b) a) da ki TEM mikrografa karşılık gelen SAD paterni (Fields, Duncan, & Zickgraf, 2009).

2.8.3 Fiziksel Özellikleri

Ni-B alaşımları fiziksel olarak çok yüksek oranda sertlik değerine sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı kaplama işleminden sonra yüksek seviyelerde tavlama (ısıtma işlemi) gerçekleştirilir. Ayrıca bu kaplamalar yüksek sertlik değerinin yanında korozyona ve aşınmaya karşı son derece iyi direnç gösterirler (Yıldız, 2012).

Örneğin: Yıldız, R., A., yapmış olduğu çalışmada akımsız yöntem kullanılarak Ni-B kaplanan alüminyum 7075 alaşımının yorulma, korozyon direnci, yüzey pürüzlülüğü, sertlik gibi özelliklerindeki gelişimi inceledi. Al. 7075 alaşımını kaplama yapmadan önce ön işleme soktu ve kaplamaya hazır hale getirdi. Daha sonra Ni-B (NaBH_4) kaplama işlemini gerçekleştirdi. Yapılan kaplamalar morfolojik olarak amorf yapıda bulunduğundan bunu kristal yapıya geçirmek için alaşımı $470\text{ }^\circ\text{C}$ de 1 saat tavlama (ısıtma işlemi) işlemine bıraktı. Yıldız sonuçları kaplamasız ve kaplamalı olarak iki türde ele alarak karşılaştırdı. Yüzey pürüzlülüğünü incelediğinde; kaplamasız 7075 0,15 iken Ni-B kaplamalı 1,12 bularak kaplamanın yüzeyi yaklaşık on kat artırdığını gözlemledi. Kaplamasız ve kaplamalı alaşımın sertlik değerlerini 125 , 150 ve $175\text{ }^\circ\text{C}$ gibi farklı tavlama sıcaklıkları ve sürelerde (saat) inceledi. Bu incelemede 100 g yük altındaki MikroVickers sertlik ölçümünü referans aldı. $125\text{ }^\circ\text{C}$ de tavllanmış alaşımda başta ısıtma işlemi sokmadan ölçülen kaplamasız 7075 Al alaşımın sertlik değeri $62\text{ HV}_{0.1}$ iken Ni-B kaplamalı 7075 Al alaşımın sertlik değeri $648\text{ HV}_{0.1}$ olduğunu gözlemledi. $125\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta 2 saat tavlama işlemi gerçekleştirdikten sonra yaptığı ölçümde kaplamasız alaşımın sertlik değeri $141\text{ HV}_{0.1}$ iken kaplamalı alaşımın değeri $665\text{ HV}_{0.1}$ buldu.

Bu işlemi 150 ve 175 °C dahil olmak üzere 2 saat artırmalı olarak 24 saate kadar devam ettirdi. Yaptığı sertlik ölçümünde uygulanacak olan ısıl işlemin ve kaplamanın alaşım üzerinde dayanımı artıracığı sonucuna vardı. Genel ortalamayı incelediğinde 150 °C – 10 saat süren tavlama sonucunda kaplamalı alaşımın sertlik değerinde yaklaşık %52 artış olduğunu gözlemledi. Korozyon testini incelediğinde daldırma yöntemli korozyon testinde 120 saat sonunda kaplamasız alaşımında oyuklar oluşurken kaplamasız alaşımında herhangi bir oyuk oluşumunun olmadığını gözlemledi. Sonuç olarak 7075 Al. Alaşımının korozif ortamlarda ömrünü artırabilmek için yüzeyde oluşan aşınmalara karşı yüksek direnç gösteren akımsız Ni-B kaplamaların yapılabileceğini ön görmektedir.



3. MATERYAL ve METOT

Yapmış olduğumuz deneysel çalışma yaklaşık olarak dört basamaktan oluşmaktadır. Bunlardan ilk olarak Alüminyum numunesinin yüzeyinin zımparalanarak çok iyi bir şekilde temizlenmesi, ardından Alüminyum yüzeyine istenilen Ni-B kaplamanın uygulanması, kaplanan alüminyumun belirli sıcaklıkta tavllanması ve en son olarak istenilen analizlerinin (SEM, XRD, Vickers sertlik ve korozyon) yapılmasıdır.

3.1 Tercih Edilen Substrat

Deneysel çalışmada altlık olarak “Alüminyum 2024” ve “Alüminyum 7075” tercih edilmiştir. Kaplama işlemi yapılacak olan altlıklar Bosh Professional GCD 12JL marka/model metal kesme testeresi yarımıyla 2x2x1 mm ebatlarında hazırlandı.



Resim 3.1 Alüminyum 2024 alaşımı.

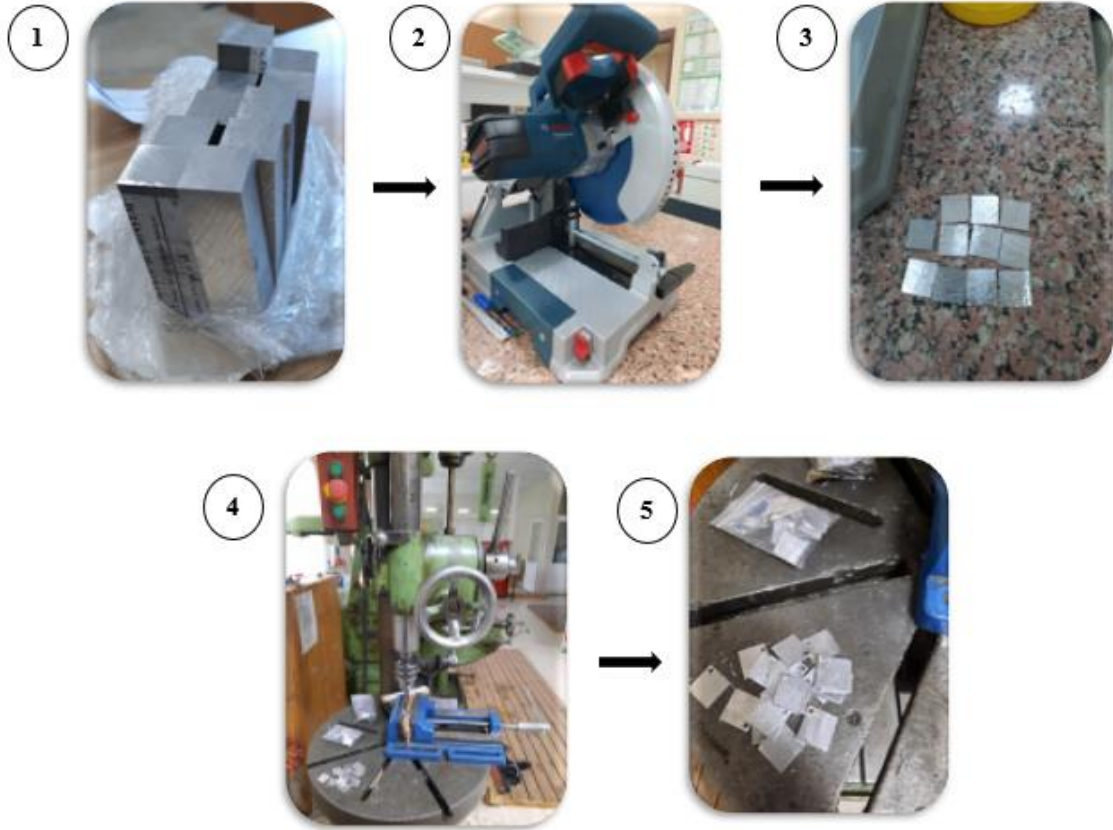
3.2 Ön İşlemler

Yapılan her türlü yüzey işlemleri için çok özenli ve dikkatli yüzey temizliği gerektirmektedir. Bu temizlik ile kaplama veya herhangi bir yüzey işlemi görecektir malzeme;

- Yabancı metallere
- Yağlardan

- Banyo atıklarından
- Pasif tabakalardan
- Diğer kirlerden

arındırılmaktadır. Böylelikle kaplamaya veya herhangi bir yüzey işlemine hazır hale getirilir.



Resim 3.2 Alüminyum 2024 / 7075 alaşımlarının hazırlanması.

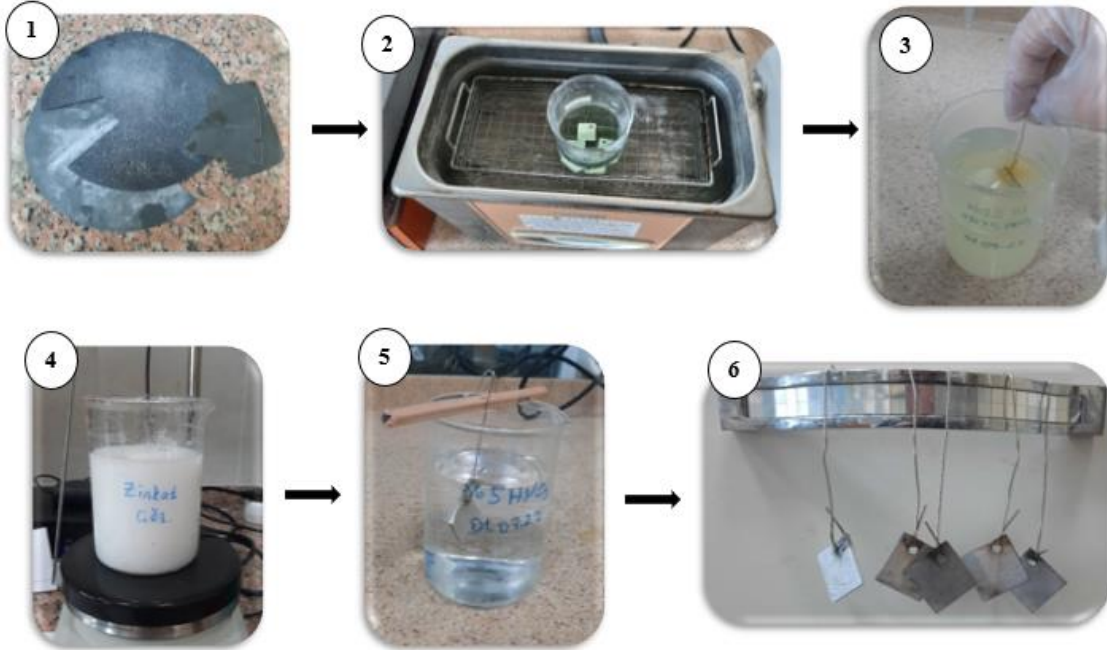
3.2.1 Alüminyuma Uygulanan Ön İşlemler

Alüminyum 2024 ve 7075 alaşımları çok hızlı oksitlene bilen metallere dendir. Bu yüzden seçilen bu metale uygulanacak olan ön işlemlerin daha dikkatli ve özen göstererek olması gerekmektedir.

1. Sırasıyla 240, 400, 600, 800 ve 1200'lük zımpara kağıtları ile zımparalama
2. 35 °C'de 3 dk boyunca alkali deterjan temizleyicisinde yağ alma

3. Yağı alınan altlıkları saf su ile durulama
4. HF+3HNO₃ (%25 HF ve %75 HNO₃) çözeltisinde 10 sn daldırma
5. Saf su içerisinde durulama
6. HF+3HNO₃ (%25 HF ve %75 HNO₃) çözeltisinde 30 sn daldırma
7. Saf su içerisinde durulama
8. Zinkatlama (Çinkolama) çözeltisinde 1dk bekletme
9. Saf su ile durulama
10. %5 HNO₃ çözeltisine 10 sn daldırma
11. Saf su ile durulama
12. Zinkatlama (Çinkolama) çözeltisinde 3 dk bekletme
13. Saf suda durulama

Yukarıda belirtilen ön işlemler uygulandıktan sonra alüminyum altlıklar akımsız Ni-B kaplamaya hazır hale gelmiştir.



Resim 3.3 Alüminyum 2024 / 7075 alaşımların ön işlemleri.

3.3 Akımsız Ni-B Banyosunun Hazırlanması

Çizelge 3.1 Ni-B kaplama banyosu bileşenleri.

Nikel Kaynağı	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20 g/L
Kompleks Oluşturucu	$\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$ (Etilen Diamin (EDA))	100 ml/L
İndirgeyici	NaBH_4	1 – 2 g/L
Dengeleyici	TICH_3COO	0.015 – 0.15 g/L
pH ayarlayıcı	NH_3	100 – 200 ml



Resim 3.4 Alüminyum 2024 / 7075 alaşımların ön işlemleri.

Çizelge 3.2 Ni-B kaplama banyosu parametreleri.

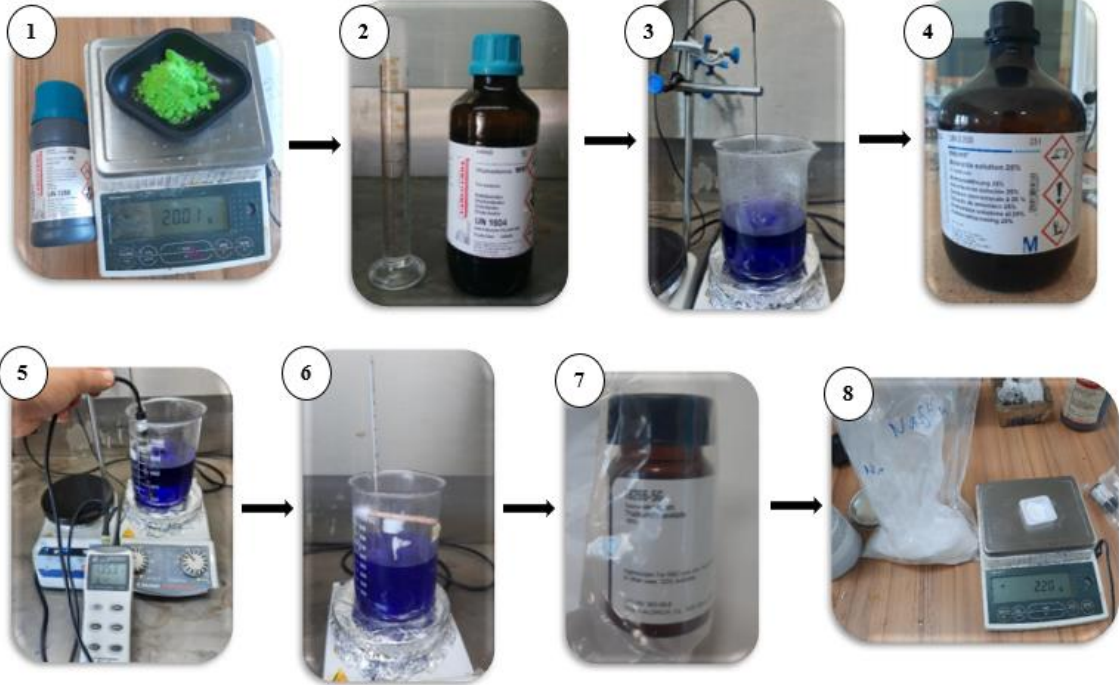
pH	12 – 14
T	85 – 95 °C
t	10 dk, 20 dk, 30 dk, 60 dk ve 90 dk
Rpm	300 – 350 rpm/dk

1. 1000 ml (1L) hacmine sahip cam beher içerisinde 500 ml saf su doldurulur.
2. Ohaus marka hassas terazide 20 g $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tartılır ve behere eklenerek manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılır. (Nikel iyonu kaynağında alternatif

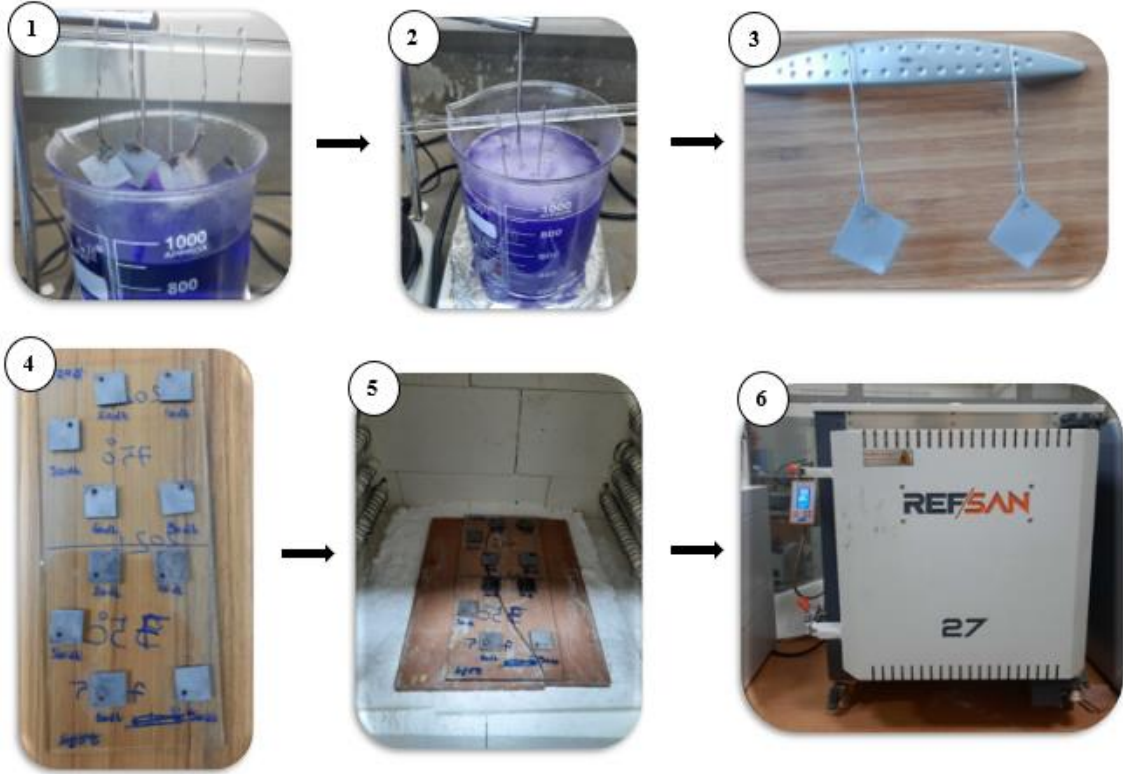
olarak $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılabilir.)

3. Manyetik olarak karışmakta olan Ni çözeltisi içerisinde 90 g (≈ 100 ml) kompleks oluşturucu olan $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$ (Etilen Diamin (EDA)) eklenir. EDA eklenmesiyle açığa ekzotermik olay çıkar ve çözelti sıcaklığı artmış olur.
4. pH değeri $\approx 10 - 11$ arasında olan kaplama banyosunun pH değerini artırmak için 100 – 200 ml NH_3 eklenir.
5. Banyonun sıcaklığı artırılır ve sıcaklık $\approx 75 - 80$ °C olduğunda banyo içerisine 0.015 – 0.15 g/L TiCl_3COO dengeleyicisi eklenir.
6. Banyo sıcaklığı $\approx 85 - 95$ °C olduğunda 1 – 2 g/L NaBH_4 eklenir ve 5 – 10 dk beklenerek çözeltiye karışması sağlanır.
7. Kaplamaya hazırlanmış olan Alüminyum alaşımları belirli kaplama parametrelerine göre hazır olan banyoya daldırılır.

Kaplama işlemleri tamamlanmış olan altlıklar 400 °C – 2 saat inert ortamda (%95 Ar + %5 He) tavlama işlemine tabi tutulur. Tavlanan numuneler istenilen analizlere yapılmak üzere gönderilir.



Resim 3.5 Kaplama banyosu kurulumu.



Resim 3.6 Kaplama banyosu kurulumu.

Çizelge 3.3 Ni-B kaplama banyosu bileşenleri ve parametreleri.

Banyo	10 dk (A ₁)	20 dk (A ₂)	30 dk (A ₃)	60 dk (A ₄)	90 dk (A ₅)
Bileşenleri /					
Parametreler					
NiCl ₂ .6H ₂ O	20 g/L				
C ₂ H ₈ N ₂	90 g/L	90 g/L	90 g/L	90 g/L	90 g/L
NH ₃	100 – 200 ml	100 – 200 ml	100 – 200 ml	100 – 200 ml	100 – 200 ml
TiCH ₃ COO	0.015 – 0.15 g/L	0.015 – 0.15 g/L	0.015 – 0.15 g/L	0.015 – 0.15 g/L	0.015 – 0.15 g/L
NaBH ₄	1 – 2 g/L	1 – 2 g/L	1 – 2 g/L	1 – 2 g/L	1 – 2 g/L
Sıcaklık	≈85 – 95 °C	≈85 – 95 °C	≈85 – 95 °C	≈85 – 95 °C	≈85 – 95 °C
pH	12 – 14	12 – 14	12 – 14	12 – 14	12 – 14
Karıştırma	300 – 350	300 – 350	300 – 350	300 – 350	300 – 350
Hızı	rpm/dk	rpm/dk	rpm/dk	rpm/dk	rpm/dk

3.4 Kaplamaların Karakterizasyon İşlemleri

3.4.1 SEM Analizi

Yapılmış olan kaplamaların mikro yapısal analizlerinin yapılması için Afyon Kocatepe Üniversitesi TUAM laboratuvarı bünyesinde yer alan “LEO 1430 VP” marka/model olan taramalı elektron mikroskobu” kullanılarak elde edilen Ni-B kaplamalarının yüzey morfolojisi incelendi.



Resim 3.7 LEO 1430 VP.

3.4.2 XRD Analizi

Yapılmış olan kaplamaların minerolojik analizlerinin yapılması için Eskişehir Teknik Üniversitesi Malzeme bilimi SAM laboratuvarı bünyesinde yer alan “Rigaku Miniflex 600 X-Ray Diffractometer” marka/model olan cihaz kullanılarak Ni-B kaplamalarının dalga boyu 1.54 \AA - Cu $K\alpha$ ve $2\theta=20^\circ - 90^\circ$ arasında $2^\circ/\text{dk}$ tarama hızında x-ışınları ile minerolojik analizleri incelendi.



Resim 3.8 Rigaku Miniflex 600 X-Ray Diffractometer.

3.4.3 Korozyon Testi

Ni-B kaplamalarının korozyon testleri Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde “Gamry Series G750TM” cihazında yapıldı.



Şekil 3.1 Gamry korozyon hücresi.



Şekil 3.2 Gamry Instruments, Warminster, USA.

Yapılan test ağırlıkça %3.5 ve pH değeri 5.8 olan NaCl çözeltisi içerisinde 3 elektrot tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Düzenekte referans elektrot olarak Ag/AgCl ve yardımcı elektrot olarak grafit çubuk tercih edilmiştir. Kaplanması istenilen numunenin bulunduğu alan hariç tüm kısımlar izole edilmiştir. Yapılan kaplamaların korozyon davranışları Tafel (Potentiodynamic polarizasyon) ile incelenmiştir.

3.4.4 Vickers Sertlik Testi

Kaplamasız ve kaplamalı, farklı süreler sonucunda meydana gelen Ni-B kaplamalar “Shimadzu HMV-G-20” marka/model cihaz kullanılarak Vickers mikro sertlik

ölçümleri yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu ölçümler 50 gr yük altında 10 sn süre boyunca uygulanmıştır ve substrat yüzeyinde oluşan izler sonucunda numunenin sertlik değerleri okunmuştur. Saf ve Ni-B kaplı her numuneden en az 5 adet ölçüm alınmış olup bunların standart sapmaları da hesaplanmıştır. Şekil 3.3’ de Shimadzu HMV-G-20 mikro sertlik cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Shimadzu HMV-G-20 Vickers sertlik cihazı.

3.4.5 Yüzey Pürüzlülüğü Testi

Kaplamasız ve kaplamalı, farklı süreler sonucunda meydana gelen Ni-B kaplamalar “Mitutoyo 178-562-01D” marka/model cihaz kullanılarak yüzey pürüzlülüğü testi yapılmıştır. Saf ve Ni-B kaplı her numuneden en az 3 adet ölçüm alınmış olup bunların standart sapmaları da hesaplanmıştır. Şekil 3.4’ de Surfrest SJ-210 yüzey pürüzlülüğü cihazı gösterilmiştir.



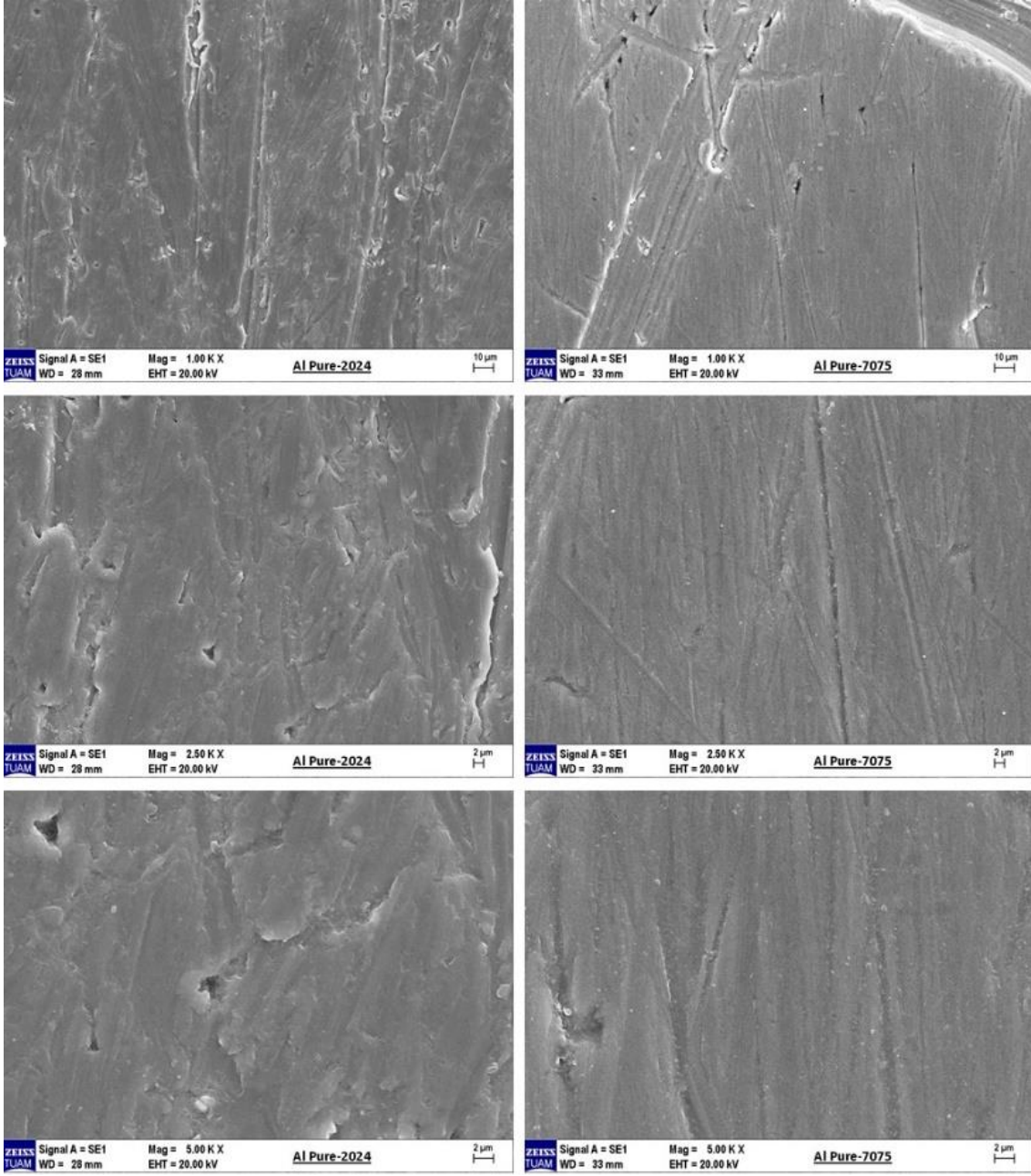
Şekil 3.4 Surfrest SJ-210 yüzey pürüzlülüğü cihazı.

4. BULGULAR.

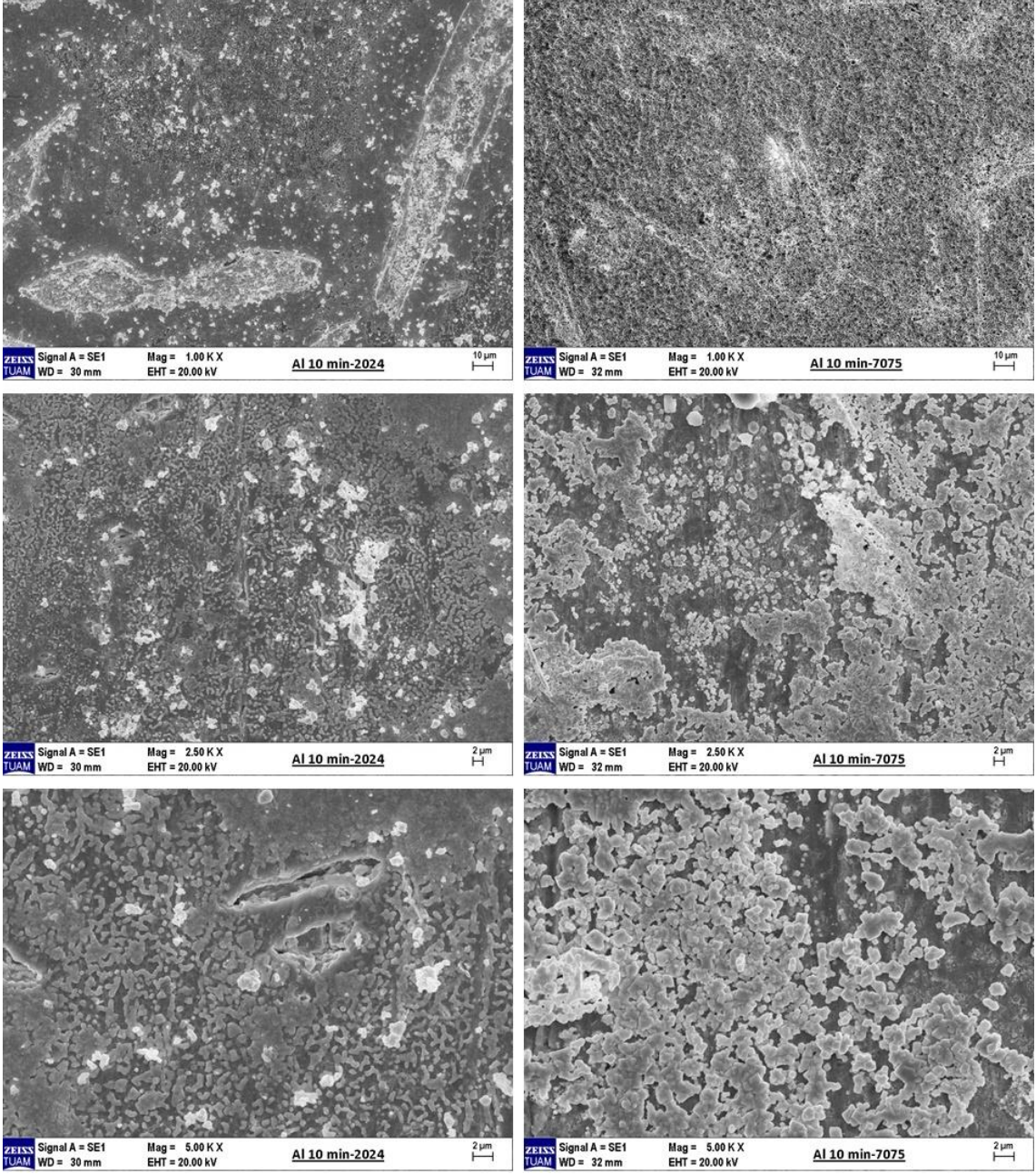
4.1 Akımsız Ni-B Kaplı Numunelerin Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi

Akımsız yöntemle elde edilen Ni-B kaplamaların yüzey özelliklerinin incelenmesinde banyo çözeltisinde değişken olarak tercih edilen kaplama süresi parametresi göz önünde bulundurularak kaplamaların yüzey morfolojileri incelenmiştir.

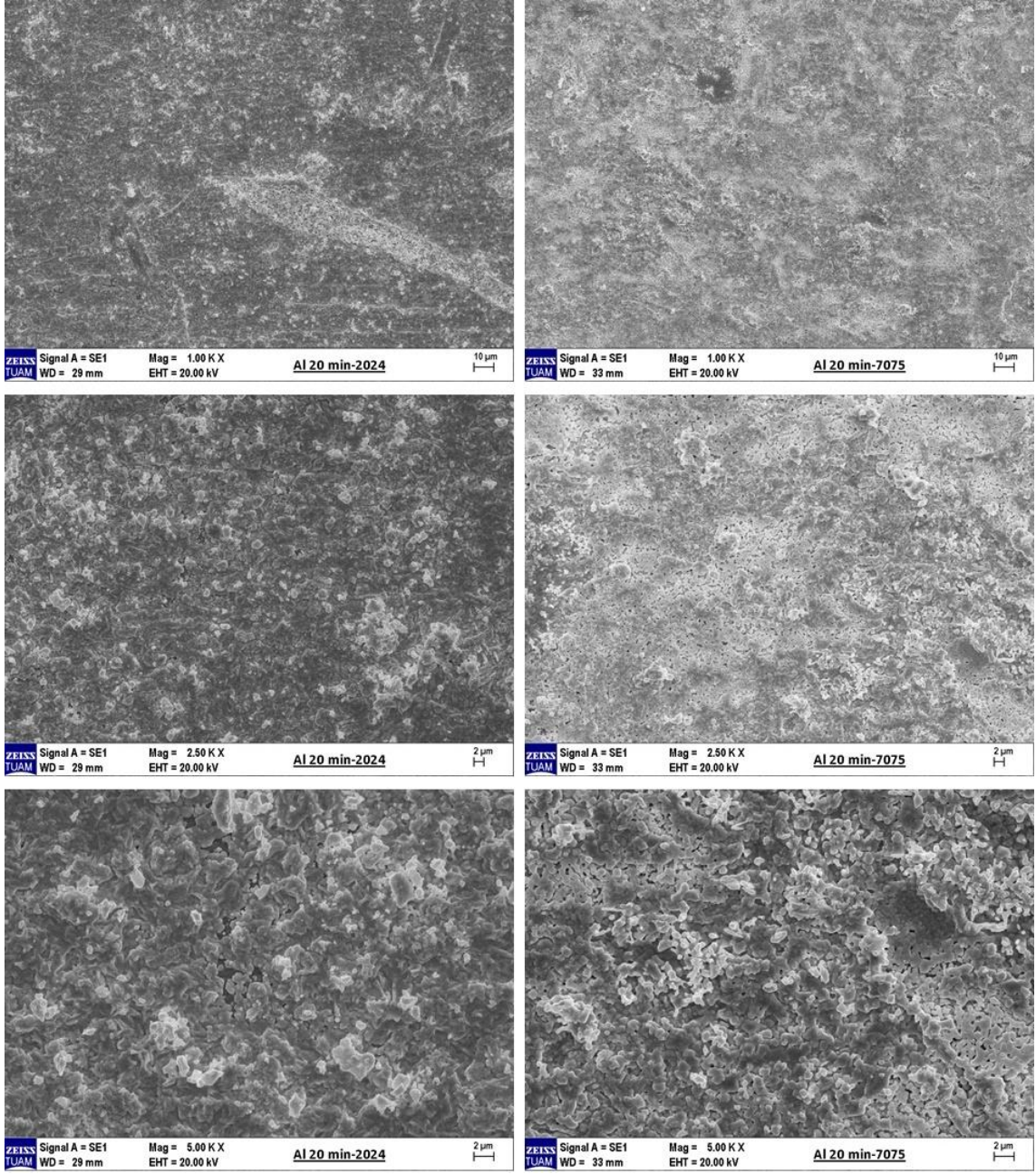
Çizelge 3.3' te verilen banyo bileşenlerinden nikel kaynağı, kompleks oluşturucu, indirgeyici, dengeleyici, pH ve sıcaklık gibi parametreler sabit tutularak, kaplama süresinin alüminyum üzerine olan etkisi incelenmiştir. Değişkenlik gösteren bu banyolarda 10dk (A₁), 20dk (A₂), 30dk (A₃), 60dk (A₄) ve 90dk (A₅) sürelerde kaplamalar yapılmış ve alüminyum üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen kaplamaların 1.00K, 2.50K ve 5.00K büyütme SEM ve kesit görüntüleri aşağıda verilmiştir.



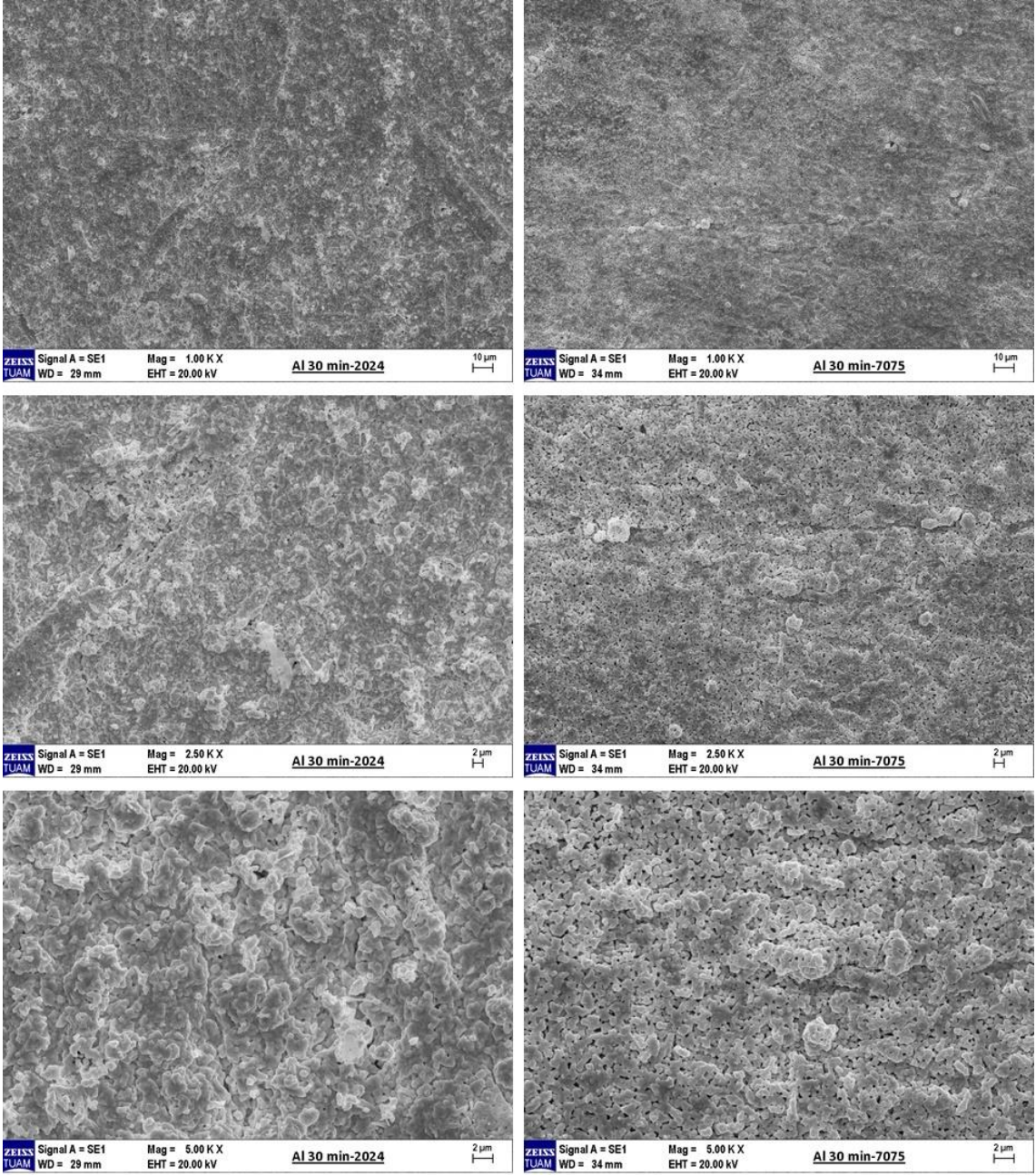
Şekil 4.1 Saf Alüminyum 2024 ve 7075 SEM görüntüsü.



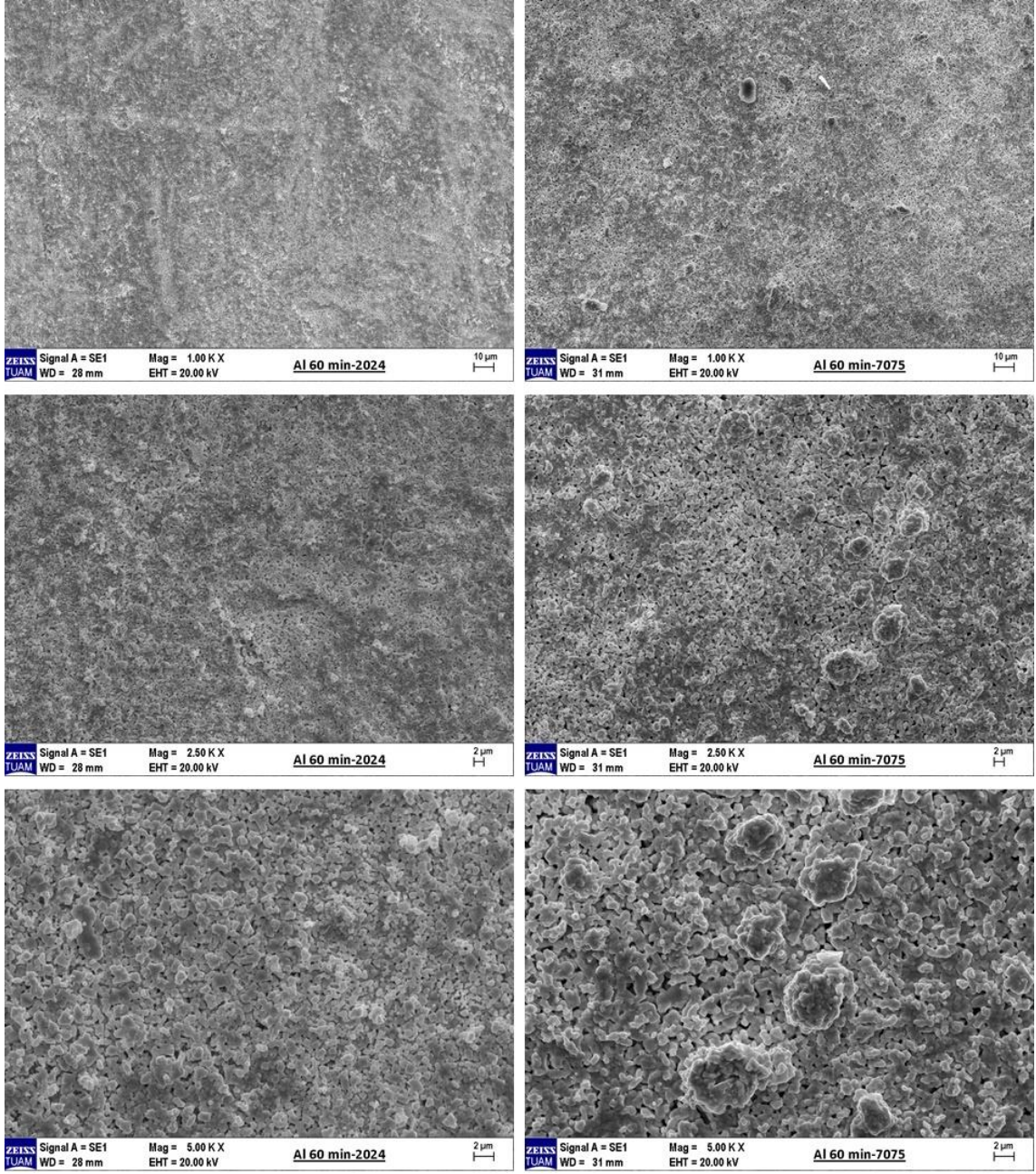
Şekil 4.2 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 10dk (A₁) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.



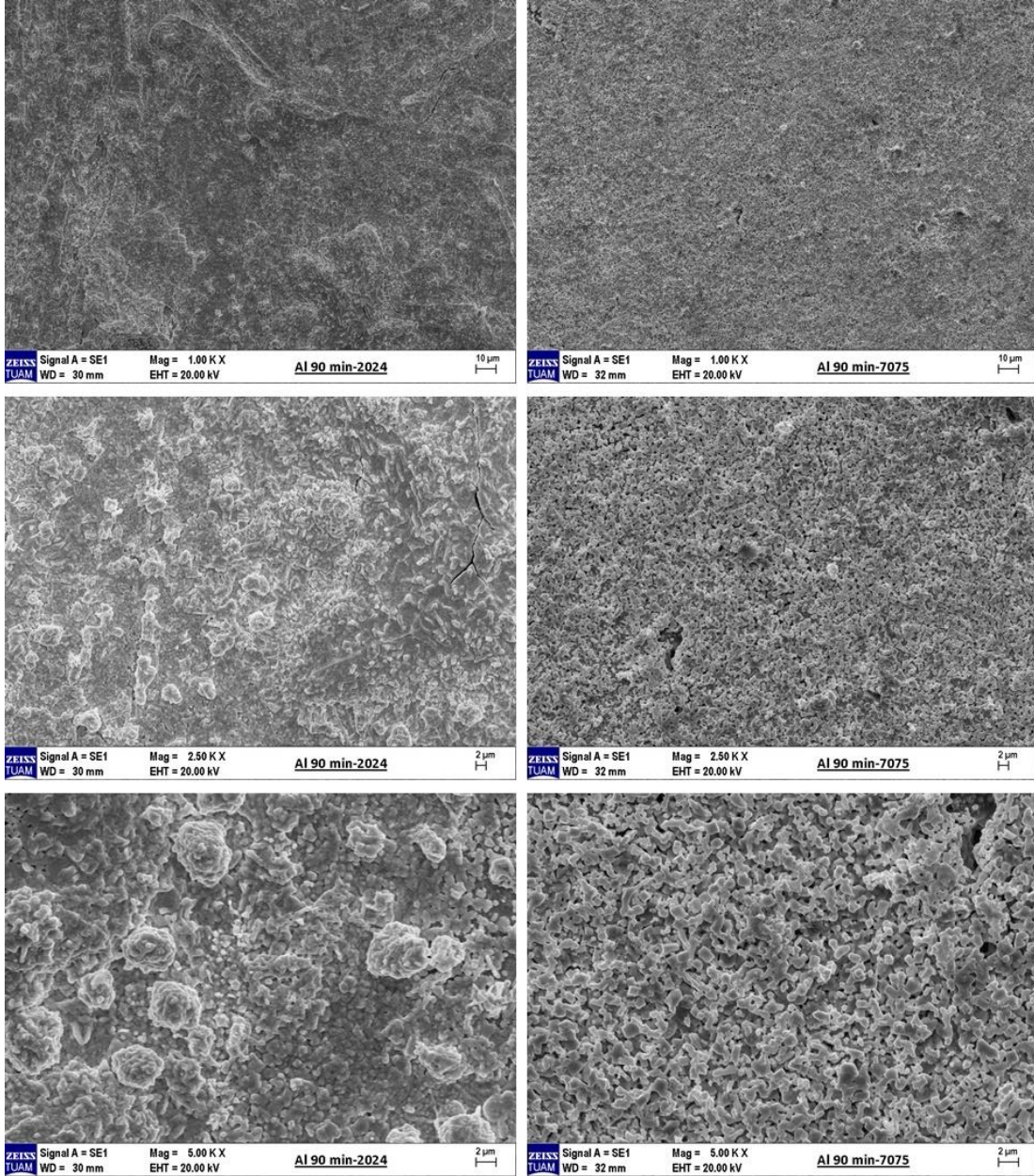
Şekil 4.3 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 20dk (A₂) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.



Şekil 4.4 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 30dk (A₃) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.



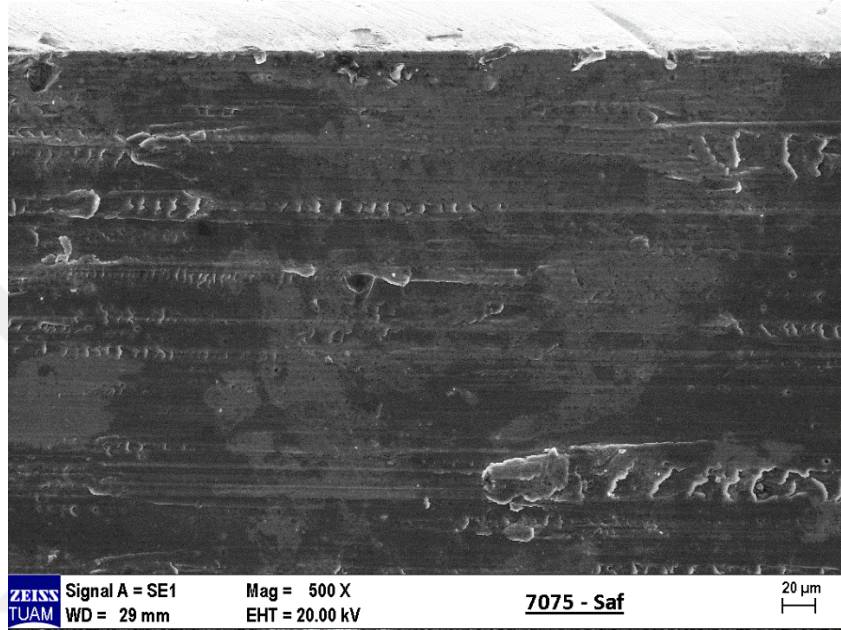
Şekil 4.5 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 60dk (A₄) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.



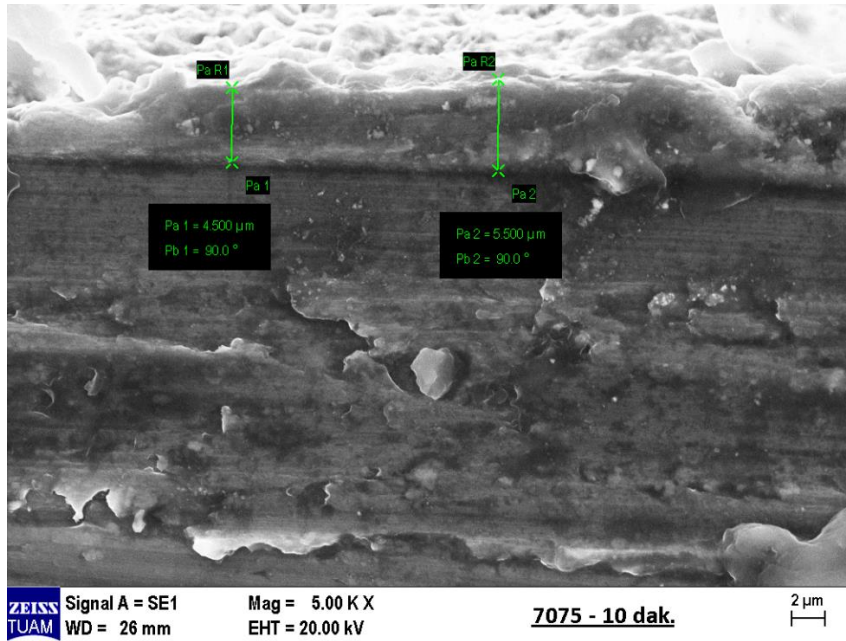
Şekil 4.6 Al. 2024 ve 7075 alaşımlarına 90dk (A₅) süreli kaplama sonrası yapılan SEM analiz görüntüsü.

Kaplama süresi 10dk (A₁) olan numunelerin yüzeyinde tam teşekküllü kaplamaların meydana gelmediği yani biriken taneciklerin alüminyum yüzeyini tam olarak doldurmadığı, kaplama süresinin yetersiz olmasından dolayı yüzeyde derin boşlukların meydana geldiği görülmüştür. Kaplama süresinin 10dk (A₁) dan 20dk (A₂) ya yükseltilmesi sonucunda substrat yüzeyinde yeni tanecikler oluştuğu ve böylelikle boşlukların dolduğu görülmüştür. 20dk'lık (A₂) kaplamada tanecikler arasında adezyon kuvvetinin arttığı ve 10dk'lık (A₁) kaplamaya göre daha düzenli bir yüzey meydana

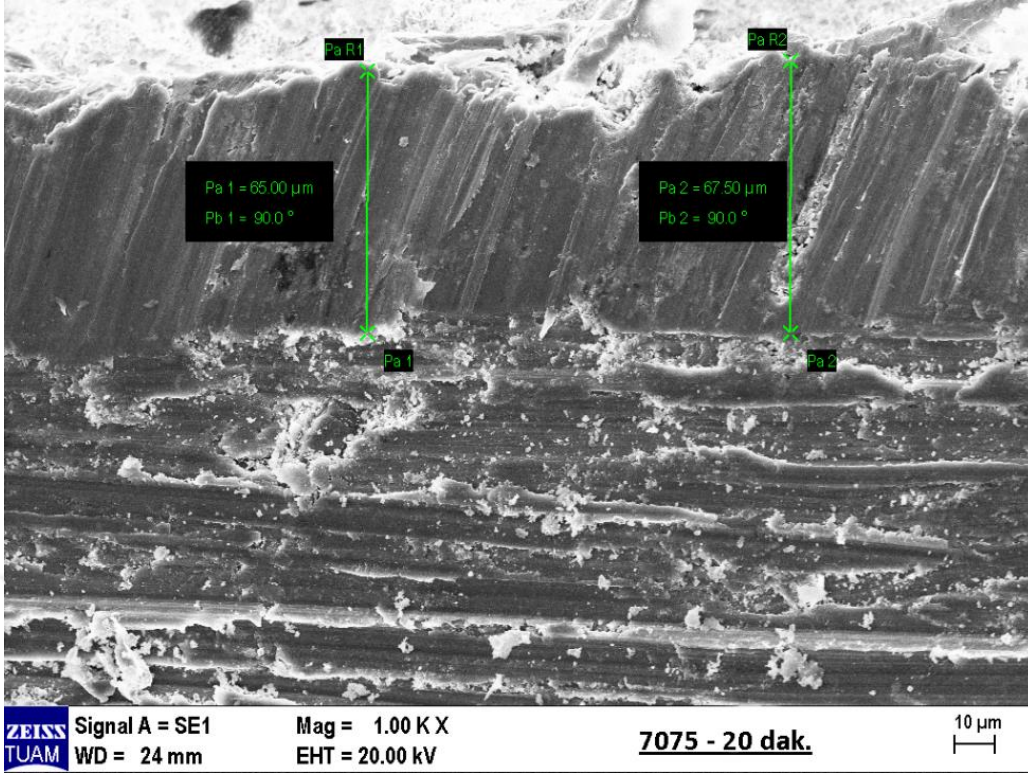
geldiği gözlemlenmiştir. Kaplama süresinde artışın oluşmasıyla tanecik boyutunda ve morfolojisinde belirgin değişiklikler görülmektedir. 30dk'lık (A₃) kaplama süresinden sonra oluşan taneciklerin kalınlıkları artmakta olup yüzeyi tamamen kaplamaktadır. Sürenin artmasıyla yanal boşlukların tamamen dolduğu ve yüzeyde homojen/düzgün bir görüntü meydana gelmektedir.



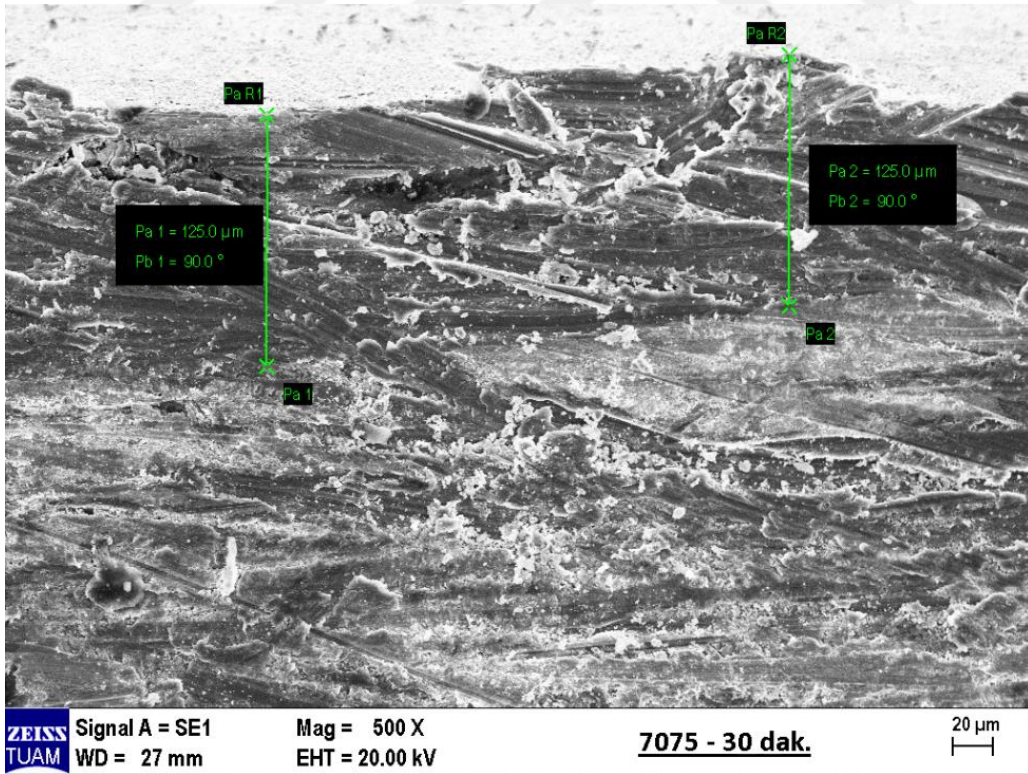
Şekil 4.7 Al. 7075 alaşımının saf haldeki kesit görüntüsü.



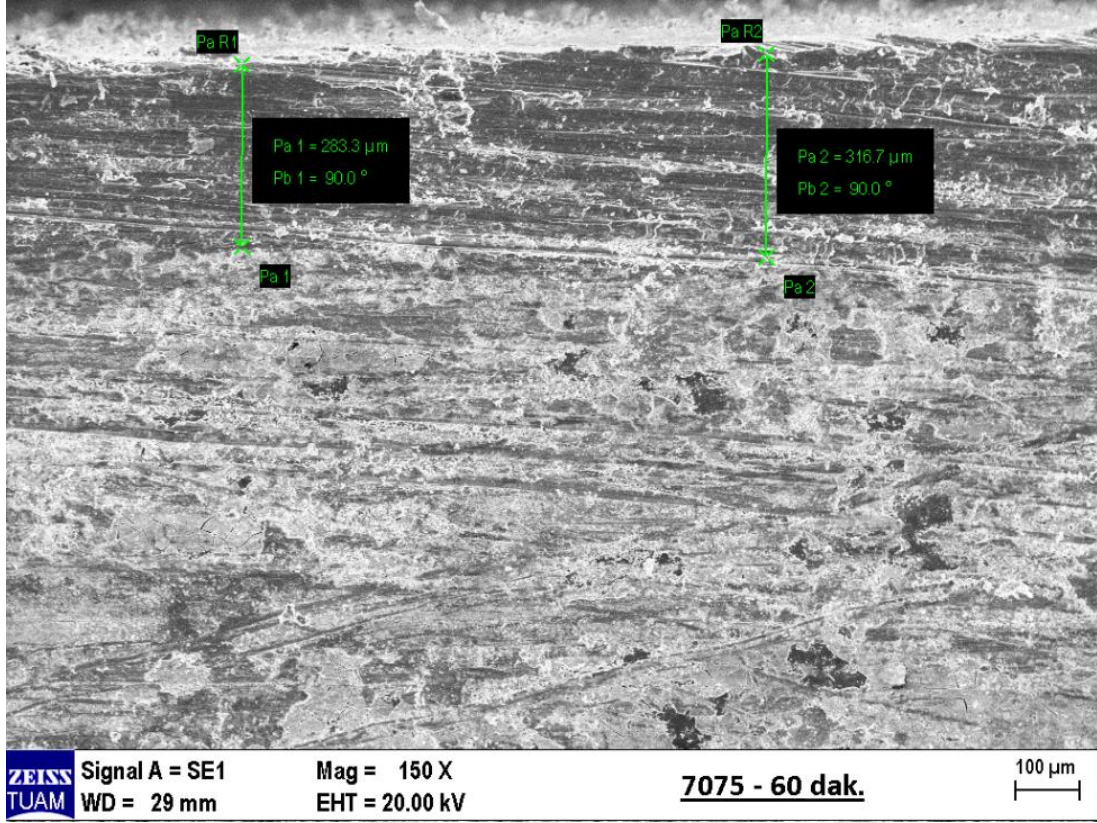
Şekil 4.8 Al. 7075 alaşımının 10dk (A₁) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.



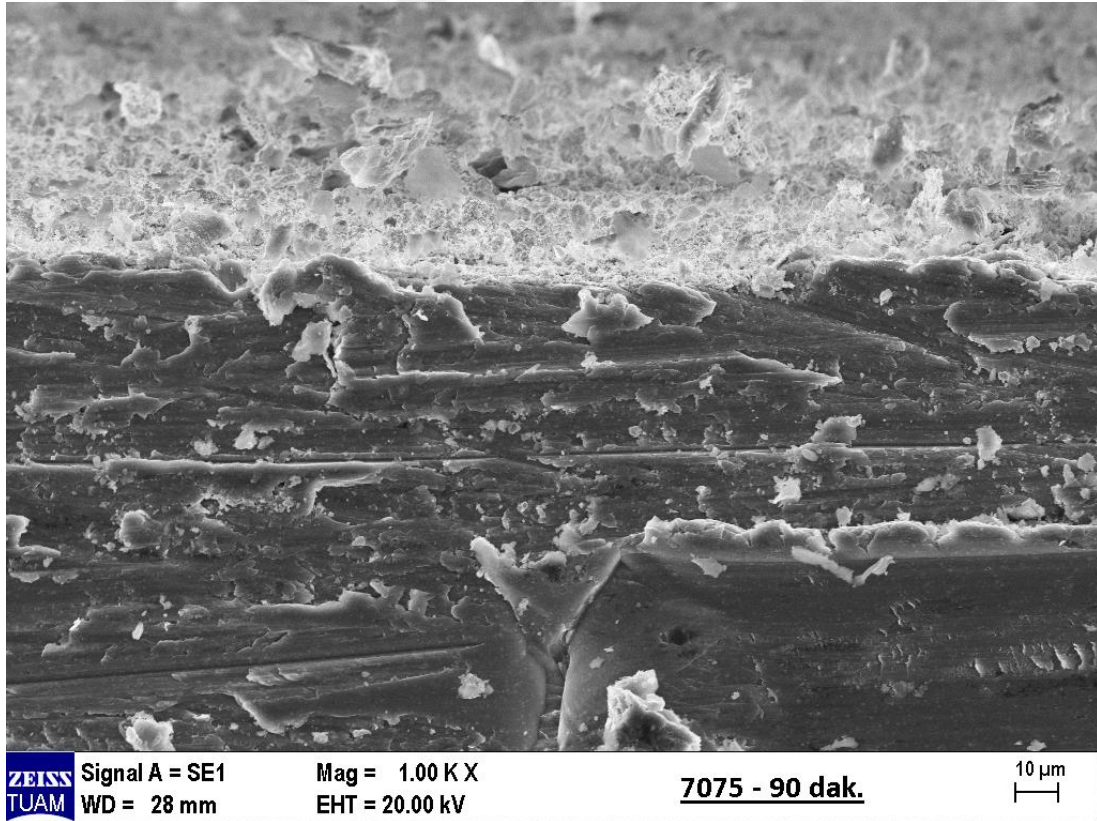
Şekil 4.9 Al. 7075 alaşımının 20dk (A₂) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.



Şekil 4.10 Al. 7075 alaşımının 30dk (A₃) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.

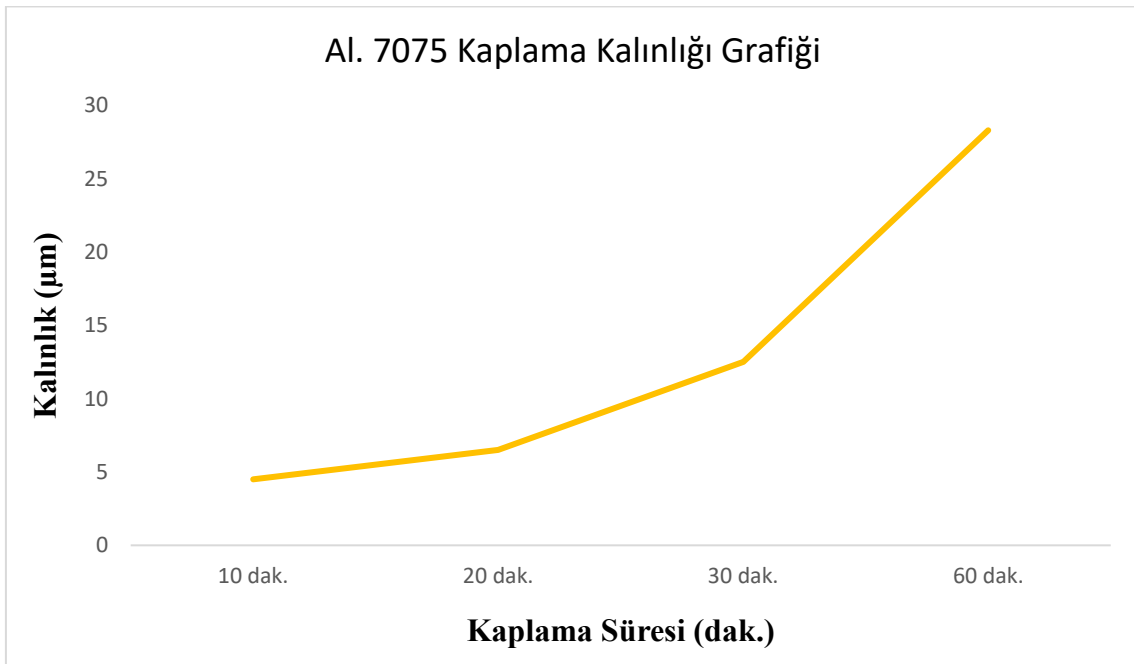


Şekil 4.11 Al. 7075 alaşımının 60dk (A₄) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.



Şekil 4.12 Al. 7075 alaşımının 90dk (A₅) süreli kaplama sonrası kesit görüntüsü.

A₁, A₂, A₃, A₄ ve A₅ morfolojik kesit görüntülerinde banyodaki bekleme süresinin (kaplama süresi) kaplama kalınlığına olan etkisi gözükmemektedir. Sonuçlar incelendiğinde artan işlem süresi ile (kaplama süresi) kaplamanın kalınlığında lineer olarak bir artış söz konusudur. 10, 20, 30 ve 60 dk bekleme sürelerinde kaplamanın gerçekleştiği görülmektedir fakat bekleme süresi 90 dk olan kaplamanın banyoda çok uzun süre bekletilmesiyle yapısında bozulmalar gerçekleştiği ve yüzeyinin kesit analiz için iyi parlatılamamasından dolayı kaplama kalınlığında tam bir ölçüm alınamamıştır.

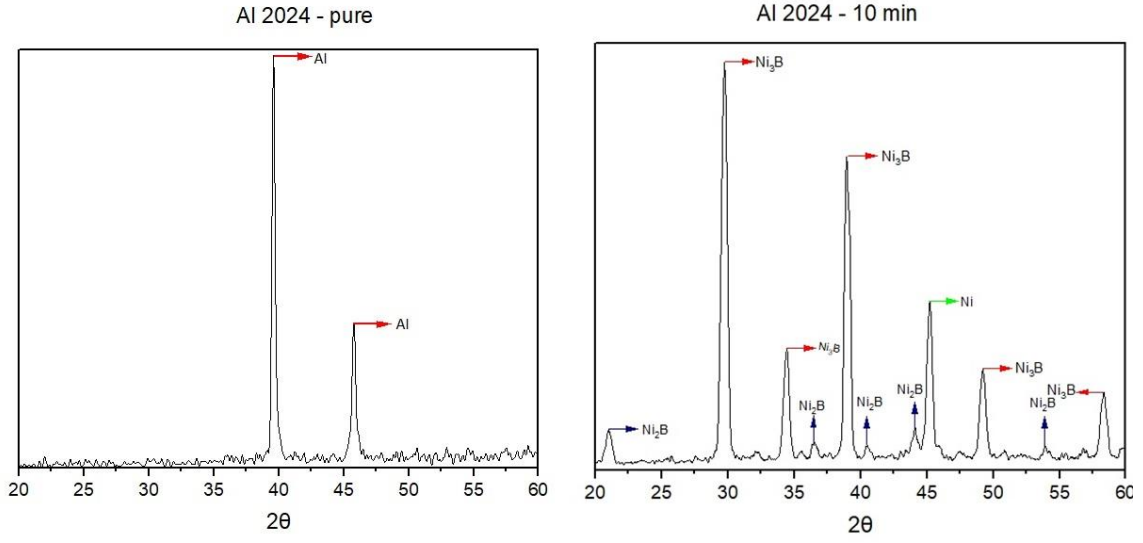


Grafik 4.1 Al. 7075 zaman-kalınlık grafiği

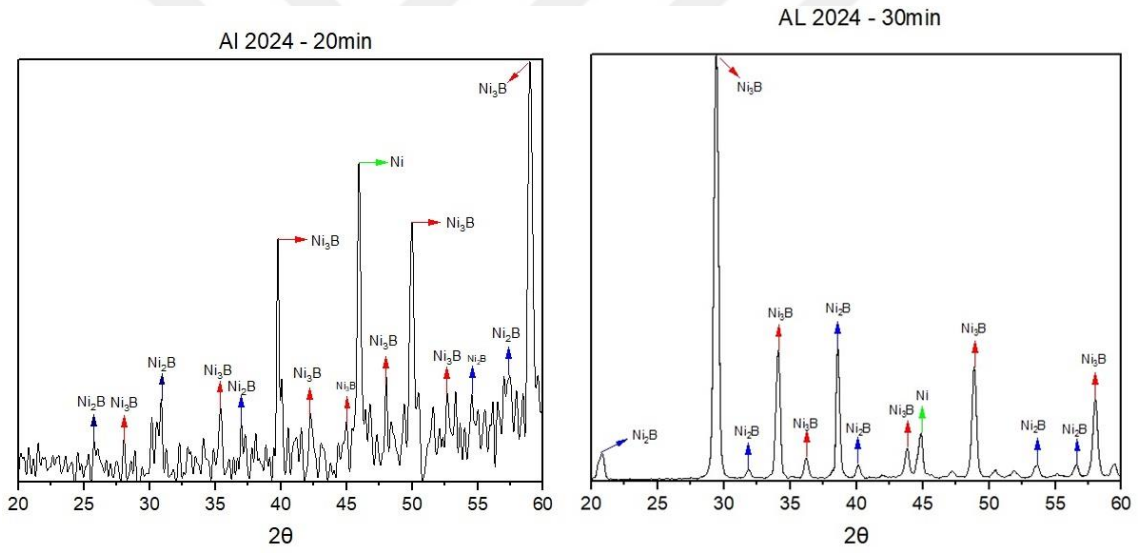
4.2 Akımsız Ni-B Kaplı Numunelerin XRD (X-Işını Kırınımı) Sonuçları

Alüminyum alaşımları üzerine akımsız yöntemle kaplanmış olan Ni-B kaplamaların 400 °C' de 2 saat ısıtılma tabii tutulduktan sonraki XRD analizlerinin grafikleri aşağıda görülmektedir.

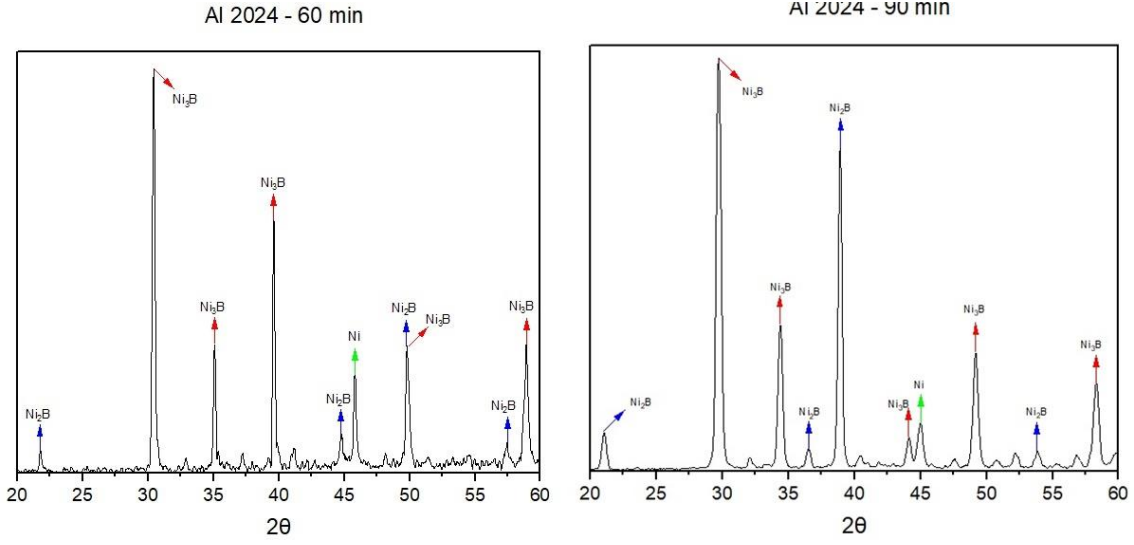
Isıl işlem görmemiş kaplamalar amorf yapıya sahiptir bu yapının kristal hale dönüşebilmesi için belirli bir ısıtılma tabii tutulmalıdır. 400 °C' de 2 saat ısıtılma tabii tutulduktan sonra substrat yüzeyindeki kaplama amorf yapıdan kristal yapıya geçmektedir. Bu geçişten sonra ortorombik yapıdaki Ni₃B, tetragonal yapıdaki Ni₂B ve Ni fazları XRD grafiğinde görünmektedir.



Şekil 4.13 Al. 2024 saf ve 10 dk'lık (A_1) $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.

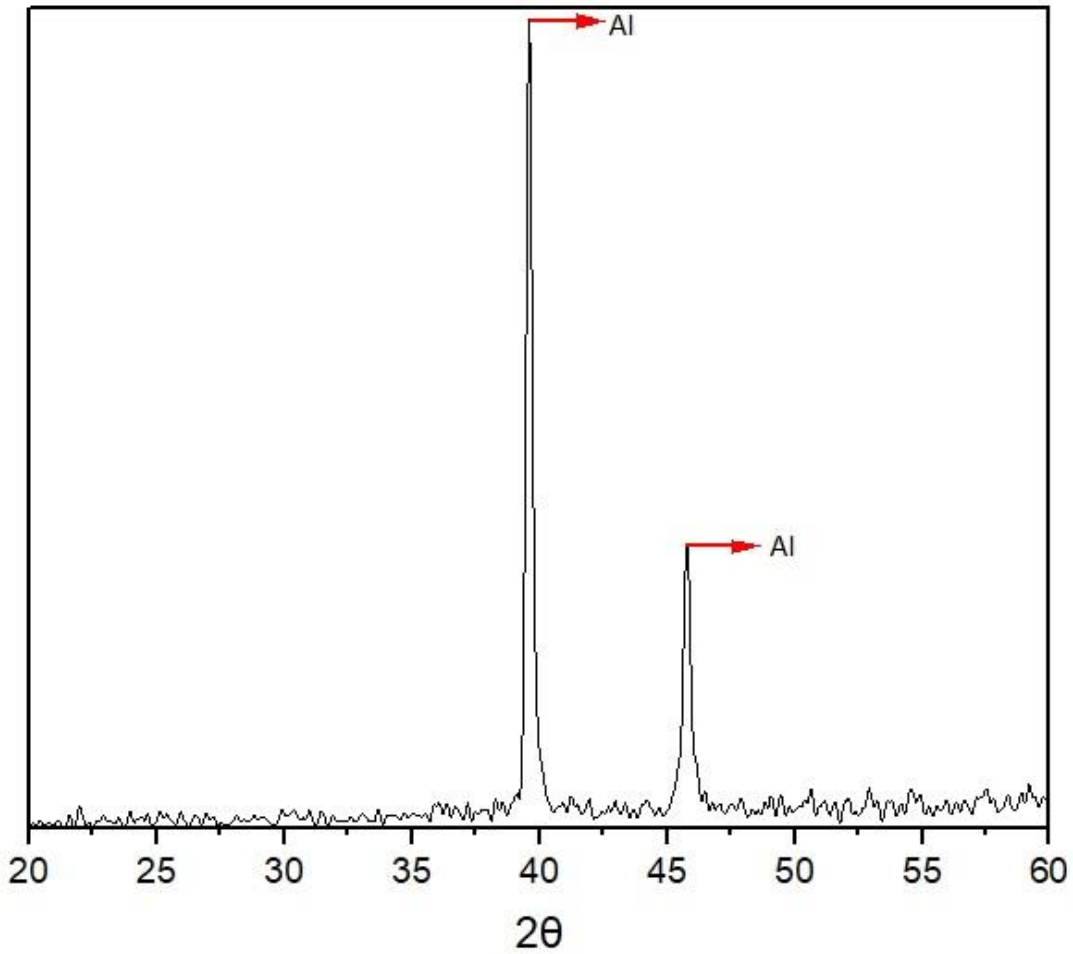


Şekil 4.14 Al. 2024 20 dk (A_2) ve 30 dk'lık (A_3) $400\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.

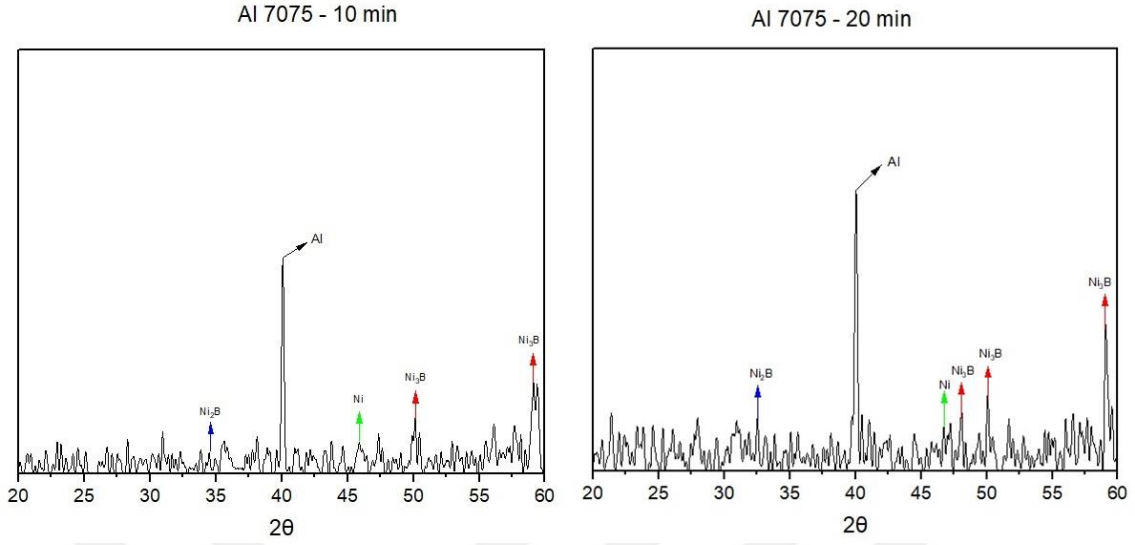


Şekil 4.15 Al. 2024 60 dk (A₄) ve 90 dk'lık (A₅) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.

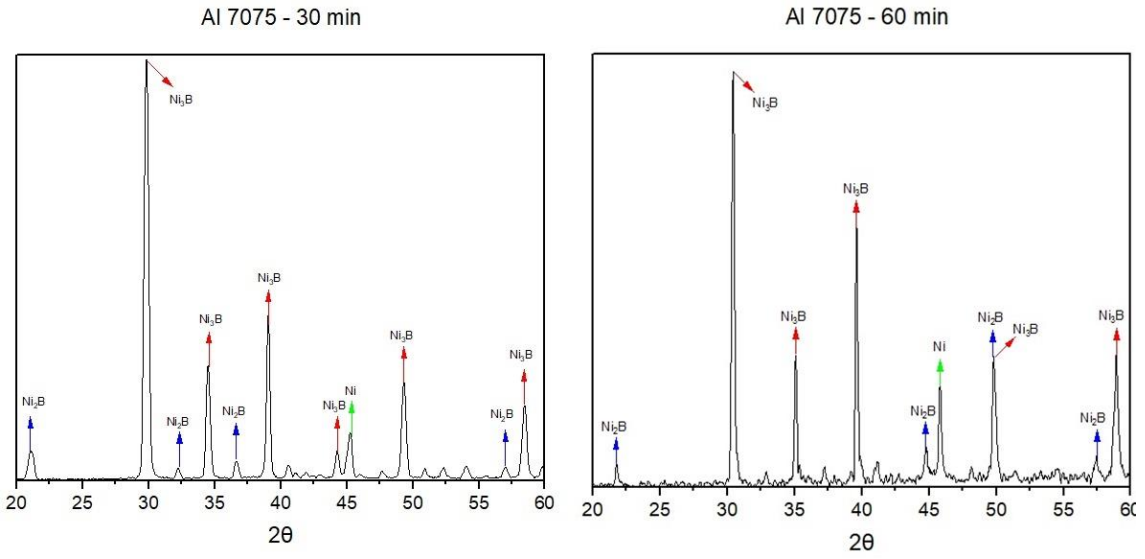
Al 7075 - pure



Şekil 4.16 Al. 7075 saf 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.



Şekil 4.17 Al. 7075 10 dk (A₁) ve 20 dk'lık (A₂) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.



Şekil 4.18 Al. 7075 30 dk (A₃) ve 60 dk'lık (A₄) 400 °C' de 2 saat tavllanmış XRD görüntüsü.

Elde edilen sonuçlardan dikkat edileceği gibi 2024 alaşımının kaplanmasında yaklaşık $2\theta=45^\circ$ difraksiyon açısında kristal haldeki Ni pikleri, $2\theta=50^\circ$ ile $2\theta=39^\circ$ difraksiyon açıları arasında kristal haldeki Ni_3B pikleri ve $2\theta=20^\circ$ ile $2\theta=53^\circ$ difraksiyon açıları arasında kristal haldeki Ni_2B pikleri baskın halde görünmektedir. Gözlemlenen bu durum literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında birbirleriyle örtüştüğü görülmektedir.

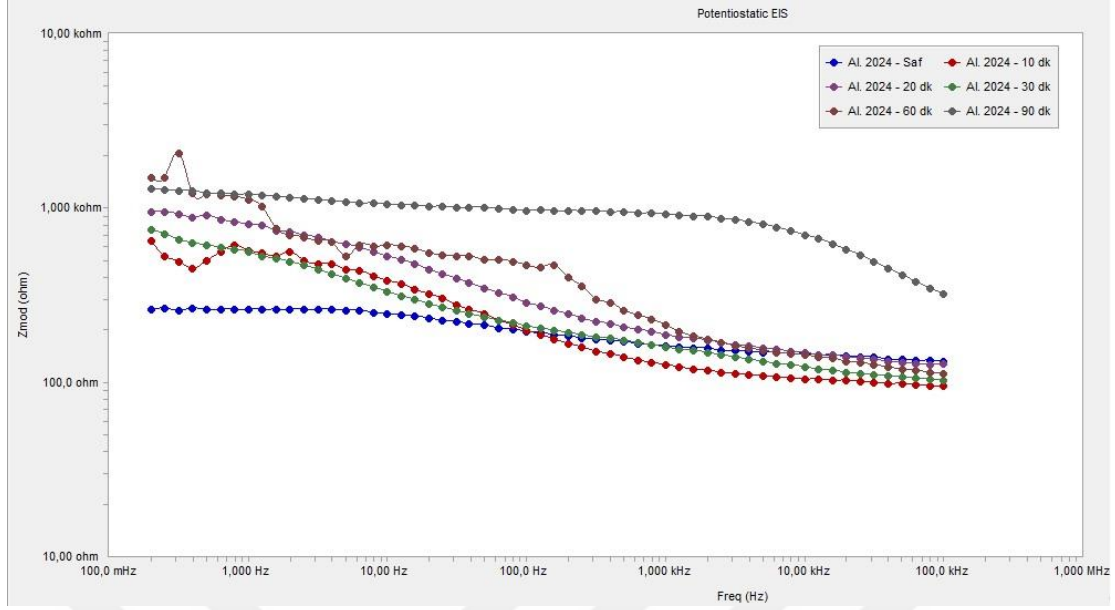
4.3 Korozyon Testi Sonuçları

Al. 2024 ve 7075 numunelerinin üzerlerine kaplanmış olan akımsız Ni-B kaplamalarının korozyon davranışlarını incelenmesi için ağırlıkça (a/a) %3.5 NaCl tuzlu su çözeltisi hazırlandı. Yapılan testler normal şartlar altında (25°C – 1atm) gerçekleştirildi.

Yapılan tüm elektrokimyasal testler, GAMRY Series (Gamry Instruments, Warminster, ABD) marka G750TM model potansiyostat/galvanostat cihazında gerçekleşti. Akımsız metotla kaplanmış olan Ni-B kaplamaların korozyon davranışları Potansiyodinamik Polarizasyon tekniği ile analiz edildi. Korozyon testlerinde üç elektrot tekniği uygulandı. ve referans elektrot olarak Ag/AgCl tercih edilirken karşı elektrot olarak da grafit kullanılmıştır. Korozyon testleri için tercih edilen başlangıç parametreleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

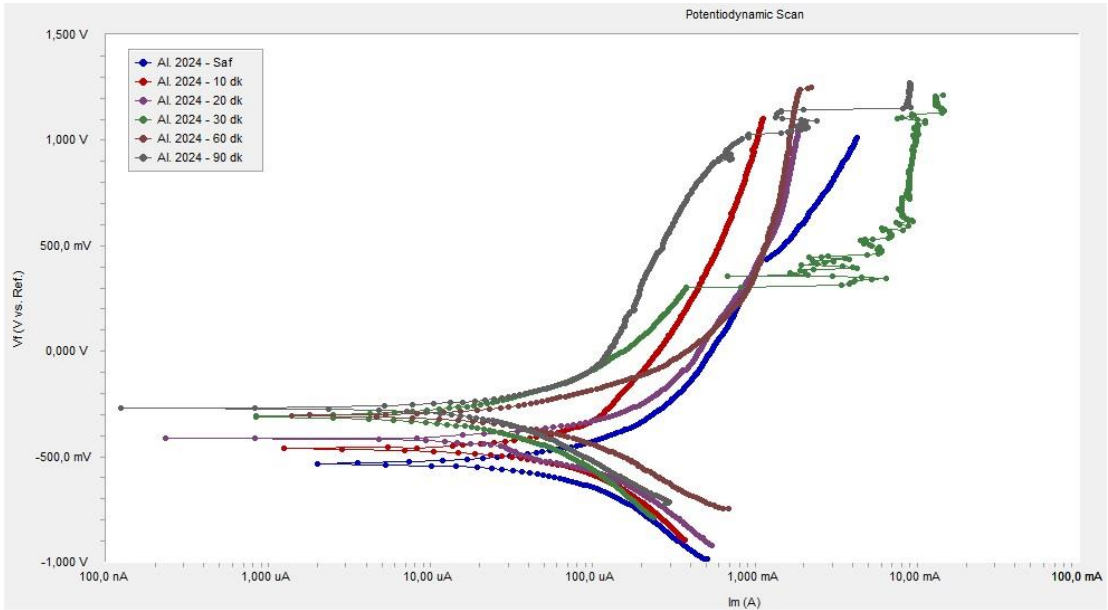
Çizelge 4.1 Korozyon testinde tercih edilen başlangıç parametreleri.

Kurulum Parametreleri	Değerler
Başlangıç Potansiyeli (V)	-0.5 ve Eoc
Bitiş Potansiyeli (V)	+1 ve Eoc
Tarama Hızı (mV/sn)	1
Örnek Veri Satın Alma Dönem(ler)i	1
Örnek Alan (cm ²)	0.38
Numune Yoğunluğu (g/cm ³)	4.43
Eşdeğer ağırlık	11.601



Şekil 4.19 Al. 2024 potansiyostatik eğrileri.

Şekil 4.3.1’de gösterilen Al. 2024 alaşımının uygulanan frekansa karşı Zmod (ohm) potansiyostatik eğrileri gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere kaplamalı yüzeylerin kaplamasız yüzeye göre korozyona olan direnci daha iyidir. Kaplamalı yüzeyler arasında da kaplama süresinin artışıyla korozyon direnci doğrusal olarak artmaktadır. Al. 2024 alaşımı için korozyona karşı direnç saf $A_1 < A_2 < A_3 < A_4 < A_5$ olarak sıralanabilir durumdadır.

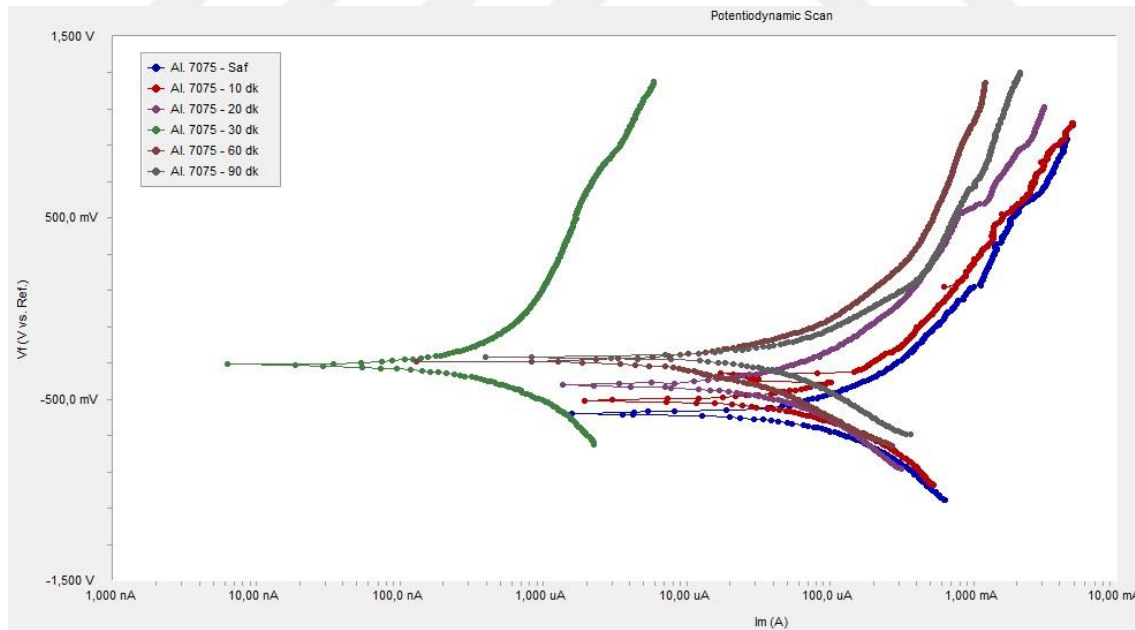


Şekil 4.20 Al. 2024 potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Çizelge 4.2 Al. 2024 tafel eğimleri ile hesaplanan korozyon değerleri (E_{cor} ve I_{cor}).

	E_{cor}	I_{cor}
Saf	-502.0 mV	199.4 μ A
A ₁	-461.6 mV	88 μ A
A ₂	-411.1 mV	82 μ A
A ₃	-306.3 mV	34 μ A
A ₄	-269.8 mV	28 μ A
A ₅	-303.8 mV	30 μ A

Şekil 4.20’de Al. 2024 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve çizelge 4.2’de polarizasyon eğrilerine göre hesaplanan E_{cor} ve I_{cor} değerleri yer almaktadır. Bu değerler incelenecek olursa korozyon potansiyeli (E_{cor}) sıfırdan uzaklaştıkça numunelerde aktiflik artmaktadır. Değerlerden de anlaşıldığı gibi en aktif yani korozyona müsait saf 2024 numunesidir. Polarizasyon eğrileri incelendiğinde %3.5’lik NaCl çözeltisinin oluşturduğu korozyona karşı en büyük direnci kaplama süresi A₄ olan numunenin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21 Al. 7075 potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.

Çizelge 4.3 Al. 7075 tafel eğimleri ile hesaplanan korozyon değerleri (E_{cor} ve I_{cor}).

	E_{cor}	I_{cor}
Saf	-537.8 mV	430 μ A
A ₁	-508.8 mV	170.1 μ A
A ₂	-419.2 mV	153.2 μ A
A ₃	-307.8 mV	102.0 μ A
A ₄	-290.3 mV	53.1 μ A
A ₅	-266.5 mV	48.4 μ A

Şekil 4.21’de Al. 7075 alaşımının potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve çizelge 4.3’de polarizasyon eğrilerine göre hesaplanan E_{cor} ve I_{cor} değerleri yer almaktadır. Bu değerler incelenecek olursa korozyon potansiyeli (E_{cor}) sıfırdan uzaklaştıkça numunelerde aktiflik artmaktadır. Değerlerden de anlaşıldığı gibi en aktif yani korozyona müsait saf 7075 numunesidir. Polarizasyon eğrileri incelendiğinde %3.5’lik NaCl çözeltisinin oluşturduğu korozyona karşı en büyük direnci kaplama süresi A₅ olan numunenin olduğu görülmektedir.

4.4 Sertlik Testi Sonuçları

Al. 2024 ve 7075 alaşımlarının akımsız yöntemle Ni-B kaplanmış olan numunelerin ve ayrıca kaplanmamış numunelerin sertlik değerleri incelenmiştir. Shimadzu HMV-G-20 marka/model cihazla gerçekleştirilen ölçümlerde, 50 gr yük altında 10 sn boyunca işlem gerçekleştirilmiştir ve elde edilen Vickers sertlik değerleri okunmuştur. Yapılan testte her bir numune için en az 5 adet ölçüm alınmış olup bunların ortalaması Vickers sertlik değeri olarak kaydedilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada kaplama süresinin, sertlik değerine olan etkisi incelenmiştir. Şekil 4.2 de kaplama süresine karşı sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4 Al. 2024.zamana karşı sertlik değerleri.

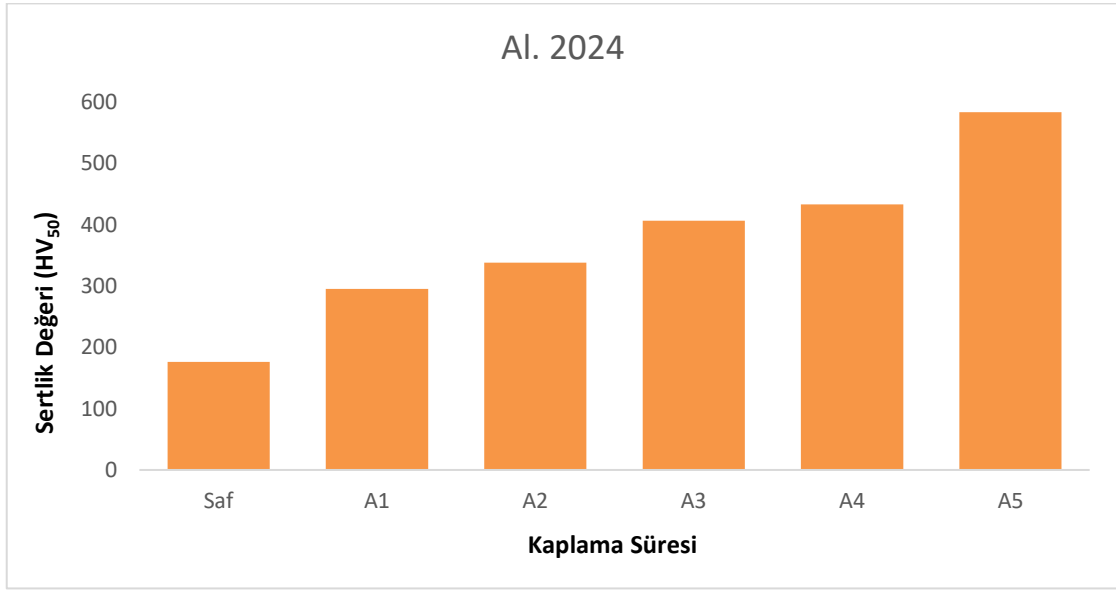
Al. 2024 / Ni-B (HV ₅₀)					
Saf	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
178	295	335	415	424	595
169	301	341	405	442	575
175	288	348	397	438	583
183	295	330	412	425	577
177	299	338	404	437	590
176,4	295.6	338.4	406.6	433.2	584

Çizelge 4.5 Al. 7075.zamana karşı sertlik değerleri.

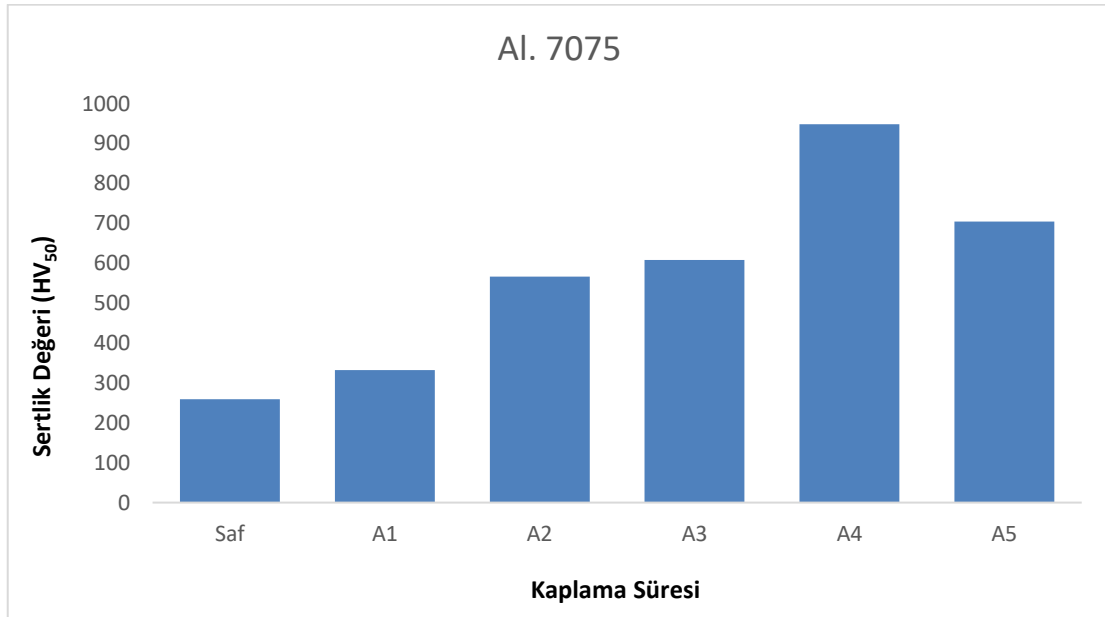
Al. 7075 / Ni-B (HV ₅₀)					
Saf	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
259	330	570	607	940	710
251	335	557	615	935	695
270	325	580	602	970	702
255	342	559	599	952	717
260	327	567	617	944	699
259	331.8	566.6	608	948.2	704.6

Kaplamaların sertlik değerleri incelendiğinde her iki alaşımda da artış gözlemlenmektedir. Al. 2024 alaşımında en iyi sertlik değeri kaplama süresi A₅ (olan numunede (584 HV₅₀) gözlenirken Al. 7075 alaşımında bu değer yaklaşık A₂ kaplama

süresinde (566.6 HV₅₀) gözükmetedir. Ayrıca Al. 7075 alaşımında en iyi sertlik değeri kaplama süresi A₄ olan numunede (948.2 HV₅₀) olduğu görülmektedir. Her iki numunenin de SEM görüntüleri incelendiğinde A₄ ve A₅ dk'lık numunelerin yüzeylerinde Ni-B kaplama daha homojen olduğu ve bundan dolayı sertlik değerlerinin diğer kaplama sürelerine kıyasla daha iyi çıktı gözükmiştir. Her iki alaşım kıyaslandığında ise en iyi sonucu Al. 7075 alaşımı sağlamıştır.



Şekil 4.22 Al. 2024 zamana karşı sertlik değeri.



Şekil 4.23 Al. 7075 zamana karşı sertlik değeri.

4.5 Yüzey Pürüzlülüğü Testi Sonuçları

Al. 7075 ve 2024 alaşımlarının kaplamasız ve kaplamalı halde Mitutoyo 178-562-01D marka/model cihaz yardımıyla ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 4.6' da görülmektedir. Bu değerler incelendiğinde her iki alaşımda kaplama sonrası yüzey pürüzlülüklerinin arttığı görülmektedir. İki alaşım arasından da en çok pürüzlülük sahibi Al. 7075 alaşımına aittir.

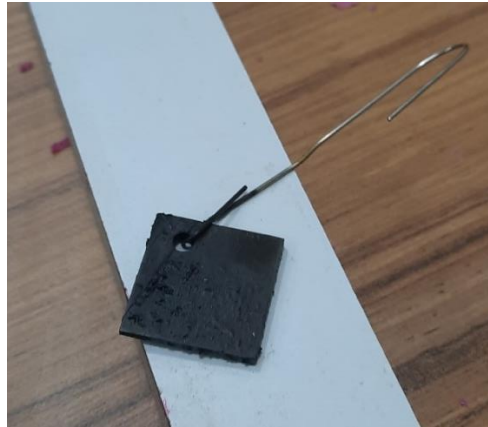
Çizelge 4.6 Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri.

	Saf	10 dak.	20 dak.	30 dak.	60 dak.
2024	0.14 μm	0.386 μm	0.447 μm	0.630 μm	1.281 μm
7075	0.16 μm	0.685 μm	0.783 μm	0.787 μm	1.543 μm

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Yapılan çalışmada Al. 2024 ve 7075 alaşımlarının Ni-B kaplanmasındaki kaplama süresinin sertlik değeri ve korozyon direncine olan etkisi incelenmiştir.ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Yapılan çalışmada pH dengeleyici olarak tercih edilen NaOH alkalisi Al. 2024 ve 7075 alaşımları üzerinde olumsuz etki bıraktı. Yapılan ön denemelerde NaOH içerikli banyolara daldırılan numunelerde ~5 ile 10 sn içerisinde kararma yani korozyona uğrama gözlemlendi.



Resim 5.1 NaOH ile korozyona uğrayan Al. 2024.



Resim 5.2 NaOH ile korozyona uğrayan Al. 2024.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda yüksek NaOH (alkali) çözeltisinin hassas metal olan alüminyum üzerinde aşındırıcı rol oynadığı tespit edildi. Alternatif pH dengeleyici NH₃ tercih edildi.

2. Farklı kaplama sürelerine sahip olan numunelerin 400°C 2 saat tavlama sonucunda yapılan SEM görüntüleri incelendiğinde kaplama süresinin artmasıyla her iki alüminyum alaşımlarının yüzeyinde kaplamanın arttığı ve daha homojen bir hal aldığı gözlemlendi. Fakat en iyi kaplamanın Al. 2024 alaşımında olduğu tespit edildi. Yüzeysel yapılar incelendiğinde oluşan tepeciklerin numune üzerinde kaygan bir yapı oluşturduğu tespit edildi.
3. Her bir numune için gerçekleştirilen XRD testlerinde her iki alüminyum alaşımında da Ni, Ni₂B ve Ni₃B bileşenleri görülmekte olduğu ve bu bilginde kaplama işleminin düzgün bir şekilde gerçekleştiğini ispatladı. Fakat her iki numune daha detaylı karşılaştırıldığında Al. 2024 alaşımında Al. 7075 alaşımına göre kaplamanın daha sağlıklı olduğu ve bileşenlerin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir.
4. GAMRY G750TM ile gerçekleştirilen korozyon testlerinin sonuçları göz önüne alındığında her iki alaşımın potansiyostatik eğrileri ve potansiyodinamik polarizasyon eğrileri kaplamaların oluştuğunu, saf 2024 ve 7075'e göre

korozyona karşı daha dirençli olduğunu ispatladı.

Bu sonuca varılmasında tafel eğimleri ile hesaplanan korozyon değerleri (E_{cor} ve I_{cor}) etikili oldu. Korozyon potansiyeli (E_{cor}) sifıra yaklaştıkça korozyon akım yoğunluğu (I_{cor}) düşmektedir. Değerler incelendiğinde Al. 2024 alaşımı için saf numunenin E_{cor} değeri -502.0 mV iken I_{cor} değeri 199.4 μ A'dır. Korozyon potansiyeli süre arttıkça doğrusal olarak artmakta yani sifıra yaklaşmaktadır ancak 2024 alaşımında korozyon direnci en iyi olan 60 dk'lık kaplama süresine sahip numunenin korozyon potansiyeli 90 dk'lık numuneye göre daha düşüktür ve böylelikle korozyon akım yoğunluğu da düşüktür. 60 dk numunenin E_{cor} değeri -269.8 mV iken I_{cor} değeri 28 μ A'dır.

Aynı sonuçlar Al. 7075 alaşımı için incelendiğinde saf 7075 alaşımının E_{cor} değeri -537.8 mV iken I_{cor} değeri 430 μ A'dır. 7075 alaşımında korozyon potansiyeli süre arttıkça doğrusal olarak artmakta yani sifıra yaklaşmaktadır. Bu alaşımda korozyona karşı en iyi diren. 90 dk'lık kaplama süresine sahip numune olduğu gözlemlenmektedir. Bu numunenin E_{cor} değeri -266.5 mV iken I_{cor} değeri 48.4 μ A olduğu tespit edilmiştir. Her iki alaşımın korozyon sonuçları incelendiğinde en iyi değer Al. 7075 te gözlemlenmektedir.

Çünkü 7075 alaşımının kaplama öncesi ve kaplama sonrası akım değerlerinde önemli değişiklikler mevcuttur ve bu da korozyon direncini artırmaktadır.

5. Shimadzu HVM-G-20 cihaz ile 50 gr yük altında 10 sn boyunca gerçekleştirilen Vickers sertlik testi sonuçları incelendiğinde yapılan kaplamaların 2024 ve 7075 alaşımları üzerinde olumlu sonuç verdiği görülmektedir. Her numune için 5 adet test yapılmış ve bu sonuçların ortalaması alınarak bir karşılaştırma yapılmıştır. 2024 ve 7075 alaşımlarının sonuçları incelendiğinde kaplama süresi arttıkça sertlik değerinde de doğrusal olarak artış olduğu gözlemlenmektedir. Fakat 7075 alaşımının en iyi sertlik değeri 60 dk'lık (948.2 HV₅₀) kaplama süresine sahip numunede gözükmekte iken 2024 alaşımının en iyi sertlik değeri 90 dk'lık (584 HV₅₀) kaplama süresinde olduğu gözükmektedir. Her iki alaşım karşılaştırıldığında en iyi sonucu Al. 7075 alaşımının sağladığı gözlemlenmektedir. Çünkü, 2024'in en iyi değeri (584 HV₅₀) 7075'in yaklaşık 20 dk'lık kaplama süresine sahip numunenin (566.6 HV₅₀) sertlik değeriyle

yakın olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan bu çalışmaların sonucunda akımsız Ni-B kaplamaların her iki alaşım için uygun olduğu ve olumlu sonuçlandığı tespit edilmiştir. Yapılan korozyon ve sertlik testleri sonucunda Al. 7075 alaşımının Al. 2024'e göre daha iyi performans gösterdiği ispatlanmıştır.



6. KAYNAKLAR

- Agarwala R C, 2003, Electroless Alloy/Composite Coatings: A Review, *Sadhana*, 28, 475-493.
- Amrollahi P, Krasinski J S, Tayebi L, 2016, Electrophoretic deposition (EPD): Fundamentals and applications from nano-to micro-scale structures, *Handbook of nanoelectrochemistry*, 48, 1-27.
- Avcu E, Baştan F E, Abdullah H Z, 2019, Electrophoretic deposition of chitosan-based composite 54 coatings for biomedical applications: A Review, *Progress in Materials Science*, 103, 69-108.
- Bargel J, Schulze G, 1985, *Malzeme Bİlgisi (Cilt II)*, Çev.: Güleç Ş, Aran A, TÜBİTAK, 274s, İstanbul.
- Benjamin J, 1976, Mechanical Alloying, *Scientific American*, 234, 40-49.
- Boccaccini A, Kaya F, 2002, Electrophoretic deposition infiltration of 2-D metal fibre-reinforced cordierite matrix composites of tubular shape, *J. Mater. Sci.*, 135, 4145-4153.
- Boccaccini A R, 2006, Electrophoretic deposition: fundamentals and applications in materials science, *J. Mater. Sci.*, 3, 8029-8030.
- Boccaccini A, Trusty P, 1998, Electrophoretic deposition infiltration of metallic fabrics with a boehmite sol for the preparation of ductile-phase-toughened ceramic composites, *J. Mater. Sci.*, 10, 933-938.
- Carlsson J, 1991, Thermally activated chemical vapor deposition, in D.S. Rickerby and A. Matthews (eds.), *Advanced Surface Coating-A Handbook of Surface Engineering*, 7, 330-338.
- Cayless A, 1992, *Metals Handbook*, Cilt II, ASM International, 25-115, USA.
- Corni I, Ryan M, Boccaccini A, 2008, Electrophoretic deposition: From traditional ceramics to nanotechnology, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 3, 1353-1367.

- Dadvand N, 2002, Investigation of the Corrosion Behaviour of Electroless Nickel-Boron and Nickel-Phosphorous Coatings in Basic Solutions, Dalhousie University, Institute of Science, PhD Thesis, 204s, Halifax, Nova Scotia.
- De Damborenea J, Navas C, Garcia J, 2007, Corrosion-erosion of TiN-PVD coatings in collagen and cellulose meat casing, *Surf. Coat. Technol.*, 201, 5751-5757.
- Delaunois F, Lienard P, 2002, Heat treatments for electroless nickel-boron plating on aluminium alloys, Polytechnic of Mons, Department of Metallurgy, PhD Thesis, 135s, Belgium.
- Delaunois F, Vitry V, 2015, Nanostructured electroless nickel-boron coatings for wear resistance, *Anti-Abrasive Nanocoating*, 11, 157-199.
- Fields W D, Duncan R N, Zickgraf J R, 2009, the ASM Committee on Electroless Nickel Plating, *Electroless Nickel Plating*, Cilt I, ASM Hands Book, 448-501, USA.
- Filiatre C, Pignolet C B, 2017, Particle Velocities near and along the Electrode during Electrophoretic Deposition, Influence of Surfactant Counter-Ions Coating, 79, 147-162.
- Fotoyatti B, Namdari N, 2019, Laser-Assisted Coating Techniques and Surface Modifications: A Short Review, *Part. Sci. Technol.*, 41, 200-209.
- Fotoyyati B, Wayne S, 2018, Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 55, 198-330.
- Gal-Or L, Liubovich S, Haber S, 1992, Deep Electrophoretic Penetration and Deposition of Ceramic Particles Inside Porous Substrates II. Experimental Model, *J. Electrochem. Soc.*, 63, 1078-1081.
- Gensure J, Potts D, 1983, International Metallic Materials Cross-Reference, Cilt III, Genium Publishing, 803s, USA.
- Grant N, 1989, Registration Record of International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys, Aluminum Association, 1011s, USA

- Grant N, 1997, Proceedings of the International Conference on the Rapid Solidification Process, Claitor's Law Books & Publishing Division, 230s, U.K.
- Inco M, 1989, Alloy AL-9052, Inco Alloys International, 98s, Swiss.
- Jangg G, Kutner F, 1977, Aluminium powder metallurgy technology for high-strength applications, Journal of Materials Science, 17, 1437-1457.
- Jones H, 1969-1970, Aluminium Alloys with heating, Cilt II, Mater. Sci. Eng. Handbook, 411s, U.K.
- Joukar A, Mehta J, Marks D, 2017, Lumbar-Sacral Destruction Fixation Biomechanics: A Finite Element Study, The Spine Journal, 17, 321-335.
- Kaufman J, Rooy E, 1989, Registration Record of Aluminum Association Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Aluminum Alloys in the Form of Casting and Ingot, Aluminum Association, 10, 300-311.
- Kaya B, 2007, Nano Kompozit Kaplama, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, İstanbul.
- Larsson M, Hill A, Duffy J, 2012, Suspension stability; why particle size, zeta potential and rheology are important, Nordic Rheology Society, 20, 209-214.
- Li Y, Mann D, Rolandi M, 2004, Preferential growth of semiconducting single-walled carbon nanotubes by a plasma enhanced CVD method, Nano Lett., 13, 317-321.
- Luff P, White M, 1970, The structure and properties of evaporated polyethylene thin films, Thin Solid Film, 6, 175-195.
- Mallory G O, Hajdu J B, 1990, Electroless Plating: Fundamentals and Applications, American Electroplaters and Surface Finishers Society, 2, 21-22.
- Mathew M, Ariza E, Rocha L, 2008, TiCxOy thin films for decorative applications: Tribocorrosion mechanisms and synergism, Tribol. Int, 41, 603-615.
- Mattox D, 2010, Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Cilt II, William Andrew, 730s, Norwich, NY, USA.
- Mori M, Watanabe T, Kashima N, 2006, Development of long YBCO coated

- conductors by multiple-stage CVD, *Phys. C Supercond Appl*, 44, 515-520.
- Narisimhan M, 1979, USA Patent No., 4142571.
- Onaran K, 2003, *Malzeme Bilimi*, Alfa Yayınları, s 46-84, İstanbul.
- Pawlowsk L, 2008, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, Wiley & Sons, 656p, USA.
- Pickard W F, 1968, Remarks on the theory of electrophoretic deposition, *J. Electrochem. Soc.*, 115, 105-108.
- Pickens J, Review A, 1981, Aluminum Powder Metallurgy for High-Strength Applications, *J. Mater. Sci.*, 16, 1437-1457.
- Pickens J, Schelleng R, Donachie S, 1981, Patent No. 429207929.
- Polmear I, Couper M, 1993, Design and Development of an Experimental Wrought Aluminum Alloy for Use at Elevated Temperatures, *Metall Trans A.*, 35, 1027-1035.
- Prengel H, Pfouts W, Santhanam A, 1998, State of the art in hard coatings for carbide cutting tools, *Surf. Coat. Techno.*, 102, 183-190.
- Sankara Narayana T S, Baskaran I, Parthiban S, 2004, Deposition of Electroless Ni-P Graded Coatings and Evaluation of Their Corrosion Resistance, *Surface and Coating Technology*, 200, 3438-3445.
- Sarkar P, Nicholson P, 1996, Electrophoretic deposition (EPD): Mechanisms, kinetics, and application to ceramics, *J. Am. Ceram. Soc.*, 79, 1987-2002.
- Scott R, 2001, Method of manufacturing a filter, US6330947 B1, 18-Dec-2001.
- Smart J, 1986, *Metals & Alloys in the Unified Numbering System*, Society of Automotive Engineers, 4, 3-35.
- Sojoudi H, Nemani S, Mullin K, 2019, A Micro/Nanoscale Approach for Studying Scale Formation and Developing of Scale-Resistant Surfaces, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 7330-7337.
- Sudagar J, Lian J, Sha W, 2013, Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings -

- A critical review, *Journal of Alloys and Compounds*, 571, 193-204.
- Takeo A, Okui N, Kitoh T, 1991, Preparation and piezoelectricity of form poly (vinylidene fluoride) thin film by vapour deposition, *Thin Solid Film*, 202, 205-211.
- Trusty P, Bocaccini A, 1998, Electrophoretic deposition infiltration of metallic fabrics with a boehmite sol for the preparation of ductile-phase-toughened ceramic composites, *J. Mater. Sci.*, 33, 933-939.
- Vernardou D, Pemble M, Sheel D, 2004, Vanadium oxides prepared by liquid injection MOCVD using vanadyl acetylacetonate, *Surf. Coat. Technol.*, 188, 250 - 254.
- Vitry V, 2009, Electroless Nickel-Boron Deposits: Synthesis, Formation and Characterization; Effect of Heat treatments; Analytical Modeling of the Structural Stat, UMONS University, Institute of Natural and Applied Sciences, Doctoral Thesis, 240p, Belgium.
- Vitry V, Delaunois F, 2015, Nanostructured electroless nickel-boron coatings for wear resistance, *Anti-Abrasive Nanocoatings*, 14, 157-199.
- Yıldız R A, 2012, Akımsız Ni-B kaplamaların 7075 Al Alaşımının yorulma davranışına etkisinin incelenmesi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, İstanbul.
- Yüksel E, 1991, 7075 Alüminyum Alaşımında Basamaklı Yaşlandırma ile Özelliklerini Kontrol İmkanları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 90s, İstanbul.