T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALODİN KAPLANMIŞ AL-5083 ZIRH ALAŞIMININ MEKANİK VE DÜŞÜK HIZLI DARBE ÖZELLİĞİNİN İNCELENMESİ

Hasan BÜYÜKKOÇ

Yüksek Lisans Tezi

SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

MAYIS, 2023

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

ALODİN KAPLANMIŞ AL-5083 ZIRH ALAŞIMININ MEKANİK VE DÜŞÜK HIZLI DARBE ÖZELLİĞİNİN İNCELENMESİ

Tez Yazarı

Hasan BÜYÜKKOÇ

Danışman

Prof. Dr. Ali Kaya GÜR

MAYIS, 2023

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı: Alodin Kaplanmış Al-5083 Zırh Alaşımının Mekanik ve Düşük Hızlı Darbe Özelliğinin İncelenmesi

Yazarı: Hasan BÜYÜKKOÇ

İlk Teslim 20/12/2022

Savunma Tarihi: 05/05/2023

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına görehazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

İmza

Danışman: Prof. Dr. Ali Kaya GÜR — Onayladım

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye: Doç. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ — Onayladım

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye: Dr.Öğr. Üyesi Hasan BALLIKAYA — Onayladım

İnönü Üniversitesi, OSB MYO

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun ...../...../20.....tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Prof. Dr. Burhan ERGEN
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım ‘Alodin Kaplanmış AL-5083 Zırh Alaşımının Mekanik ve Düşük Hızlı Darbe Özelliğinin İncelenmesi’ başlıklı çalışmamın içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesinde ve sunulmasında bilimsel etik kurallarınauygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

05/05/2023

Hasan BÜYÜKKOÇ

ÖNSÖZ

Savunma sanayi, ülkemizde ve dünya çapında her geçen gün etkinliğini arttırarak gelişmekte olan bir sektör haline gelmiştir. Ülkeler arası rekabet arttıkça savunma sanayine olan ilgi de bir o kadar artmaktadır. Buna bağlı olarak savunma sanayi alanına yapılan yatırımlar da bir hayli fazladır. Dolayısıyla bu alan için gerekli temel ihtiyaçlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin bu alandaki en büyük ihtiyaçlardan birisi ham malzemedir. Peki savunma alanında kullanılan metaller sadece çelik ve çelik alaşımları mıdır?

Çelikle birlikte alüminyum da savunma sanayinde önemli yeri olan bir malzeme cinsidir. Çeliğe göre 1/3 oranında ağırlığa sahip olması, iyi bir korozyon direnci, elektrik iletkenliği, iyi kaynaklanabilirlik ve iyi bir mukavemet değerlerine sahip olması onun bu alanda tercih edilme sebeplerinin başında gelir.

Bu tez çalışmamda alüminyum bir malzemeye uygulanan yüzey işlemlerinden alodin kaplama (sarı kromatlama) konusunu ele aldım. Tez denek parçalarıma tıpkı savunma alanında kullanılan bir alüminyum malzeme gibi talaşlı imalat ve kaynaklı imalat proseslerini uyguladım. Daha sonra savunma sanayinin önde gelen firmaları tarafından onaylı olan özel bir kaplama-boya firmasında kaplama ve boya işlemi gerçekleştirdim. Kaplama esnasında alodin tankında bekletilme sürelerini değiştirdim ve bu süre farklılıklarının ne gibi değişikliklere yol açtığını tezimde inceleyerek sonuçlarını paylaştım.

Tezimin hazırlanması esnasında değerli fikirleri ile beni yönlendiren ve birçok konuda yardımını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ali Kaya GÜR'e, düşük hızlı düşürme testilerimizi yaparak balistik sonuçlara katkı veren Afyon Kocatepe Üniversitesi öğretim üyesi hocamız Prof. Dr. Şükrü TALAŞ hocama ve desteklerini esirgemeyen değerli iş arkadaşlarım Yakut Sönmez'e ve Emre Gümüş'e teşekkür ederim.

Ayrıca Ankara'da bulunan ve savunma alanında faaliyet gösteren; ham malzemeden üretim-imalat, kaplama-boya ve deney-test gibi süreçlerde desteğini esirgemeyen; İnoksen Makina, Tohan Metal, Sağlam Metal, Mekasan Kaplama-Boya, Ader Savunma ve Döksan Isıl İşlem firmalarına teşekkürlerimi sunarım.

Hasan BÜYÜKKOÇ
Elazığ, 2023

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iv**

ÖZET ..... **vii**

ABSTRACT ..... **viii**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **ix**

TABLOLAR LİSTESİ ..... **xii**

SEMBOLLER VE KISALTMALAR ..... **xiii**

1. GİRİŞ **1**

2. ALÜMİNYUM MALZEMELER **2**

2.1. Saf Alüminyum 3

2.2. Dünyada Alüminyum Üretimi 4

2.3. Alüminyumun Genel Özellikleri 7

2.4. Alüminyumun Elektriksel İletkenliği 7

2.5. Alüminyumun Alaşımları ve İsimlendirilmesi 8

2.5.1 Alüminyum 1XXX Serisi 8

2.5.2. Alüminyum 2XXX Serisi 8

2.5.3. Alüminyum 3XXX Serisi 9

2.5.4. Alüminyum 4XXX Serisi 9

2.5.5. Alüminyum 5XXX Serisi 9

2.5.6. Alüminyum 6XXX Serisi 10

2.5.7. Alüminyum 7XXX Serisi 10

2.5.8. Alüminyum 8XXX Serisi 10

2.6. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi ve Harflendirilmesi 11

2.7. Alüminyumun Korozyon Direnci 11

3. SARI ALODİN KAPLAMA (CR^{+6} KAPLAMA) **13**

3.1. Alodin Kaplamanın Tanımı ve Genel Özellikleri 13

3.2. Alodin Kaplama Standartları 14

3.3. Alodin Kaplama Banyosu Kimyasal Bileşimi 14

3.4. Alodin Kaplamanın Başlıca Yararları 15

3.5. Alodin Kaplamada Performans Testleri 15

3.5.1. Tuz Testi 15

3.6. Alodin Kaplamanın Malzeme Üzerindeki Kalınlığı 16

3.7. Farklı Renk Tonlarında Kurutma Sıcaklıkları 16

3.8. Alodin Kaplamanın Çevreyle İlişkisi 16
4. ALODİN KAPLAMA UYGULAMA PROSESİ 18
4.1. Solvent Temizliği 19
4.1.1. Solvent Nedir? 19
4.2. Alkali Yağ Alma 19
4.3. Dağlama – Aşındırmalı Yağ Alma (Kostikleme) 20
4.4. Nötralizasyon (Aktifleme) 21
4.5. Durulama 22
4.6. Kromatlama Dönüşüm Kaplaması 23
4.7. Kurutma 25
5. ALODİN KAPLAMA UYGULAMA ALANLARI 26
5.1. Balistik ve Zırh Alanında Uygulamalar 26
5.2. Savunma Alanında Uygulamalar 26
5.3. Havacılık Uygulamaları 27
5.4. Denizcilik Uygulamaları 28
5.5. Elektrik Endüstrisinde Uygulamaları 28
6. MATERYAL VE METOD 29
6.1. Tasarım, Modelleme ve Teknik Resim Hazırlanması 30
6.2. Numunelerin hazırlanması 30
6.3. Alodin Kaplama İşlemi 32
6.4. Boyama İşlemi 32
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 35
7.1. Renk Tonu Farkı 35
7.2. Elektrik İletkenlik Testi 36
7.3. Sertlik Testi 39
7.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülük Testi (Ra) 42
7.5. Kaplama Kalınlığı Testi 46
7.6. Balistik Test 48
7.6.1. Düşen Ağırlıklı Düşük Hız Balistik Test Metodu 49
7.7. SEM ve EDS Analizi (Taramalı Elektron Mikroskobu) 53
7.7.1. Alodin Kaplama ve Boya Kaplama Arayüzeylerinin İncelenmesi 53
7.7.2. Alodin Kaplama Yüzeylerinin İncelenmesi 59
8. SONUÇLAR 66
ÖNERİLER 68
KAYNAKLAR 69
ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Alodin Kaplanmış Al-5083 Zırh Alaşımının Mekanik ve Düşük Hızlı Darbe Özelliğinin İncelenmesi

Hasan BÜYÜKKOÇ

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı
Mayıs 2023, Sayfa: xiii+70

Askeri alandaki birçok araç ve ekipman zor şartlar altında faaliyet göstermektedir ve bu şartlar altında maksimum verimlilik sağlanmak amacıyla birçok AR-GE çalışması yapılmaktadır. Günümüzde halen geliştirilmekte olan yüzey kaplama işlemleri bunlardan birisidir. Araçların veya ekipmanların tuzlu su, nem, kar, sıcak, soğuk, kum ve arazi şartlarına uygun olması gerekmektedir. Bundan dolayı savunma sanayinde hizmet veren firmaların birçoğu ürünlerinde boya öncesinde veya nihai ürün aşamasında yüzey kaplama işlemleri uygular. Bu alanda genel olarak; alodin kaplama, eloksal kaplama veya çinko-nikel kaplama tercih edilir. Kullanılan malzemenin cinsine göre ve parçanın çalışacağı ortam koşulları göz önünde bulundurularak tasarım tarafından uygun bulunan kaplama prosesi parça üzerine uygulanır.

Bu çalışmada, deney parçası olarak altı adet alüminyum 5083 H321 malzeme kullanıldı. Kaplama esnasında tüm proses, sıcaklık ve pH gibi değerler sabit tutuldu ve sadece alodin tankında bekleme süreleri değiştirildi. Sonrasında boyama işlemi yapıldı ve deney parçaları teste alındı.

Test esnasında farklı sürelerde alodin tankında bekleyen parçalarda ilk göze çarpan renk tonları olurken bunun yanı sıra elektrik iletkenlikleri, boya yapışma kabiliyetleri, yüzey pürüzlülüğü, malzeme üzerindeki kaplama kalınları, SEM EDS analizi ve işlemleri ve nihai olarak düşük hızlı düşürme testi yapılarak balistik sonuçlara etkisi analiz edildi. Elektrik iletkenlikleri arasında benzer değerler bulunurken boya yapışma kabiliyetinde en iyi sonucu 45sn olan parça verdi. Kaplamadaki bekletilme süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünde de artışlar gözlemlendi. Bekletilme süresinin malzeme kalınlığında herhangi bir değişikliğe sebep olmadığı anlaşılırken M6 ve M10 dişlerde 0sn, 15sn, 45sn, 90sn sürelerde dişlerin gayet iyi çalıştığı fakat 240sn ve 600sn sürelerinde dişlerin çalışmasında negatif yönde bir etki yarattığı gözlemlenmiştir. Kaplama sürelerinin balistik incelemelere etkisinin olduğu görüldü.

Anahtar Kelimeler: Savunma sanayinde yüzey işlemleri, Alodin kaplama, Sarı kromatkaplama, Cr^{+3} kaplama, Cr^{+6} kaplama, Kromatlama.

ABSTRACT

Investigation of Mechanical and Low Velocity Impact Properties of Alodine Coated Al-5083 Armor Alloy

Hasan BÜYÜKKOÇ

Master's Thesis

FIRAT UNİVERSİTY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Defence Technologies
May 2023, Page: xiii+70

Many vehicles and equipment in the military field operate under difficult conditions and many R&D studies are carried out in order to ensure maximum efficiency under these conditions. Surface coating processes that are still being developed today are one of them. Vehicles or equipment must be suitable for salt water, humidity, snow, hot, cold, sand and terrain conditions. Therefore, many of the companies serving in the defense industry apply surface coating processes on their products before painting or at the final product stage. In this field in general; Allodyne coating, anodized coating or zinc-nickel coating are preferred. According to the type of material used and considering the ambient conditions in which the part will operate, the coating process, which is found appropriate by the design, is applied on the part.

In this study, six aluminum 5083 H321 materials were used as test pieces. During the coating process, values such as temperature and pH were kept constant and only the waiting times in the allodyne tank were changed. Afterwards, the dyeing process was performed and the test pieces were put to the test.

During the test, the first noticeable color tones were observed on the parts waiting in the allodyne tank at different times, as well as electrical conductivity, paint adhesion capabilities, surface roughness, coating thickness on the material, SEM EDS analysis and processes and finally the low speed drop test was performed and the effect on the ballistic results was analyzed. . While similar values were found between their electrical conductivity, the piece with the best paint adhesion ability of 45 seconds gave the best result. As the waiting time in the coating increased, an increase in the surface roughness was also observed. While it was understood that the waiting time did not cause any change in the material thickness, it was observed that the teeth worked well in 0sec, 15sec, 45sec, 90sec times in M6 and M10 teeth, but it had a negative effect on the operation of the teeth in 240s and 600sec. It was observed that coating times had an effect on ballistic examinations.

Keywords: Surface Treatment İn Defense Industry, Alodin Coating, Yellow Chromate, Cr^{+3} Coating, Cr^{+6} Coating, Chromating.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alüminyum elementi fiziksel özellikleri 3
Şekil 2.2. Dünya işlenebilir boksit rezervi dağılımı grafiği 4
Şekil 2.3. Boksit madeni işlemesinden bir görünüm 5
Şekil 2.4. Boksit cevheri 5
Şekil 2.5. Alümina 6
Şekil 2.6. Birincil üretimde ürünü alüminyum bloklar 6
Şekil 3.1. Alodin uygulaması örneği 13
Şekil 3.2. Tuz testi cihazı 16
Şekil 3.3. Restriction of hazardous substances 17
Şekil 4.1. Alodin kaplama proses akış şeması. 18
Şekil 4.2. İşlem basamakları arasında yapılan durulama işlemleri şeması. 18
Şekil 4.3. BDL-S3B temizleme solventi 19
Şekil 4.4. Kaplamada kullanılan asidik aşındırma havuzları. 20
Şekil 4.5. Kaplamada kullanılan asidik aşındırma havuzları -2 21
Şekil 4.6. Aktifleme banyoları 22
Şekil 4.7. Durulama tankı 23
Şekil 4.8. Kromatlama Tankı 24
Şekil 4.9. Kromatlama tankı-2 24
Şekil 4.10. Kurutma fırını 25
Şekil 5.1. Savunma alanında kullanılmış alodin kaplama uygulaması örneği 27
Şekil 5.2. Elektrik endüstrisinde kaplama uygulaması örneği 28
Şekil 6.1. Alodin kaplama için hazırlanan numune modeli gösterimi 30
Şekil 6.2. Deney parçalarının talaşlı imalat sonrası görüntüsü 31
Şekil 6.3. Deney parçalarının işlendiği 3 eksen CNC işleme merkezi tezgahı. 31
Şekil 6.4. Farklı sürelerde kaplanmış deney parçaları 32
Şekil 6.5. Yaş boya uygulama tesisi. 33
Şekil 6.6. Boyama işlemi tamamlanmış bir deney parçası 34
Şekil 7.1. Kaplama süreleri ve renk tonları. 35
Şekil 7.2. Kaplama tabakalarının renk kartelası şeklinde topluca görünümü. 36
Şekil 7.3. Kaplama süreleri ve renk tonları. 36
Şekil 7.4. Elektrik iletkenlik ölçüm cihazı 37
Şekil 7.5. Elektrik iletkenliği test uygulaması 38
Şekil 7.6. Elektrik iletkenliği test sonucu 38
Şekil 7.7. Brinell sertlik testi 39
Şekil 7.8. Emcotest DuraScan brinell sertlik ölçüm cihazı 40
Şekil 7.9. Numune üzerinde taşlama yapılan yüzey 41

Şekil 7.10. Numune sertlik ölçümü 41
Şekil 7.11. 600sn kaplama süresi olan numunenin sertlik ölçüm sonucu 42
Şekil 7.12. Brinell sertlik ölçümü sonrası çıkan sonuçlar....42
Şekil 7.13. Genel yüzey hataları....43
Şekil 7.14. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı....43
Şekil 7.15. Yüzey pürüzlülük hesaplama örnek eğrileri....44
Şekil 7.16. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları örneği....45
Şekil 7.17. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları örneği....45
Şekil 7.18. Kaplama kalınlık ölçüm cihazı. 47
Şekil 7.19. Kaplama kalınlık ölçüm değerleri 47
Şekil 7.20. Balistik test esnasında olan bir numune parça görüntüsü 49
Şekil 7.21. Balistik test için hazırlanmış numune örneği 49
Şekil 7.22. Deney esnasından kullanılan numune boyutları 50
Şekil 7.23. a) Veri toplama ünitesi, b) Merminin teknik çizimi 50
Şekil 7.24. Darbe kuvvetini ve darbe süresini gösteren analiz sonucu 51
Şekil 7.25. Kaplamasız ve 15 saniye kaplama uygulanmış numunelerin balistik test davranışları. 51
Şekil 7.26. 45 saniye ve 90 saniye kaplama uygulanmış numunelerin balistik test davranışları 52
Şekil 7.27. 240 saniye ve 600 saniye kaplama uygulanmış numunelerin balistik test davranışları 52
Şekil 7.28. Numunelerin hazırlanması ve incelenme yüzeyleri şematik görüntüsü 54
Şekil 7.29. Kaplamasız numune yüzeyleri SEM Görüntüsü....55
Şekil 7.30. 15 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü....55
Şekil 7.31. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü....55
Şekil 7.32. 90 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü....56
Şekil 7.33. 240 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü....56
Şekil 7.34. 600 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü....56
Şekil 7.35. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsü 57
Şekil 7.36. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsüne ait analizler....57
Şekil 7.37. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsüne ait analizler....58
Şekil 7.38. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsü 58
Şekil 7.39. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM-EDS analizi 59
Şekil 7.40. 15 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü. 59
Şekil 7.41. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü 60
Şekil 7.42. 90 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü 60
Şekil 7.43. 240 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü 61
Şekil 7.44. 600 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü 61
Şekil 7.45. Al5083 numune yüzeyleri SEM görüntüsü 62
Şekil 7.46. 15 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü....62
Şekil 7.47. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü....63
Şekil 7.48. 90 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü....63

Şekil 7.49. 240 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.....64
Şekil 7.50. 900 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.....64
Şekil 7.51. 900 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.....65
Şekil 7.52. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyi EDS analizi görüntüsü.....65

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alüminyumun genel özellikleri 7
Tablo 3.1. Farklı standartlara göre uygulanan alodin kaplamalar 14
Tablo 6.1. Numuneler ve deney parametleri. 30
Tablo 7.1. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları 46
Tablo 7.2. Balistik test sonrası net kuvvet, geri tepme kuvveti, delik çapları tablosu 53

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

AA	: Alüminyum Alaşım
Cr	: Krom
^{o}C	: Santigrat
DIN	: Alman Standartı
EFV	: Sefer Kuvvetleri Aracı
EN	: Avrupa Standartı
kg	: Kilogram
kN	: Kilo Newton
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
TS	: Türk Standartı
USMC	: ABD Deniz Piyadeleri
vb	: Ve benzeri

1. GİRİŞ

Sosyal devletlerin başta gelen ödevlerinden ilk sıralarda, milli birliğin korunması ve yurt güvenliğinin tesis edilmesi gelmektedir. Ülke dışından gelebilecek her türlü tehdide karşı ülkeler öz savunma stratejilerini belirleyerek bu kapsamda savunma yöntemlerini hazırlayıp hayata geçirirler.

Savunma alanında geliştirilen ve üretilen ürünlerin zorlu koşullarda maksimum verimlilikte çalışabilmesi için alt parça bazında imalat aşamasında bazı proseslerden geçer. İmalatı tamamlanan parçalar üzerinde korozyon direncini arttırmak için bazı yüzey işlemleri uygulanır. Uygulanan bu yüzey işlemleri başta malzeme cinsi olmak üzere; ürünün çalışacağı ortam koşulları da göz önünde bulundurularak belirlenir.

Bu çalışmanın amacı; Savunma sanayinde kullanılan alüminyum parçaların çalışma ve ortam koşullarını göz önünde tutarak maksimum verimlilikte bir korozyon direnci sağlamak amacıyla yapılan Cr^{+6} yani sarı alodin kaplama üzerine inceleme yapmaktadır.

2. ALÜMİNYUM MALZEMELER

Tabiatta en çok bulunan elementlerden birisi olan alüminyum mühendislik ve özellikle savunma-havacılık sektöründe önemli bir yere sahiptir. Çeliğin yoğunluğu 7.83 g/cm3 iken alüminyumun yoğunluğu 2.71 g/cm3 değerindedir. Yaklaşık üçte biri kadardır. Bunun yanı sıra alüminyum alaşımlarının akma dayanımı 500MPa değerlerini aşmaktadır. Bu değer sanayide kullanılan pek çok çelik türlerinin akma dayanımından daha fazladır [1]. Örnek olarak S235 veya S355 çeliklerinden çok daha yüksek bir akma sınırına sahiptir.

Alüminyumun keşfedilmesi H. Davy tarafından 1807'de ilk olarak laboratuvarda elde edilmiş, 1829 yılında ise Wöhler tarafından diğer elementlerden ayrılarak elde edilmiştir. Fransa'da Deville adlı araştırmacı redükleyici etken kapsamında metalik sodyumu kullanmıştır. Böylece yaklaşık 20 poundtan 60 libre civarı alüminyum elde etmiştir. Endüstriyel imalatıysa 1886 tarihinde CM Hail ve P.L.T. Herault isimlerince keşfedilen, erimiş kriyolit-aluminanın ($Na_3AlF_6 - Al_2O_3$) elektroliziyle oluşturulmuştur. Bu sayede alüminyumun fiyatı daha makul bir düzeye inmiş, endüstriyel üretimi başlamıştır. K.J. Bayer tarafından 1887 yılında yapılan uygulama ile saf Al_2O_3 üretimi gerçekleşmiştir. Bu uygulamada boksit cevheri yüksek basınç ve sıcaklık altında sodyum hidroksit çözeltisi ile çözündürülmektedir. Buradan elde edilen çözeltinin kullanımıyla da Al_2O_3 imalatı gerçekleştirilmektedir [1].

Alüminyum 1900'lü yıllarında ilk bölümünde geniş bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Kimi avantajlı özellikleri ile de kullanım alanı daha fazla artış göstermiştir. Bu özelliklerin başında çeliğe göre özgül ağırlığının düşük olması, tokluğunun yüksek olması, yüksek kaynaklanabilirlik kabiliyeti, elektrik iletkenliği ve yüzeydeki oksit tabakası sayesinde havanın olumsuz etkilerinden korunabilmesi gibi özellikleri ön plana çıkmaktadır. Hatta alüminyuma ilave edilen alaşım elementlerinin ve ısıl işlem uygulamasının malzeme özelliklerini olumlu yönde arttırması, kullanım alanını bir hayli genişletmiştir [2].

Başlıca alüminyum alaşımları; magnezyum, mangan, bakır, çinko ve silisyum gibi ana alaşım elementlerinden birini veya birkaçını içerebilir. Düşük miktarlarda krom, titanyum ve demir gibi elementleri de barındırabilir. Özel alaşımlarda ise bunlarla birlikte kalay, kurşun, kobalt, nikel ve vanadyum da bulunabilir [3].

Alüminyumda mekanik özelliklerin daha iyi hale gelmesi ve aşınma direncinin arttırılması amacıyla öne çıkan uygulamalardan biri ısıl işlemdir. Endüstri, sanayi ve benzer alanlarda sıklıkla tercih edilen ısıl işlem yöntemi ise yaşlandırma ısıl işlemidir. Bu yöntem sayesinde, ikinci faz çökeltilerinin mikro yapıda oluşması sağlanmaktadır. Oluşan fazlar ise zamana ve sıcaklığa endeksli bir şekilde malzemenin mekanik dayanımı ile sertliğini arttırır [4].

Uygulanacak ısıl işlem ve yaşlandırma işlemi ile yüksek dayanım değerleri olışturulur. Saf bir alüminyumun çekme dayanımı 50 MPa değerine yakınken yaşlandırılmış Al-ZnMgCu1.5

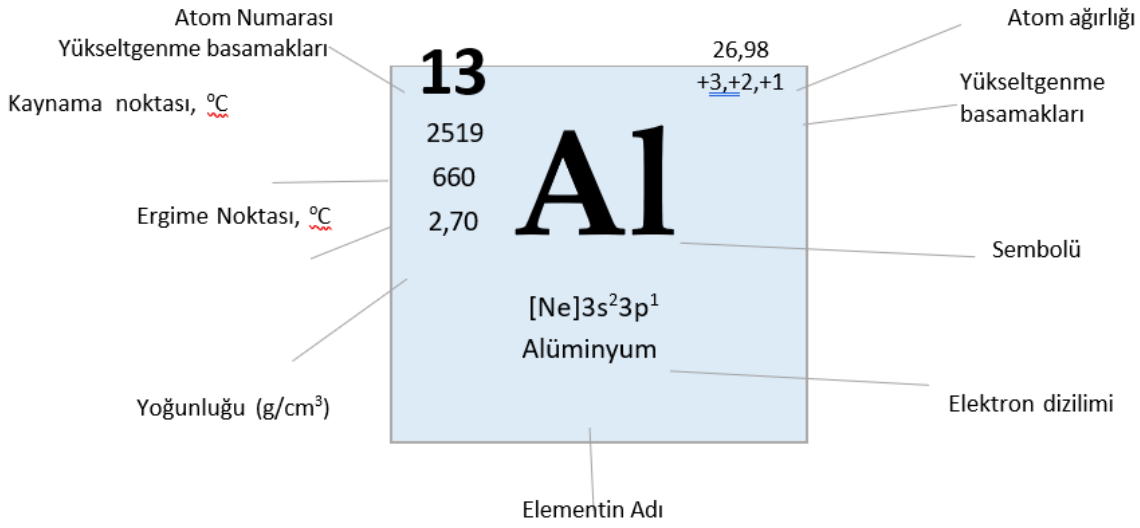
alaşımının çekme dayanımı 600-700 MPa seviyelerine kadar çıkmaktadır. Bu mekanik dayanımın yanında hafifliği ve kolay şekillendirilebiliyor olması savunma sanayi, uzay araçları ve havacılık sektöründe önemli yer tutmaktadır.

Alüminyumun diğer önemli özelliği ise manyetiklik özelliğinin olmamasıdır. Bu sayede elektrik ve elektronik endüstrisinde önemli bir alana sahiptir.

2.1. Saf Alüminyum

Alüminyum (Al) atom numarası 13, yoğunluğu 2.70gr/cm3 olan gümüş renkli hafif bir metaldir. Dünyada en çok bulunan üçüncü sıradaki element olarak alüminyum, tamamen bileşikler şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Alüminyumun üretimi, boksitten elde edilen birincil üretim ve hurdadan dönüştürülen ikincil üretim olarak ayrılmaktadır [5].

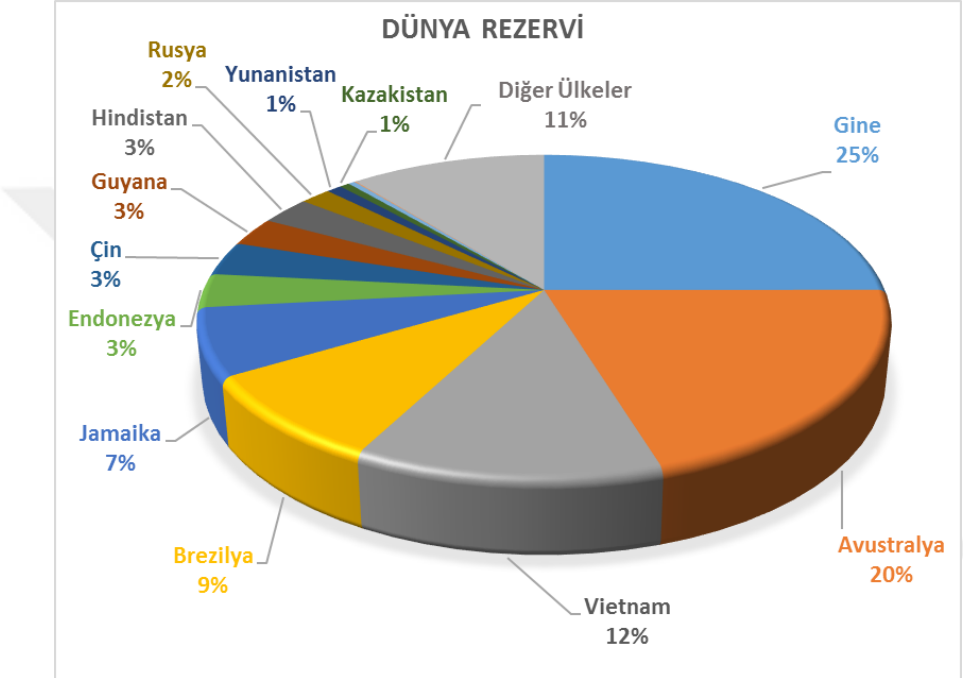
Şekil 2.1'de Alüminyumun elementinin bazı özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Alüminyum elementi fiziksel özellikleri. [6]

Dünya genelinde alüminyum üretiminde değerlendirilen boksit kaynaklarının 55-75 milyar ton civarında olduğu düşünülüyor. İşlenebilirlik rezervlerin ise 30 milyar ton düzeyinde olduğu bilinmektedir. Dünyadaki en önemli rezerv sahaları; Gine (7.4 milyar ton), Avusturalya (6 milyar ton), Vietnam (3.7 milyar ton), Brezilya (2.6 milyar ton), Jamaika (2 milyar ton), Çin (1 milyar ton) ve Endonezya (1 milyar ton) da bulunmaktadır.

Şekil 2.2'de Dünya işlenebilir boksit rezervi dağılımının grafiği verilmiştir.



Şekil 2.2. Dünya işlenebilir boksit rezervi dağılımı grafiği [6]

2.2. Dünyada Alüminyum Üretimi

Alüminyum üretimi iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Bunlardan birisi birincil üretim diğeri ise ikincil üretimdir. Alüminyum boksitten üretildiğinde birincil üretim, alüminyum hurdasından üretildiğinde ikincil üretim adını alınır.

Birincil alüminyum üretimi aşağıdaki 3 ana başlıktan oluşur;

1. Boksit madeni işletmeciliği.
2. Boksit cevherinden Bayer metodu ile alümina üretimi.
3. Alüminadan elektroliz yöntemi ile metalik sıvı alüminyum üretimi.

Bütün bu süreçler sonucunda oluşan sıvı alüminyum külçe şeklinde dökülmesi, ekstrüzyon ve haddeleme aşamalarıyla yarı mamul ve mamul ürünlerin imalatı aşamalarının tamamı, endüstride farklı bir sanayi koluna bölünür. Türkiye'de, burada bahsi geçen minvalde olan tek

entegre tesis, Seydişehir Alüminyum Tesisleridir. Şekil 2.3'de boksit madeni işletmesinden bir görünüm verilmiştir.



Şekil 2.3. Boksit madeni işlemesinden bir görünüm

Boksit, derinde olmayan bir maden olduğu için genelde açık alandadır ve bu avantajıyla alüminyum kuruluşları, yakınlarına kurulabilir. Bu tesislerde çoğunlukla Bayer metodu (önce sudkostik eriyiği ile alüminyum hidroksit eldesi ve sonra kalsinasyon işlemi) kullanılarak boksit cevherinden alümina (Al2O3) elde edilir.

Şekil 2.4'de boksit cehverinin, Şekil 2.5'de alüminanın görseli verilmiştir.



Şekil 2.4. Boksit Cevheri



Şekil 2.5. Alümina

Bu adımdan sonra, alümina elektroliz işlemi (Hall-Heroult Proces) ile alüminyuma dönüştürülür. Bu işlemde alümina eriyik kraylit banyosunda çözünür, çelik konteynır hücrede pozitif ve negatif karbon anotlar halinde elektrolize edilir. Burada amaç alüminyumu oksijenden arındırmaktır. Dipte biriken alüminyumun alınması ile işlem tamamlanır. Genel olarak ağırlıkça 4 birim boksitten, 2 birim alümina ve 2 birim alüminadan da 1 birim alüminyum elde edilir. Bu işlem ile elde edilen sıvı alüminyum, sektörde birincil alüminyum olarak adlandırılır.

Şekil 2.6'da birincil üretimde ürünü alüminyum bloklar verilmiştir.



Şekil 2.6. Birincil üretimde ürünü alüminyum bloklar

İkincil alüminyum imalatı ise geri dönüşüm kuruluşlarında, hurda alüminyum ile yapılmaktadır. Hurda olarak, alüminyumdan yapılmış her türlü sanayi parçaları, üretim esnasında

bozulmuş ölçüsel sapmaya uğramış tolerans dışı ürünler, eski ambalaj atıkları kullanılır. Alüminyum hurdasının büyük kısmını içecek kutuları oluşturmaktadır. Hatta ikincil alüminyum imalatında, içecek ambalajlarının oranı %25-55 aralığında yer almaktadır. Bu oran ülkenin nüfusuna ve yaşam şartlarına bağlı olarak değişmektedir.

2.3. Alüminyumun Genel Özellikleri

Saf alüminyumun genel özelleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.1'de Alüminyumun genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Alüminyumun genel özellikleri

Atom ağırlığı	26.97 g/mol
20^{o}C'deki yoğunluğu	2.7 g/cm^3
Atom yarıçapı	143 pm
Kimyasal yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Poisson oranı	0.34
Çekme mukavemeti	572.265 MPa
Elektriksel direnç (20^{o}C'de)	2.69 μΩcm
Ergime sıcaklığı	660^{o}C
Buharlaşma sıcaklığı	2327^{o}C
Özgül ısısı	0.214 cal/g
Isıl iletkenlik	237 W/(m·K)
Elastisite modülü	72200 N/m2
Vickers serliği	167 MPa
Brinell sertliği	245 MPa

Alüminyumun elastisite modülü çeliğin takriben 3'te 1'i kadardır. Yani alüminyumun aynı yük altındaki elastik deformasyon miktarı çeliğinkinin 3 katı kadardır. Alüminyumun bu özelliği tasarım hesaplamalarında oldukça önemli olmaktadır. Dinamik yüklere maruz kalması halinde elastisite modülünün düşük olması avantaj sayılır [43]. Zira alüminyumun daha yüksek olan direnci, çeliğe kıyasla daha fazla miktarda daha fazla enerjinin absorbe edilmesine imkân verir.

2.4. Alüminyumun Elektriksel İletkenliği

Savunma sanayinde çeşitli metal iletkenler kullanılır. Bunların başında iki metal iletken olan bakır ve alüminyum gelir. İletkenler; iletkenlik gerilme mukavemeti, ağırlık ve çevresel etkenlere karşı dayanıklılık gibi farklı özelliklere sahiptir. Alüminyum oldukça iletken bir metaldir.

Alüminyumun iletkenliği bakırın iletkenliğiyle mukayese edildiğinde %39'luk bir kayıp vardır. Ancak alüminyumun avantajı bakırdan %70 daha hafif olmasıdır [6]. Bundan dolayı alüminyum kullanımının Avrupa'da %10'u, ABD'de %9'u, Japonya'da %7'si elektrik ve elektronik alanında değerlendirilmektedir. Bu alandaki kullanımın büyük yoğunluğu elektrik nakil hatlarıdır.

Çelik özlü alüminyum iletkenler, yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında kullanılan tek malzemedir. Alüminyum elektrik borularında, motor bobin sarımında ve yeraltı kablolarında yoğun olarak değerlendirilmektedir. Elektronikte alüminyum kullanım yerleri arasında yongalar, şaseler, transistor soğutucuları, şaseler, data kayıt diskleri ve elektronik cihazların kasaları bulunmaktadır.

2.5. Alüminyumun Alaşımları ve İsimlendirilmesi

Günümüzde alüminyum ve alaşımları başta hafiflikleri olmak üzere arttırılmış mukavemet özellikleri, iyi derecede elektrik ve ısıl iletkenlikleri, zorlu koşullarda nem, tuz gibi ortamlarda korozyona karşı direnç göstermeleri nedeniyle savunma sanayinin en gözde malzeme türlerindendir. Bunun yanı sıra havacılık, uzay, otomotiv, inşa endüstrisi, gıda ve kimya alanında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Öne çıkan birçok özellikleri sayesinde tasarımcıların en çok tercih ettiği malzeme grubu haline gelmiştir.

Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri içerisinde bulunan alaşım elementleri ve mikroyapısına bağlı olarak farklılık gösterir. Alüminyumun yapısına katılan alaşım elementleri başlıca; bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur.

Alüminyum alaşımları döküm ile dövme alaşımları olmak üzere ikiye ayrılır. Dövme alaşımlarının plastik deformasyon kabiliyeti yüksektir ve basitçe şekillendirilebilir. Amerikan alüminyum birliğine göre alüminyum dövme alaşımları dört harf ile sınıflandırılmaktadır.

2.5.1 Alüminyum 1XXX Serisi

Alüminyum oranı, %99'un üstündedir. Korozyon direnci, elektrik ve ısıl iletkenliği mükemmeldir. Fakat mekanik özellikleri diğer serileri göre daha düşüktür. Bu alaşımlar yüksek oranda haddeleme işlemine tabii tutularak levha veya folyo haline getirilerek kullanılırlar. Gerinim sertleştirmesi ile mukavemette küçük bir artış sağlanabilir. Örnek olarak 1100 alaşımının tavlanmış durumda çekme mukavemeti 90 MPa'dır [7]. Genellikle elektrik alanında ve kimya endüstrisinde tercih edilir. Kaynağa elverişlidir.

2.5.2. Alüminyum 2XXX Serisi

Esas alaşım elementi bakırdır. %6,3'e kadar bakır içerir. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir. Yüksek mukavemete sahip olduğu için havacılık alanında

uçak gövdesinde ve mekanik eleman ürünlerinde tercih sebebidir. Bu serilerin en iyi tarafı ise 150^{o}C'ye kadar olan sıcaklıklarda iyi bir dayanım göstermeleridir. Kaynak kabiliyeti diğer alaşım türlerine nazaran orta seviyedir. 2024 alüminyum serisi en çok kullanılan çeşittir ve genelde uçak tasarımlarında etkin olarak kullanılır.

2.5.3. Alüminyum 3XXX Serisi

Bu serinin en önemli alaşım elementi manganezdir. Korozyona karşı çok iyi direnç, mükemmel şekil değiştirme ve iyi derecede kaynaklanabilirliğe sahiptir. Isıl işleme uygun değildirler. Buna rağmen serinin takribi %20'si 1XXX serine oranla daha güçlü alaşım elementlerine sahiptir. 250 MPa değerine dek akma dayanımı vardır [8].

2.5.4. Alüminyum 4XXX Serisi

Alüminyum 4XXX sersinin esas alaşım elementi silisyumdur. Temel genleşme katsayısı düşük, korozyon ve aşınma direnci yüksek bir alaşımdır. Silisyum ilavesi, lehimleme ve kaynak işlemlerinde erime noktasını düşürür. Böylece 4XXX serisi alüminyumların kaynak ve lehimleme kabiliyetleri iyileştirilmiş olur. Silisyumun akıcılık özelliğini arttırması sayesinde şekil ve geometrisi karmaşık ya da zor olan parçaların üretilmesinde kolaylık sağlamaktadır. 4043 ve 4047 gibi alaşımları kaynak dolgu teli imalarında kullanılmaktadır [9,10]. Yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları için piston yapında tercih edilen bir alaşımdır.

2.5.5. Alüminyum 5XXX Serisi

Alüminyum 5XXX serisi alaşımın ana elementi magnezyumdur. Alaşımdaki magnezyum oranı arttıkça mukavemet ve sertlik artarken süneklik azalır. Deniz suyu gibi tuzlu ve nemli ortamlarda oldukça üstün korozyon direnci sağlar. Savunma alanında deniz kuvvetlerinde kullanılacak bir araçta tasarımcıların tercih etme sebeplerinden birisidir. İyi derecede kaynaklanabilirliğe sahiptir. 5356 alaşımı kaynak dolgu metali olarak kullanılmaktadır [41,42].

Bu alaşımın savunma sanayinde en çok tercih edilenleri ise 5083 ve 5754 alaşımlarıdır. 5754 alaşımı kolay şekillendirilebilir ve süneklik özelliği ile öne çıkmaktadır. Bu özelliği sac-metal alanında kullanımın imkânı sağlamaktadır. Diğer serilerde büküm işlemi esnasında kırılmalar, çatlamalar meydana gelirken 5754 serisinde bu olay söz konusu değildir.

Alüminyum 5083 H321 malzeme savunma alanında araçlar üzerinde 19.05mm kalınlıkta zırh malzemesi olarak tercih edilmektedir.

2.5.6. Alüminyum 6XXX Serisi

Savunma sanayinde en çok tercih edilen alüminyum alaşımlarından birisidir. İçerisinde %1 magnezyum, %0,6 silisyum, %0,3 bakır barındırır. Diğer serilerde olduğu gibi korozyon dayancı ve işlenebilirliği yüksek, kaynaklı imalata elverişli ve iyi derecede dayanıma sahiptir. Savunma sanayi alanında en yaygın olarak 6061 serisi kullanılır. Bu alaşım düşük karbon çelikleri ile kıyaslanabilecek akma mukavemetine sahiptir. Mukavemet değerleri 251 MPa ve 408 MPa arasında değişkenlik gösterir.

AA6061 T4 ve T6 temperleri havacılık alanında uçak iniş merdivenleri, servis sistemleri ve elektronik cihaz kutularında kullanılmaktadır. T0,T4,T6,T651 gibi temperleri ise ara bağlantı parçalarında profil olarak kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra gövde panellerinde, kanatlardaki acil çıkış kısımlarında, motor kaportalarında da kullanılmaktadır. Havacılıkta son zamanlarda daha iyi korozyon direnci ve şekillendirilebilirlik özelliği ile 6061 yerine 6013 T6 ve 6063 T6 malzemeler kullanılmaktadır.

2.5.7. Alüminyum 7XXX Serisi

Bu serinin en önemli alaşım elementi çinkodur. Serileri arasında AA7075'in yüksek mukavemeti ısıl işleme uygunluğu ve hafifliği nedeniyle birçok alanda tercih sebebi olmuştur. Ancak AA7075 malzemenin içerisinde bulunan bakır ve çinko alaşımları nedeniyle korozyon dayanıklılığı ve kaynak kabiliyeti gibi özellikleri diğer alaşım serilerine göre oldukça düşüktür. Bu serilerin yüksek sıcaklıklardaki dayanımı: kısa süreli max 160^{o}C, uzun süreli max 120^{0}C'dir [11].

2. Dünya savaşından sonra tüm dünya genelinde çeliğin yerini artık alüminyum almaya başlamıştır. İlk zamanlarda 2014, 2017 ve 2024 alaşımları kullanılmaya başlanmış olsa da daha sonrasında yüksek çekme mukavemetine ihtiyaç duyulduğu için 7xxx serisi alüminyuma geçilmiştir. Minimum çekme dayanımı 580 MPa olan 7178 alaşımı, uçak yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Uçaklardaki ana gövde yapısını oluşturan kiriş ve kemerlerde 7050 T7451 ve 7050 T7651 serisi alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Gövde bağlantı kirişlerinde, yük taşıyan mekanik parçalarda ve üst kanat yüke maruz kaldığı için bu kısımlarda 7075 T6 ve 7075 T651 serisi tercih edilmektedir.

2.5.8. Alüminyum 8XXX Serisi

8xxx serisi alüminyum alaşımlarının esas alaşım elementi lityumdur. Buna ilaveten kalay eklentisi de yapılabilmektedir. İyi yorulma direnci ve iyi tokluk değerleri sayesinde özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu alaşımın en büyük dezavantajlarından birisi diğer alaşımlara göre üretim maliyetinin daha yüksek olmasıdır [12].

2.6. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi ve Harflendirilmesi

Alüminyum alaşımlarına farklı şekillerde ısıl işlem uygulanabilir. Uygulanan bu işlem TX sembolleri ile birlikte alaşım numarasının hemen yanına yazılır. Bu ısıl işlem durumları şu şekilde ifade edilmektedir:

F: Üretildiği gibi.

H: Sertleştirilmiş.

O: Tavlanmış.

T: Isıl işleme tabi tutulmuş.

T1: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

T2: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmıştır.

T3: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

T4: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

T5: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış.

T6: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış.

T7: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlanmaya yapılmış.

T8: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.

T9: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve soğuk şekillendirilmiş.

T10: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.

2.7. Alüminyumun Korozyon Direnci

Korozyon, metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonları sonucu bozulmalarıdır. Alüminyum ise yeterli düzeyde mekanik dayanım, iyi plastik şekil değiştirme kabiliyeti, ısı ve elektriği iletebilme ve düşük özgül ağırlığının yanı sıra aynı zamanda iyi bir korozyon dayanımına da sahiptir. Özellikle atmosfer ortamında korozyona oldukça dayanıklıdır. Korozyon dayanımının özellikle arandığı durumlarda alüminyum saflığının %95,5'in altında olmaması gerekmektedir. Fakat genellikle alüminyumun mekanik özelliklerini iyileştirmek için alaşımlama yapıldığı için, alüminyum alaşımlarının korozyon direnci, saf alüminyumdan daha düşüktür.

Alüminyumun birçok zorlu şartta korozyona karşı göstermiş olduğu direnç; yüzeyinde oluşan, amorf veya kristalin alüminyum oksit tabasından dolayıdır.

Atmosferde oluşan yüzey koruyucu film tabakası genelde amorftur, su ve su buharı içerisinde ise daha çok kristalin yapıda yüzey filme oluşur. Bu oluşan koruyucu film tabakası ne kadar homojen ise aynı şartlarda korozyon dayanımı da o kadar iyidir.

Deniz atmosferinde ve endüstri atmosferinde (SO_2, toz, kir, vb.) otuz yıl sonrası korozif etki sonucu, alüminyum malzemedeki dayanım azalması yaklaşık %9-13 kadardır.

3. SARI ALODİN KAPLAMA (CR^{+6} KAPLAMA)

3.1. Alodin Kaplamanın Tanımı ve Genel Özellikleri

Alüminyum malzemeler her zaman ince bir oksit film tabakası ile kaplanır. Ancak bu uzun vadede yetersiz bir koruma sağlar. Dolayısıyla korozyon önleme ve sonraki boya uygulamaları için uygun bir yüzey sağlamaz. Alodin kaplama işlemi; alüminyum ile alüminyum alaşımlı yüzeylere bir film tabakası oluşturarak korozyon dayanımını yükseltmek, elektriksel iletkenliği muhafaza etmek, boya uygulanacak yüzeyler için yapışma özelliğini yükseltmek ve dekoratif görünüm elde etmek amacıyla değerlendirilmektedir. Ayrıca aşırı ısı farklılıkları, tuz ve nem gibi dış ortamdaki olumsuz koşullara karşı dayanıklı duruma gelmesini sağlar. [11-13]

Şekil 3.1'de örnek bir alodin kaplama uygulaması verilmiştir.



Şekil 3.1. Alodin Uygulaması Örneği

Alüminyum ve alüminyum alaşımlı malzemeler için en yaygın kullanılan yüzey işlemi Alodin kaplama(kromatlama) işlemidir. Mükemmel korozyon direnci, yüksek boya yapışma yeteneği ve nispeten düşük uygulama maliyeti ile en yaygın tercih edilen kaplama yöntemidir [14]. Alodin kaplama boyanın daha iyi yapışmasını sağladığı gibi, boyanın dışarıdan darbe aldığında kolayca yüzeyden ayrılmasına da engel olur. Malzemenin kırılganlığını azaltır, esneme kabiliyetini yükseltir [21].

Bu kaplama, alüminyum kimyasal dönüşüm kaplaması veya alodin kaplama şeklinde de tanımlanmaktadır. Kaplama tip ve sınıfına göre koyu sarıdan açık sarıya, açık sarıdan renksiz görünüme dek farklılaşan aralıklarda üretilebilmektedir. Cr^{+6} değerlik içeren ve Cr^{+6} ihtiva etmeyen çözeltileri de mevcuttur [31,47].

Savunma alanında imal edilen birçok parçanın ölçüleri hassastır. Parçalar imal edilirken kaplamanın malzeme üzerinde alacağı kalınlık da hesap edilerek üretim gerçekleştirilir. Alodin kaplama film tabakası halinde olduğu için parça ölçülerini etkilemez. Bu sayede imalatı tamamlanan parçaların hassas ölçüleri kaplama sonrası değişmez.

3.2. Alodin Kaplama Standartları

Alodin kaplamada uluslararası ana standartlar şunlardır;

- MIL-C-5541
- MIL-DTL-5541
- MIL-DTL-81709
- ASTM-B449
- SI-0000-0036

Tablo 3.1'de farklı standartlara göre uygulanan alodin kaplamalar verilmiştir.

Tablo 3.1. Farklı Standartlara Göre Uygulanan Alodin Kaplamalar. [15]

Şartname	Sınıflandırma		AÇIKLAMA
MIL-C-5541	Sınıf 1A		Koyu sarı - açık sarı arasında maksimum korozyon direnci sağlar.
	Sınıf 3		Açık sarı - renksiz yeterli kadar korozyon direnci, düşük elektriksel kontak direnci sağlar.
MIL-DTL 5541	TIP I (Cr^{+6} Değerlik içerir.)	Sınıf 1A	Koyu sarı - açık sarı arasında renge sahiptir ve maksimum korozyon direnci sağlar.
		Sınıf 3	Açık sarı - renksiz yeterli kadar korozyon direnci, düşük elektriksel kontak direnci sağlar.
	TIP II Cr^{+6} Değerlik içermez.)	Sınıf 1A	Koyu sarı - açık sarı arasında renge sahiptir ve maksimum korozyon direnci sağlar.
		Sınıf 3	Açık sarı - renksiz yeterli kadar korozyon direnci, düşük elektriksel kontak direnci sağlar.
ASTM 449	Sınıf 1		Kahverengi - sarı arası maksimum korozyon direnci.
	Sınıf 2		Açık sarı - renksiz arası yeteri kadar korozyon direnci.
	Sınıf 3		Renksiz, zayıf korozyon direnci düşük elektriksel kontak direnci.
	Sınıf 4		Açık yeşil - yeşil arası renge sahip, yeteri kadar korozyon direnci, boyamaya ve kauçuk yapıştırmaya uygun.

3.3. Alodin Kaplama Banyosu Kimyasal Bileşimi

Kromat kaplama işlemi, altı değerlikli krom ve alüminyum metali arasındaki bir redoks reaksiyon ile başlar. Örneğin;

$$Cr^{+6} + Al \rightarrow Cr^{+3} + Al^{+3}$$

Ortaya çıkan üç değerlikli katyonlar, karşılık gelen hidroksitleri veya her iki hidroksitin katı bir çözeltisini oluşturmak için suda sudaki hidroksit iyonlarıyla reaksiyona girer.

$Cr^{+3} + 3OH^{-} \rightarrow Cr(OH)_3$

$Al^{+3} + 3OH^{-} \rightarrow Al(OH)_3$

Uygun koşullar altında alüminyum metali yüzeyinde bir hidrojel olarak biriken çok küçük parçacıklardan oluşan koloidal bir jel oluşturmak oluşur. Bu jel, bir sıvı fazı çevreleyen nano ölçekli elementler ve boşluklar ile oksit ve hidroksitlerden oluşan üç boyutlu bir yapıdan oluşur. Jelin yapısı, metal iyonu konsantrasyonuna, pH'a, şelatlama maddelerine ve çözeltinin diğer bileşenlerine bağlıdır. Jel fil kurudukça büzülür, yapısını sıkılaştırır ve tabakanın sertleşmesine neden olur.

Sarı alodin içeren havuzda konsantrasyon 7kg/1000L'dir. Ana reaksiyonlar, biriken krom anyonlarının (kromatlar ve dikormatlar) çoğunu çözünmez krom bileşiklerine dönüştürse de bunların küçük bir miktarı kurumuş kaplamada reaksiyona girmeden kalır. Örneğin bir kromat banyosunda alüminyum üzerinde oluşan kaplamada, krom atomlarının yaklaşık %23'ünün heksavalent Cr^{+6} olduğu bulunmuştur [16,17].

3.4. Alodin Kaplamanın Başlıca Yararları

- Gelişmiş korozyon direnci.
- Gelişmiş boya yapışma yeteneği.
- Elektriksel iletkenlik [18].

3.5. Alodin Kaplamada Performans Testleri

Talep edilen standarttaki tip ve sınıf ihtiyacına göre farklılaşmaktadır. Yüzey görünümü, kaplama ağırlığı, boya yapışma, ıslak yapışma, elektriksel temas direnci ve korozyon direnci testleri ile performans ölçülmektedir [17].

3.5.1. Tuz Testi

Tuz testi, kaplamalı parçanın ömrü boyunca yüksek aşınma direncini kontrol etmek, kaplanmış numunelerin aşınma direncini karşılaştırmak ve servis ömürleri hakkında tahmini bilgi edinmek için kullanılır. Korozyon direncini arttırmak için kullanılan alodin kaplamanın 168 saat tuz testi dayanımı vardır.

ASTM B117 standardı ekseninde katı çözeltisi 200ppm'den fazla olmayan ve 6.5-7.2 arasındaki pH değeri ile deiyonize su içinde %5'lik bir sodyum klorür (NaCl) çözeltisi kabın içine püskürtülerek deniz atmosferi benzeri bir korozif ortam oluşturur.

Şekil 3.2'de tuz testi cihazının örnek görseli verilmiştir.



Şekil 3.2. Tuz Testi Cihazı

3.6. Alodin Kaplamanın Malzeme Üzerindeki Kalınlığı

Aynı zamanda koruyucu film kalınlığı 5.00x102 ile 7.5x103 angstrom arası değişiklik gösterir. Bu sayede malzeme kalınlığında herhangi bir ölçün değişikliğine sebebiyet vermez. [18-21]

3.7. Farklı Renk Tonlarında Kurutma Sıcaklıkları

Kurutma sıcaklıkları sarı için 65^0 C, yeşil ve şeffaf alodin için 85^0 C'yi geçmemelidir.

3.8. Alodin Kaplamanın Çevreyle İlişkisi

Bilinen alodin kaplama malzemeleri barındırdıkları Cr^{+6} ve Cr^{+3} gibi bileşikler nedeniyle doğal hayata zarar veren kimyasallardır. Son yıllarda çevre bilicinin gelişmesi ile birlikte bu kimyasallara muadil tabiata zararlı olmayan alternatifler geliştirilmiştir. Chrome-free olarak adlandırılan bu kimyasallar, kromatlama kimyasalları ile elde edilen kaplamalara nazaran 10 kat daha ince olmasına rağmen korozyon dayanımları birbirine yakındır [32].

Avrupa Birliği'nin tehlikeli maddeler (RoHS) kısıtlaması ve Atık Elektrik ve Elektronik Ekipman Yönergesi (WEEE) ile uyumlu +3 değerlikli alodin prosesi yapılmaktadır. Bu kaplama

+6 değerlikli krom içermez ve MIL-DTL-5541 standartının tüm gerekliliğine uygundur.

Şekil 3.3'de belirli zararlı maddelerin kullanımının kısıtlaması anlamına gelen görsel verilmiştir.



Şekil 3.3. Restriction of Hazardous Substances (Belirli Zararlı Maddelerin Kullanımını Kısıtlama)

4. ALODİN KAPLAMA UYGULAMA PROSESİ

Alodin kaplama işleminde metal parçalara (alüminyum parça, alüminyum döküm parçası, kompozit plastik vb.) büyüklüklerine göre farklı işlemler uygulanmaktadır.

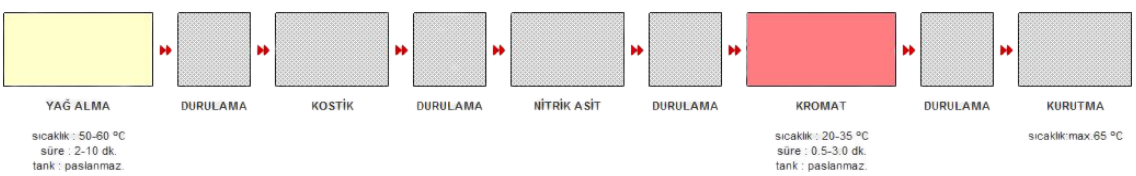
Uygulama prosesi;

1. Solvent Temizliği
2. Alkali Yağ Alma
3. Dağlama (kostikli)
4. Nötralizasyon
5. Asidik Aşındırma
6. Kromat Dönüşüm Kaplaması
7. Kurutma

Şekil 4.1'de alodin kaplama işleminin proses akış şeması, şekil 4.2'de ise işlem basamakları arasında yapılan durulama işlemlerinin şeması verilmiştir.



Şekil 4.1. Alodin Kaplama Proses Akış Şeması.



Şekil 4.2. İşlem Basamakları Arasında Yapılan Durulama İşlemleri Şeması.

4.1. Solvent Temizliği

4.1.1. Solvent Nedir?

Solvent sökücü anlamındadır. Genellikle tinerin yerine kullanılıyor olsa da çok farklı kullanım alanları da mevcuttur. Genelde metal kaplama, kimya sanayi ve tekstil sektörlerinde kullanılır. En önemli kuralı çözücü madde içinde çözünen bir madde olmasıdır. Metal kaplama sektöründe ise yağ çözücü solvent olarak kullanılır.

Alodin kaplama işleminin ilk basamağı da solvent temizliği yaparak parça yüzeyini yağ, pas ve kir gibi istenmeyen maddelerden arındırmaktır.

Şekil 4.3'te örnek bir solvent temizleyici ürünün görseli verilmiştir.



Şekil 4.3. BDL-S3B Temizleme Solventi

4.2. Alkali Yağ Alma

Kirli ve yağlı ürünlerin temizliğinde kullanılan kimyasallardır. İçeriğinde mevcut olan yüzey aktif malzemeler ve alkali kimyasallar yardımı ile metal üzerindeki kirleri ve yağları yüzeyden temizler. Kaplama, fosfatlama emaye hatlarında işlem öncesi yağ alma malzemesi olarak kullanılır.

Alkali yağ almalar genelde 40-60^{o} C sıcaklık aralığında çalışır. Düşük sıcaklıklarda etkili bir temizlik gerçekleşmeyebilir. Bu yüzden işlem çözeltisinin sıcaklığı önemlidir. Banyolarda ısıtma işlemi, termostatlı elektrikli ısıtıcılar kullanılarak yapılmaktadır. Bu aşamada talaş, toz, kaba kir gibi malzemelerden arındırılmaktadır.

Yağ alma işlemi tamamlanan parçalar, durulama banyosunda (maksimum pH 9) iki kez daldırılıp çıkarılarak durulanmaktadır. Durulama banyolarında pH'ın 9'u geçmemesi için sürekli temiz su girişi ve aynı miktarda su çıkışı yapılmaktadır.

Bir metal parçasını üzerinde yağ kalıp kalmadığı en kolay durulama banyolarında gözlemlenir. Durulanmış ürünlerin üzerinde su taneleri bariz olarak duruyorsa metalin yağı

tamamen alınmamış anlamına gelmektedir. Böyle durumlarda yağ alma prosesi ürün üzerindeki kirleticiler temizlenen dek tekrar uygulanmalıdır.

4.3. Dağlama – Aşındırmalı Yağ Alma (Kostikleme)

Alüminyumun aşındırılması için en sık kullanılan yöntem sulu kostik soda (NaOH) çözeltisidir. Bu oksit, yüzey altı döküntü yağının çıkarılabileceği yerlerde genel temizlik amaçlı kullanılır. Bu aşamada alüminyum parça üzerindeki tüm yağ, kir, çapak, talaş gibi etkenler parça yüzeyinden uzaklaştırılır.

Şekil 4.4 ve şekil 4.5'de alodin kaplama prosesinde kullanılan asidik aşındırmaya ait havuzların görseli verilmiştir.



Şekil 4.4. Kaplamada kullanılan asidik aşındırma havuzları.



Şekil 4.5. Kaplamada kullanılan asidik aşındırma havuzları -2.

4.4. Nötralizasyon (Aktifleme)

Kostik banyosu ardından nötralize etmek için nitrik asit banyosu kullanılır. Nitrik asit banyosunda 0.5-2 dakika arasında uygulama yapılacaktır.

Nitrik asit banyosu sonrası parçalar durulama işlemi uygulanmak üzere minimum pH 5'te iki kez art arda daldırılıp çıkartılarak durulama işlemi gerçekleştirilmektedir.

Şekil 4.6'da aktifleme banyolarına ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 4.6. Aktifleme banyoları

4.5. Durulama

Asidik yağ alma ile yüzeyde kalan kir ve tufal aşındırma kimyasalı kullanılarak yüzeyden uzaklaştırılır. Yeterli sürede bekletildikten sonra durulama banyosunda minimum pH 5 olmak üzere iki kez art arda daldırılıp çıkartılarak durulanmaktadır. Bu durulama işlemi her istasyon arasında yapılmaktadır. İşleyiş şu şekildedir:

- Solvent temizliğinden sonra durulama,
- Asidik aşındırmadan sonra durulama,
- Aktiflemeden sonra durulama,
- Alodin tankından sonraki son durulama.

Şekil 4.7'de alodin kaplama işlemi tamamlanmış bir numunenin durulama banyosundaki görseli verilmiştir.



Şekil 4.7. Durulama tankı

4.6. Kromatlama Dönüşüm Kaplaması

Durulana parçalar boyanın yüzeye daha iyi yapışması ve korozyon direncinin artması için işlem sarı kromat (alodin) banyosunda devam etmektedir. Sarı kromat banyosu ile ağırlıkça %0,75 sarı kromat kimyasalı eklenerek, 20-40^{0}C sıcaklıkta 0.5-2 dakika arası bekletilmektedir.

Sarı kromat banyosu sonrasında parçalar durulama banyosunda minimum pH 5 olmak üzere iki kez art arda daldırılıp çıkartılarak durulanmaktadır. [21-22]

Şekil 4.8 ve şekil 4.9'da alodin uygulamasının yapıldığı havuzdan görseller verilmiştir.

Banyolarda ısıtma işlemi, termostatlı elektrikli ısıtıcılar kullanılarak yapılmaktadır.



Şekil 4.8. Kromatlama Tankı



Şekil 4.9. Kromatlama tankı-2.

4.7. Kurutma

Tüm işlemler sonrasında kaplanan parçalar hava ile kurutulmaktadır. Bu işlem özel bir fırın ile yapılmaktadır. Fırın içerisindeki kurutma fanları ile parçanın kuruma işlemi daha hızlı bir şekilde tamamlanmaktadır.

Şekil 4.10'da alodin kaplama sonrası kurulama işlemi yapmak için kullanılan bir fanlı kurutma cihazının görseli verilmiştir.



Şekil 4.10. Kurutma fırını

5. ALODİN KAPLAMA UYGULAMA ALANLARI

5.1. Balistik ve Zırh Alanında Uygulamalar

"Balistik" kelimesi, mermilerin itme, uçuş ve çarpma etkilerini inceleyen bilimin kısaltmasıdır. Balistikte, silahla birlikte, balistik etkisi ve incelenmesi, mermi, mermi parçaları veya peletlerle çarpmanın gerçekleştirildiği araçlara dayanır. Ateşleme ile merminin silah namlusunu terk etmesine kadar olan olaylara iç balistik denir ve genellikle ateşlenen merminin başta gaz olmak üzere yanıcı bir madde üreterek ve bunun birkaç tonluk itme basıncını kullanarak ilk namlu çıkış hızıdır [23].

Ancak harici balistik, merminin namlu dışındaki hareketini inceler. Balistik çarpma olayının incelenmesinde karşılaşılan sorunlardan biri, bir cismin hasar görmeden dayanabileceği hızın yani balistik hızın veya kritik vuruş hızının belirlenmesidir. Balistik limit hesaplamalarında merminin şekil ve ebatları, çarpma hızı ve hedefin kalınlığı gibi faktörler de belirleyici olmaktadır [25-30]. Zırh malzemesini delmek için gereken enerji miktarı üzerinde hasara neden olan çekme, sıkıştırma veya diğer streslerin etkisi, balistik özelliklerin analizinde önemli bir araçtır [27,28].

Çarpma sırasında oluşacak enerjinin hedef malzeme üzerinde geniş bir alana yayılmasıyla çökme miktarının minimumda tutulması sağlanır. Merminin etkisiyle üretilen enerjinin büyük bir kısmı, kinetik enerji ve ısıdan lokal deformasyon olarak doğrudan temas halinde hedef malzemenin yüzeyine aktarılır. Hedef, plastik deformasyona uğrayarak ve hasar görerek önemli miktarda enerji emer [25,26,36].

Bir merminin kinetik enerjisi, delme etkisine, merminin kütlesine, merminin hızına, hedefi vurmaaçısına ve merminin metalurjik özelliklerine ve zırh malzemelerine bağlı olarak değişir [24-28].

Daha ölümcül tehditlerin ortaya çıkmasıyla birlikte yakın zamanda tasarlanmış alüminyum zırh tabanlı sistemler, örneğin N2 Bradley Savaş Aracı ve USMC Seferi Kuvvet Aracı (EFV), AA7039[19], AA2219[20], ve AA2519[21] gibi daha yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları bir araya getirdi. Bu alaşımlar daha yüksek güçleri nedeniyle zırh delme (AP) tehditlerine karşı arttırılmış balistik koruma sağlar. Ne olursa olsun bu tür zırh parçalarının korozyon direncine de dayanıklı olması gereklidir. Bu hususta zırh parçalarında da alodin kaplamanın önemi büyüktür [29-33].

5.2. Savunma Alanında Uygulamalar

Yüzey kaplama işlemlerinin modern zamanda sağladığı çeşitli avantajlar sayesinde önemli düzeyde ilgi görmektedir. Günümüzde ihtiyaç duyulan birçok ürünün üretiminde kaplama işlemleri kullanılmaktadır. Kaplama işlemi bir malzeme yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliklerini

değiştirmek amacıyla yapılmaktadır.

Şekil 5.1'de savunma sanayi alanında kullanılan birkaç malzemenin alodin kaplama sonrası görselleri verilmiştir.



Şekil 5.1. Savunma Alanında Kullanılmış Alodin Kaplama Uygulaması Örneği

Savunma sanayi alanında yapılan projelerde; projenin çalışacağı çevre şartları büyük önem arz etmektedir. Örneğin karada çalışacak projelerde yağmur, toz, çamur gibi faktörlerin etkisiyle herhangi bir korozyona uğramaması için, denizde çalışacak parçaların tuzlu suya karşı korozyon direncinin artması için projelerin imalatında alt parça bazında çeşitli kaplama işlemleri yapılır.

Projelerdeki alüminyum parçalar için boya öncesi veya boyasız olan parçalarda imalat sonrası alodin kaplama uygulaması yapılır. Kaplaması tamamlanan parçalarda boya istenmişse boya işlemi uygulanır. Parça boyadan sonra projedeki yerine göre çalışacağı mekanizmaya entegre edilir [34].

5.3. Havacılık Uygulamaları

Havacılık alanında;

- Uçak gövdeleri
- Burulma destekleri
- Amortisörler
- İniş takımları
- Kanat parçaları
- Uçuş kontrol sistemleri

dahil olmak üzere bir çok parçada alodin kaplama uygulamaları kullanılır.

Uçaklar çok yüksek hızlarla seyahat ederler. Aşırı yüksek irtifalarda atmosferik gazlarla birleşen yüksek hız, uçak parçalarının korozyonuna sebep olur. Bulutların arasından geçmek bile uçak parçalarının korozyona uğramasına neden olabilir. Bu nedenle korozyona karşı maksimum koruma için alodin kaplama uygulaması havacılık sektöründe kritik bir yere sahiptir. [24]

5.4. Denizcilik Uygulamaları

Denizcilik sektöründe kullanılan deniz taşıtlarının korozyona olabildiğince dayanıklı olması gerekir. Teknenin iç mekanları ve mekanik parçaları tuzlu sudan hasar alabilir. Alodin kaplama, parçaların aşındırıcı tuzlu su ortamlarına dayanmasına imkân verir.

5.5. Elektrik Endüstrisinde Uygulamaları

Elektrik alanında, kabloları tutan veya koruyan kablo muhafazasına alodin kaplama uygulaması uygulanarak korozyon direnci arttırılır. Bu uygulama tellerin ömrünü ve performansını uzatmaya yardımcı olur. Elektrik endüstrisindeki alodin kaplamalar sadece tel muhafazaları ve paneller için korozyon koruması sağlamakla kalmaz, aynı zamanda elektrik iletkenlik kayıplarını da azaltır.

Şekil 5.2'de elektrik endüstrisinde kullanılan malzemelere yapılmış alodin kaplama örnekleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Elektrik Endüstrisinde Kaplama Uygulaması Örneği

6. MATERYAL VE METOD

Bu tez çalışmasında, Al-5083 yüzeyine alodin kaplama işlemi yapılmıştır. Yüzeyde alodin kaplama süreye bağlı olacak şekilde farklı kombinasyonlarda gerçekleştirilmiştir. Alodin kaplanmış yüzeyler incelenmiştir. Bu amaçla deneyler, aşağıdaki aşamalarda yapılmıştır.

- AI-5083 numunelerin alodin metoduyla yüzeyinin kaplanması
- Alodin kaplı tabakaların renk değişimi incelenmesi.
- Alodin kaplı tabakaların sertlik incelenmesi.
- Alodin kaplı tabakaların iletkenlik incelenmesi.
- Alodin kaplı tabakaların yüzey pürüzlülük incelenmesi.
- Alodin kaplı tabakaların balistik incelenmesi.
- Alodin kaplı tabakaların mikroyapılarının incelenmesi.

Al-5083 malzemenin yüzeyinin kaplama malzemesi olarak seçilmesinin sebebi, bu Al alaşımlarının balistik özelliğinin olması ve savunma teknolojileri alanında farklı birimlerde kullanılmasıdır. Alodin kaplama yönteminin kullanılmasının nedeni ise, geleneksel olarak kullanılan yüzey alaşımlama tekniklerine göre daha yeni bir uygulama olması, homojen yüzeyler elde edilmesidir. Alodin kaplama farklı işlem süreli kaplama parametrelerinde çalışılmış ve esas olarak yüksek düşme testi ile balistik incelemesi yapılarak, kaplama ve boyanmış alanlarda SEM-EDS incelemeleri yapılıp mikroyapılar incelenmiştir.

Alodin kaplama çalışması için CAD ortamında çizim yapılarak bir katı model tasarlandı. Daha sonra bu katı modele uygun prosesler belirlendi. Proses olarak; talaşlı imalat, kaynaklı imalat, lazer markalama, alodin kaplama ve sonrasında yeşil elektrostatik boya uygulamaları şeklinde bir yol haritası çizildi. Deney parçası olarak 6 adet alüminyum 5083-H321 malzeme tercih edildi.

Tablo 6.1 de numuneler ve deney parametreleri verilmiştir.

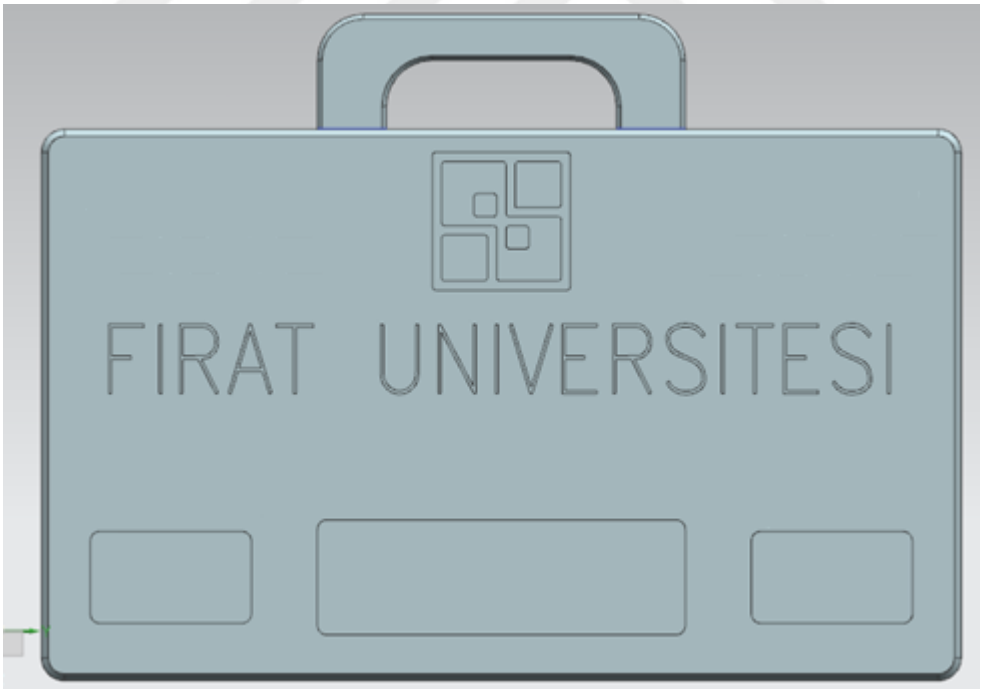
Tablo 6.1. Numuneler ve deney parametleri.

Kaplama Süresi	0 sn Kaplanmamış	15 Saniye	45 Saniye	90 Saniye	240 Saniye	600 Saniye
Numune Adı	0	1	2	3	4	5

6.1. Tasarım, Modelleme ve Teknik Resim Hazırlanması

Özel bir CAD programı yardımıyla deneyde kullanılacak olan numune parçaların tasarımı yapıldı. Tasarım aşamasında numune üzerinde deneysel araştırma işlemleri de düşünülerek buna uygun bir katı model hazırlandı. Şekil 6.1.'de alodin kaplama için hazırlanan numune modeli gösterimi verilmiştir. Numuneler şekilde görüldüğü bibi büyük boyutta şeçilerek üretilmiştir. Sonrasında gerekli incelemeler için numunenin uygun bölümünden seçilip kesilerek değerlendirme ve incelemeler yapılmıştır.

Şekil 6.1'de özel bir CAD ortamında alodin kaplama uygulaması için hazırlanmış numunenin görseli verilmiştir.



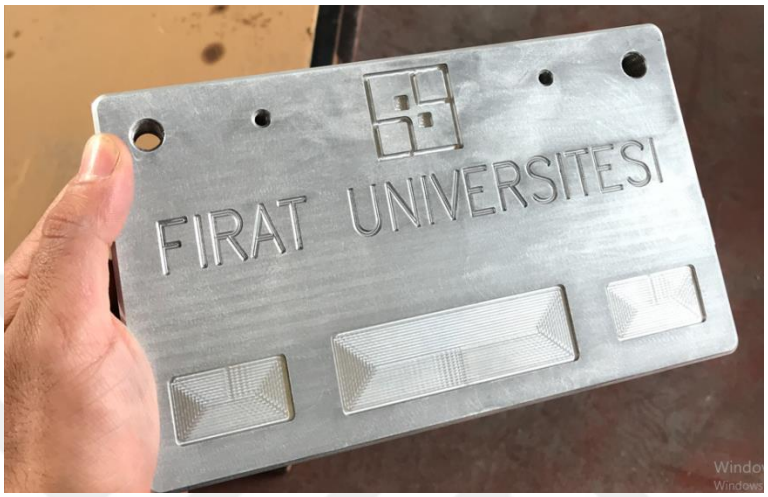
Şekil 6.1. Alodin kaplama için hazırlanan numune modeli gösterimi

6.2. Numunelerin hazırlanması

Alüminyum 5083 H321 deney parçaları ilk olarak talaşlı imalat yapılarak istenilen formda ve ölçülerde işlenmiştir. Bunu yaparken 3 eksen CNC dik işleme tezgahı kullanılmıştır. CAM

programı üzerinden NC kodları alınarak tezgaha aktarılan program sayesinde gerekli tüm işlemeler yapılmıştır. İşlemeleri yaparken alüminyum parmak freze, karbür matkap, karbür pah takımı, M6 ve M10 kılavuz takımı gibi kesici takımlar kullanılarak üretim tamamlanmıştır.

Şekil 6.2'de örnek bir numune parçasının talaşlı imalat sonrası görseli, şekil 6.3'de ise talaşlı imaların yapıldığı CNC dik işleme merkezine ait görsel verilmiştir.



Şekil 6.2. Deney parçalarının talaşlı imalat sonrası görüntüsü



Şekil 6.3. Deney parçalarının işlendiği 3 eksen CNC işleme merkezi tezgahı.

6.3. Alodin Kaplama İşlemi

Üretimi tamamlanan deney parçaları kaplama yapılmak üzere özel bir kaplama firmasına gönderildi. Standart olarak SI-0000-0036, SINIF 1'e göre sarı alodin kaplama uygulaması yapıldı.

Şekil 6.4'te farklı sürelerde kaplanmış deney parçalarının görseli verilmiştir.



Şekil 6.4. Farklı sürelerde kaplanmış deney parçaları

0sn olan alüminyum deney parçasına tüm ön hazırlık işlemleri (yağ alma, aktifleme, durulama gibi.) yapılmış, sadece alodin kaplama işlemi yapılmamıştır.

6.4. Boyama İşlemi

Yaş boya işlemi tüm metal yüzeylere korozyon dayanımı ve dekoratif bir görünüm sağlamak için uygulanır. Solvent bazlı epoksi, akrilik, poliüretan, kızılötesi yansıtmalı boyalarla su bazlı boyaların püskürtme yöntemiyle uygulanması esasına dayanır. Yaş boya uygulaması uygun bir astar uygulama işlemi ile yapılmaktadır. Yaş boyanın yapışma kabiliyetinin yüksek olması için

uygun bir yüzey hazırlama işlemi gerektirir. Korozyon dayanımının yüksek olması istenildiği durumlarda metalin yapısına uygun bir kimyasal ön işlem yapılmalıdır. Eğer malzeme alüminyum ise kromatlama veya eloksal, çelik ise fosfatlama, paslanmaz ise pasivasyon yapılması önerilir.[16]

Şekil 6.5'de numunelerin boya işleminin yapıldığı tesise ait örnek bir görsel verilmiştir.



Şekil 6.5. Yaş boya uygulama tesisi.

Araştırmamızda ise kaplama işlemi tamamlanan deney parçaları tamamen kuruduktan sonra boyanmak üzere boyahaneye istasyonuna gönderildi. Burada parçalar SI-0000-0078'e göre MY-0000-0186 numaralı astar boya üzerine MY-0000-0183 numaralı BOYA YAS SKNT PUR AYL MAT (YEŞİL) POLIURETAN CARC son kat boya ile boyanmıştır.

Şekil 6.6'da boyama işlemi tamamlanmış bir numune parçasının görseli verilmiştir.



Şekil 6.6. Boyama işlemi tamamlanmış bir deney parçası

Üretimi tamamlanan deney parçaları kaplama yapılmak üzere özel bir kaplama firmasına gönderildi. Standart olarak SI-0000-0036, SINIF 1'e göre sarı alodin kaplama uygulaması yapıldı. Ön hazırlık işlemleri tüm parçalar için aynı yapılırken; alodin tankından bekleme süreleri farklı olacak şekilde kaplama işlemleri yapıldı.

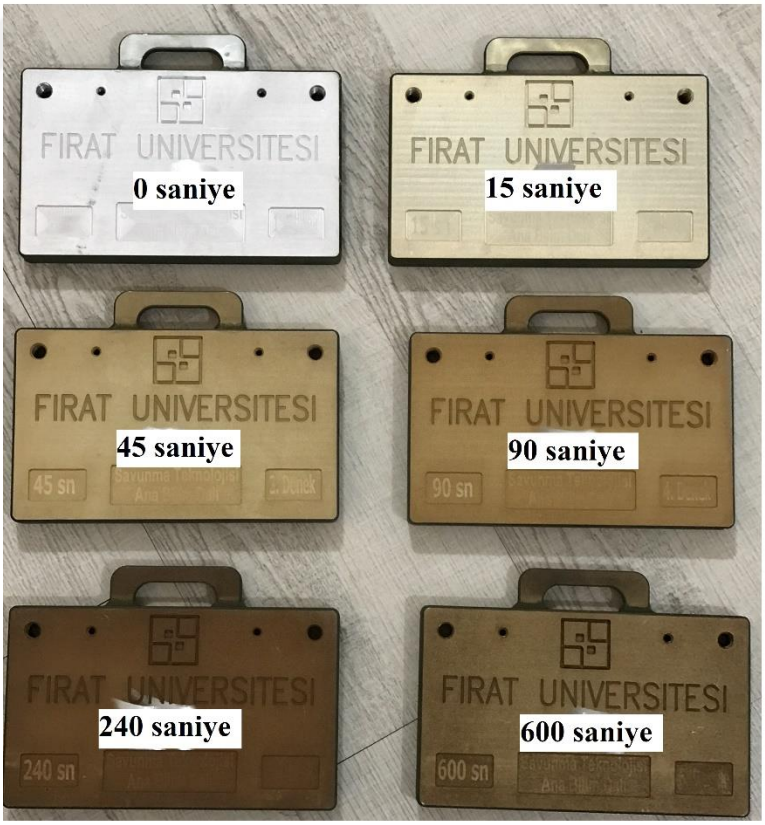
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Üretim ve kaplama boya işlemleri tamamlanan deney parçalarında test aşamasına geçildi. Farklı sürelerde yapılan kaplama işleminde ilk olarak renk tonu farklılıkları incelenirken daha sonra elektrik iletkenlik testi, yüzey pürüzlülük testi, sertlik testi, markalama yüzeylerinde incelemeler, kaplama kalınlığı, boya yapışma kabiliyeti ve diş çekilen deliklerin durumu hakkında incelemeler yapıldı.

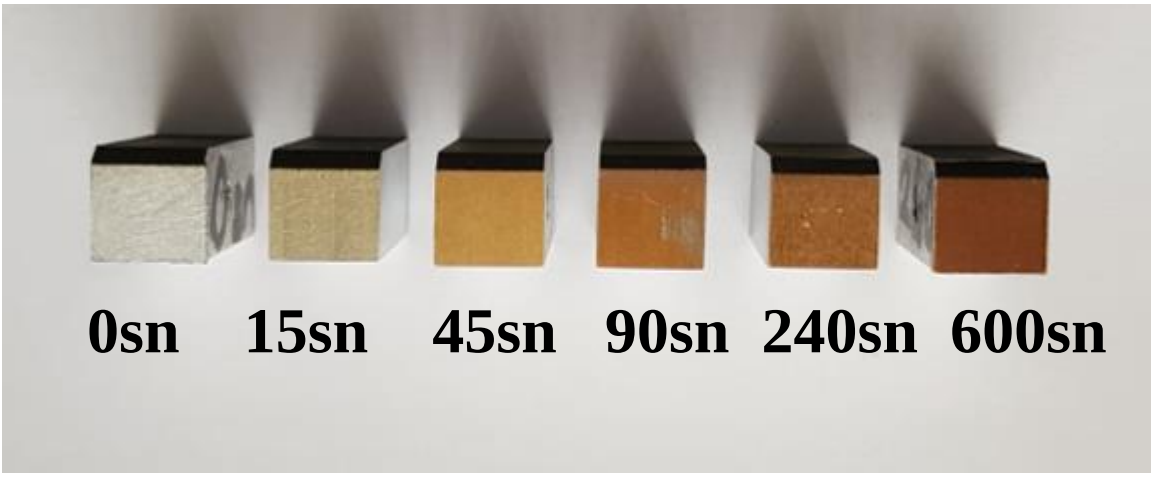
7.1. Renk Tonu Farkı

Deney parçalarındaki ton farkı alodin tankındaki bekleme sürelerine bağlı olarak gözle görülür şekilde farklılık gösterdi. Banyo içerisindeki bekleme süresi arttıkça renk tonunda koyulaşma görüldü. Şöyle ki; 15sn yapılan alodin kaplama işlemi açık sarı iken, 240sn ve 600sn olan kaplamalar koyu sarı hatta neredeyse kahverengi rengine dönüştüler.

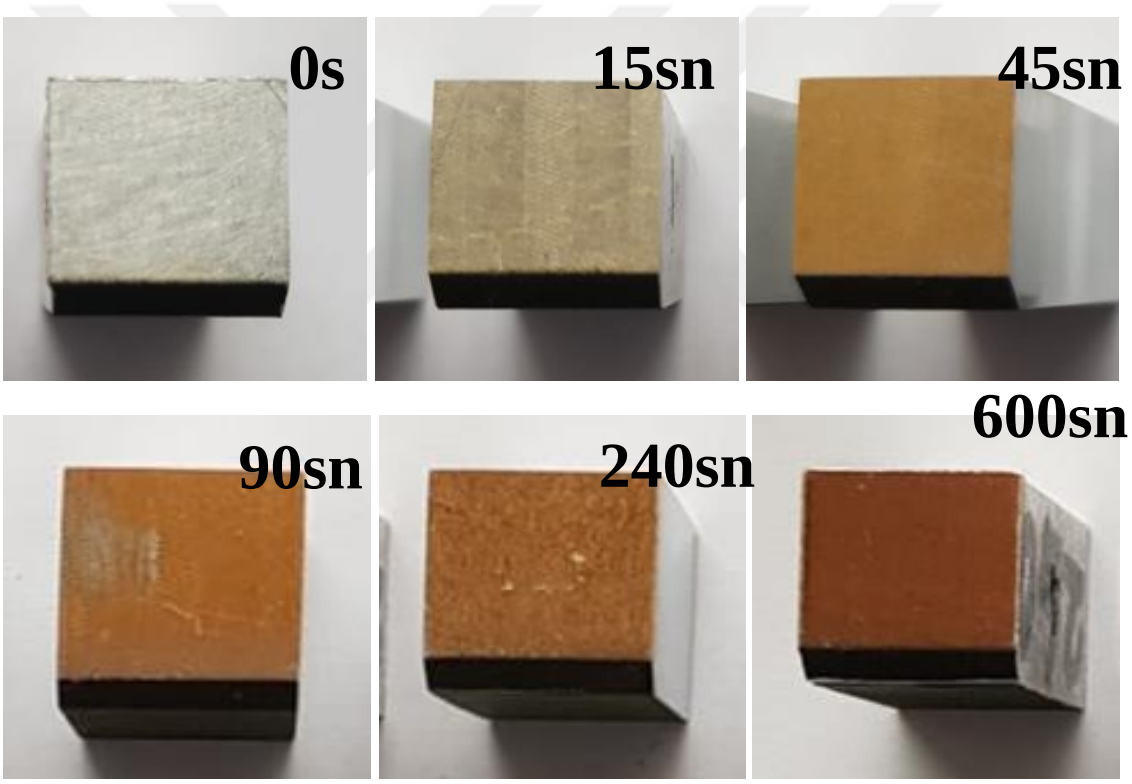
Şekil 7.1, şekil 7.2 ve şekil 7.3'de kaplama sonrası süre farklılıklarından oluşan renk tonlarına ait görseller verilmiştir.



Şekil 7.1. Kaplama süreleri ve renk tonları.



Şekil 7.2. Kaplama tabakalarının renk kartelası şeklinde topluca görünümü.



Şekil 7.3. Kaplama süreleri ve renk tonları.

7.2. Elektrik İletkenlik Testi

Bakır gibi diğer iletken malzemelerin 10 bin yıldan daha fazla bir tarihi olmasına karşın alüminyum ancak 100 yıldan beri teknik olarak üretilmektedir. Alüminyumun özgül elektrik iletkenliğinden sadece gümüş, bakır ve altınınki daha iyi olduğundan elektro teknik amaçlar için teknik bakımdan üretilmesi kısa süre önce gerçekleşmiştir. Bugün için alüminyum geleneksel rakip malzemelere karşı pek çok elektroteknik kullanım alanına girmekte veya yükselen bir kullanım payı kazanmaktadır [25].

Bakır alüminyuma göre ağırdır ve alüminyumun yoğunluğu, bakırın yoğunluğu %30'u civarındadır. Özellikle çelik kafes yapılarının hafif bir konstrüksiyonda olması oldukça önemlidir. Çünkü; ağırlığı olan iletkenler, onları taşıması için ağır olan direk mekanizmalarına ihtiyaç duyar. Hatta daha ağır olan bakır iletkenlere göre alüminyum iletkenlerin montajı daha basittir. Alüminyumun hafif olması, bakır iletkenlere nazaran birçok faydayı yanında getirmektedir [26].

Araştırmamızda deney parçalarına uygulanan alodin kaplamada havuz içerisindeki bekletilme süresinin elektrik iletkenliğinde yaratacağı farklılıklar incelendi. Elektrik iletkenliğini ölçmek için SIGMASCOPE cihazı ile faza duyarlı eddy akımı test yöntemi kullanıldı. Faza duyarlı eddy akımı yöntemi, kaplama kalınlığı ölçümü için geleneksel genliğe duyarlı eddy akımı yönteminin bir modifikasyonudur. ISO 21968'e göre faza duyarlı eddy akımı yöntemi herhangi bir malzeme üzerinde elektriksel olarak iletkenliği test etmek için kullanılır.

Elektrik iletkenlik cihazındaki ölçü birimi MS/m, 1.000.000 Siemens/m'ye karşılık gelen m başına Mega-Siemens anlamına gelir. Bu birim, Ohm x mm2 / m spesifik elektrik direnci için ölçü biriminin tersidir. Bu nedenle 1 Siemens, 1 / Ohm'a karşılık gelmektedir. Şekil 7.3'te elektrik iletkenlik ölçüm cihazı görülmektedir. İletkenli ölçümü probun numune yüzeyine teması ve akım geçirilmesi şeklinde ölçülmektedir.

Şekil 7.4'de elektrik iletken testi için kullanılan ölçüm cihazının görseli verilmiştir.



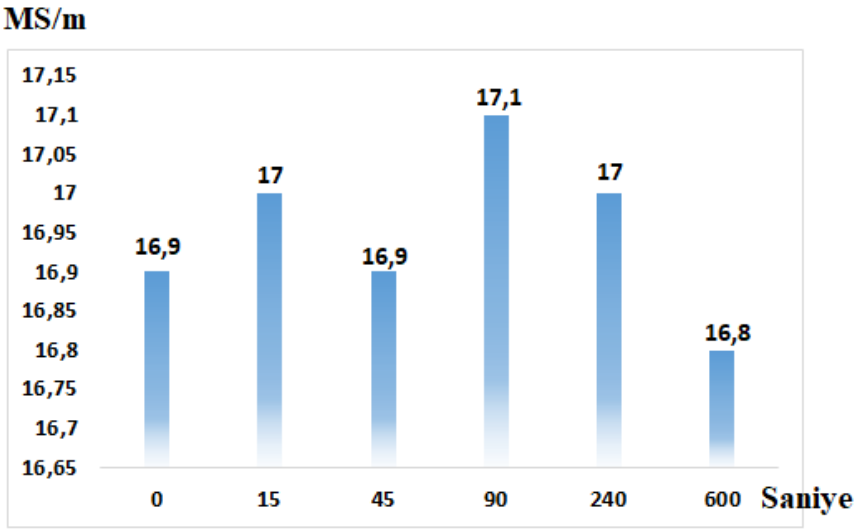
Şekil 7.4. Elektrik iletkenlik ölçüm cihazı

Spesifik elektrik iletkenliği doğrudan sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa iletkenlik o kadar düşüktür. İletkenlik her zaman 20 ^{o}C referans alınarak verilir.

Aşağıda deney parçalarının test sonucu elektriksel iletkenlik ölçüm değerleri verilmiştir. Şekil 7.5'deki iletkenlik alınma işlemi, şekil 7.6'daki tabloda ise iletkenlik değerlerinin grafiği verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi alodin kaplamanın iletkenliğe etkisi yok denecek kadar azdır.



Şekil 7.5. Elektrik iletkenliği test uygulaması



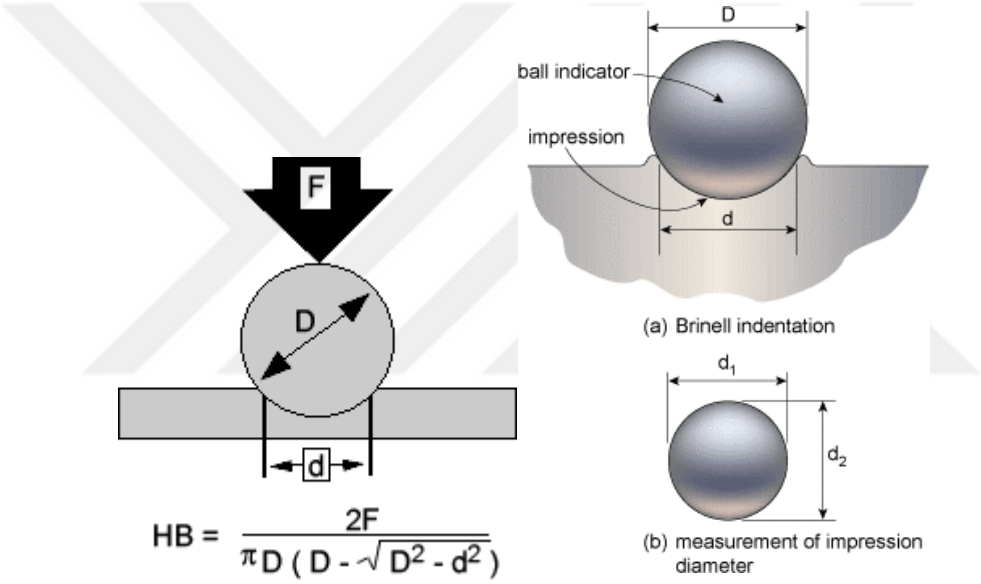
Şekil 7.6. Elektrik iletkenliği test sonucu

7.3. Sertlik Testi

Kaplama havuzunda bekleme süresinin sertlik üzerinde bir değişikliğe sebep olup olmadığını araştırmak için deney parçalarına sertlik testi uygulandı. Bu test Brinell sertlik ölçüm metodu ile gerçekleştirildi.

Yüzeye belirli bir yükün, belirli çaptaki sert bir malzemeden üretilmiş bir bilye yardımıyla belirli süre uygulanması sonucu oluşan iz çapının ölçülmesinden oluşur.

Brinell sertlik değeri (BSD); Belirli çapta bir bilye ile bir malzemenin yüzeyine belirli bir süre bastırmak yöntemiyle meydana getirilen kalıcı izin büyüklüğü ile ilgili bir değerdir. Brinell sertlik değeri, bilye üzerine uygulanan yükün numune yüzeyi üzerinde elde edilen küresel yüzey alanına bölünerek belirlenir. Şekil 7.7'de brinel sertlik ölçme işlemi şematiği gösterilmektedir.



Şekil 7.7. Brinell sertlik testi

$$BHN = \frac{F}{2\pi D\ (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Burada;
F: uygulanan kuvvet (N, kg)
D: Bilya çapı (mm^2)
d: İz çapı (mm^2)

Standart testlerde çoğunlukla 10 mm çapında çelik bilye, 300 kg yük ve 30 saniye bekleme süresi koşullarında yapılır. Diğer deney koşulları için BSD işaretinin yanına bilye çapı/yük/süre sırasına uygun olarak bilgiler eklenir. Örnek olarak; 60BSD 4/400/30 şeklinde bir gösterimde, deneyin 4 mm çapında bir bilye üzerine 400 kg yükün 30 saniye süreyle uygulanması

vurgulanmaktadır. Gerçekte, pratikte bu yükler oldukça büyük olduğu ve yüzeyde büyük ezilmeler yarattığı için daha küçük yük-bilye çapı kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu deneyin en önemli olumsuz yanıysa yük-çap kombinasyonlarının malzemeye bağlı şekilde değerlendirilmesi mecburiyetidir. Örneğin çelik bir malzemenin sertliği ölçülecekse, deneyde 2.5 mm çapında bir bilye kullanılırsa uygulanması gereken kuvvet 187.5 kgf'dir. Ancak bir Al alaşımının sertliği ölçülecekse bu durumda 31.25 kgf'lik bir kuvvet uygulanması yeterli olmaktadır [35-37].

Test numunelerimiz Emcotest DuraScan cihazı kullanılarak brinell cinsinden sertlik değerleri ölçüldü.

Şekil 7.8'de sertlik ölçümü için kullanılan cihazının görseli verilmiştir.



Şekil 7.8. Emcotest DuraScan brinell sertlik ölçüm cihazı

Numune parçaların sertlik değerini hata payı daha düşük ve doğru bir şekilde ölçmek için parçanın orta kısmından bir miktar taşlama işlemi yapılarak kaplama kaldırıldı. Bu taşlanan bölge üzerinden sertlik değerleri ölçüldü.

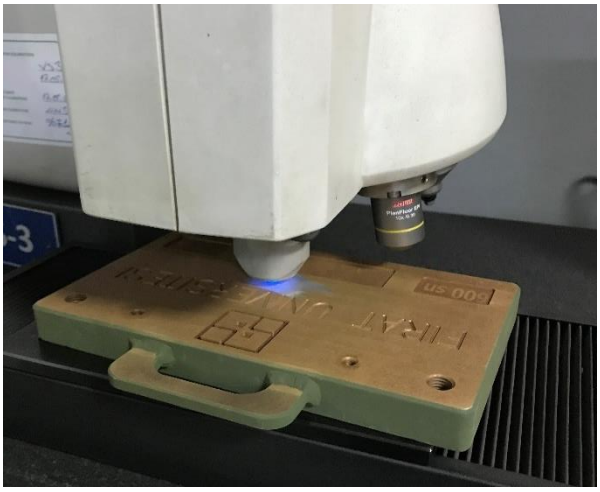
Şekil 7.9'de sertlik ölçümünde yapılan taşlama işlemi sonrası yüzey görseli verilmiştir.



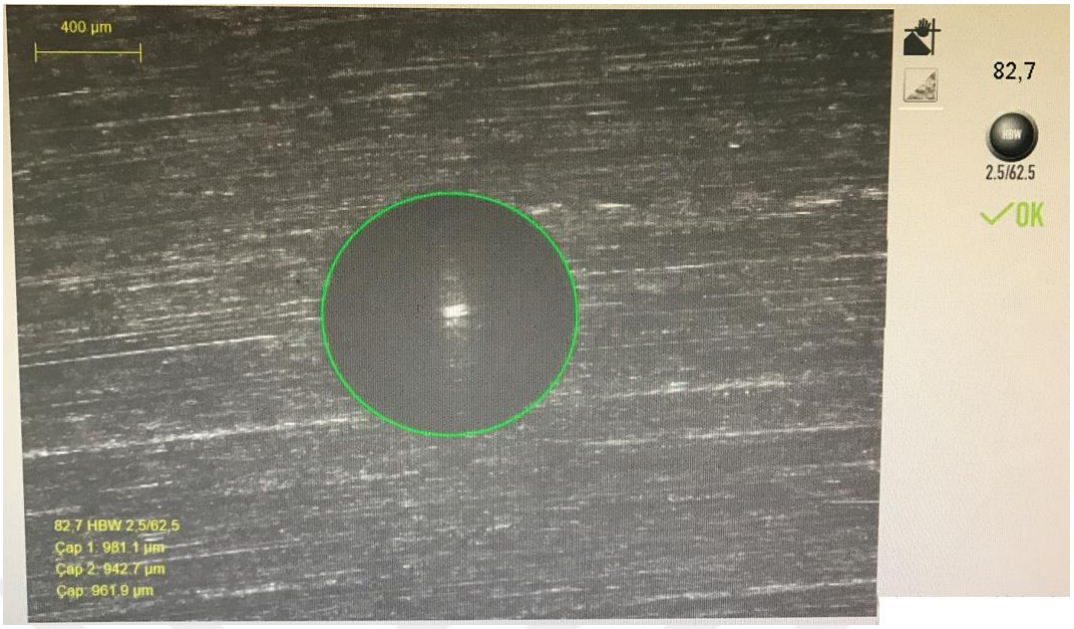
Şekil 7.9. Numune üzerinde taşlama yapılan yüzey

Kaplama havuzunda bekleme süresinin sertlik üzerinde bir değişikliğe sebep olup olmadığını araştırmak için deney parçalarına sertlik testi uygulandı. Bu test Brinell sertlik ölçüm metodu ile gerçekleştirildi.

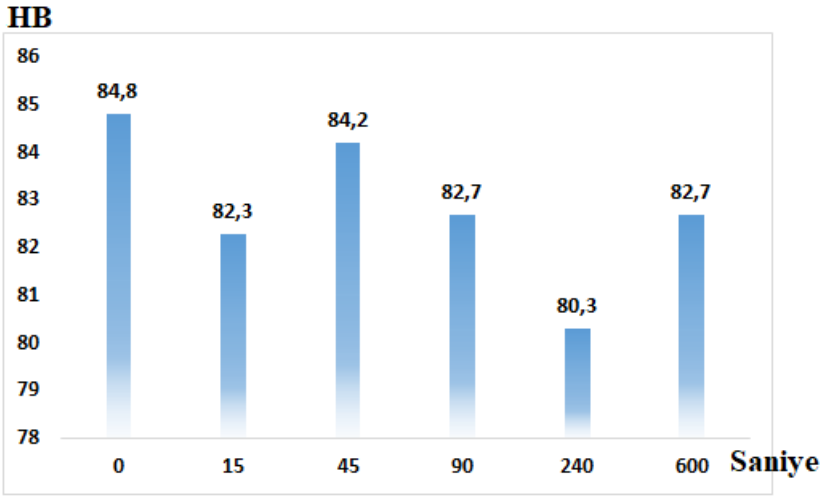
Şekil 7.10'da sertlik ölçümü esnasında çekilmiş bir görüntüsü, şekil 7.11'de 600 saniye kaplama süresi olan numunenin sertlik ölçüm sonucu, şekil 7.12'de ise tüm numunelerin sertlik ölçüm sonuçları grafik halinde verilmiştir.



Şekil 7.10. Numune sertlik ölçümü



Şekil 7.11. 600sn kaplama süresi olan numunenin sertlik ölçüm sonucu

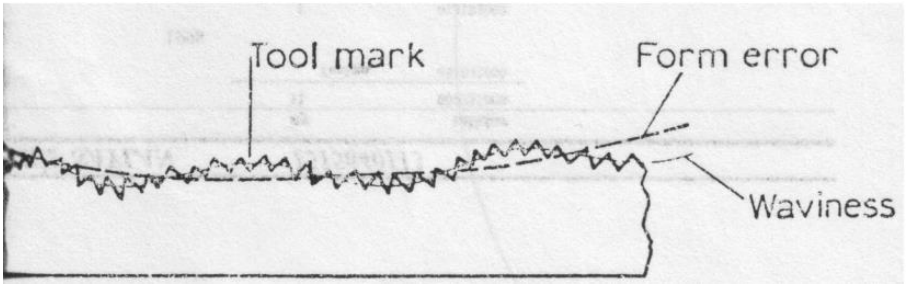


Şekil 7.12. Brinell sertlik ölçümü sonrası çıkan sonuçlar

7.4. Ortalama Yüzey Pürüzlülük Testi (Ra)

İşleme metodu, kesicinin cinsi ve işlenen malzemeye bağlı olarak işleme sırasında fiziksel, kimyasal ve ısıl faktörlerle, kesen ve kesilen arasındaki mekanik hareketlerin de etkisiyle işlenmiş yüzeylerde, genellikle istenmediği halde tabii olarak bazı izler oluşur. Nominal yüzey çizgisinin altında ve üstünde düzensiz saplamalar meydana getiren bu duruma yüzey pürüzlülüğü denir. Yüzey pürüzlülüğün tahmin etmek ve ilerleme veya kesme hızı gibi işleme parametlerinin uyumunu değerlendirmek ürün kalitesini yükseltir ve istenilen yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesini sağlar. [23]

Şekil 7.13'de genel yüzey hatalarına örnek verilecek bir görsel verilmiştir.



Şekil 7.13. Genel yüzey hataları

Üretim prosesleri tamamlanan bir parçanın çalışma ortamına göre kendilerine özel geometrik toleransları olabilir. Bu özel toleranslardan bir tanesi de yüzey pürüzlülüğüdür. Üretim esnasında oluşabilecek kesici takım izleri veya çevresel şartlardan kaynaklı (parçanın düşmesi, ezilme, darbe alma vb.) yüzeyde bozulmalar meydana gelebilir.

İş parçasının çalışacağı bölgede sürtünmeyi minimuma indirmek için daha yüksek bir yüzey kalitesi istenebilir. Kusursuz işlenmiş bir yüzey, sürtünme ömrünü, yorulma mukavemetini ve korozyon direncini önemli miktarda iyileştirir. Ek olarak yüzey sürtünmesine neden olan temas, aşınma, ısı iletimi, yağ filminin tutulması ve dağıtılması kabiliyeti, kaplama veya direnç ömrü benzeri parçaların çeşitli fonksiyonel özelliklerini de etkiler. Bu durumlarda teknik dokümanda yüzey pürüzlülüğünü gösteren geometrik sembol kullanılarak, izin verilebilir maksimum yüzey pürüzlülüğü verilir. İş parçasının yüzeyindeki pürüzlülük bu toleransı aşmamalıdır. Aksi takdirde parça müşteri tarafından hurda olarak değerlendirilebilir.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak bilinen Ra değeri ortalama çizgisinden ölçülen değişimlerin aritmetik ortalamasıdır. Yani iş parçası yüzeyindeki tepecik ve çukurcukların eksen çizgisine olan ortalama derinlik ölçüsüdür.

Şekil 7.14'de numunelerin yüzey pürüzlülüğünün yapıldığı cihazın bir görseli verilmiştir.

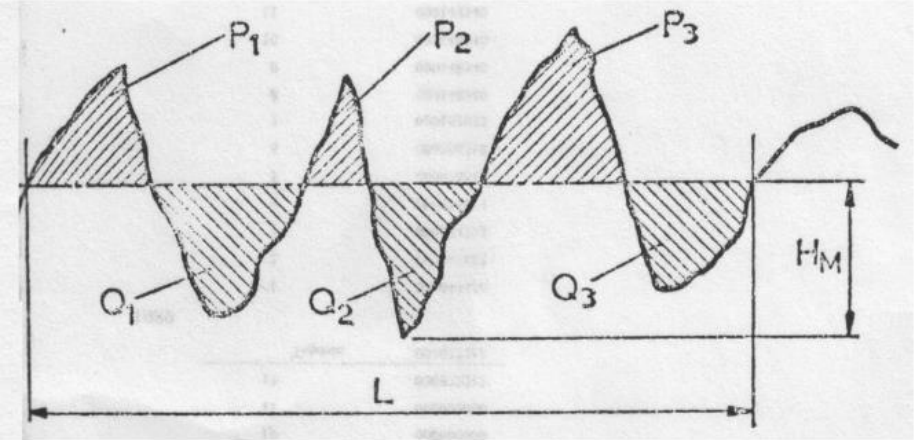


Şekil 7.14. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

Bir yüzeydeki pürüzlülüğü bulmak için şu yollar takip edilmelidir.

- ✓ Önce yüzeyin en alt (dip) tarafına değecek şekilde düz bir (x-x) ekseni çekilir.
- ✓ Tam sayıda dalga boyu uzunluğuna sahip olacak şekilde bir (L) uzunluğu seçilir.
- ✓ Planimetri kullanılarak eğri altındaki çizili (A) alanı bulunur. Daha sonra Hm=A/L hesaplanır. Ve (C-C) ekseni çizilir.

Şekil 7.15'de yüzey pürüzlülük hesabı için gerekli parametrelerin gösteri verilmiştir.



Şekil 7.15. Yüzey pürüzlülük hesaplama örnek eğrileri

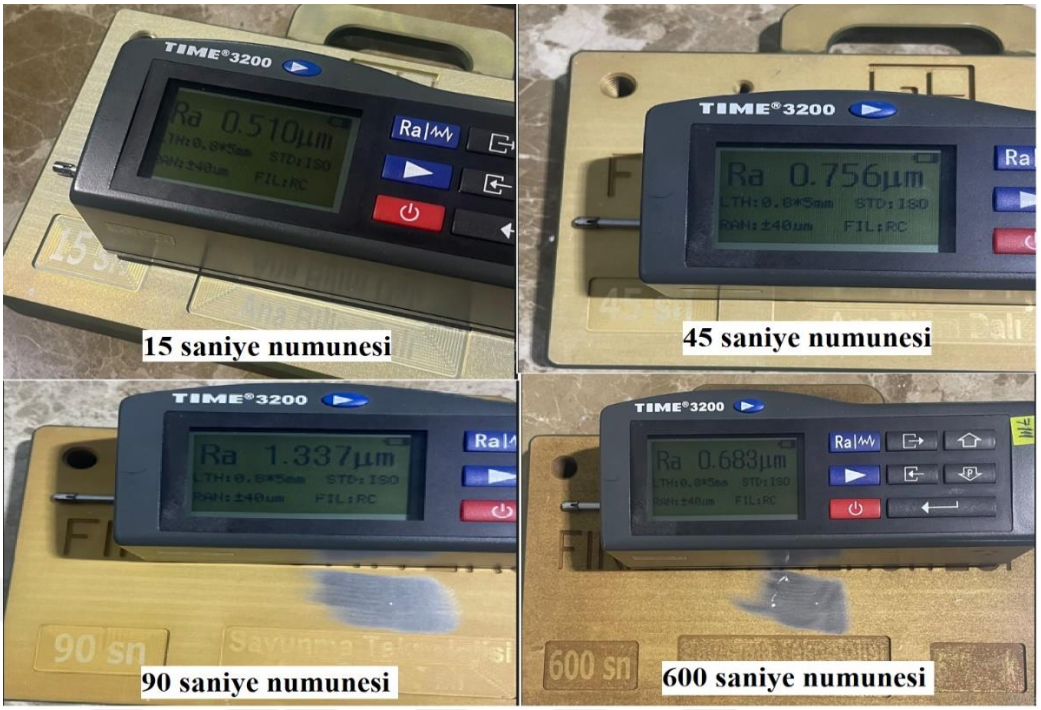
- ✓ (Hm) yüksekliğindeki eksen çizildikten sonra eksen üzerinde (P1+P2+P3+….vs) ve eksen altında (Q1+Q2+Q3+…..vs) ki alanların toplamı (L) uzunluğuna bölünüp (1000/Vq) ile çarpılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$Ra\ (\mu m) = \left(\frac{P\ alanı + Q\ alanı}{L}\right) . \frac{1000}{Vq}$$

Burada; P ve Q alanları (mm2), L: uzunluğu(mm) Vq: düşey büyültme değerini temsil eder[44,47].

Araştırmamızda ise deney parçalarında Time3200 model yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak, her numune parçasının 5 ayrı bölgesinde ölçüm yapılmıştır. Cihazın kalibrasyonun güncel olduğuna dikkat edilmiştir.

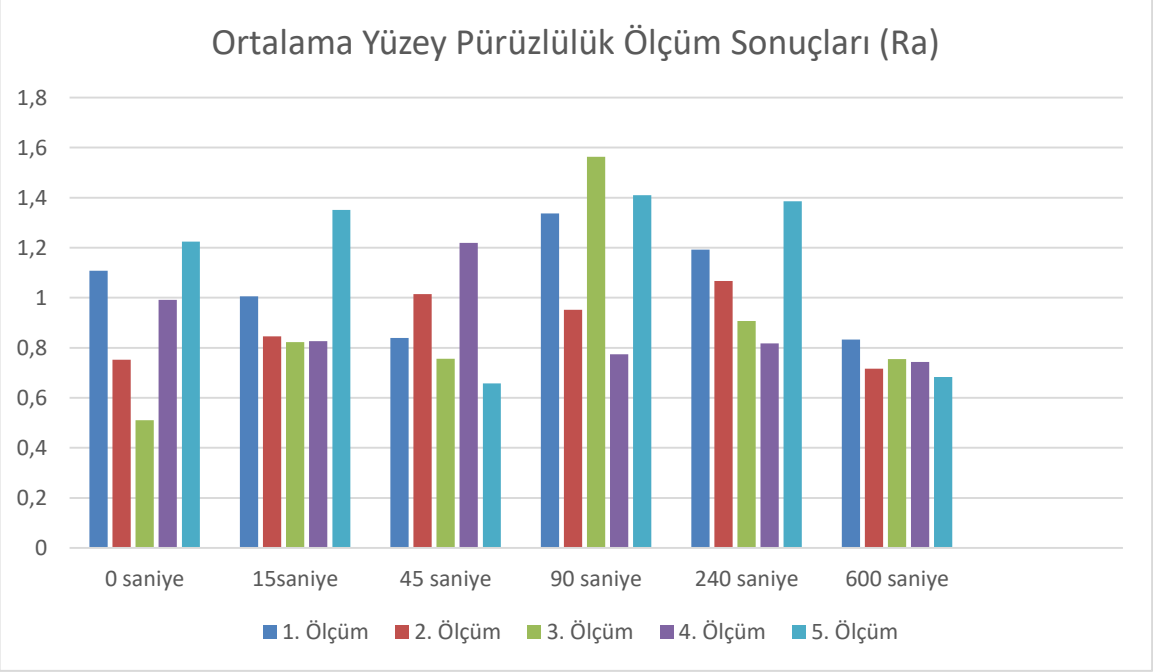
Şekil 7.16'da yüzey pürüzlülük ölçümü yapılarken çekilmiş birkaç görüntü verilmiştir.



Şekil 7.16. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları örneği

Deney parçalarının 5 farklı yerinden alınmış olan yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları aşağıdaki gibidir.

Şekil 7.17'de numunelerin yüzeyinde çıkan yüzey pürüzlülük sonuçları grafik olarak, tablo 7.1'de ise tablo olarak verilmiştir.



Şekil 7.17. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları örneği

Tablo 7.1. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

Numune Adı	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm
0 saniye	1.108µm	0.752µm	0.510µm	0.992µm	1.224µm
15 saniye	1.006µm	0.846µm	0.823µm	0.827µm	1.351µm
45 saniye	0.839µm	1.015µm	0.756µm	1.220µm	0.658µm
90 saniye	1.337µm	0.952µm	1.563µm	0.774µm	1.410µm
240 saniye	1.192µm	1.067µm	0.907µm	0.818µm	1.386µm
600 saniye	0.833µm	0.717µm	0.755µm	0.744µm	0.683µm

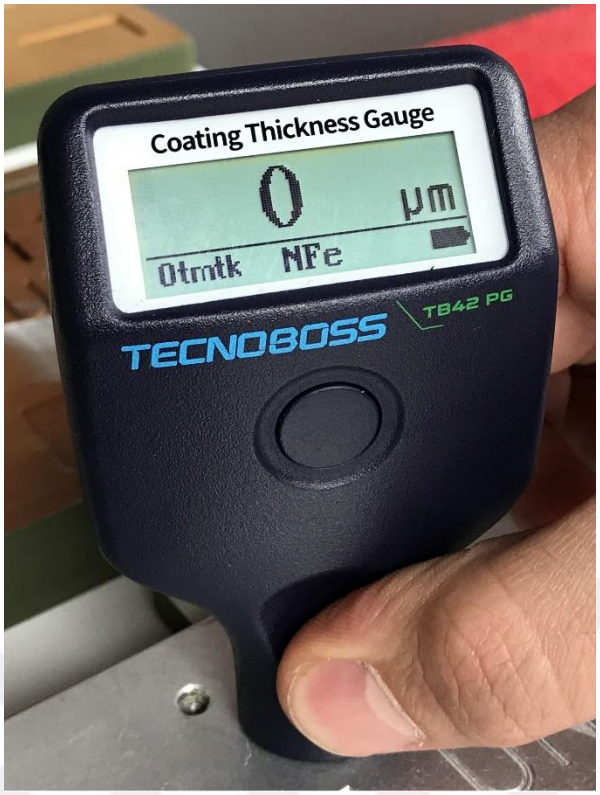
Ölçüm öncesinde deney parçaları yüzeyleri saf alkolle temizlenmiştir. Ölçümler özel bir şirketin kalite kontrol odasında yaklaşık 25^0C sıcaklık ortamında gerçekleştirilmiştir. Test yapılan cihazın kalibrasyon tarihine dikkat edilmiştir.

7.5. Kaplama Kalınlığı Testi

Savunma alanında alodin kaplamanın tercih edilme sebeplerinden birisi de kaplama kalınlığı oluşturmamasıdır. Bu özelliği sayesinde üretimi tamamlanan bir parçaya alodin kaplama uygulaması yapıldığında ölçüsel olarak herhangi bir değişikliğe yol açmaz. Özellikle toleransın düşük olduğu sıkı geçme çaplarında alodin kaplama oldukça başarılıdır.

Alüminyum malzemelere uygulanan diğer kaplama yöntemleri noktasal olarak yaklaşık 0.01mm ile 0.04mm arasında kaplama kalınlığı alabilmektedir. Örneğin siyah eloksal kaplama veya tenifer(nitrasyon) kaplama noktasal olarak yaklaşık 0.02mm kalınlığında bir film tabakası oluşturur. Bu kaplamaların yapılacağı ürünler kaplama kalınlığı da düşünülerek üretilmelidir. Delik çapları 0.02mm büyük, mil çapları ise 0.02mm küçük işlenmelidir ki kaplama sonrasında istenilen ölçüye gelebilsin. Aksi durumda üretilen parçaların kaplama sonrasında montaj aşamasında problem yaşanma ihtimali yüksektir.

Şekil 7.18'de kaplama kalınlığının ölçümü için kullanılan cihazın görseli verilmiştir.



Şekil 7.18. Kaplama kalınlık ölçüm cihazı.

Deney parçalarında kaplama kalınlıklarını incelemek için dijital bir kaplama kalınlık ölçüm cihazı kullanıldı. Bu cihazın alüminyum parçalardaki doğruluk hassasiyeti 0-50µm arasındaki ölçümlerde yaklaşık 1 µm'dur.

Şekil 7.19'de kaplama sonrası ölçüm sonuçlarına ait görseller verilmiştir.



Şekil 7.19. Kaplama kalınlık ölçüm değerleri

Her deney parçasının en az 5 farklı bölgesinden ölçüm yapılarak kalınlık değeri ölçülmeye çalışılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda farklı sürelerde yapılan kaplamaların malzeme yüzeyinde kalınlık oluşturmadığı tespit edilmiştir.

7.6. Balistik Test

Balistik kelimesi, merminin itme, uçuş ve çarpma etkisini inceleyen bilimin kısaltması olarak nitelendirilir. Atışla birlikte merminin silah namlusunu terk etmesine kadar olan olaylara iç balistik adı verilir ve genellikle ateşlenen merminin başta gaz olmak üzere yanıcı bir madde üreterek ve bunun birkaç tonluk bir itme basıncıyla namlu ucundan çıkış hızıdır. Dış balistik ise merminin namlu dışındaki hareketlerini inceler. Balistik darbe olayının incelenmesinde karşılaşılan sorunlardan biri bir cismin hasar görmeden dayanabileceği hızın yani balistik hızın veya kritik darbe hızının belirlenmesidir.

Balistik test ile aynı et kalınlığına sahip farklı sürelerde kaplama yapılmış alüminyum malzemelerden oluşan numunelerin balistik testi sırasında, balistik uçta mermi tarafından uygulanan hasar mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır. Hassas kuvvet okuyucularından oluşan bir düzenek kurulmuş ve çalışma prensipleri belirlenmiştir. Bu deney mermi ucunun bir deformasyon bölgesi oluşturduğunun yanı sıra, hassas ölçümlerle belirlenmesi mümkün olan malzeme üzerindeki etkiyi absorbe etme durumunu da göstermiştir.

Numuneler üzerindeki farklı sürelerde yapılan kaplamaların, malzeme üzerindeki balistik özelliğini incelemek amacıyla düşen ağırlıklı düşük hız balistik testi yapılmıştır. Aynı et kalınlığına sahip 6 farklı numuneyi deforme etmek için 1 kg ağırlık kullanılarak aynı koşullar altında düşük hızlı balistik testler gerçekleştirilmiştir. Alüminyum malzemelerin düşen ağırlığa karşı tepkisi balistik özelliğine göre sınıflandırılan bir test aparatı kullanılarak düşük hızlı darbede incelenmiştir. Sonuç ve değerlendirmeler ise; ağırlığın numuneye çarptıktan sonra yaratmış olduğu deformasyonun büyüklüğü, deldikten sonraki ilerleme mesafesi ve geri tepmedeki yüksekliği baz alınarak yapılmıştır [38].

Şekil 7.20'de balistik test esnasında çekilmiş bir görsel verişmiştir.

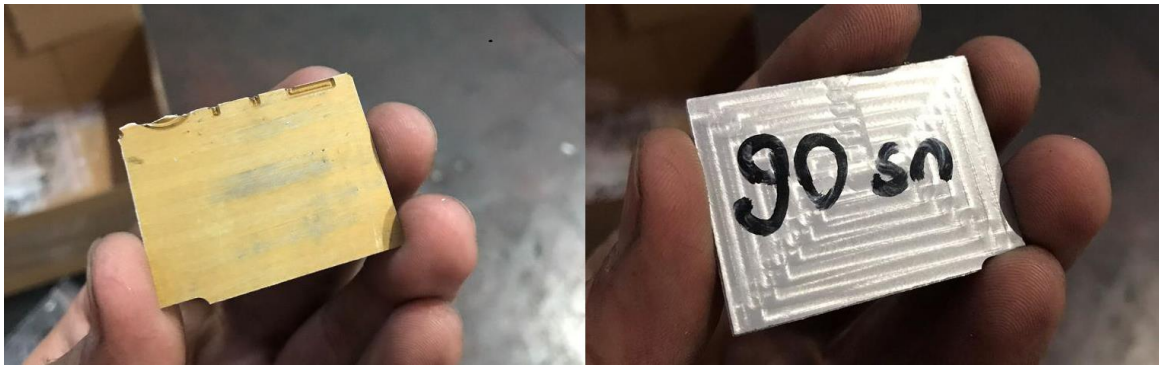


Şekil 7.20. Balistik test esnasında olan bir numune parça görüntüsü

7.6.1. Düşen Ağırlıklı Düşük Hız Balistik Test Metodu

Test numuneleri Tablo 7.2'deki ölçülere uygun olarak hazırlandı. Numune hazırlama işlemi talaşlı imalat yöntemiyle yapılmıştır. Bu sayede herhangi bir ısı girdisi olmamış ve malzeme yapısı etkilenmemiştir. Hazırlanan test numunelerinin yüzeyleri alkol ile temizlenmiş ve tüm numunelerin aynı koşullarda test edilmesi sağlanmıştır.

Şekil 7.21'de balistik test için hazırlanmış numunelerim örnek görselleri verilmiştir.

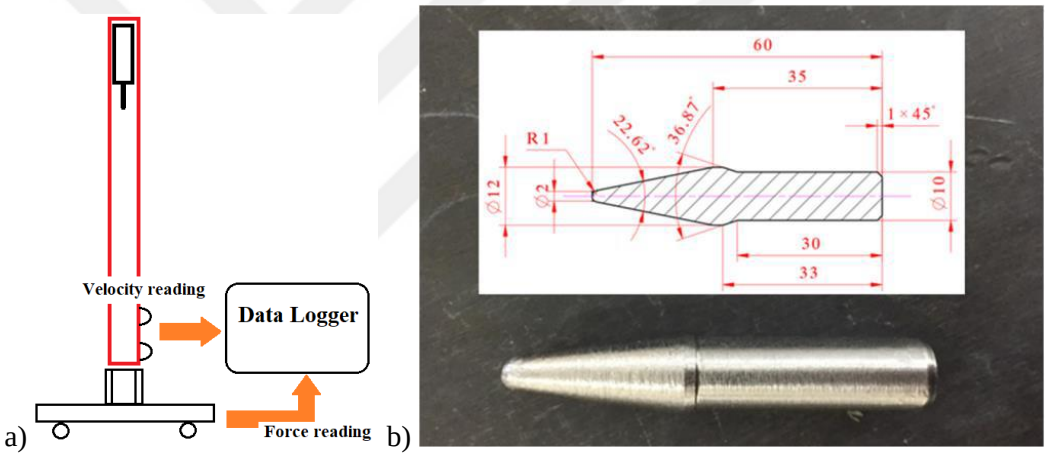


Şekil 7.21. Balistik test için hazırlanmış numune örneği

Numuneler	Boyutlar	Kalınlık
1. Numune 0sn	30x40mm	1.20mm
2. Numune 15sn	30x40mm	1.20mm
3. Numune 45sn	30x40mm	1.20mm
4. Numune 90sn	30x40mm	1.20mm
5. Numune 240sn	30x40mm	1.20mm
6. Numune 600sn	30x40mm	1.20mm

Şekil 7.22. Deney esnasından kullanılan numune boyutları

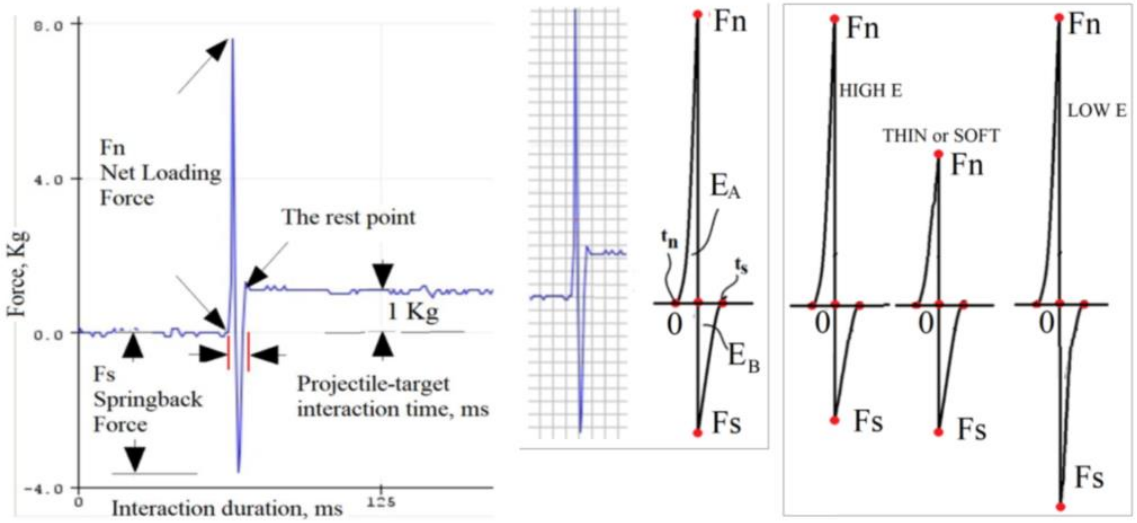
Düşük hızlı balistik test, 2.5m yükseklikten yerçekimi etkisiyle kendi ağırlığıyla bırakılan 1 kg çelik çubuktan oluşan düzenek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 7.22).



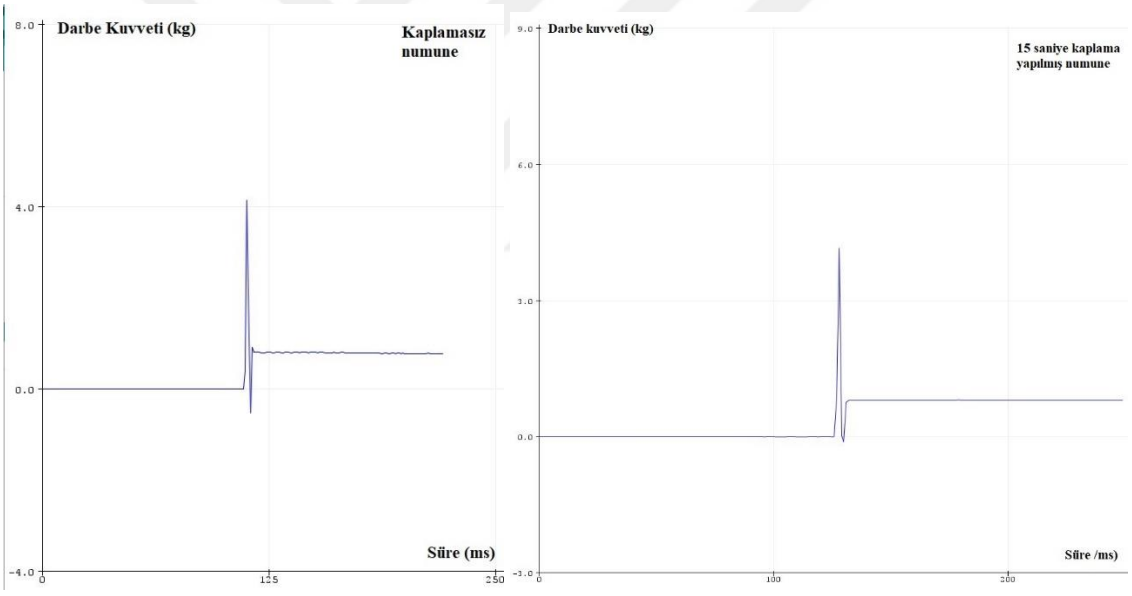
Şekil 7.23. a) Veri toplama ünitesi, b) Merminin teknik çizimi

Şekil 7.23 a) 4 adet 50 kg kuvvet sensöründen oluşan kuvvet okuma şemasını göstermektedir. Alüminyum numuneler sabitlenmemiştir. Zorunlu okuma tarama hızı analog sinyal ve 16MHz'dir. Bu da minimum 0.001ms'lik bir hassasiyette değerler vermektedir. Sensör yanıt verme süresi 1.5ms'den daha azdır. Test için sertleştirilmiş (48 HRC) bir mermi ucu kullanılmıştır. Şekil 7.23.b'de gösterilmiştir. Ortalama 6.2m/s mermi hızı elde edildi. Ancak temas anındaki hız darbe testlerinden ölçülmüştür. Darbe testlerinden kaynaklanan girintilerin çapları dijital kumpas ile ölçülmüştür. Gelen sinyalleri kaydetmek için ise arduino tabanlı bir veri kaydedici kullanıldı ve çıktılar bir bilgisayar ortamına kaydedildi.

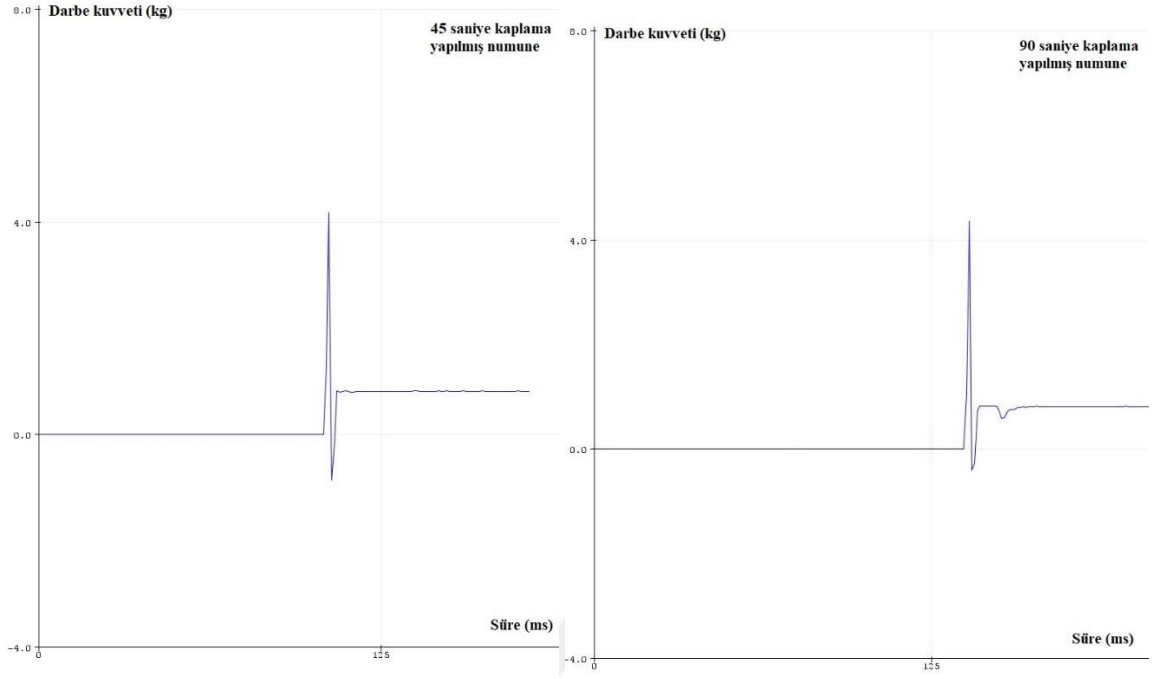
Şekil 7.24'te grafikleri okumak için yardımcı olacak bilgiler verilmiştir.



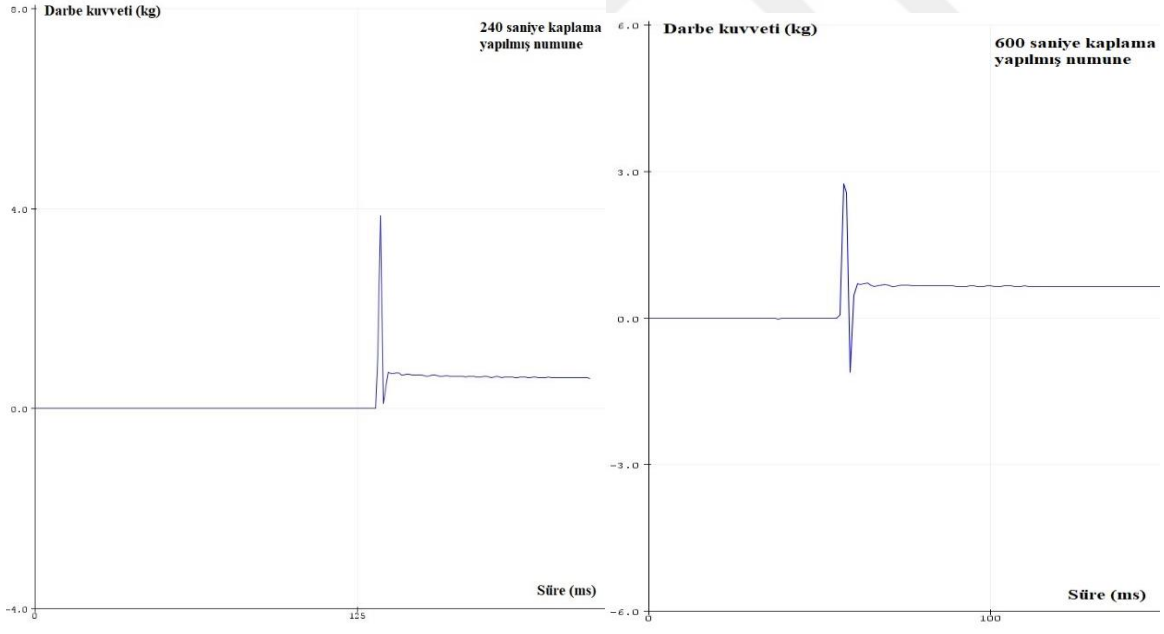
Şekil 7.24. Darbe kuvvetini ve darbe süresini gösteren analiz sonucu



Şekil 7.25. Kaplamasız ve 15 saniye kaplama uygulanmış numunelerin balistik test davranışları.



Şekil 7.26. 45 saniye ve 90 saniye kaplama uygulanmış numunelerin balistik test davranışları



Şekil 7.27. 240 saniye ve 600 saniye kaplama uygulanmış numunelerin balistik test davranışları

Tablo 7.2. Balistik test sonrası net kuvvet, geri tepme kuvveti, delik çapları tablosu

	Kaplamasız	15 Saniye	45 Saniye	90 Saniye	240 Saniye	600 Saniye
Net Kuvvet, Fn, Kg	4.1	3.9	4.1	4.15	3.95	2.9
Geri Tepme Kuvveti, Fs, Kg	-0.4	-0.05	-0.7	-0.2	0	-1.2
Delik çapları, mm	8.53	8.33	6.76	7.40	7.15	5.68

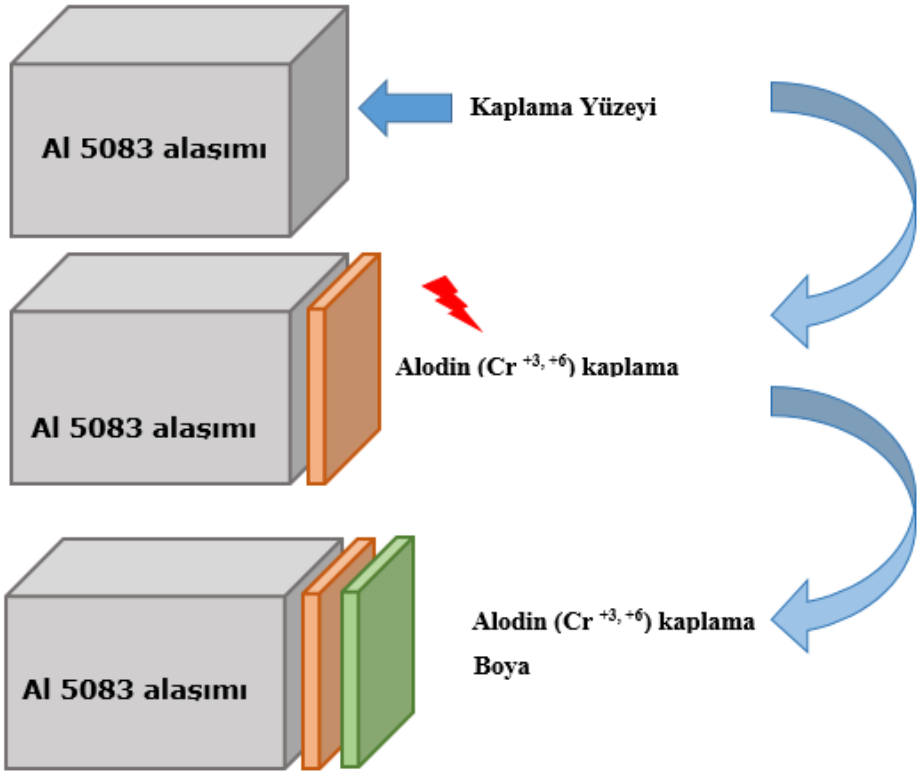
Alodin kaplanmış Al-5083 alaşımı numunelerini karşılaştırmak için 1 kg çelik kütlenin serbest düşme hızında düşük hızlı balistik testi yapılmıştır. Test sonrası elde edilen veriler tablo 7.2'de verilmiştir. Darbe kuvveti ölçümleri ve darbe hasarı sonrasında 1 kg cismin geri esneme etkisi ile reaksiyon kuvveti oluşumu Şekil 7.25-7.27'de verilmiştir. Balistik etki bölgesi ve reaksiyon kuvvetinin ölçüm alanı açıkça görülebilir. Tipik olarak, darbe sönümleme etkisi, kütle ve/veya sertliğe, yani malzemenin elastisite modülüne orantılı olarak değişir. Sert matrisin, aşınma direncine benzer bir etkiyle darbeyi emmesi ve hasarı azaltması beklenir. Şekil 7.25-7.27 görülebileceği gibi, dikkate alınması gereken dört öğe vardır, Fn, tn, Fs ve ts. Deneyler, başlangıç hızının tüm deneyler için aynı olmasına rağmen, Fn'nin her zaman aynı olmadığını göstermiştir. İlk kuvvetteki eşitsizliğin, metalin ne kadar işleme (alodinleme) sürecinden geçtiği ve dolayısıyla malzeme türü ile ilgili olduğuna inanılmaktadır. Burada eğrinin ikinci kısmı, B daha çekici ve Fs, Fn ile karşılaştırılabilir. Tane boyutu, ısıl işlem geçmişi vb. gibi birçok nedenden dolayı Fn ve Fs arasındaki fark orantılı değildir ve güvenilir değildir, dolayısıyla bu, eğrinin ilk yarısının ikinci yarısıyla karşılaştırılması olan başka bir yaklaşımı gerektirir. Eğrinin ilk yarısının alanı A, ikinci yarısının alanı B olsun; şu ana kadar elde edilen sonuçlardan genel bir varsayım olarak yazılabilir; $A \neq B$, $Fn > Fs$ ve $tn \neq ts$. Bu varsayımlar, hedef malzeme şeklini değiştirmeye dirençli veya deformasyona dayanıklı olduğunda geçerlidir. Şekil 7.25-7.27'de gösterildiği gibi, etki tepkileri diyagramında iki farklı alan vardır. İki farklı bölge, enerji dengesi açısından A ve B alanlarının karşılaştırılmasını sağlayacak şekilde iki ayrı bölgeye ayrılabilir [39][40].

7.7. SEM ve EDS Analizi (Taramalı Elektron Mikroskobu)

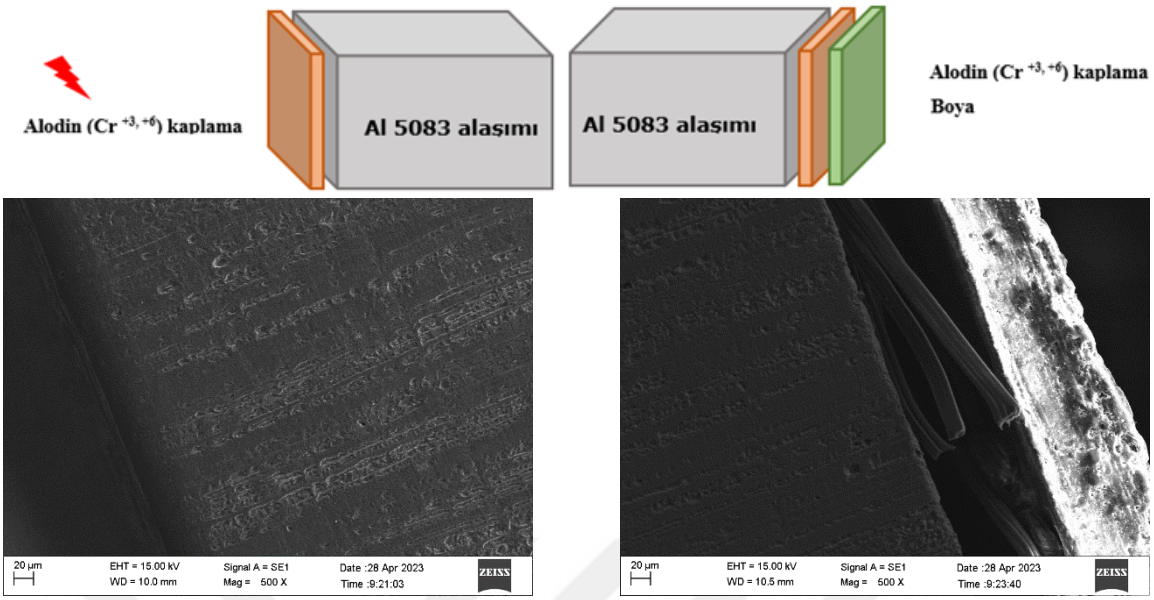
7.7.1. Alodin Kaplama ve Boya Kaplama Arayüzeylerinin İncelenmesi

Taramalı elektron mikroskobu, odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topograf ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller ilgili detektörlerce toplanarak bilgisayar ekranına aktarılır ve görüntü elde edilir [39,45]. Şekil 7.28'de alodin kaplama prosesi ve elde edilen numunelere göre SEM incelemelerinin

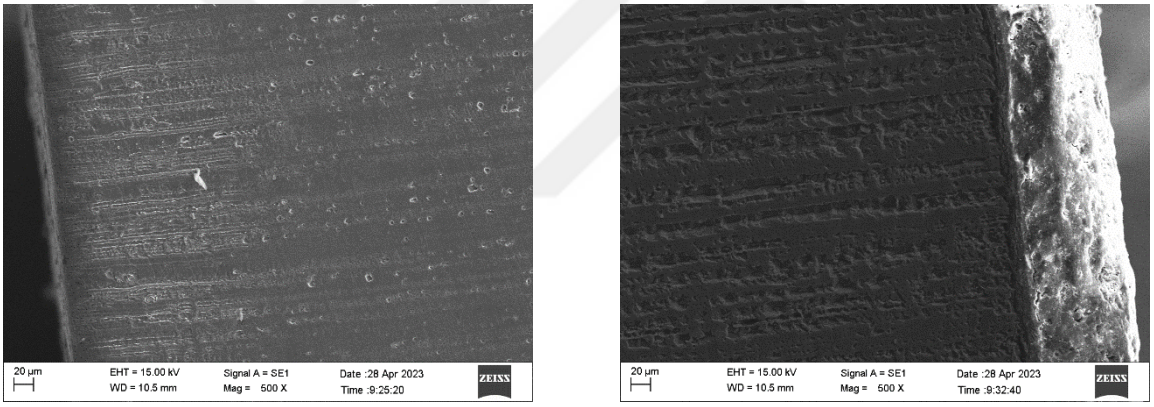
nasıl yapıldığı gösterilmektedir. Al-5083 önce yüzeyleri temizlenmiş akabinde alodin tanklarında farklı sürelerde kaplanmış ve kuruduktan sonra boyanmıştır. Bu işlemlerden sonra SEM görüntüleri sol tarafı alodin kaplı yüzeylerden sağ taraf ise alodin kaplı boyanmış yüzey olacak şekilde resimler alınmıştır. Resimler dikkatli incelendiğinde boya tabakası daha belirgin olmak kaydı ile mikroyapılardaki değişimler rahatlıkla görülmekte ve ayırt edilmektedir. Kaplamasın numune Şekil 7.29 da boya tabakasının yapışma yüzeyinde boşluk hemen göze çarpmaktadır. Ancak sonraki numunelerde bu durum apaçık farklıdır. Artık boya tabakası aralıklı değil numune yüzeyine yani alodin kaplı yüzeye tam yapışık durumdadır. Alodin kaplı sol yana bakan resimler incelendiğinde klasik kaplama numuneleri gibi olmasa da kaplama tabakası difüzyon bölgesi yapıya benzer beyaz bir tabaka oluştuğu görülmektedir. Şekil 7.35-7.39'da sırasıyla 15 saniye alodin işlemine tabi tutulmuş numune ile 45 saniye alodin işlemine tabi tutulmuş numuneler görülmektedir. Noktasal analiz yapılmış yüzey bölgelerinde Cr oluşumuna rastlanmıştır. Ancak 7.36 nolu resimde verilen EDS analizinde ise bölgesel alınmış bir sonuç vardır. Elde edilen bu sonuç ile de kullandığımız Al-5083 alaşımın ana malzemesine tekabül eden değerler bulunmuştur. Şekil 7.30'da 15 saniye, şekil 7.31'de 45 saniye, şekil 7.32'de 90 saniye, şekil 7.33'de 240 saniye ve şekil 7.34'de 600 saniye kaplama yapılmış numunelerin ayrı ayrı SEM görüntüleri verilmiştir.



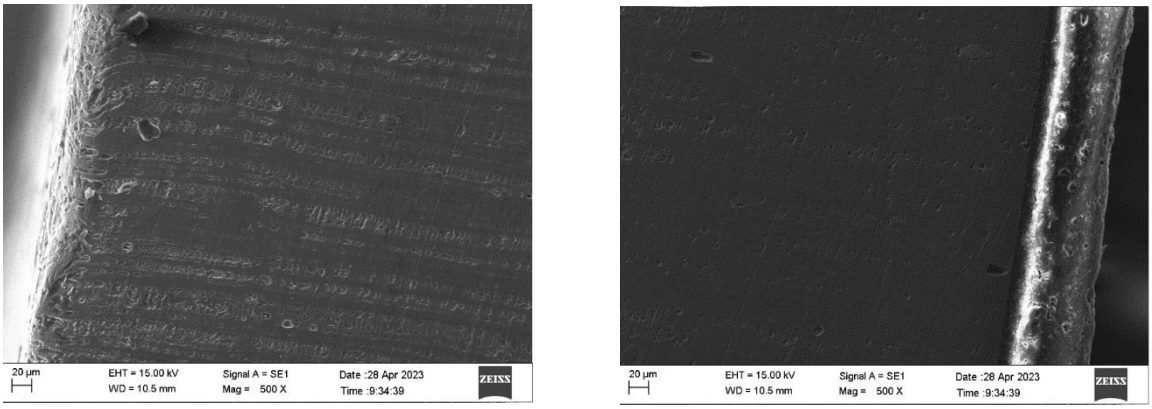
Şekil 7.28. Numunelerin hazırlanması ve incelenme yüzeyleri şematik görüntüsü



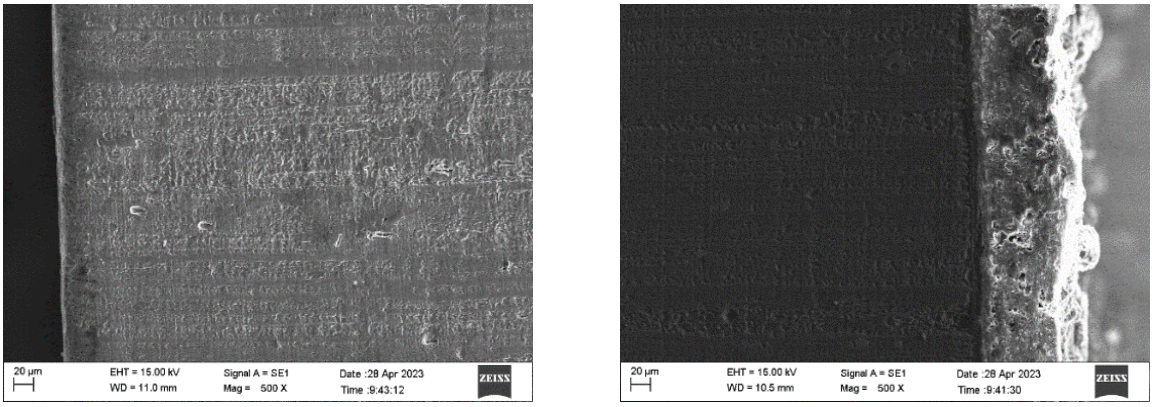
Şekil 7.29. Kaplamasız numune yüzeyleri SEM Görüntüsü



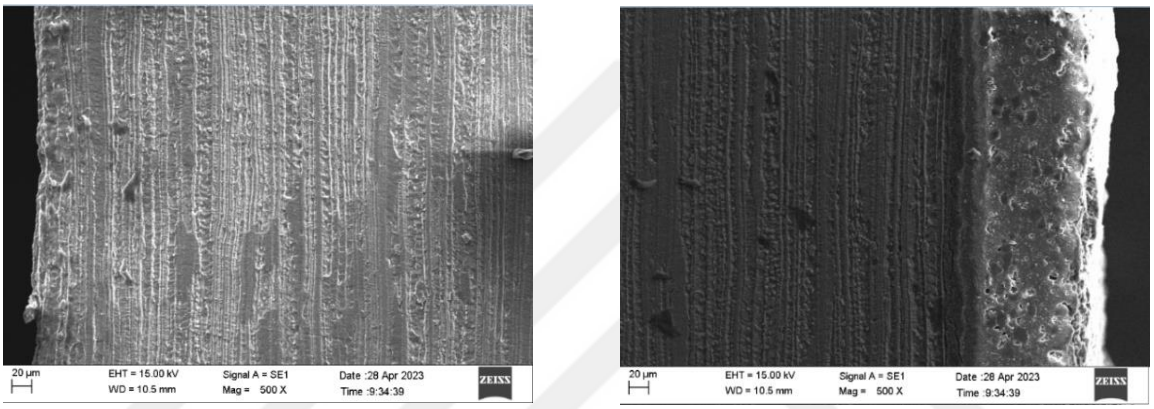
Şekil 7.30. 15 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü



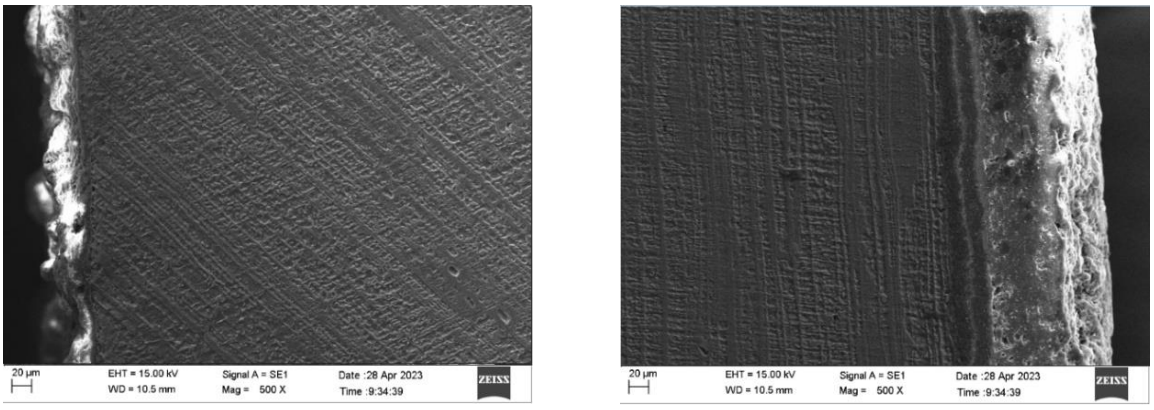
Şekil 7.31. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü



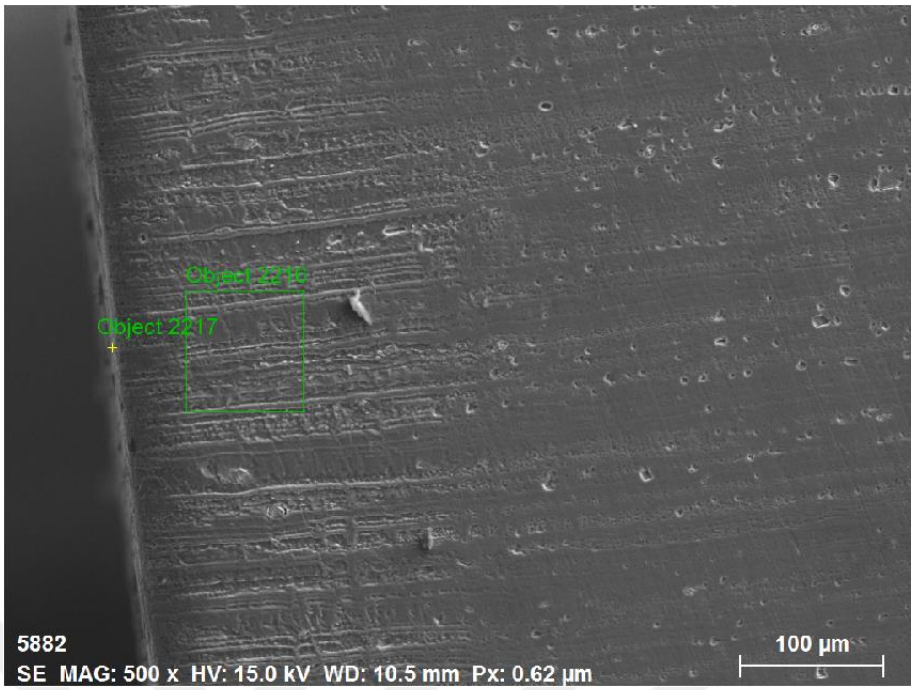
Şekil 7.32. 90 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü



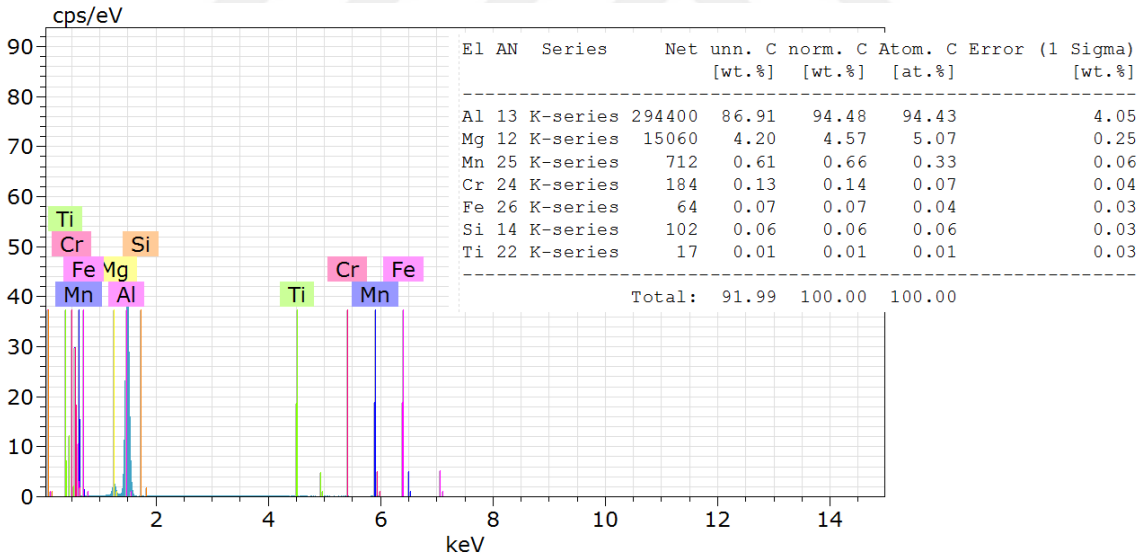
Şekil 7.33. 240 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü



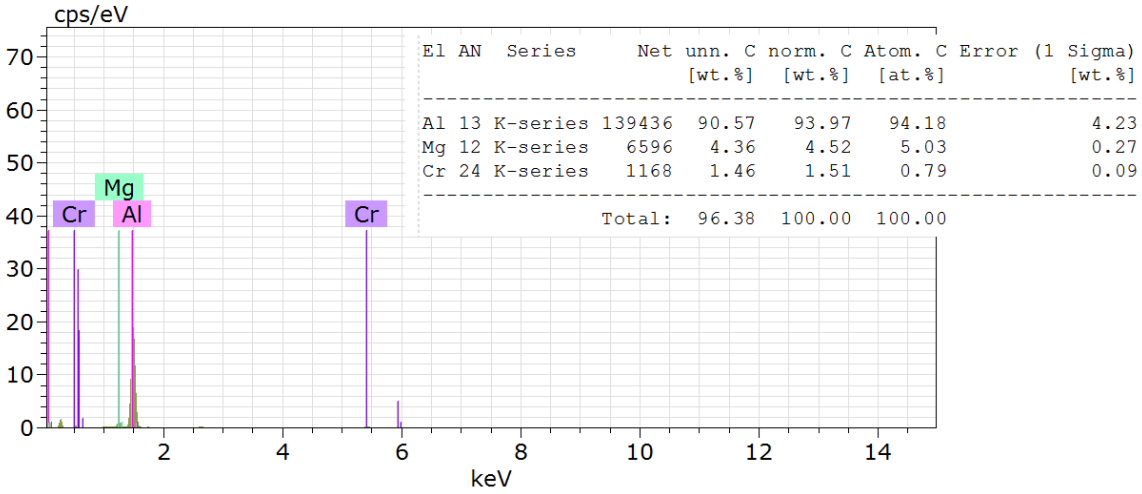
Şekil 7.34. 600 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM Görüntüsü



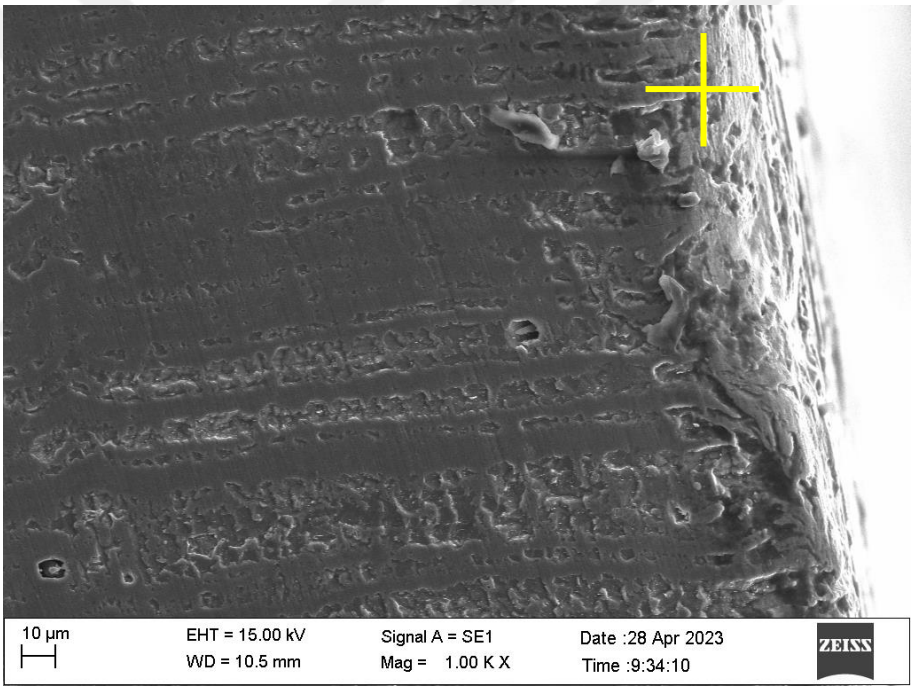
Şekil 7.35. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsü



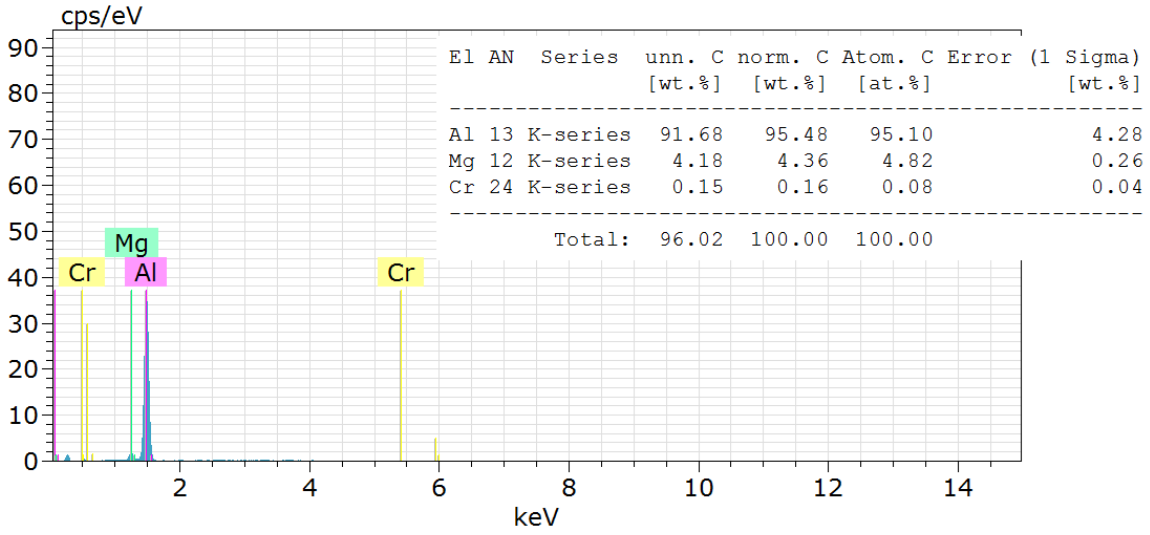
Şekil 7.36. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsüne ait analizler



Şekil 7.37. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsüne ait analizler.



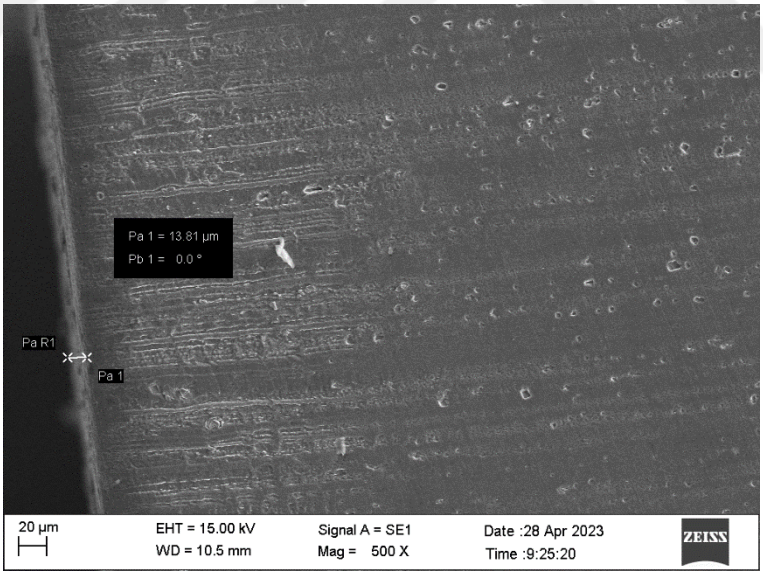
Şekil 7.38. Numune üzerinden alınmış bir EDS görüntüsü



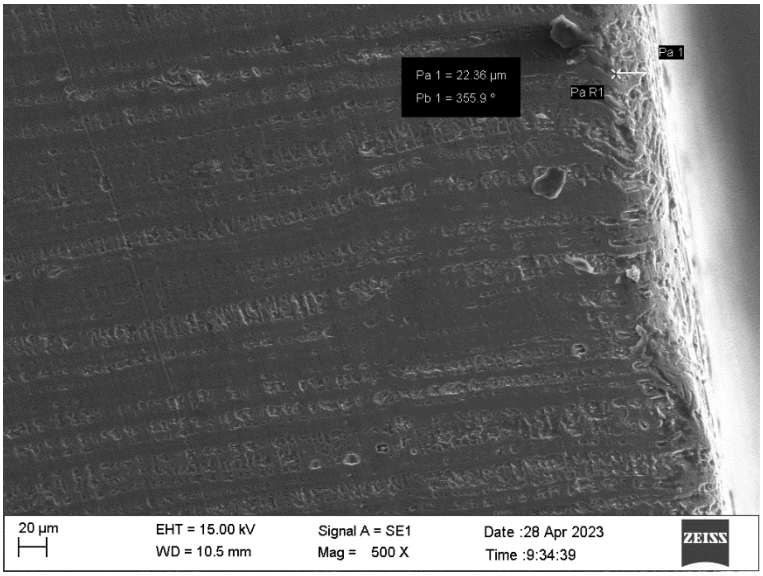
Şekil 7.39. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM-EDS analizi

7.7.2. Alodin Kaplama Yüzeylerinin İncelenmesi

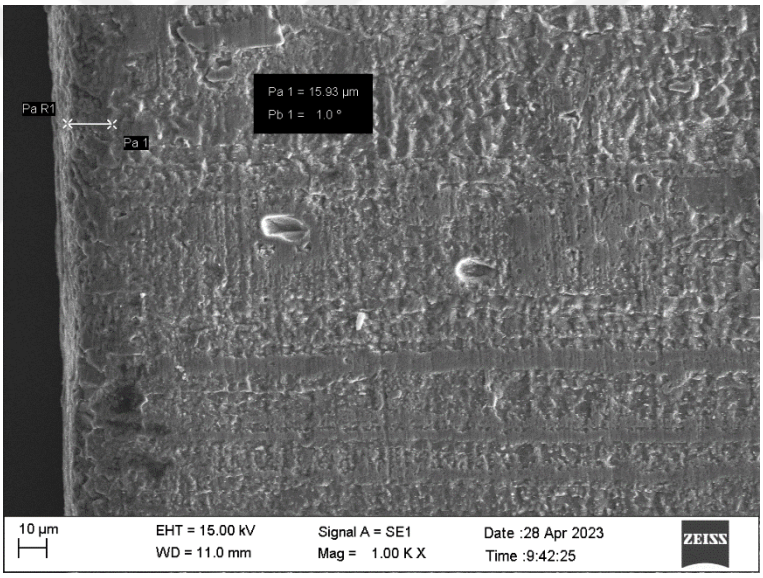
Şekil 7.40 ile şekil 7.44 arasında kaplamalı parçalara ait SEM görüntüleri verilmiştir. Bu SEM görüntülerinde alodin kaplamanın Al-5083 malzeme üzerindeki oluşturduğu film tabakası görünmektedir.



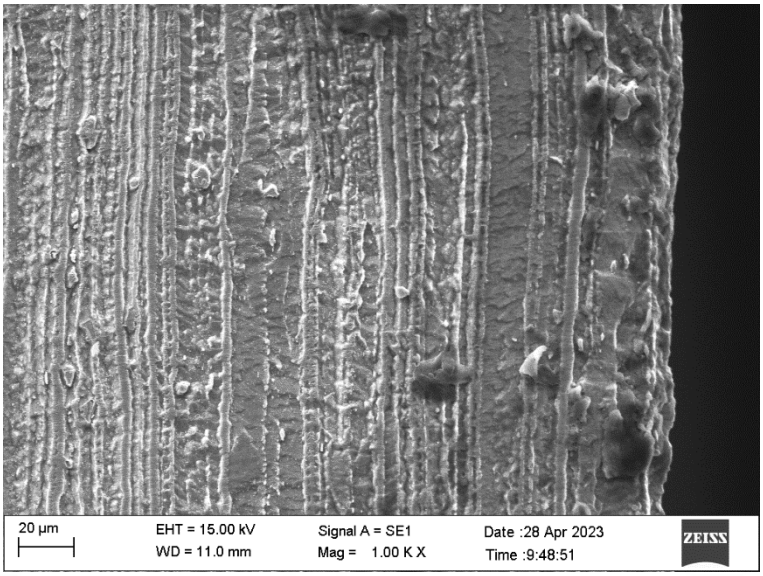
Şekil 7.40. 15 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü.



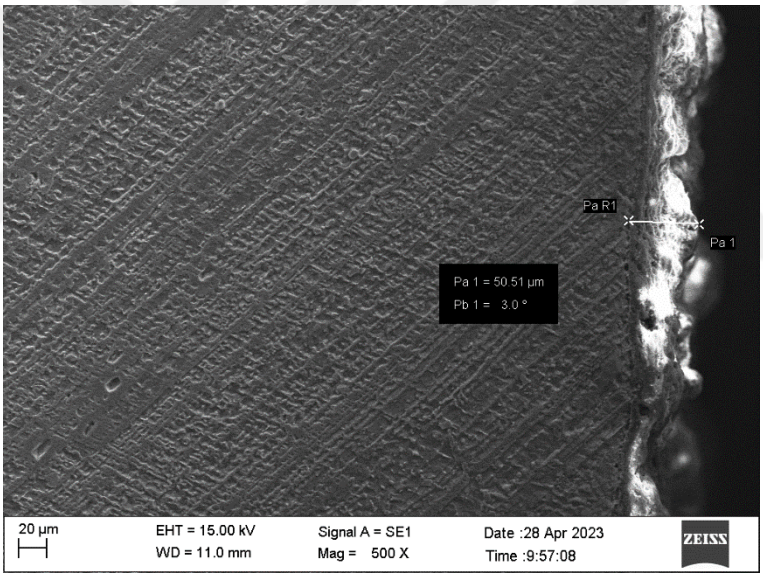
Şekil 7.41. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü



Şekil 7.42. 90 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü

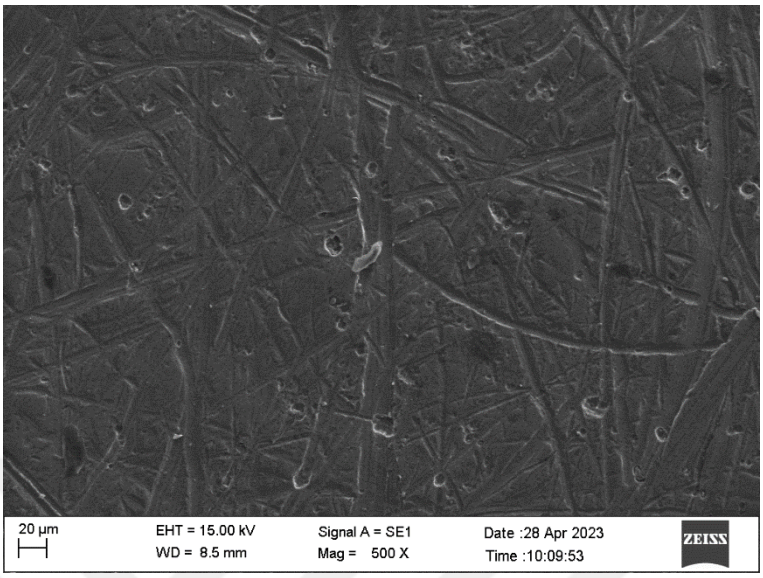


Şekil 7.43. 240 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü

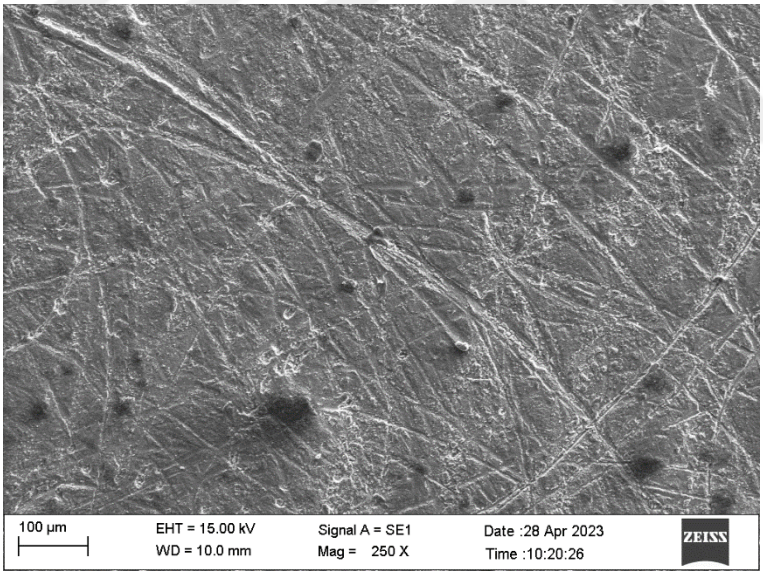


Şekil 7.44. 600 saniye kaplamalı numune yüzeyleri SEM kalınlık görüntüsü

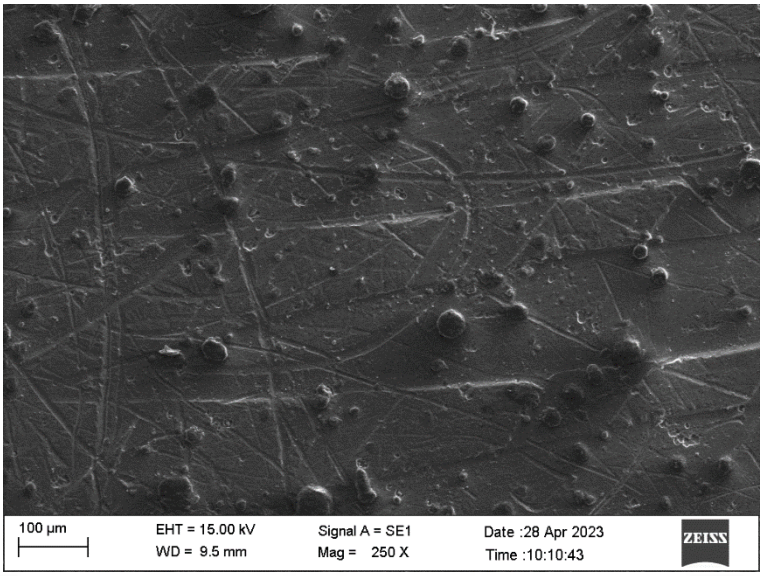
7.7.1. Alodin Kaplama Üst Yüzeylerinin İncelenmesi



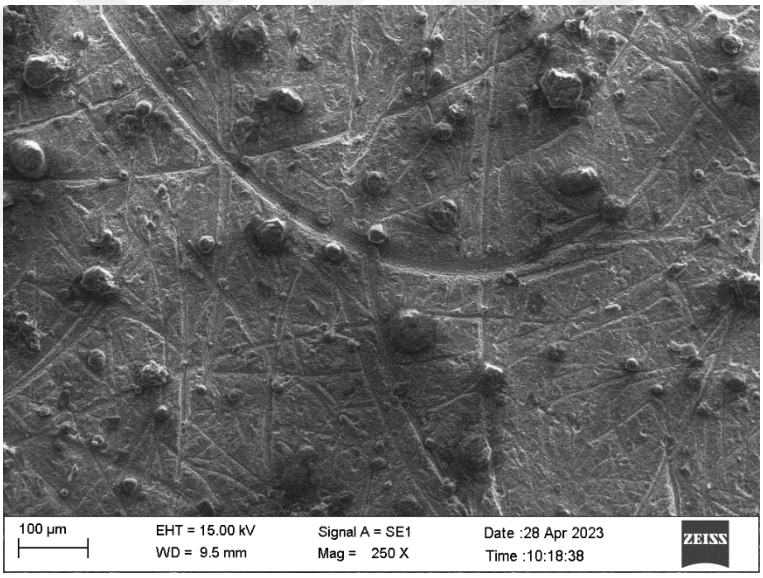
Şekil 7.45. Kaplamasız Al-5083 numune yüzeyi SEM görüntüsü.



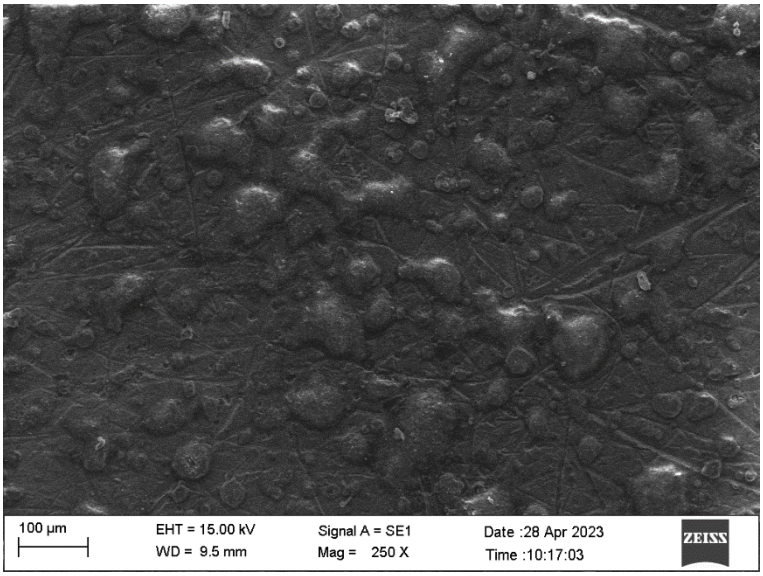
Şekil 7.46. 15 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.



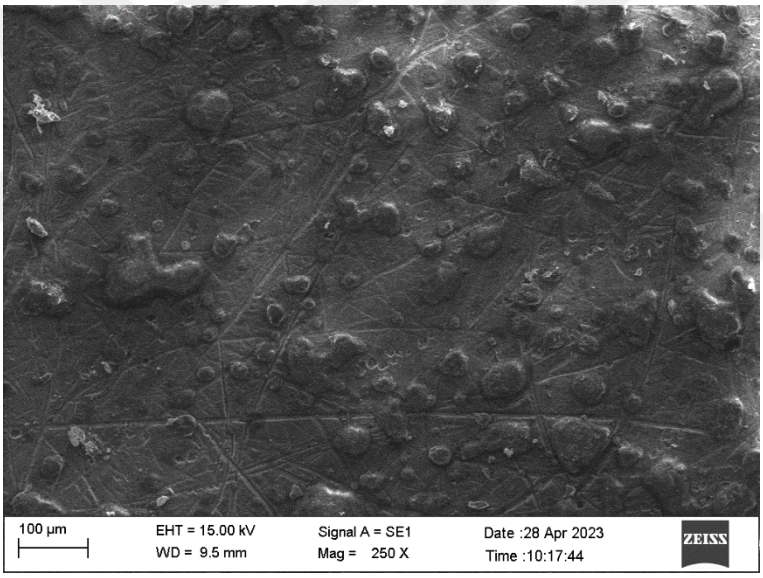
Şekil 7.47. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.



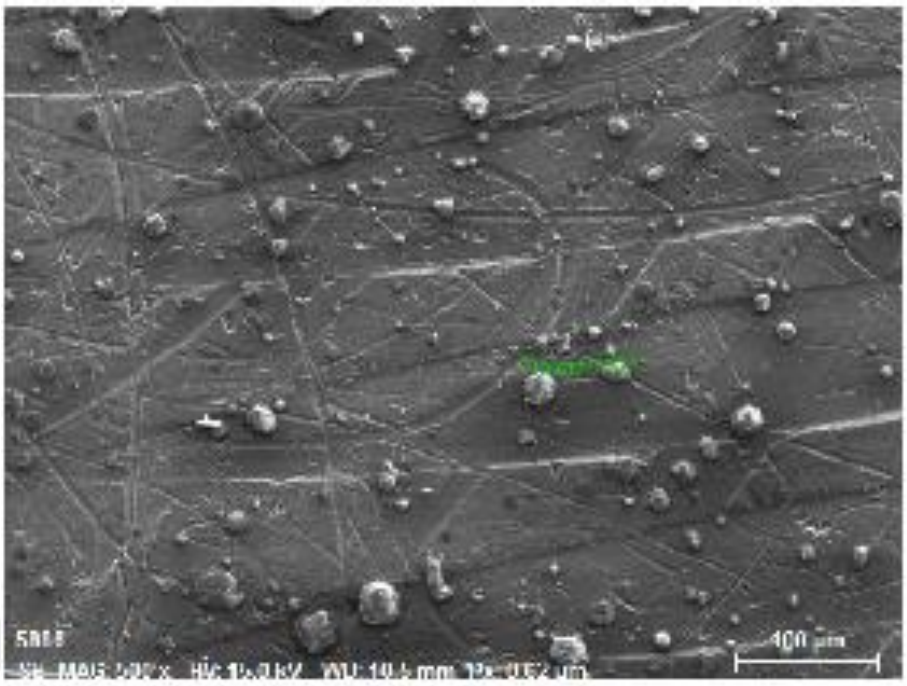
Şekil 7.48. 90 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.



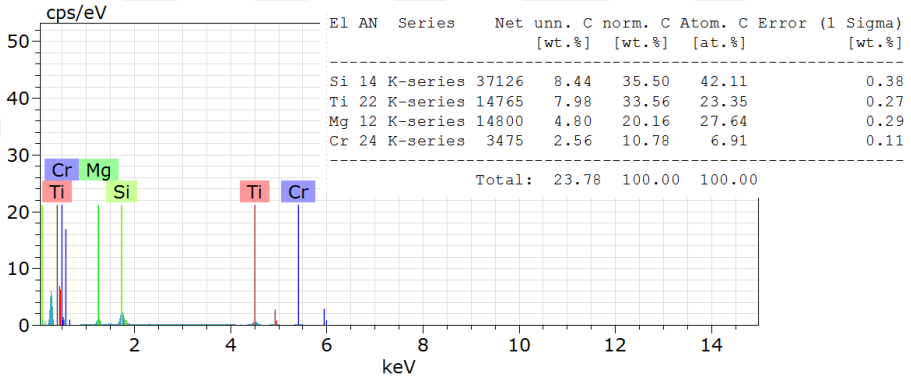
Şekil 7.49. 240 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 7.50. 600 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 7.51. 90 saniye kaplamalı numune yüzeyi SEM görüntüsü.



Şekil 7.52. 45 saniye kaplamalı numune yüzeyi EDS analizi görüntüsü.

Şekil 7.45-7.51 arasında alodin kaplanmış numunelerin üstünden alınmış yüzey morfolojileri görülmektedir. Şekil 7.45 ‘de alodin işlemine tabi tutulmamış ham Al-5083 yüzeyi görülmektedir. Görüldüğü gibi yüzey temiz ve pürüzsüz sayılabilecek haldedir. Sonrasında Şekil 7.46 ve sonrasındaki numunelerde yüzeyde biriken alodin malzeme çıkıntıları vardır. Oluşan bu parçacık şekilli çıkıntılar dış katmanın kaplanma0sının en belirgin etkisidir. Şekil 7.52’de ki SEM EDS analizinde de görüldüğü gibi alınan analiz sonuçlarında yüzeydeki Cr oranının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Özellikle Cr yoğunluğunun artması çıkıntıların oluşması görülmektedir. Alodin kaplı numunelerin tamamında benzer yapılar oluşmuştur. Bu benzer eğilim ve yapılar Al-5083 üzerinde oluşturulan alodin kaplama kalitesinin de olduğunu kademeli olarak iyileştiğini ve oluştuğunu göstermektedir.

8. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında bir Al-5083 H111 malzemenin ham malzeme tedarikinden başlayarak; numune hazırlama, alodin kaplama ve boya uygulamasına kadar olan tüm süreçleri savunma sanayinde kullanılan bir parça gibi özenle yapıldı. Tez araştırma konusu olarak; alodin kaplama esnasında parçaların alodin tankında bekletilme süreleri değiştirilmiştir. Bu süreler sırasıyla; 0, 15, 45, 90, 240 ve 600 saniyedir. Parçalardan birisine ön hazırlık işlemleri uygulanmış fakat kaplama işlemine tabii tutulmamıştır.

Yapılan bu çalışmaların sonucunda elde edilen 6 adet numune parça üzerinde elektrik iletkenlik testi, brinell sertlik testi, boya kalınlık testi, yüzey pürüzlülük testi, lazer markalama testi gibi birçok farklı test yapıldı. Yapılan tüm bu testlerin sonuçları ve bu sonuçlardan yola çıkarak elde edilen yorumlar aşağıdaki gibidir.

a. Alodin kaplama esnasında yüzey hazırlık işlemleri tamamlanan parçalar tek tek alodin tankına daldırıldı. Üzerlerinde yazılan süreler kadar havuzda bekletildi. Bu bekleme süresi malzemelerin renklerinde büyük değişikliğe yol açtı. 15 ve 45 saniye sürelerinde açık sarı bir renk elde edilirken, 90 saniyede koyu sarı, 240 ve 600 saniyelerinde neredeyse kahverengine yakın bir renk elde edildi. Sonuç olarak alüminyum bir Al-5083 H111 malzemede alodin tankından bekletilme süresi malzemenin yüzeyindeki kaplamanın rengini doğrudan etkilemektedir.

b. Farklı sürelerde kaplama yapılan numune parçalarına elektrik iletkenlik testi uygulandı. Aralarında küçük de olsa farklar oluşmuştur. Fakat bu farkların kullanımda etki yaratacak kadar büyük bir fark olmadığı anlaşılmıştır.

c. Numune parçalar alüminyum malzeme olduğu için sertlik ölçümü için brinnel sertlik test uygulaması kullanıldı. Yapılan test sonuçlarında ise çıkan rakamların birbirine yakın olduğu anlaşılmıştır. Buradan yola çıkarak alodin kaplamanın malzemenin sertliğinde herhangi bir değişikliğe yol açmadığı sonucuna varılmıştır.

d. Farklı sürelerde yapılan alodin kaplamanın parça yüzeyindeki pürüzlülüğe bir etkisinin olup olamadığını anlamak için yüzey pürüzlülük cihazı ile her parça üzerinde 5 farklı noktadan ölçüm yapıldı. Çıkan sonuçlarda 600 saniye alodin tankında bekleyen parçanın yüzeyinin diğerlerine göre daha pürüzsüz olduğu anlaşılmıştır.

e. Alodin kaplamanın özelliklerinden bahsederken kaplama kalınlığı olmadığı, malzemede herhangi bir ölçüsel değişikliğe yol açmadığı hakkında bilgi verilmişti. Fakat kaplama süresini uzun tuttuğumuzda bu özellikte bir kayıp olabilme ihtimali düşünülerek her numune parçasının kaplama yapılan yüzeylerinden mikron kalınlık cihazı ile ölçümler yapıldı. Yapılan ölçüm sonuçlarına göre alodin tankında 600 saniyeye kadar bekleyen bir alüminyum parçada herhangi bir kaplama kalınlığının olmadığı anlaşılmıştır. Sonuç olarak alodin

kaplamanın malzeme üzerinde kayda değer bir kaplama kalınlığı almadığı ve ölçüsel olarak bir değişiklik yaratmadığı bir kez daha ispatlanmış oldu.

f. Kaplama sürelerinin malzeme üzerinde balistik bir etki yaratıp yaratmadığını anlamak için 'Düşen Ağırlıklı Düşük Hız Balistik Testi' uyguladık. Yapmış olduğumuz balistik test sonucunda 600 saniye olan kaplamalı parçada oluşan deformasyonun diğer numunelere nispeten daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu da bize numune üzerinde oluşan kaplamanın, malzeme yüzeyinde oluşturmuş olduğu film tabakasının, yüzeyde bir sürtünme kuvvetine sebebiyet verdiği ve bu sürtünme kuvveti sonucunda üzerine düşen kuvveti daha fazla absorbe ederek daha az hasar aldığı şeklinde yorumlamamıza sebep oldu. Bu yorum numune üzerinde oluşan delik çapları ve datadan alınan grafik bilgilerine göre yapılmıştır.

g. Yapılan SEM-EDS analizi sonuçlarına göre numune yüzeyine Cr difüzyonu olduğu görülmektedir. Ayrıca alodin kaplama yapılmamış olan numune parçasında, alüminyum ile boya tabakası arasında boşluk oluşumu varken diğer kaplama yapılmış numunelerde böyle bir problem olmamıştır. Yani alodin kaplama uygulanmadan yapılan yaş boya işleminde alüminyum ile boya tabakası arasında tam anlamıyla bir yapışma sağlanmadığı gözlemlenmiştir. (Şekil 7.9)

ÖNERİLER

1) Kısıtlı zaman sebebiyle gerçekleştirilemeyen, alüminyum tez numunelerini gerçek bir deniz suyu ortamında tuzlu suya maruz bırakarak oluşan deformasyonların farklı sürelerde ne gibi değişikliğe yol açacağı incelenebilir. Benzer şekilde toz, kum, yağmur, kar, güneş, yüksek ve düşük sıcaklık koşullarında tez numunelerinde meydana gelecek deformasyonlar incelebilir.
2) Kaplama kalınlığı ölçümü yapılırken kullanılan cihazın hesaplama kabiliyeti 0.001mm olduğu için farklı sürelerde oluşan kaplama kalınlığını nanometre cinsinden hesaplama imkânı bulamadık. Daha küçük ölçüsel hesaplamalar yapan ve doğruluk hassasiyeti daha yüksek olan bir cihazla ölçüm yapıldığında kaplama kalınlıkları arasında nanometre değerlerinde farklar çıkabilir.
3) Balistik test sonucunu daha iyi analiz edebilmek için 1000 saniyenin üzerinde bir numune daha üretip, diğer numunelerle kıyas yapılabilir.
4) Alodin kaplama öncesi yüzey hazırlama işlemleri esnasında asidik aşındırma tankında kaynaklı parçalarda kaynak bölgesinde oluşabilecek deformasyonlar incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] Yeşilotah, N. (2001). *AA 3003 Alüminyum Alaşımlarında Tav Parametrelerinin Derin Çekilebilirliğe Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi. S.Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[2] Oğuz, B. (1990). *Demirdışı Metaller Kaynağı*, Oerlikon Yayınları, İstanbul.

[3] Dogan M.(1989). *Alüminyum Isıl İşlemi*, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[4] Güngören, M. (2015). *AA2014 Alüminyum Alaşımının Mikro Yapısının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[5] Maden ve Tetkik Arama Genel Müdürlüğü (2018). *Dünyada ve Türkiye'de Alüminyum*, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.

[6] Kalkan Geri Dönüşüm, En İyi İletkenler Hangisi?, www.kalkangeridonusum.com, Erişim: 11 Eylül 2022.

[7] Alüminyum Alaşımları ve Serileri, Öğretici İçerikler ve Mesleki Haberler, https://www.metalurjik.com/aluminyum-alasimlari-ve-serileri , Erişim: 10 Kasım 2022

[8] Alüminyum Alaşımları, https://www.serdarkorkut.com, Erişim: 13 Eylül 2022.

[9] Altenpohl DG (1998). Aluminium Technology, Applications and Environment.

[10] The Aluminium Association and The Minerals, Metals Materials (1998). Washington.

[11] Alüminyum Özellikleri, https://aluminyumburada.com/blog?p=en-aw-7075-aluminyum-ozellikleri, Erişim: 15 Kasım 2022.

[12] Mısırlı, C. (2011). *5083 Kalite Alüminyum Alaşımının Homojenize Edilerek Sertlik Değerlerinin ve Mikroyapılarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

[13] USGS Mineral Commodity Summaries, (2018).

[14] The Science and Engineering of Materials (1994). 3rd. Edn., Wadsworth Publishing Company, 812 s. Askeland.

[15] Ankar Metal Kaplama, Alodin Kaplama, https://www.ankormetalkoruma.com/tr/kaplama/alodin-kaplama, Erişim: 11 Ekim 2022.

[16] Chromete conversion coating, https://en.wikipedia.org/wiki/chromete_conversion_coating, Erişim: 24 Eylül 2022 .

[17] Becker, M (2019), *Chromete-free chemical conversion coatings for aluminum alloys*, De Gruyter, C. 37, Sayı 4, 321-342. doi:10.1515/corrrev-2019-0032.

[18] Endüstri Teknik Yüzey İşlemleri, Alüminyum Kromat Kaplama, http://estyuzeykaplama.com/hizmetler/aluminyum-kromat-kaplama/, Erişim: 15 Ekim 2022.

[19] *Metals Handbook: Surface Cleaning: Finishing and Coating*, vol. 5, American Societyfor Metals, Materials Park, OH 1982.

[20] Military Specification MIL-C-81706, Chemical Conversion Materials for Coating Aluminiumand Aluminium Alloys.

[21] Wernick, S and Pinner, R. (1986). *The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and its Alloys*,5th ed , Finishing Publications, Teddingtın, U.K .

[22] Weber, E. (1972). *Research/Development*.

[23] Talaş, Ş., Yazar, M., Kul, M., Kır, H. (2022). Falling Weight Low Velocity Ballistic Testing and Its Damage on Different Type of metals, *Politeknik Dergisi*, C. 25, Sayı 4, 1595-1601. doi: 10.2339/politeknik.884115.

[24] Sunderland, R. J. (1974). Analysis of chromate conversion coatings on alüminyum citation, *Japanese Journal of Applied Physics*, C. 13, Sayı 1. 347-350. doi: 0.7567/JJAPS.2S1.347

[25] Karasek, F. W. (1973). Research/Development.

[26] Schubert, R., Tracy, J.C. (1973). A Simple, Inexpensive SIMS Apparatus, *Review of Scientific Instruments*. Sayı 44, 487-491. doi:10.1063/1.1686163

[27] Demiray, O. Z. (1985). İletken Malzeme Olarak Alüminyum, *Elektrik Mühendisliği,* Sayı 318/319. 92-97.

[28] W3.gazi.edu.tr/bayindir/D4.pdf, Erişim Tarihi: 10.03.2020.

[29] Socha, A. J. (1971). Analysis of surfaces utilizing sputter ion source instrument, *Surface Science,* C. 25, Sayı 1. 147-170. doi:10.1016/0039-6028(71)90213-5.

[30] Nicolet, A., Mayer, J.W. and Mitchell, I.V. (1972). Microanalysis of Materials by Backscattering Spectrometry, *Science,* C. 177, Sayı 4052, 841-849. doi: 10.1126/science.177.4052.841

[31] Propaks Savunma ve Balistik, Alodin (Kromat) Kaplama, http://www.prokaps.com/alodine--kromat---kaplama.html. Erişim: 13 Ekim 2022.

[32] Forza Savunma Makine SAN.ve TİC. LTD. ŞTİ. Kaplama Tesisi Kapasitesi Artışı ProjeTanıtım Dosyası Sayfa: 6-7 Kromat (Alodin) Kaplama Prosesi Ankara, 2019.

[33] Evci, C. (2018). Analysis of the effect of propellant temperature on interıor ballistics problem. *Journal of Thermal Engineering*, C. 4, Sayı 4, 2127-2136. doi: 10.18186/journal-of-thermal-engineering.433738.

[34] Interior Ballistics of Guns, Ballistic Series, Engineering Design Handbook, US Army, (1965).

[35] Research and development of Materiel, Elements of Armament Engineering (1963), Part 2: Ballistics, Engineering Design Handbook, US Army.

[36] Kiliç, N. and Ekici, B. (2013). Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition, *Materials and Design*, Sayı 44, 35-48. doi: 10.1016/j.matdes.2012.07.045

[37] Übeyli, M.., Yildirim, R.O. and Ögel, B. (2007). On the comparison of the ballistic performance ofsteel and laminated composite armors, *Material and Design*, C. 28, Sayı 4, 1257-1262. doi: 10.1016/j.matdes.2005.12.005.

[38] Best Technology, Alodin (Kromat) Dönüşüm Kaplama Nedir? https://www.besttechnologyinc.com/surface-finishing/what-is-alodine-chem-film-chromate-conversion-coating/, Erişim: 4 Kasım 2022.

[39] Chung, D.D.L. (2001). Materials for vibration damping. Journal of materials science, Sayı 36, 5733-5737.

[40] Armor Plate, Aluminum Alloy, 7039 (1992); MIL-DTL-46003H; U.S. Department of Defense: Washington DC.

[41] Aluminum Alloy Armor, 2219, (1998). Rolled Plate and Die Forged Shapes; MIL-DTL-46118E; U.S. Department of Defense: Washington DC.

[42] Aluminum Alloy Armor Rolled Plate (1/2 to 4 Inches Thick), (2000). Weldable (Alloy 2519); MIL-DTL-46118E; U.S. Department of Defense: Washington DC.

[43] Akkurt, M. (2000). *Makine Elemanları Cilt II*, Birsen Yayınevi, İstanbul (2000).

[44] Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Laboratuvarı, Sertlik Ölçme Deneyi, Deney Föyü, BURSA, 2019.

[45] Taramalı Elektron Mikroskobu, https://www.arum.ogu.edu.tr Sayfa/Index/65/taramali-elektron-mikroskobu-sem, Erişim: 14 Ekim 2022.

[46] Yüzey Pürüzlüğü, https://www.balikesir.edu.tr/lectures/yuzey.puruzlulugu.pdf, Erişim: 20 Ekim 2022.

[47] Lia, S., Yu, B., Zhang, X., Lu, X., Zhou, P., Zhang, C., Wang, F. (2021). New design principles fort he bath towards chromate-and crack-free conversion coatings ob mannesium alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, C. 9, Sayı 2, 505-519.