

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ANODİK OKSİDASYON İŞLEMİNİN 7075-T6
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YORULMA
DAVRANIŞINA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Eyüp CİRİK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Kenan GENEL

Haziran 2007

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANODİK OKSİDASYON İŞLEMİNİN 7075-T6
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YORULMA
DAVRANIŞINA OLAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Eyüp CİRİK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT

Bu tez 20 / 06 /2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr.Ahmet TÜRK
Jüri Başkanı

Doç.Dr.Kenan GENEL
Üye

Doç.Dr.Erdal KARADENİZ
Üye

TEŞEKKÜR

Çalışmanın titizlikle yönetilmesi ve sonuçlandırılmasında hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, engin bilgisi ile beni aydınlatan, desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Kenan GENEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Dört yıl süren yüksek lisans çalışmamda bir idarecilik örneği gösteren değerli amirlerim; Sakarya Eğitim ve Araştırma Hastanesi Müdürü Ahmet KEMİKSİZOĞLU'na, Müdür Yardımcıları Erdoğan KOZAN'a, İkramettin DURSUN'a ve satınalma birimindeki mesai arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ve ailem, öğrencilik hayatım boyunca hep yanımdaydınız. Annem, babam, kardeşlerim ve eşim Selime CİRİK'e bu çalışma sırasında manevi desteklerinizle beni yüreklendirdiniz, başarıma isteğimi artırdınız. En içten duygularıyla teşekkür ederim, iyiki varsınız.

Eyüp CİRİK

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YAPI VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Alüminyumun Özellikleri.....	3
2.2. Alüminyumun Korozyona Karşı Mukavemeti.....	3
2.3. Alüminyum Alaşım Sistemleri.....	4
2.4. Alüminyum Alaşımalarının Gruplandırılması.....	5
2.4.1. Dövme alüminyum alaşımları.....	5
2.4.2. Dökme alüminyum alaşımları.....	6
2.5. Alaşım Elementleri ve Alaşım Elementlerinin Etkileri.....	6
2.5.1. Yaşlandırma ısıl işlem kademeleri.....	7
2.5.1.1. Çözeltiye alma.....	8
2.5.1.2. Su verme.....	8
2.5.1.3. Yaşlandırma.....	9
2.5.2. Çinkonun etkisi.....	10
2.5.3. Bakırın etkisi.....	10

2.5.4. Magnezyumun etkisi.....	10
2.5.5. Silisyumun etkisi.....	11
2.5.6. Diğer alaşım elementlerinin etkisi.....	11
2.6. 7075 Alüminyum Alaşımı.....	12
2.6.1. Uygulama alanları.....	13
2.6.2. T6 ısıtıl işlemleri.....	14
2.6.3. Alüminyum alaşımının dayanım ve korozyon direnci	15
2.7. Anodik Oksidasyon (Eloksal) Yöntemi.....	16
2.7.1. Yağ alma.....	18
2.7.2. Matlaştırma (Dağlama).....	18
2.7.3. Temizleme.....	18

BÖLÜM 3.

KOROZYON VE OYUK KOROZYONU	20
3.1. Korozyonun Genel Özellikleri.....	20
3.1.1. Korozyonun sınıflandırılması.....	22
3.1.2. Yerel korozyon	22
3.1.3. Yerel korozyonun sınıflandırılması.....	23
3.2. Oyuk Korozyonu.....	23
3.2.1. Pasiflik.....	27
3.3. Oyuk Korozyonunun İzlenmesi.....	30
3.3.1. Elektrokimyasal yöntemler.....	30
3.3.1.1. Potansiyostatik yöntem.....	30
3.3.1.2. Galvanostatik yöntem.....	30
3.3.1.3. Potansiyodinamik yöntem.....	30
3.3.2. Kimyasal yöntemler.....	31
3.3.3. Derinlik ölçümü yöntemi.....	31
3.4. Oyuk Korozyonun Önlenmesi.....	31
3.4.1. Pasifleştirici inhibitörler.....	33
3.4.2. Adsorpsiyon inhibitörler.....	33

BÖLÜM 4.

METALLERİN YORULMASI	36
4.1. Yorulma Kırılmasının Nedeni.....	37
4.2. Çatlak Oluşumu	37
4.3. Yorulma Zorlamalarında Kırılma Olayı.....	38
4.3.1. Dış etkenler.....	39
4.3.2. İç etkenler.....	40
4.4. Yorulma Kırıklarının Görünümü.....	40
4.5. Yorulma Dayanımının Saptanması.....	41
4.6. Yorulma Deneyi Türleri.....	43
4.7. Korozyonun Yorulma Ömrüne Etkisi.....	44
4.8. Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Özellikleri.....	45

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMA	48
5.1. Malzeme	48
5.2. Talaşlı İmalat.....	48
5.3. Yüzey Durumu.....	49
5.4. Çekme Deneyi.....	49
5.5. Anodik Oksidasyon(Eloksal) İşlemi.....	49
5.5.1. Yağ Alma.....	49
5.5.2. Dağlama.....	49
5.5.3. Nötrlizasyon.....	50
5.5.4. Eloksal işlemi.....	50
5.5.5. Tespit işlemi.....	50
5.6. Metalografik İncelemeler.....	50
5.6.1. Optik mikroskop incelemeleri.....	50
5.6.2. Taramalı elektron mikroskop (sem) incelemeleri.....	51
5.7. Yorulma Deneyleri.....	51
5.7.1. Ön korozyonlu yorulma deneyleri	52
5.7.2. Gerilme hesabı ve deney parçasının bağlanması.....	52

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
6.1. Ön Korozyon Deneyleri Sonuçları.....	53
6.2. Yorulma Deneyleri Sonuçları.....	60
6.3. Yorulma Numunelerinde Kırık Yüzeyi İncelemesi.....	66
6.4. Genel Sonuçlar.....	70
6.5. Öneriler.....	71
KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ.....	76

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

MPa	: Megapaskal
BSD	: Birinel sertlik değeri
$\sigma_{\text{ç}}$: Çekme gerilmesi
σ_{ort}	: Ortalama gerilme
σ_{g}	: Gerilme genliği
N	: Çevrim sayısı
YDS	: Yorulma dayanım sınırı
σ	: Gerilme
π	: Pi sayısı
d	: Çap

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Çökelme sertleşmesi işlem kademeleri.....	7
Şekil 2.2.	Büyük uçaklarda kullanılan alüminyum alaşımları.....	14
Şekil 2.3.	Eloksal tabakasının yapısı.....	17
Şekil 2.4.	Eloksal tabakasının tespit işlemi öncesi ve sonrası	18
Şekil 3.1.	Alüminyum alaşımları için farklı oyuklanma morfolojileri.....	24
Şekil 3.2.	Alüminyum yüzeyinde oyuk oluşumunun elektrokimyasal mekanizması.....	26
Şekil 3.3.	Çelik için sülfürik asit içinde şematik polarizasyon eğrisi.....	28
Şekil 3.4.	Alüminyum için potansiyel pH diyagramı.....	29
Şekil 4.1.	Wöhler eğrisi.....	42
Şekil 4.2.	Korozif edici çevrenin G-N diyagramına etkisi.....	44
Şekil 4.3.	2024-T3 alüminyum alaşımına ait oyuklanma ve çatlak büyümesinin yorulma ömrüne olan etkisi.....	46
Şekil 4.4.	2024-T3 alüminyum alaşımında oyuk yoğunluğunun yorulma ömrüne olan etkisi.....	47
Şekil 5.1.	Yorulma deneylerinde kullanılan deney parçasının imalat resmi.....	48
Şekil 5.2.	Yorulma makinesi.....	51
Şekil 5.3.	Balmumu ile kaplanmış yorulma deney numuneleri.....	52
Şekil 6.1.	7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik olarak parlatılmış yüzeyinin mikroyapı fotoğrafı.....	53
Şekil 6.2.	Farklı zaman dilimlerinde numune yüzeyinin %3,5'lik NaCl çözeltisine daldırılmasından sonra oyuk oluşumu.....	54
Şekil 6.3.	Farklı büyüklüklerdeki oyuk sayısının ön korozyon süresine bağlı olarak değişimi.....	55
Şekil 6.4.	Tipik çatlaklar bulunan ön korozyona tabi tutulmuş yüzey.....	55

Şekil 6.5.	6 saatlik ön korozyonlu numunenin elektron mikroskobu ve EDS analiz sonuçları.....	57
Şekil 6.6.	6 µm oksit film kaplı numunenin partiküllerinin yüzey görünüşü.	58
Şekil 6.7.	240 saatlik ön korozyon testinden sonra (a) 6 µm (b) 12 µm kaplanmış numunelerin yüzey görünüşü.....	58
Şekil 6.8.	a) 6 ve b) 12 µm oksit kalınlığına sahip numunelerde oyuk oluşumları ve çatlak durumu. Oyuk bölgesinde tespit edilen Cl miktarı.....	59
Şekil 6.9.	Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin yorulma eğrileri.....	60
Şekil 6.10.	Ön korozyona uğratılmış ve uğratılmamış numunelerin yorulma eğrileri.....	61
Şekil 6.11.	Yorulmaya karşı direnç ve ortalama oyuk derinliğinin ön korozyon süresi ile değişimi.....	62
Şekil 6.12.	Ön korozyonlu ve ön korozyonsuz, oksit kaplı numunelerin yorulma eğrileri.....	63
Şekil 6.13.	Farklı sürelerde ön korozyona tabi tutulmuş ana malzemelerin ve 23 µm oksit kaplı parçaların yorulma eğrileri.....	64
Şekil 6.14.	23 µm oksit kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ön korozyonlu ve korozyonsuz yorulma dayanımındaki değişim.....	65
Şekil 6.15.	Kırılmış numunelere ait (a) 6 saatlik ön korozyon ve 256 MPa gerilme uygulanmış, (b) 240 saatlik ön korozyon ve 155 MPa gerilme uygulanmış, elektron mikroskobu fotoğrafları.....	66
Şekil 6.16.	240 saat ön korozyona tabi tutulmuş numunelerin optik mikroskoptaki yan yüzey görünümü (a) oyuk grupları ve birleşmiş oyuklar (b) ikincil çatlak şekli.....	67
Şekil 6.17.	a) 6, b) 12, c) 23 µm oksit kaplı numuneye ait X22 büyütme için optik mikroskop kırık yüzeyleri ve d), e) 23 µm oksit kaplı numunenin çatlak yüzey SEM fotoğrafları.....	69
Şekil 6.18.	240 saat ön korozyona tabi tutulmuş 6 mikrometrelilik kaplamalı yorulma numunesinin kırık yüzeyine ait SEM mikrofotografı.....	70

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Alaşım elementlerinin alüminyumda çözünürlük sınırları	7
Tablo 2.2.	Ticari 7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	12
Tablo 2.3.	7075 alüminyum alaşımının bazı fiziksel özellikleri.....	12
Tablo 2.4.	7075 alüminyum alaşımının tipik T6 yapay yaşlandırma ısıl işlem şartları.....	15
Tablo 5.1.	Kullanılan deney malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).....	48

ÖZET

Anahtar kelimeler: 7075-T6, Oyuk Korozyonu, Yorulma, Anodik Oksidasyon

Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarında ön korozyon ve anodik oksit kaplamanın eğme yorulma dayanımına olan etkisi 95 Hz frekansta bir seri döner eğme yorulma testleri uygulanarak araştırılmıştır. % 3,5 NaCl çözeltisinde 6, 48, 96 ve 240 saat süreyle yapılan ön korozyon çalışmalarından, kaba partiküllerin oyuklanma üzerinde ana rol oynadığı saptanmıştır. Yorulma testleri, 10^7 çevrim sayısı esas alındığında, oyuklanmanın varlığı ile yorulma dayanımı önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Yorulma ömründeki azalma miktarı oyuklanmanın şiddetine bağlı olup, oyuklanmanın etkisiyle yorulma dayanımında yaklaşık % 60'lık azalma elde edilmiştir. Oksit kaplı numunelere ait test sonuçları, oksitlemenin yorulma dayanımını azaltıcı eğilime sahip olduğu ve artan kaplama kalınlığı ile yorulma dayanımındaki azalma miktarını arttırdığını göstermiştir. Ancak oksitleme işlemi oyuklanma korozyonuna azaltmaktadır. 10^7 çevrim sayısı esas alındığında, yorulma dayanımında kaplamasız parçalara göre %47'lik iyileşme gözlenmiştir. Maksimum ön korozyon süresi olan 240 saat için anodik kaplamanın faydalı etkisi uzun ömürlü yorulma bölgesinde elde edilmiştir. Ancak daha uzun süreli ön korozyon uygulamaları için dikkatli olunmalıdır.

INVESTIGATION ON EFFECT OF ANODIC OXIDATION ON FATIGUE BEHAVIOR OF 7075-T6 ALUMINUM ALLOY

SUMMARY

Key Words: 7075-T6, Pitting Corrosion, Fatigue, Anodic Oxidation

The effect of pre-corrosion and anodic oxide coating on the bending fatigue performance of high-strength aluminum alloy has been investigated by conducting a series of rotary bending fatigue tests at 95 Hz. From pre-corrosion studies including 6, 48, 96 and 240 h duration in 3,5 % NaCl solution, it was observed that coarse constituent particles play the main role in the pitting process. The results obtained from fatigue tests revealed that the fatigue strength, based on a fatigue life of 10^7 cycles, was dramatically reduced by the presence of pitting. The reduction in fatigue life depended on the severity of pitting; an approximately 60% decrease in fatigue strength was obtained. The results from coated specimen indicated that oxidation has a tendency to decrease the fatigue performance, and degradation was accelerated as the coating thickness increased. However, application of the oxidation mitigates pitting corrosion. An improvement of 47% in fatigue strength based on a fatigue life of 10^7 cycles was obtained as compared to uncoated pre-corroded specimens. Beneficial effect of anodic coating can be attained at high cycle region for the maximum 240 h of pre-corrosion length of times. Care should be taken, however, for a prolonged pre-corrosion times.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Alüminyumun ergime sıcaklığı oldukça düşüktür. Bu nedenle ergitilmesi, dökülmesi, şekillendirilmesi kolaydır. Ayrıca alüminyum alaşımları yaşlanma sertleşmesi yolu ile çeliğe yakın mekanik özellikler verebilmektedir. Bu usulün keşfedilmesinden sonra özellikle mukavemet / ağırlık oranı yüksek alüminyum alaşımları uçak ve uzay araçlarının yapılmasını ve gelişmesini imkan dahiline getirmiştir[1].

Alüminyum çok çeşitli kullanım özelliklerine sahip olduğu için sanayide geniş uygulama alanları bulmuştur. Kendinden var olan özellikleri yapılan araştırmalarla daha da çeşitlilik kazanan alüminyumun başlıca avantajlarından birisi hafifliğidir; diğerleri, korozyona direnç, zehirli olmayışı, işlenebilirliği, göze hoş gelen görünümü, yüksek elektrik iletkenliği, yüksek ısı iletkenliği, ışığı verimli bir şekilde yansıtması, manyetik olmayışı ve birçok ticari formda kolaylıkla bulunabilmesidir. Bu elverişli özelliklere ek olarak, alüminyum yaygın olarak kullanılmaya başlandığı zamandan beri oldukça makul ve istikrarlı bir fiyat seyri izlemiştir[2].

7075 alaşımı ise haddelenen alüminyum alaşım grubunda olup dövülebilen bir malzemedir. Yapılan araştırmalar sonucu kazandıkları uygun özellikler sayesinde ön plana çıkan 7075 alaşımı uçaklarda dönen parçalarda, işlenen parçalarda (Freze ile işlenen), kemer tabir edilen kısımlarda, basınç ile çalışması istenen yerlerde, yüzey levhası olarak, şerit biçimli olan kısımlarda ve uzay mekiği, makine sanayisi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni ise uygun mekanik özelliklerinin yanı sıra diğer yapı malzemelerine göre çok daha hafif olmalarıdır. Alüminyum alaşımları II. Dünya Savaşı'ndan beri hem sivil hem de askeri uçakların inşasında gittikçe artan miktarlarda kullanılmışlardır. Bu altmış yıl içerisinde, özelliklerinde ve daha da önemlisi kullanımlarını sınırlayan

limitlerin anlaşılmasında ve ortadan kaldırılmasında büyük gelişmeler sağlanmıştır. Alüminyum alaşımları hemen hemen bütün hava araçlarında tercihen kullanıldıkları için, bu gelişmeler belki de alüminyum endüstrisinden daha çok uçak üreticileri için faydalı olmuştur[1,3].

Alüminyum alaşımlarının birçoğu yüzeylerinde hızla oluşan oksit tabakasından dolayı doğal atmosfer ve doğal sularda korozyona karşı dirençlidirler. Alüminyum alaşımlarının yüzeyi normal olarak ~ 50 Å kalınlığında koruyucu oksit tabakası ile kaplıdır. Bu oksit tabakası 4-9 pH aralığında kararlıdır. Ancak klorür iyonu (Cl⁻) içeren ortamlarda oyuklanma korozyonu nedeniyle alüminyum 7075 alaşımı yüksek dayanıklılığını yitirmektedir[4,5].

Alüminyum alaşımlarının yapılarda kullanımlarını sınırlayan faktörler arasında korozyon çatlama ve taneler arası korozyon önemli yer tutmaktadır. Özellikle 7000 serisi alüminyum alaşımlarında çok yüksek dayanım seviyelerinin elde edilebileceği uzun zamandan beri bilinmektedir, ancak bu yüksek dayanım seviyeleri, gerilmeli korozyon dayanımı ile ters orantılıdır[1,6].

7000 serisi alüminyum alaşımları havacılık sanayinde yaygın olarak kullanılan, çökelme ile sertleştirilmiş malzemelerdir. Bu seriye dahil 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) alüminyum alaşımı da uçak yapı malzemesi olarak yaygın olarak kullanılır, çünkü düşük bir yoğunlukla birlikte yüksek bir dayanıma sahiptir. Bu alaşım için en yüksek dayanım seviyesi T6 yaşlandırma ısıl işlemi ile edilir[3].

BÖLÜM 2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YAPI VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum metalinin mühendislik uygulamalarında kullanımını sağlayan çok önemli özellikleri vardır. Bazı özelliklerinden bahsedecek olursak. Alüminyum hafif metaller grubunun en önemli temsilcisidir. Özgül ağırlığı ($2,71 \text{ gr/cm}^3$) demir ve bakırın yaklaşık üçte biridir. Isı ve elektriği bakır kadar iyi iletir. Korozyon direnci çok yüksektir.

Yüzey merkezli kübik kafese sahip olan alüminyumun sıcak ve soğuk şekil değiştirme kabiliyeti çok iyidir. Ekstrüzyon yöntemi ile her türlü profil üretilebildiğinden, pencere, kapı ve otomobil gövdeleri için değişik profil serileri geliştirilmiştir. Böylece tasarımcının öngördüğü biçimler basit montajlarla gerçekleştirilebilir.

Saf alüminyumun mekanik dayanımı akla gelebilecek kullanım alanlarının pek çoğu için yeterli sayılmaz. Ancak yaklaşık 90 MPa düzeyinde olan çekme dayanımını alaşım elemanlarının ilavesi ve ısıl işlemler ile 650 MPa değerinin üstüne çıkmaktadır[7].

2.2. Alüminyumun Korozyona Karşı Mukavemeti

Alüminyum alaşımlarının korozyon direnci yüksektir. Saf alüminyum en yüksek korozyon direncine sahiptir. Bunu sırasıyla Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Si ve Al-Si alaşımları izler. Bakır içeren alüminyum alaşımlarının korozyon direnci kötüdür. Alüminyum alaşımları ile diğer metallerin ya da alaşımların kendi aralarında temas durumunda olmaları, nemli ortamda korozyona neden olur[1,8].

Elektrokimyasal gerilim serisindeki konumu nedeniyle asal bir metal olmayan alüminyumun korozyona dayanıklılığı, havada veya sulu çözeltilerde yüzeyi kaplayan oksit tabakasından ileri gelir. Bu koruyucu tabaka, bozulduğunda doğal oksitlenme ile hemen yeniden oluşur; ayrıca ortamda bulunabilecek asitler ne kadar oksitleyici ise o kadar kararlı davranır. Örneğin derişik nitrik asit, alüminyum kaplarda nakledilebilmektedir. Saf alüminyumun bu özelliği, korozyona hassas alaşımlarında, alaşımlı levhaların korozyona maruz yüzeylerine çok ince bir tabaka saf alüminyum giydirilerek (Cladding) korozyondan korunmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Öte yandan anılan oksit tabakasını çözebilen derişik alkaliler alüminyumu korozyona uğratar. Yüzeydeki doğal oksit tabakası sadece 0,01µm kalınlığında olup çok sayıda gözenek içerdüğinden, alüminyumda öncelikle bakır, demir gibi katışıklar yerel bileşim farklılıkları ve dolayısıyla korozyon pilleri oluşturabilir[9].

Alüminyumun doğal koruyucu tabakasını kuvvetlendirmek üzere kimyasal fosfatlama ve kromatlama yapılabilir. Ancak bu amaçla, daha yaygın olarak kullanılan alüminyumun elektrolitik oksitlenmesidir(anodizasyon, eloksal). Bu işlem sülfirik veya kromik asitli banyolarda gerçekleştirilir.

2.3. Alüminyum Alaşım Sistemleri

Alüminyumun düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci gibi üstünlüklerinden makine, taşıt ve yapı endüstrisinde geniş oranda yararlanılması, ancak dayanım özelliklerinin alaşımlama yoluyla iyileştirilmesinden sonra gerçekleşebilmiştir. Dayanımın çökeltme sertleşmesiyle artırılabilceğinin bulunması da alüminyum alaşımlarının geliştirilmesinde çok büyük rol oynamıştır[8] .

Metalik karakteristiklere sahip kimyasal elementlerin çoğu, alüminyumla kolayca alaşım yapabilirler. Ancak bunlardan sadece birkaçı ticari alüminyum esaslı alaşımlarda temel alaşım elementi olarak yer alırlar. Ayrıca çok sayıda başka elementler de alaşımın özelliklerini iyileştirmek için destekleyici alaşım katkıları olarak kullanılır[10].

Bakır, yüksek çözünürlüğü ve dayanım artırıcı etkisi nedeniyle alüminyum için önemli alaşım elementlerinden biridir. Ticari alüminyum alaşımlarının çoğu temel alaşım elemanı veya ikincil element olarak % 1-10 arasında bakır içerirler. Bakır bu alaşımların çoğunun çökeltme sertleşmesi kabiliyetlerini iyileştirir[2].

2.4. Alüminyum Alaşımlarının Gruplandırılması

Alüminyum alaşımları teknolojik özelliklerine ve kullanma şartlarına bağlı olarak genellikle dövme ve dökme türü olmak üzere iki ana grupta incelenebilirler. Bu iki grup içinde dövme alüminyum alaşımları dövme ve plastik şekil verme usulleri ile şekillendirilirken, dökme alüminyum alaşımları sadece döküm yoluyla şekillendirilebilir.

Bu iki grup kendi içinde; ısıtılabilir ve ısıtılmayan alüminyum alaşımları olmak üzere alt bölümlere ayrılırlar. Isıtılabilir alaşımların mekanik özellikleri soğuk şekil verme ve ısıtılabilir alaşımlarda sadece soğuk şekil verme ile mukavemet artışı sağlanabilir[11].

2.4.1. Dövme alüminyum alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları çok geniş bir yer tutar. Bu alaşımlarda daha yüksek fiziksel özellikler elde edilmesi haddeleme, ekstrüzyon, dövme gibi mekanik işlemler tarafından sağlanır. Bu işlemler tane yapısını inceltir ve alaşımı daha homojen yapar. Dövme işlemi malzemenin döküm yapısını bozarak, malzeme özelliklerini iyileştirir.

Dövme alaşımların üretimindeki işlem kademeleri sırasıyla;

- İşlenmemiş parça veya ingotun dökümü,
- Sıcak veya çoğunlukla soğuk şekil verme,
- Isıtılabilir, şekillendirilirdir.

Birçok uçak ve uzay aracı uygulamalarında açık ve kapalı kalıp dövme alüminyum alaşımları kullanılır. Alüminyum alaşımlarının % 20'ye yakını ekstrüzyon ürünü alaşımlar oluşturur. Ekstrüzyon ürünleri özel biçim ve kesit gerektiren her türlü uygulamada kullanılabilir. Dövme alüminyum alaşımlarına bir genelleme yaparsak 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx serileri ısıtılma işlemi uygulanamayan türlerdir ve bunlar sadece şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xxx ve 7xxx dövme alüminyum alaşımları ise ısıtılma işlemi tabii tutulabilirler[12].

2.4.2. Dökme alüminyum alaşımları

Dökme alaşımlar genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak dökülürler. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özellikler gösterir ve işlenmeye elverişlidirler. Dökme alaşımlar kaynak edilebilirler. Isıtılma işlemi çok yaygın olarak dövme alüminyum alaşımlarına uygulanmakla birlikte, dökme alaşımların bir kısmına da uygulanabilir. Bu alaşım gurubunun özellikleri her ne kadar hafif bir döküm alaşımı yapısı sergiliyorsa da çok geniş bir şekilde taşıma sahasında kullanılmaktadırlar.

Dökme alüminyum alaşımları genellikle iki fazlıdır. Bu alaşımların bazı bileşim özellikleri ısıtılma işlemi veya ergimiş metali kalıba dökmeden önce döküm yapısında bir iyileştirme işlemi vasıtasıyla düzeltilebilir. Dökme alüminyum alaşımlarına bir genelleme yaparsak 1xx.x, 3xx.x, ve 5xx.x dökme alüminyum alaşımları yaşlandırılmaz. 2xx.x, 4xx.x, 7xx.x ve 8xx.x dökme alüminyum alaşımları ise yaşlandırılabilir[13].

2.5. Alaşım Elementleri ve Alaşım Elementlerinin Etkileri

Ana element alaşım olarak Çinko, Magnezyum, Bakır ve Krom'dur. Alüminyum birçok metal ile sıvı halde kolayca karışabilir. Birçok alaşımında metaller arası bileşikler oluşur ve alaşımın mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileşir. Alüminyum; bakır, magnezyum, mangan, silisyum, çinko gibi elementlerle yüksek sıcaklıklarda yüksek katı çözünürlüğü, oda sıcaklığında ise düşük katı çözünürlüğü gösterir. Alaşım elementlerinin çözünürlük sınırları Tablo

2.1.'de gösterilmiştir[12].

Tablo 2.1. Alaşım elementlerinin alüminyumda çözünürlük sınırları

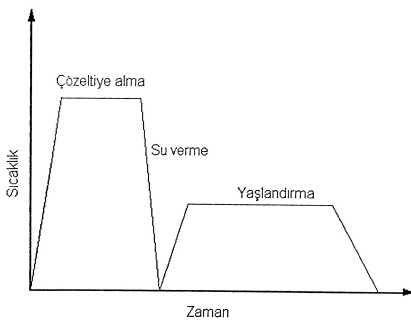
Alaşım Elementi	Katılma Sıcaklığında Çözünürlük (%)	Oda Sıcaklığında Çözünürlük (%)	Fark
Cu	5,65	0,02	5,63
Mg	14,9	2,5	12,4
Mn	1,8	0,3	1,5
Si	1,65	0,1	1,55
Zn	8,2	2,0	6,2

Yüksek sıcaklıklarla oda sıcaklıklarındaki çözünürlükler arasındaki bu belirgin farklılıklar bu alaşım elementlerinin yer aldığı alaşımlarda çökelme sertleştirmesini mümkün kılar. Dolayısıyla bu tür alaşımların mekanik özellikleri yaşlandırma işlemiyle iyileştirilebilir. Bunun yanı sıra alaşım elementleri iyi işlenebilirlik, korozyon direncini artırma gibi etkilere de neden olurlar.

2.5.1. Yaşlandırma ısı işlem kademeleri

Çökelme sertleşmesi (yaşlandırma) olayı çeliklerdeki yaşlanmayla benzer şekildedir. Bunun için, ana metal içerisinde bulunan alaşım elementlerinin düşen sıcaklıkla çözünebilirliklerinin azalması gerekir. Fakat teknik için önemli sayılabilecek belirli bir dayanım artması için yeterli değildir. Teknolojik olarak, yaşlandırma sertleşmesinde şu aşamalar gereklidir(Şekil 2.1.):

- Çözeltiye alma,
- Su verme ve
- Yaşlandırma



Şekil 2.1. Çökelme sertleşmesi işlem kademeleri[14]

2.5.1.1. Çözeltiye alma

Çözeltiye alma işleminin amacı Cu, Mg, Si, Zn gibi sertleştirmeyi sağlayan, çözünen atomların katı çözültideki konsantrasyonunu artırmaktır. Böylece daha sonraki çökeltme (yaşlandırma) işlemine bir zemin hazırlanmış olur. Bu elementlerin çözünlükleri sıcaklıkla oldukça fazla bir şekilde artmaktadır. Ayrıca çözünme hızı da difüzyon hızı arttığı için sıcaklıkla artar. Bu nedenle maksimum çözünmenin olduğu sıcaklık erime sıcaklığına çok yakındır, ancak eritmeden kaçınılmalıdır. Birçok ticari alaşımın çözündürme ısıl işlemi için öngörülen sıcaklıklar ötektik sıcaklığın sadece 10-15 °C altında olduğu için, fırınlarda sıcaklığın çok iyi kontrol edilmesi ve üniformalığının sağlanması gereklidir.

Çözündürme sıcaklığında beklenmesi gerekli süre ürün formuna, alaşım türüne, kullanılan döküm veya plastik şekil verme yöntemine ve kesitin kalınlığına bağlıdır. Bu faktörler çözeltiye girmiş veya dışında kalmış alaşım atomu oranını ve çökelen fazların boyut ve dağılımını belirler. Dövme alaşımlarının, kalınlıklarının her 25mm'si için en az 1 saat ısıtılmaları gerekir. Bu süre çok ince saclar için 10–30 dakika arasındadır. Optimum mekanik özelliklerin elde edildiği çözeltiye alma sıcaklığı, 7075 alüminyum alaşımları için ise 480 °C olarak belirtilmektedir. Ayrıca çözeltiye alma süresi ise malzemenin kalınlığına göre 20-75 dakika arasında değişmektedir[10,15].

2.5.1.2. Su verme

Su verme, çökeltme sertleşmesinin en kritik kademesi olarak değerlendirilmektedir. Alaşımın çözeltiye alma sıcaklığından oda sıcaklığına ya da oda sıcaklığına yakın bir sıcaklığa aniden soğutulduğu bu kademede, çözeltiye alma sırasında elde edilen tek fazlı katı çözelti yapısının korunması amaçlanmaktadır. Su verme sırasında ortaya çıkan bir diğer durum da atom boşluklarının konsantrasyonu ile ilgilidir. Yapıda bulunan atom boşlukları, sıcaklığın artmasıyla birlikte ekspanansiyel olarak artar. Dolayısıyla, çözeltiye alma sıcaklığında dengedeki atom boşluğu konsantrasyonu, oda sıcaklığındaki değerinden yüksektir. Bu durumda, ani soğuma sonucu, yapıda çok

miktarda atom boşluğu kalmaktadır. Su verilmiş haldeki boşluklar, bir sonraki yaşlanma kademesinde atom yayınımlı kolaylaştırıcı bir faktör olarak çökelti fazının çekirdekleşme ve büyüme hızını arttırmaktadır. Genellikle malzemeyi soğuk suya daldırarak uygulanan su verme, sürekli ısıl işleme üretilen, sac, levha ya da ekstrüzyon ürünlerinde çözeltili alma hattından çıkan ürünlerin yüzeyine yüksek hızda su püskürtülerek yapılmaktadır[15].

Farklı su verme ortamlarının meydana getirdiği farklı su verme hızlarının mekanik özelliklere etkisi alaşımdan alaşıma farklılık göstermekle birlikte, genel olarak en iyi dayanım ve tokluk değerleri, en yüksek su verme hızlarıyla sağlanmakta, korozyon ve gerilmeli korozyon çatlaması direnci, su verme hızının artmasına paralel olarak artmaktadır.

2.5.1.3. Yaşlandırma

Yaşlandırma, çökeltme sertleşmesi ısıl işleminin son kademesidir ve su verilmiş alaşımın, oda sıcaklığında ya da daha yüksek bir sıcaklıkta belirli bir süre tutulması şeklinde uygulanmaktadır. Tek fazlı yapı içerisinde, ikinci bir fazın çökmesiyle sertlik ve dayanımın arttığı yaşlandırma işlemi, oda sıcaklığında yapıldığında "doğal yaşlandırma", daha yüksek bir sıcaklıkta yapıldığında ise "yapay yaşlandırma" adını almaktadır.

Oda sıcaklığında çökeltme çok yavaş ilerlediğinden, doğal yaşlandırma sonucu alaşımın mekanik özelliklerinin yüksek ve kararlı bir hale gelmesi için oldukça uzun süreler gerekmektedir. Bu süre, alaşımdan alaşıma değişmekle birlikte, birkaç günden birkaç yıla kadar çıkabilmektedir. Bu tür alaşımlara, bazı durumlarda yapay yaşlandırma uygulanarak yüksek sertlik ve dayanım değerlerinin daha kısa sürede elde edilmesi amaçlanmaktadır. Çökeltmenin düşük hızlarda geliştiği, dolayısıyla kısa doğal yaşlandırma sürelerinde kararlı mekanik özellik değerlerinin sağlanamadığı alaşımlar, her zaman yapay yaşlandırma uygulanarak kullanılmaktadır.

Yapay yaşlandırma işlemi, çözeltili alma ve su verme işlemlerinin ardından, alaşımı 115–190 °C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda uzun süre (5–48 saat) tutma şeklinde

uygulanmaktadır. 7075 alaşımı için 120 °C'de 24 saattir[15]. Alaşımlar, yapay yaşlandırma sonunda genellikle en yüksek dayanım değerlerine ulaşmaktadır.

2.5.2. Çinkonun etkisi

Alüminyum-inko alaşımları genellikle en yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarıdır. Çinko, alüminyum alaşımlarının işleme kabiliyetini artırır. Sıcak yırtılmaya sebep olmasına rağmen diğer alaşım elementleri ile bu kötü ozellik ortadan kaldırılabılır. Çinko dökülebilirliği düşürür. Yüksek inkolu alaşımlar sıcak çatlama ve soğuma çekmesi gösterirler. % 10 'dan fazla çinko içeren alaşımlar gerilmeli korozyon çatlaması gösterirler[12,16].

2.5.3. Bakırın etkisi

Bakır alüminyum endüstrisinin hemen hemen başlangıcından beri en çok bilinen alaşım elementi olmuştur. Bakır düşük sıcaklıkta ısıl işleme, yüksek sıcaklıklarda ise diğer alaşım elementleri ile meydana getirdiği ara fazlar vasıtasıyla malzemenin mukavemetini artırır[7].

Bakır ilavesi ile akıcılık artar, çekilme ve sıcak yırtılma azalarak döküm içi kolaylaşır. Bakır kopma mukavemeti, elastiklik sınırı ve ozellikle sertlik gibi mekanik ozelikleri önemli lde artırır. Buna karşılık deformasyon kabiliyeti ve süneklik bakır yüzdesine göre tedricen azalır. Bu nedenle dövme alaşımlarda plastik Şekil verme işlemini güçleştireceğinden %5 'den fazla bakır kullanılmaz. Bakır, alaşımın korozyon mukavemetini düşürür. Özellikle tavlanmış halde oyuklanma oluşumuna neden olur. Yaşlandırma ile sertleştirildiğinde taneler arası kırılma ve gerilmeli korozyona hassasiyet oluşur. Bakır ilavesi ile alaşımın yoğunluğu ihmal edilemeyecek Şekilde artar.

2.5.4. Magnezyumun etkisi

Saf alüminyuma ilave edilen magnezyum bu malzemenin korozyona karşı olan mukavemet ozeliklerini korumasının yanı sıra yüksek mukavemet, süneklik gibi

mekanik özellikleri de geniş ölçüde iyileştirir. Kaynak kabiliyeti sağlamasının yanında malzeme yoğunluğunu da artırmaz.

Al-Mg alaşımının döküm özellikleri iyi değildir. % 10'a kadar Mg içeren döküm alaşımı yüksek mukavemet ve korozyon direncine sahip olmakla birlikte, erime ve dökmedeki teknolojik zorluklar bu alaşımın karmaşık parçalarda kullanılmasını engeller.

Al-Mg alaşımlarının özelliklerini iyileştirmek için ilave edilen manganez, çekme mukavemetini iyileştirir. Bu durum artan manganez miktarı ile kendini gösterir. Al-Mg alaşımına ilave edilen silisyum döküm kabiliyetini artırır. Magnezyum silisyum oluşturabilecek kadar Mg ve Si içeren alaşımlara ısıl işlem uygulanabilir ve kolay işlenebilirler. Bu tip alaşımların korozyon dayanımları da iyidir.

2.5.5. Silisyumun etkisi

Al-Cu alaşımlarından sonra en tanınmış alüminyum alaşımları Al-Si alaşımlarıdır. Bu alaşımlar alüminyumun bulunmasından beri tanındığı halde, ancak 1920'lerden sonra gelişmeye başlamış ve dökümcülüğe yarayan önemi sayesinde sanayide önem kazanmıştır. Silisyum, döküm alaşımlarda akışkanlığı artırmak ve sıcak yırtılmayı düşürmek için ilave edilir. Silisyum miktarı arttıkça çekme ve akma mukavemeti artış gösterir. Alaşımın içerisinde silisyum ihtiva eden fazın şekli ve dağılımı önemlidir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini artırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür. İyi akıcılığı sayesinde çok ince ve geniş yüzeyle parçalarla, nispeten karmaşık parçaların imaline olanak verir. Silisyumlu alaşımlar korozyona karşı, bakırlı alaşımlara oranla daha dayanıklıdır[11,16].

2.5.6. Diğer alaşım elementlerinin etkisi

Mangan dökülebilirliği artırmak için demir ile birlikte kullanılır. Metaller arası bileşiklerin özelliğini değiştirir. Çekmeyi azaltır, alaşımların süneklik ve tokluk özelliklerini artırır[16].

AlZnMgCu alaşımı için krom ihtiva etmesi yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşmesi için gerekli olmaktadır. Bu özellik genellikle diğer alüminyum alaşımları için de geçerli olmaktadır. Çekme mukavemeti değeri kromun katılmasıyla biraz yükselir. Aynı zamanda genel korozyon özellikleri düzeltir[1,16].

Demir alüminyumda doğal katkı elementi olarak bulunur. Az oranlarda bulunduğu bazı alaşımların sertlik ve dayanımı artırır, dökümlerin sıcak çatlama eğilimlerini azaltır[7].

2.6. 7075 Alüminyum Alaşımı

7075 alüminyum alaşımı hafifliği ve T6 ısıl işlem şartlarında eriştiği yüksek dayanım özellikleri nedeniyle uçak endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Bu alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 2.2. 'de görülmektedir. 7075 ilk kez 1943 'te geliştirilmiştir. Diğer 7000 serisi alaşımları gibi çökelme ile sertleştirilir. Genel olarak levha formunda üretilir. Artan kullanım sonucu dövme ve ekstrüzyon mamulleri ve kalın levha üretimi de yaygınlaşmıştır.

Tablo 2.2. Ticari 7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi[17]

Alaşım Elementi	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
% Ağ.	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2,0	Max 0,5	Max 0,4	Max 0,3	0,18-0,28	Max 0,2	Kalan

7075 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri diğer alüminyum alaşımlarından daha iyidir. Bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.3. 'de verilmiştir.

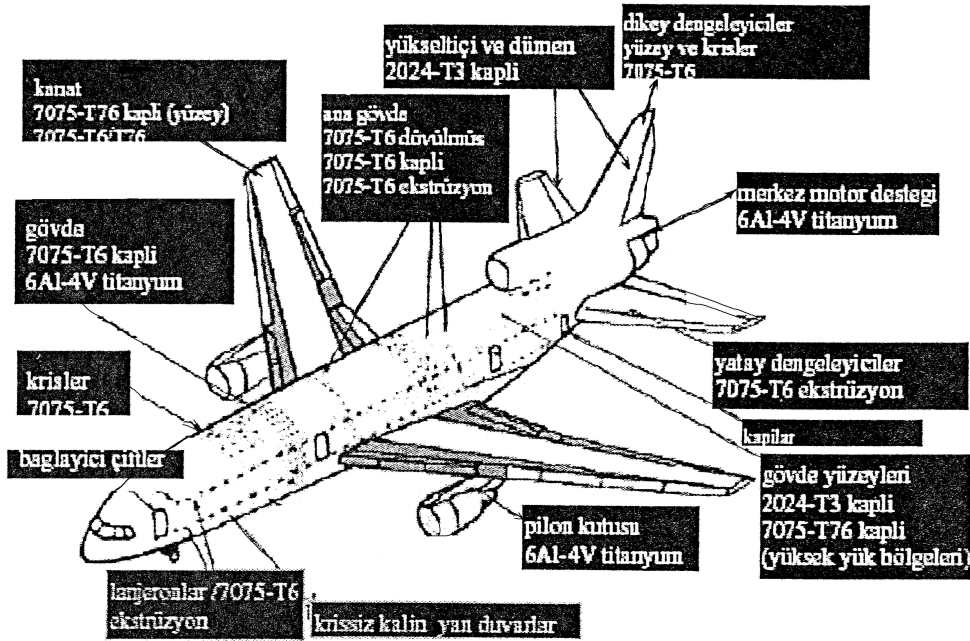
Tablo 2.3. 7075 alüminyum alaşımının bazı fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık	2,81 gr / cm ³
Elastik Modülü	7300 kg / mm ²
Rijitlik Modülü	2750 kg / mm ²
Ergitme Aralığı	477 – 635 °C
Özgül Isı (0-100 °C arasında)	0,23 cal/gr °C
Lineer Genleşme Katsayısı (20-100 °C, T6 için)	24-10-6 mm/°C
Özgül Elektrik Direnci (20 °C, T6 için)	0,058 Ohm.mm ² /m

7075 alüminyum alaşımının iyi mekanik davranışına rağmen, atmosferik rutubet gibi düşük aktiviteli ortamlarda dahi gerilmeli korozyona hassas olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle ticari 7075 alaşımı levhalar genellikle "Alclad" denilen ve her iki tarafına korozyona dayanıklı bir alüminyum alaşımı tabaka giydirilmiş ürünler şeklinde piyasaya sunulur. 7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini iyileştirmek için T6 yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmaktadır[10].

2.6.1. Uygulama alanları

Saç ve plaka üretim formundaki 7075 alüminyum alaşımı, alaşım elementlerinin çok küçük oranlarda katılması ile yoğunluğunun çok az artmasına karşın, mekanik özellikleri ile dökülebilirlik özeliğinde önemli iyileşmeler gözlenmektedir. Yüksek mukavemet ile ortalama tokluk ve de en önemli özelliklerinden biri olan hafifliği nedeniyle uzay-uçak yapılarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Alüminyum kaplı saç, kalınlığı 101,6 mm kadar olan yapısal levha bileşenleri alüminyumun genel uzay-uçak uygulamaları bu alaşımın tipik uygulamalarıdır. Kanat uygulaması (gerilme etkin) ve yatay kuyruk uygulamasıdır (gerilme-basma etkin). Günümüzde kullanılmakta olan birçok askeri ve ticari uçakların üst kanat panelleri ile alt yatay dengeleyici panellerinde, gövde kirişleri ve gövde omurga kirişlerinde ekstrüzyonla üretilerek kullanılır(Şekil 2.2.). Hafifliği nedeniyle tercih edilen diğer bir kullanım alanı piston ve piston kolları ve motor gövdeleridir. Isı iletkenliğinin yüksek olması, bu alaşımların piston olarak kullanımı sırasında daha yüksek sıkıştırma uygulanabilmesine olanak sağlar. Silah donanımlarında, mermi yapımında, uçakların iniş takım çalıştırma silindirleri ve yapısal parçalarında, yüksek basınç altında çalışan sahalarda v.b. yerlerde kullanılırlar[1,18,19].



Şekil 2.2. Büyük uçaklarda kullanılan alüminyum alaşımları

2.6.2. T6 ısıt işlemleri

T6 ısıt işlemleri, 7000 serisi alüminyum alaşımları için en yüksek dayanım seviyesini sağlayan ticari bir ısıt işlemdir. Konvansiyonel T6 ısıt işlemleri, malzemeye çözündürme ısıt işlemleri uygulandıktan sonra su verilerek 120 °C'de 24 saat yaşlandırma ile elde edilir. T6 ısıt işlemleri, 7075 alüminyum alaşımına koşulları uygulandığında ısıt işlem sürelerine göre mekanik özellikleri şu değerlere kadar iyileşmektedir. Çekme dayanımı 228 MPa'dan 572 MPa'a, akma dayanımı 103 MPa'dan 503 MPa'a, sertliği 60 BSD'nden 150 BSD'ne kadar çıkabilmektedir[20,21]. Ayrıca 7075-T6 alüminyum alaşımının spesifik dayanımını düşünecek olursak, ancak yay çeliklerinin spesifik dayanımı o mertebelerde olmaktadır. Tablo 2.4 'te 7075 alüminyum alaşımının tipik T6 ısıt işlem şartları gösterilmiştir[10,15].

Tablo 2.4. 7075 alüminyum alaşımının tipik T6 yapay yaşlandırma ısı işlem şartları

Isıl İşlem	Çözeltiye Alma Sıcaklığı	Çözeltiye Alma Süresi	Yaşlandırma Sıcaklığı	Yaşlandırma Süresi
T-6	480 °C	Değişik	115-190 °C	5-48 Saat

2.6.3. 7075-T6 alüminyum alaşımının dayanım ve korozyon direnci

Maksimum dayanım şartlarına yaşlandırılmış (T6) 7075 alüminyum alaşımının taneler arası gerilmeli korozyon çatlamasına hassas olduğu bilinmektedir (özellikle klorür içeren ortamlarda)[22].

Çökeltme ile sertleştirilmiş alüminyum alaşımlarında, çökelti veya bunların etrafındaki, alaşım elementlerinden yoksun kalmış bölgeler belirli korozif ortamlarda matrise ve etraflarındaki bu fakir bölgeye göre elektrokimyasal potansiyel farktan dolayı anodik davranırlar. Bu çökelti tane sınırları boyunca korozyona uğramaları sonucu tane sınırlarına çok yakın bir seri boşluklar oluşacaktır. Tane sınırlarına dik gerilmeler etkisi ile bu oyuklar büyüyüp birleşerek oyuklanmaya sebep olacaklardır[23].

7075 alüminyum alaşımının T6 ısı işlem koşullarında istenen dayanım özelliklerini sağladığı, ancak korozyon direncinin düştüğü; 7000 serisi alüminyum alaşımlarının mukavemet özelliklerinde azalma olmadan yüksek bir oyuk korozyon direncinin kazandırılabilmesi için yapılan çalışmaların çoğu ısı işlem şartları ve çökelti özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Dayanım ve korozyon direnci gibi özellikler alaşımın çökelti yapısı ile (tür ve dağılımları ile) çok yakından ilgilidir. Çökelti yapıları alaşımın metalurjik şartlarını, mekanik özelliklerini ve korozyon davranışını belirlerler[10].

Çökelti tür ve dağılımları ısı işlem şartları ile yakından ilgili olduğundan, 7075 alüminyum alaşımının gerilmeli korozyon çatlaması probleminin çözümünde ısı işlem şartlarının optimizasyonu önem kazanmıştır. Bu nedenle 7075 alüminyum alaşımında dayanımın ve korozyon direncinin nasıl optimize

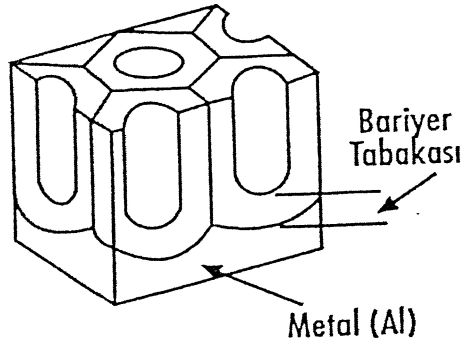
edildiğinin anlaşılması için AlZnMg alaşımlarının mikro yapısının ve çökelme işleminin incelenmesinde yarar vardır[24].

2.7. Anodik Oksidasyon (Eloksal) Yöntemi

Anodik oksidasyon alüminyum ekstrüzyon ürünlerinde uygulanabilen yüzey işlemlerinden biridir. Yüzey işlemleri ürünün estetik görünümünü iyileştirmek ve/veya korozyon ve aşınmaya karşı direncinin artırmak için yapılır[25].

Eloksal işlemi kısaca bir elektroliz prosesidir. H_2SO_4 %20 'lik sulu çözeltisine (elektrolit) elektrik akımı (doğru akım) uygulandığında H_2^+ , SO_4^- , O_2^- iyonlarına ayrılır, alüminyum iş parçaları üzerine yönelir. Ve alüminyum ile birleşerek yüzeye çok sıkı yapışan sert bir oksit tabakası oluşturur. Bu tabaka [$Al_2O_3 + Al_2(SO_4)_3$] eloksal tabakasıdır. H_2^+ , (+) yüklü olduğu için (-) kutuplara yönelirken, SO_4^- ile O_2^- (-) olduğu için (+) kutuplara doğru yönelirler. Diğer bir ifade ile katyon adı verilen (+) iyonlar anot tarafından itilip, katot tarafından çekilirken, burada yapılarına göre ya elektron alır ya da elektron vererek nötr hale geçerler. Alüminyumun anodik oksidasyonunda (eloksalda), SO_4^- ve O_2^- fazla elektronları vererek nötrleşirken, H_2^+ iyonunda elektron alarak nötrleşir. Fazlası da gaz halinde dışarı çıkar. Eloksal yönteminde anot (+ kutup) alüminyumun iş parçalarını, katot (- kutup) alüminyum lamaları (bara) oluşturur. Eloksal tabakası elektrik akımını iletmez. Eloksal, alüminyum ve alaşımlarında dekoratif, koruyucu ve korozyona dayanıklı bir yüzey elde etmek için uygulamada çok geniş olarak kullanılır[26].

Eloksal tabakası Şekil 2.3. 'de görüldüğü gibi alüminyuma entegre bir tabaka olarak oluşur ve metal/oksit ara kesitinde oluşan bölümüne özel olarak "baraj tabakası" (barrier layer) adı verilir. Eloksal tabakasının gözenekli yapısı bu baraj tabakasının üstünde büyür[25].



Şekil 2.3. Eloksal tabakasının yapısı[25]

Genel olarak, gözenek çapı, hücre boyutları ve baraj tabakası uygulanan voltajla doğru orantılıdır. Uygulanan her volt için gözenek çapı ve baraj tabakası 10 Angström, hücre boyutu ise 30 Angström büyür[25].

Aşağıdaki parametreler anodik oksidasyon şartlarının nasıl değiştiğini açıklamaktadır.

- Belirli bir anodik oksidasyon voltajında sıcaklık artışıyla akım yoğunluğunu ve kaplama porozitesi çözülmeye yardım eden sıcaklık artışı sebebiyle artmaktadır.
- Belirli bir anodik oksidasyon voltajında sülfürik asit konsantrasyonu artışıyla daha yüksek oksit film çözünürlüğünden dolayı akım yoğunluğu artmaktadır.
- Belirli bir sıcaklıkta anodik oksidasyon voltajının artışıyla akım yoğunluğu baraj tabaka kalınlığı ve porozitelerin çapı artmaktadır[27].

Eloksal tabakasının alüminyuma tutunması, alüminyum ile bütünleşerek oluşmasından dolayı mükemmel sonuç verir. Eloksal tabakası çok sert (Al_2O_3) ve aşınmaya karşı çok dayanıklı olduğundan alüminyuma üstün özellikler kazandırır. Tespit işlemi tamamlanmış bir eloksal tabakası çeşitli asit ve diğer kimyasallara karşı dayanıklı olduğundan, birçok ortamda alüminyum korozyona karşı korur(Şekil 2.4.). Eloksal tabakasının şeffaf yapısı, alüminyumun metalik görünümünü ortaya çıkarır. Ve bu özellik sayesinde alüminyum yüzeyine parlak veya mat görünüm verecek çeşitli mekanik veya kimyasal işlemler uygulanabilir.



Şekil 2.4. Eloksal tabakasının tespit işlemi öncesi ve sonrası[25]

Birçok yüzey işlem prosesi öncesinde yüzeyi hazırlamak amacıyla, “yüzey ön işlemleri” uygulanır. “Yüzey ön işlemleri” ile yüzeyin dekoratif görünümü değiştirilebileceği gibi, esas yüzey işlemle oluşturulacak tabakanın iyi tutunması için yüzeyin tutunma kabiliyeti geliştirilebilir. Alüminyum profillere uygulanan en önemli yüzey işlemlerinden birisi olan “eloksal” (anodik oksidasyon) öncesi yüzeyin hazırlanması büyük önem taşır[25].

Bu işlemlerden kısaca bahsedecek olursak

2.7.1. Yağ alma

Genellikle, yağ alma eriyikleri, su esaslı eriyikler olup, karbonat, fosfat, ıslatıcı ajan ve bazende bir kompleks yapıcı içeren bazik eriyiklerdir. Su esaslı yağ alma banyoları 70-90 °C arasında çalışırlar.

2.7.2. Matlaştırma (Dağlama)

Alüminyum yüzeyinin matlaştırılması için genelde sud-kostik içeren eriyikler kullanılır ve bu işleme “kostikleme” denir. Kostik banyosu, 60 °C civarında çalışır. Reaksiyon sonucunda yüzey alanının her m²’inde 80-120 gr alüminyum çözünerek eriyiğe geçer.

2.7.3. Temizleme

Kostikle yapılan matlaştırma veya kimyasal parlatma işlemleri sonucunda,

alüminyum yüzeyinde bir çamur tabakası (reaksiyon ürünü) oluşur. Bunun temizlenmesi için, asidik bir banyo kullanılır. Bu amaçla en yaygın kullanılan banyo, oda sıcaklığında çalışan ve hacimsel olarak % 30-50 konsantrasyonda nitrik asit içeren banyodur[28].

BÖLÜM 3. KOROZYON VE OYUK KOROZYONU

3.1. Korozyonun Genel Özellikleri

Korozyon metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonları sonucu bozunmalarınıdır. Oluşumunu sağlayan reaksiyonun türüne göre kimyasal ve elektrokimyasal korozyon olmak üzere iki grupta incelenebilir. Kimyasal korozyon metal ve alaşımlarının gaz ortamlar içindeki oksitlenmesidir. Elektrokimyasal korozyon ise metal ve alaşımlarının sulu ortamlar içinde bozunmalarınıdır. Sözü edilen sulu ortamlar metal yüzeyinde yoğunlaşmış ince filmlerden sulu çözeltilere kadar su içeren bütün ortamları kapsamaktadır. Örneğin; atmosfer, doğal sular, topraklar, vücut sıvıları, kimyasal çözeltiler, besin ürünleri, vb[29,30].

Korozyon olgusunun temelini elektrokimyasal olarak yürüyen reaksiyonlar oluşturur. Bu reaksiyonlar metal yüzeyinde veya metal-çözelti ara yüzeyinde yürürler. Korozyon bir yüzey olayıdır ve yüzeyden başlayarak metalin içine doğru ilerler. Korozyon reaksiyonlarının elektrokimyasal yoldan yürüyebilmesi için aşağıdaki üç koşulun bir araya gelmesi gerekir.

1. Bir potansiyel farkı bulunmalıdır.
2. Elektronik ve elektrolitik iletkenler arasında yük transferi reaksiyonu olmalıdır.
3. Sürekli bir akım iletim yolu bulunmalıdır.

Korozyon reaksiyonları Au, Pt ve Pd gibi soy metaller dışındaki metallerin termodinamik kararsızlığı sonucu veya dış akımların etkisiyle gerçekleşir. Metaller, cevherlerinden doğadaki temel reaksiyonları tersine çevrilerek; indirgenme yoluyla elde edilirler. Dolayısıyla bu metaller birçok ortamda kararlı

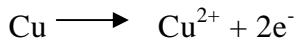
değildirler ve yeniden kararlı bileşikler oluşturabilme eğilimi gösterirler. Bu eğilim de korozyona neden olur[31,32].

Belirlenen en korozif ortam oksijen, karbondioksit, H₂S, amonyak, bazlar, asitler, asit tuzları, oksitleyici maddeler, çözünmüş katılar veya metal yüzeyinde birikinti oluşturan maddeleri içeren sulu ortamlardır.

Bir korozyon olayındaki anodik ve katodik reaksiyonlar, reaksiyon veren bölgeler arasındaki serbest enerji farkı nedeniyle gerçekleşir. Korozyonun mekanizması elektrokimyasal bir pilin mekanizmasıyla aynıdır. Sulu ortamlarda yürüyen reaksiyonlardaki anot ve katot olayları şu şekildedir:

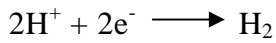


Bütün korozyon reaksiyonlarında anodik reaksiyon metalin kendi iyonlarına yükseltgenmesidir. Anodik reaksiyonlarda n metalin kaybettiği elektron sayısını göstermektedir. Örneğin:

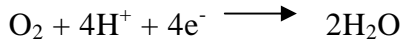


Metalik korozyonda sık sık göz önüne alınan çeşitli katodik reaksiyonlar vardır;

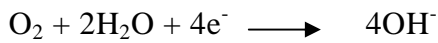
Katot reaksiyonu:



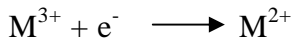
Hidrojen çıkışı



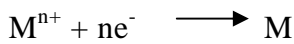
Oksijenin indirgenmesi(asitli ortamda)



Oksijenin indirgenmesi(nötr ortamda)



Metalin indirgenmesi



Metalin ayrılması

Korozyon sırasında birden çok yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonu yürüyebilir. Elektrokimyasal bir pilde olduğu gibi anotta açığa çıkan elektronların tamamı katodik reaksiyon ile harcanmak zorundadır[31].

Korozyon olayının mekanizmasını belirleyebilmek için anot ve katot reaksiyonlarının ayrı ayrı incelenmesi ve enerji ilişkilerinin bilinmesi gerekmektedir. Böylece reaksiyonun hızı, kendiliğinden yürüme yönünde istekli olup olmadığı ve nasıl denetlenebileceği konusunda fikir edinilebilir.

3.1.1. Korozyonun sınıflandırılması

Korozyonun başlaması ve sürmesi, metal yüzeyinde farklı koşulların oluşmasına; örneğin çözeltili içerisinde aşındırıcı iyon bulunmasına, metalik yapının şekline, metalin metalürjik özelliklerine ve alaşımları oluşturan metallerin birbirlerine göre aktiflik farklarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Literatürde bu faktörlere bağlı olarak oluşan 47 tip korozyondan söz edilmektedir. Ancak korozyona uğramış metallerin görünüşlerine göre korozyon çeşitleri üç ana grupta toplanabilir[33].

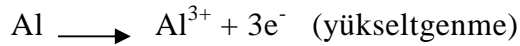
1. Genel Korozyon
2. Yerel Korozyon
3. Gerilmeli Korozyonu

3.1.2. Yerel korozyon

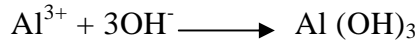
Metal içindeki heterojenlik, çevre veya yapının geometrisiyle ilgili olarak metal yüzeyinin bazı bölgelerinin diğer bölgelerden daha hızlı korozyona uğraması yerel korozyon olarak tanımlanabilir. Yerel korozyon tehlikeli ve yıkıcı korozyon türüdür. Bunun nedeni ise çok küçük alanlarda bölgesel olarak oluşan aşınmanın izlenmesinin güç olması ve çok hızlı ilerleyerek kırılmalara ve kopmalara neden olmasıdır[34].

Yerel korozyon metal yüzeyinde elektrokimyasal mekanizmaya sahip bölgesel pillerin varlığı nedeniyle oluşur. Bir yükseltgenme reaksiyonu olan korozyon bu pilin anodunda gerçekleşir.

Alüminyum suda olduğu bir durumda;



Alüminyum iyonları su içerisinde çözünür, iyon halinde bulunamaz. Sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek alüminyum hidroksit olarak çöker.



Yukarıdaki çökeltme reaksiyonu nedeniyle ortamdaki hidroksil iyon derişimi düştüğünden anodik bölge asidik olur. Bu bölgede pH 2-4 arasındadır. Bu durumda pasifleşme potansiyeli yükselir ve metalin çözünmesi artar.

Yerel korozyonda da bütün korozyon reaksiyonlarında olduğu gibi hidrojen çıkışı, oksijenin indirgenmesi ve metalin indirgenmesi reaksiyonları katodik reaksiyonu oluşturur[35].

Bölgesel piller metal yüzeyindeki bölgesel farklılıklardan, metalin çevresindeki farklılıklardan ve metalin bir şekilde maruz kaldığı akımlardan kaynaklanmaktadır.

3.1.3. Yerel korozyonun sınıflandırılması

Yerel korozyon oluşumuna ve şekillerine göre sınıflandırılabilir[30,35].

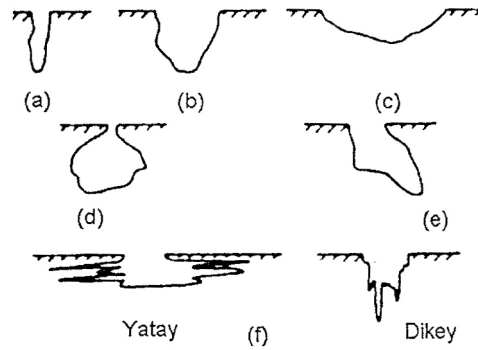
1. Oyuk korozyonu
2. Çatlak korozyonu
3. Taneler arası korozyon
4. Birikme korozyonu
5. Seçimli aşınma
6. Yorulma korozyonu

3.2. Oyuk Korozyonu

Oyuk korozyon metal yüzeyinin özel bölgelerinde küçük oyuklar oluşurken

metalin geriye kalan yüzeyinin çoğu kez etkilenmeden kaldığı yerel korozyonun sınır hali olarak tanımlanır. Sulu elektrolit çözeltileri içinde metali yıkıcı en yaygın ve tehlikeli korozyon türüdür. Demir, nikel, alüminyum, magnezyum, zirkonyum, bakır, kalay, çinko ve bunların çeşitli alaşımlarında gözlenir.

Oyuk korozyonunda görülen oyukların oluşması için genellikle uzun bir başlama süresi geçer. Bu süre metale ve korozif ortama bağlıdır. Oyuklar genellikle yerçekimi doğrultusunda büyüyerek metal yüzeyini derinliğine oyma eğilimi gösterirler. Oyukların biçimi iç yüzeyi parlatılmış yan küresel, düzgün olmayan, yanları kristal yüzeylerden oluşan kristalografik veya tane yönlenmesi gösteren kristalografik şekillerde olabilir. Şekil 3.1.'de, alüminyum alaşımlarında oluşan oyuk korozyonun farklı morfojilerinin kesit görünüşü şematik olarak verilmektedir[34].



Şekil 3.1. Alüminyum alaşımları için farklı oyuklanma morfolojileri[36] (a) Dar ve derin, (b) Eliptik, (c) Geniş ve sığ, (d) Yüzeyaltı (e) Açılı derin, (f) Mikroyapısal yönlenmeye bağlı.

Oyuk korozyon iki aşamada gerçekleşir:

1. Oyuk oluşumu
2. Oyukun büyümesi (gelişme ve yayılma)

Oyuk oluşması ve büyümesi ya da başka bir deyişle metalin oyuk korozyona uğraması için şu koşullar sağlanmalıdır[37].

1. Metal pasif durumda olmalıdır.

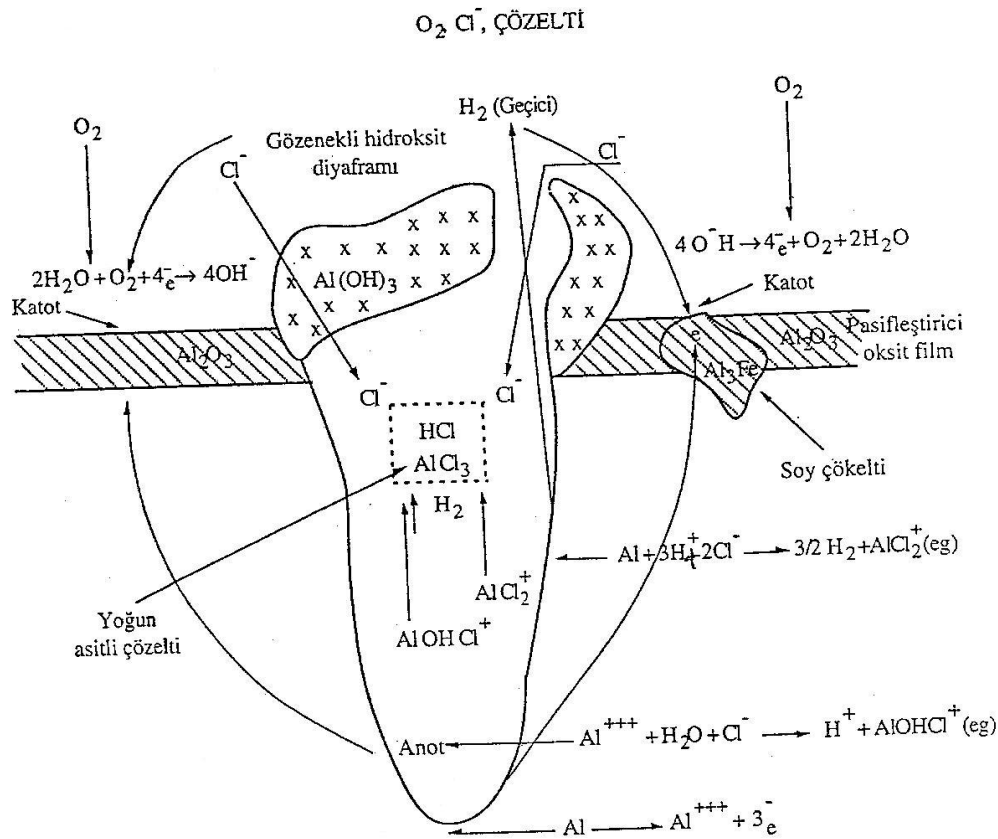
2. Elektrot potansiyeli oyuk oluşma potansiyelinden, E_{oo} , daha pozitif olmalıdır.
3. Ortamdaki elektrolit çözeltisi yüksek derişimde aşındırıcı anyon (Cl^-) içermelidir.

Oyuk korozyonda, korozyonun oyuk içinde başlaması ve sürmesi için gerekli koşulların kendiliğinden olması olayın otokatalik olarak yürüdüğünü gösterir.

Şekil 3.2. 'de oksijenli ortamda sodyum klorür çözeltisi içerisinde alüminyum oksit yüzeyinde oyuk oluşması ve büyümesinin elektrokimyasal mekanizması şematik olarak gösterilmiştir[38].

Oyuk içinde metal anodik olarak çözünürken metal yüzeyinde oksijen indirgenir. Oyuk içinde metalin hızla çözünmesiyle çok miktarda artı yüklü iyonlar oluştuğundan elektriksel nötrlük koşulunu korumak için klorür iyonları oyuk içine difüzlenir. Oyuk içinde $AlCl_3$ derişimi artınca hidroliz sonucu hidrojen iyon derişimi artar ve ortam asidik olur. Bu durumda pasifleşme potansiyeli yükselir ve metalin çözünmesi artar. Hidrojen ve klorür iyonlarının her ikisi de birçok metalin ve alaşımlarının çözünmelerini arttırıcı etki gösterirler. Oyuğun içi küçük anot, metal yüzeyi büyük katot olarak etkiyerek oyuk otokatalik olarak çözünmesini sürdürür[39].

Oyuk korozyon genellikle Cl^- , Br^- , F^- , I^- gibi halojenür iyonları içeren ortamlarda olur. Bunların yanında yükseltgeyici metal iyonları da korozyonu arttırırlar. Bakır II, demir-III, civa-II halojenürleri oyuk korozyonu bakımından çok etkindirler[34].



Şekil 3.2. Alüminyum yüzeyinde oyuk oluşumunun elektrokimyasal mekanizması

Adsorpsiyon oyuk korozyonun oluşmasında önemlidir. Cl^- ve diğer aşındırıcı iyonların metal yüzeyine adsorpsiyonu korozyonun ilk aşamasıdır. Klorür iyonlarının pasif metal yüzeyine adsorpsiyonu Tempkin adsorpsiyon izotermine uymaktadır.

Pasif film üzerine Cl^- adsorpsiyonun yüzey yüküne bağlı olduğu bulunmuştur. Pasifleştirilmiş metal suya daldırıldığında oksit film üzerine suyun adsorpsiyonu gerçekleşir ve bu da hidratlanmış bir yüzey tabakasının oluşumuna neden olur. Yüzey yükünün sıfır olduğu noktada (pH_{zch}) ortamdaki OH^- derişimi ile H^+ derişimi birbirine eşittir. pH_{zch} değerlerinden daha büyük pH değerlerinde oksit yüzey negatif yüklüdür ve bu durumda Cl^- adsorpsiyonu gerçekleşmez. Ancak pH_{zch} değerinden daha düşük pH 'larda Cl^- ve diğer halojenür anyonların adsorpsiyonu mümkündür.

Demir için pH_{zch} değeri 8,8 iken alüminyum oksit için 9,1 'dir. Bunun anlamında

bu pH değerlerinin altında söz edilen oksit filmleri pozitif yüklüdür ve halojenür anyonlar adsorplanabilirler[37].

3.2.1. Pasiflik

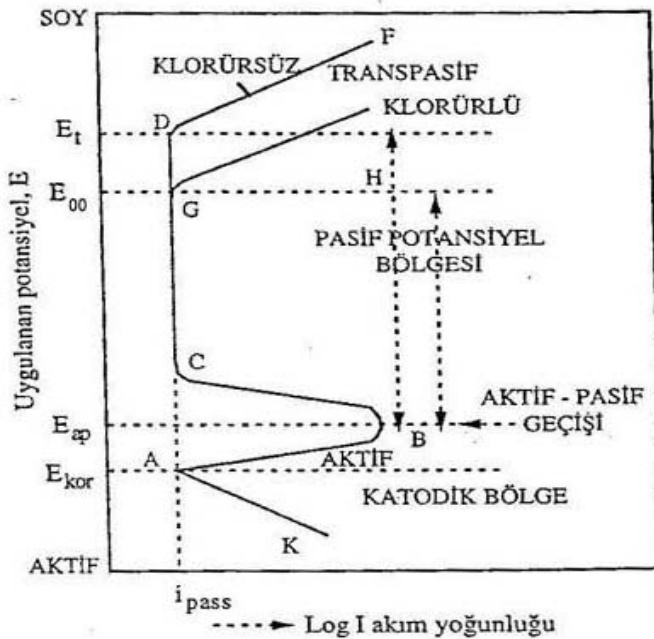
Pasiflik metallerin şiddetle oksitlenmelerinde düşük korozyon hızı ile karakterize edilen bir potansiyel bölgesindeki metal yüzeyinin hali ya da korozyon ürünlerinin metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturmasıyla korozyon eğiliminin azalması olarak tanımlanabilir. Kimyasal ve mekanik olmak üzere iki tür pasiflik vardır[34,38].

Kimyasal pasiflik geçiş metallere ve diğer bazı metallere ortaya çıkmaktadır. Pasifleşen geçiş metallere örnek olarak demir, platin, krom, molibden, tungsten, titanyum ve zirkonyum verilebilir. Bunun yanında geçiş metali olmayıp ta pasiflik gösteren metallere vardır, örneğin; alüminyum. Kimyasal pasifliği sağlayan, metal yüzeyindeki çok ince fakat yoğun ve yan iletken oksit filmidir. Bu film sayesinde metalin elektrot potansiyeli (alüminyum için bu elektrot potansiyel değeri -1,67 V 'tur) oldukça pozitif değerlere kayar(0,5-2V).

Mekanik pasiflik ise uygun ortamlarda metal yüzeyinde katı tuzların çökebildiği tüm metal türlerinde görülür. Bu kez korozyon hızını azaltan faktör kalın, gözenekli ve genellikle iletken olmayan tuz tabakasıdır. Elektrot potansiyelinin pozitif değerlere kayma gerekliliği yoktur, ancak eğer tuzun çözünürlük çarpımı düşükse potansiyel standart potansiyelden daha negatif değerlere kayar. Bu tip pasifliğe örnek olarak ise sülfürik asit içindeki kurşun, florür ya da su içinde magnezyum, klorür çözeltisi içinde gümüş verilebilir.

Kimyasal pasiflik metalin içinde bulunabileceği birçok ortamda gerçekleşebilen genel bir olaydır. Kimyasal ve mekanik pasiflik arasında kesin bir ayırım yapmak mümkün değildir. Çünkü alüminyum, magnezyum ve tungsten örneklerinde olduğu gibi metallerin yüzeylerindeki ince doğal oksit film tabakası anodik işleme kalın ve daha koruyucu oksit filmine dönüştürülebilir.

Aktif-pasif geçişli bir metal veya alaşımının durumunu incelemek için anodik polarizasyon eğrilerinden yararlanır. Pasifleşen bir metal veya alaşımının durumu üç bölgede incelenebilir; Aktif bölge, pasif bölge, transpasif bölge [34]. Şekil 3.3. 'de görüldüğü gibi anodik akım önce artar, sonra potansiyel arttıkça ani olarak azalır. Bu davranış ortamdaki oksitleyici derişimi arttıkça korozyon hızının artışının ve oksitleyici derişimi kritik bir değere ulaştığında korozyon hızının azaldığının bir göstergesidir. Korozyon hızındaki takımındaki bu ani düşüşe pasifleşme denir. Sadece alüminyumda bu davranış farklılık gösterir. Alüminyumda da diğer metallerde olduğu gibi korozyon potansiyelinden sonra korozyon hızı (akım) düzgün olarak artar. Ancak alüminyumda aktif-pasif geçiş bölgesine gelindiğinde korozyon akımı pasif potansiyel bölgesi boyunca sabit kalır; akımda ani bir düşüş gözlenmez. Pasif bölgeden sonra potansiyel daha da arttırılırsa alüminyum ve diğer bütün metaller için akımda tekrar ani bir artış olur. Bu artışın gözlendiği potansiyel oyuk oluşma potansiyeli ya da transpasif potansiyel olarak adlandırılır. Bu ani artışın nedeni ise pasif filmin bozulmasıdır.

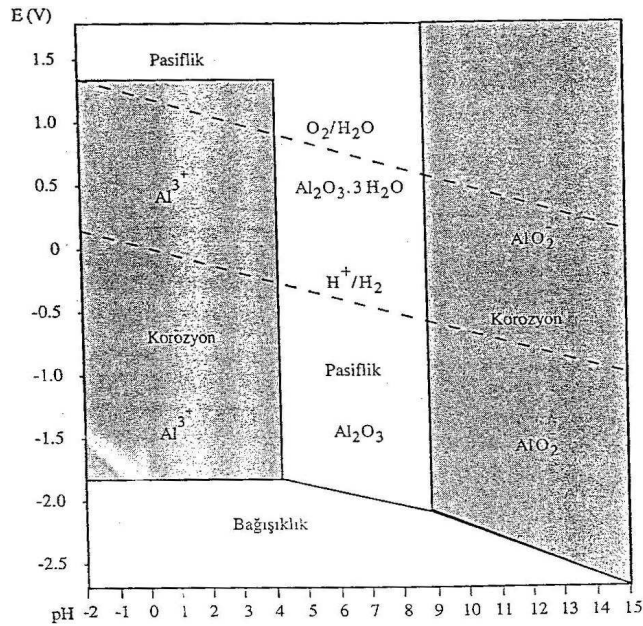


Şekil 3.3. Çelik için sülfürik asit içinde şematik polarizasyon eğrisi

Aktif çözünme bölgesinin bütün potansiyel aralığında düzgün bir çözünme gözlenir. Aktif-pasif geçişin gözlendiği tepe bölgesi civarında da düzgün bir korozyon beklenmelidir. Bu tepe bölgesinden, yani E_{ap}, birinci pasiflik

bölgesinden sonra metal yüzeyi bir pasiflik filmi ile kaplanmaya başlar ve bu film C-D potansiyel bölgesinde metal yüzeyini korur. Daha sonra klorür gibi korozif iyonların veya yüksek oksitleyici güce sahip maddelerin etkisi ile pasif film parçalanır ve filmin parçalanması ile bozulan yerlerde büyük miktarda akım geçer. Bu potansiyel değerine oyuk oluşma potansiyeli veya transpasif potansiyel denir.

Metalin pasifliği konusunda Pourbaix diyagramları da fikir verir. Bu diyagramlarda korozyon olayında ortamın pH değerleri elektrot potansiyellerine karşı çizgelere geçirilmiştir. Her metal için bir potansiyel-pH diyagramı çizilerek metallerin kuramsal pasiflik, korozyon ve bağımsızlık bölgeleri gösterilebilir(Şekil3.4.).



Şekil 3.4. Alüminyum için potansiyel pH diyagramı

Bu diyagramlar metalin korozyon durumunu ve pasiflik alan genişliğini oldukça iyi gösterir. Bununla birlikte pasifleştiği kesin olan bazı metallerde bu kuramsal diyagramlar metalin pratikte gösterdikleri gerçek pasiflik bölgesini daha küçük göstererek metalin korozyon özelliklerini belirtmede yetersiz kalabilirler. Bu nedenle Pourbaix diyagramları ancak E-I polarizasyon eğrileri ile birlikte kullanıldığında korozyon ve pasiflik konusunda kesin bilgiler elde edilebilir [30].

3.3. Oyuk Korozyonun İzlenmesi

3.3.1. Elektrokimyasal yöntemler

3.3.1.1. Potansiyostatik yöntem

Bu yöntemde kararlı potansiyodinamik yöntem de denir. Bu yöntemde akım potansiyel eğrileri elde edilirken, potansiyel zamanla belirli bir hızla değiştirilip, akımın değişimi gözlenir. Potansiyel belirli bir miktar değiştirilip akım sabit kalıncaya kadar beklenir. Daha sonra potansiyel yeniden arttırılır.

Elde edilen anodik polarizasyon eğrisinde akım uzun süre sabit kaldıktan sonra ani bir artış gösterir. Akımı değerindeki bu ani artışa karşılık gelen potansiyel oyuk oluşma potansiyelidir. Oyuk oluşma potansiyelinin en duyarlı olarak ölçülebileceği yöntem potansiyostatik yöntemdir.

3.3.1.2. Galvanostatik yöntem

Bu yöntemde sabit akım uygulanarak potansiyel değişimi izlenir. Korozyon davranışı izlenecek metal elektrot olarak devreye bağlanır ve R direnci değiştirilerek elektroda belirli bir akım uygulanır. Bu akımları karşılayan kararlı potansiyel değerleri bir voltmetre aracılığı ile ölçülür. Potansiyelin uzun süre önemli derecede değişmediği değer oyuk oluşma potansiyelini verir.

3.3.1.3. Potansiyodinamik yöntem

Potansiyel belirli hızlarla değiştirilirken akım potansiyel eğrisi otomatik olarak çizilir. Akımın hızla artmaya başladığı potansiyel oyuk oluşma potansiyelini, geri dönüşte akımın azaldığı potansiyel ise yeniden pasifleşme potansiyelini verir. Akım-potansiyel eğrilerindeki tepelerin potansiyelleri, tepe akımları ve potansiyel değiştirme hızları arasındaki ilişkiler sadece korozyon hızı hakkında değil, korozyonun mekanizması hakkında da bilgi verir.

3.3.2. Kimyasal yöntemler

Oyuk korozyonun izlenmesinde kullanılan kimyasal yöntemler daha çok kalitatif sonuçların elde edildiği yöntemlerdir. Bu yöntemler oyukların sayıları ve kabaca büyüklükleri hakkında bilgi verebilirler. Oyuk korozyonun izlenmesinde kullanılan kimyasal yöntemler şunlardır:

1. Metal katyonu içeren asitli çözeltiye daldırma testi.
2. İndikator testi.

3.3.3. Derinlik ölçümü yöntemi

Oyuk korozyonun izlenmesinde etkili bir yöntemdir. Bu yöntemde metal yüzeyinde belirlenen alandaki en derin on oyuğun derinlikleri ölçülür, maksimum ve ortalama oyuk derinlikleri hesaplanır. Aynı zamanda oyuk dağılımı, oyukların sıklığı ve şekilleri de incelenir. Sonuç olarak en derin oyuğun derinliğinin bütün metal yüzeyindeki kalınlıktaki incelme miktarına oranı hesaplanarak oyuk korozyonun şiddeti hakkında Önemli bilgiler sağlayan oyuk faktörü olarak isimlendirilen oran bulunur[34,38].

3.4. Oyuk Korozyonun Önlenmesi

Bölüm 3.2. 'de de belirtildiği gibi oyuk korozyonu, oyuğun oluşması ve oyuğun büyümesi (gelişme ve yayılma) olmak üzere iki aşamada gerçekleşir. Bu iki aşamanın gerçekleşmesi için şu koşullar bulunmalıdır.

1. Metal pasif durumda olmalıdır.
2. Elektrot potansiyeli, oyuk oluşma potansiyelinden, E_{oo} , daha pozitif olmalıdır.
3. Ortamdaki elektrolit çözeltisi yüksek derişimde aşındırıcı anyon içermelidir.

İnhibitörler bu faktörlerin hepsi üzerinde etki gösterebilirler. Etkili bir inhibitör

pasif filmin koruyucu özelliğini kuvvetlendirir, oyuk oluşma potansiyelini artırır ve metalin oldukça yüksek derişimde aşındırıcı iyon içeren çözeltide korozyona uğramadan kalmasını sağlar.

Aşındırıcı iyonun pasif filmi yerel olarak tahrip etmesi ve çıplak metal yüzeyine etki ederek metali aktif olarak çözmesiyle ilgili tam bir mekanizma belirlenememiştir. Metalin aktif çözünmesiyle ilgili iki hipotez bulunmaktadır. Birinci hipoteze göre oyuk oluşumu oksit-metal ara yüzeyinde olmaktadır. Bu hipoteze göre;

- Pasif filmde bulunan çatlaklar ve gözeneklerden klorür iyonlarının çıplak metal yüzeyine difüzlenmesiyle,
 - Metal-oksit ara yüzeyindeki katyon boşlukları nedeniyle pasif filmin yıkılmasıyla,
 - Gerilmeler nedeniyle oksit filmin mekanik olarak kırılmasıyla,
- Cl⁻ iyonları çıplak metal yüzeyine ulaşarak oyuk oluşumuna neden olur.

İkinci hipoteze göre oyuk oluşumu oksit-çözelti ara yüzeyinde olmaktadır. Bu hipoteze göre ise;

- Oksit filmdeki oksijen iyonları ile klorür iyonları yer değiştirirler.
- Metal katyonları ile klorür iyonları klorür kompleksleri oluşturur.
- Metal katyonları ile klorür iyonları arasındaki reaksiyon sonucu tuz oluşur.

Bu nedenlerle pasif film incelik ve klorür iyonları çıplak metal yüzeyine ulaşarak oyuk oluşumuna neden olur.

Aşındırıcı iyonların metal yüzeyine saldırı şekline bağlı olarak oyuk oluşumunu önleyen inhibitörler iki sınıfa ayrılır[40].

1. Pasifleştirici inhibitörler
2. Adsorpsiyon inhibitörleri

3.4.1. Pasifleştirici inhibitörler

Pasifleştirici inhibitörler filmdeki yapısal eksiklikleri gidererek filmi iyileştirme ve korozyon potansiyelini anodik değerlere kaydırma özelliğine sahiptirler.

Pasifleştirici inhibitörler metali oyuk korozyondan üç şekilde koruyabilirler:

1. Metal yüzeyinde az çözünür tuzlar oluştururlar.
2. Oksit film üzerindeki zayıf noktaları (gözenekler, boşluklar vb), gözenekleri, boşlukları tıkayarak ya da filmin kimyasal bileşimini ve yapısını değiştirerek filmi iyileştirirler.
3. Metal yüzeyinde monoatomik veya poliatomik oksit film oluşturarak metali korurlar.

Pasifleştirici inhibitörler metali oyuk korozyon yanında genel korozyondan korumada da etkilidirler. Pasifleştirici inhibitör olarak kullanılan bazı anyonların oksijensiz ortamda, pasifleştirme yetenekleri şu sıralamaya göre artış gösterir.

Nitrit > OH⁻ > kromat > borat > fosfat > karbonat > benzoat > bikarbonat > nitrat
Nitrit ve kromat gibi tipik pasifleştirici inhibitörler uygun derişimlerde kullanıldığında sürekli bir pasifleşme veya yeniden pasifleşme (oksidin onarılması) sağlayarak metali oyuk korozyondan korur[37].

3.4.2. Adsorpsiyon inhibitörleri

Adsorpsiyon oyuk oluşumu ve oyuk önlenmesinde önemli bir süreçtir. Daha öncede bahsedildiği gibi oyuk oluşumu Cl⁻ iyonlarının oksit yüzeyine adsorplanarak oksit örgüsünde alüminyum katyonu ile çözünür kompleks oluşturmasıyla başlar. Daha sonra çözünür kompleksin yüzeyden difüzyonla oksit film incilir ve incelen bölgelerde metalin doğrudan elektrolitteki aşındırıcı iyonlarla reaksiyona girmesiyle oyuk büyür.

Inhibitör olarak belirlenen bileşimin adsorpsiyonu, aşağıdaki sonuçları vermelidir;

1. Adsorpsiyonda aşındırıcı iyonla, yarışmalı ve aşındırıcı iyondan daha hızlı adsorbe olmalı,
2. Adsorpsiyonla aşındırıcı iyonun metal katyonu ile çözünür kompleks vermesi önlenmeli,
3. Adsorbe olan inhibitör, metal ile çözünür kompleks oluşturmamalıdır[41].

Pasif film üzerine anyonların adsorpsiyonu yüzey yüküne bağlıdır. Pasifleştirilmiş metal suya daldırıldığında oksit film üzerinde suyun adsorpsiyonuyla hidratlanmış bir yüzey tabakası oluşur. Yüzey yükünün sıfır olduğu noktada (pH_{zch}) ortamdaki OH^- derişimi ile H^+ derişimi birbirine eşittir. pH_{zch} 'dan daha büyük pH değerlerinde oksit film negatif yüklüdür ve bu durumda anyonların adsorpsiyonu gerçekleşmez. Ancak pH_{zch} 'dan daha düşük pH değerlerinde yüzey pozitif yüklü olduğundan Cl^- iyonlarının da, inhibitörün de yüzeye adsorpsiyonu mümkündür. Alüminyum oksit için pH_{zch} değeri 9,1 'dir, yani bu pH değerinin altında yüzey pozitif yüklüdür ve anyonlar adsorplanabilir.

Metal veya oksit filmleri üzerinde ne tür maddelerin kuvvetle adsorplanabileceği konusunda yapılan çalışmalarda iki kuralın teorik olarak yol gösterici olabileceği üzerinde durulmaktadır:

- 1) Kuvvetli ve zayıf asit ve baz kuralı(HSAB)
- 2) Lineer serbest enerji ilişkisi(LFER)

HSAB kuralına göre hidroksit, sülfat gibi inhibitör olarak davranan kuvvetli bazların metal katyonu içeren oksit film üzerine adsorpsiyonu kolayca gerçekleşir. Bu kurala göre bazlığı $I^- < Br^- < Cl^-$ sıralamasına göre artan aşındırıcı anyonlarda oksit film üzerine kuvvetle adsorplanırlar. Bu nedenle inhibitörün aşındırıcı anyonlarla yüzeyde adsorpsiyonda yarışabilmesi için aşındırıcı anyonlardan daha nükleofilik olması gerekir. Ayrıca elektron verici (nükleofilik karakter) ile oksit arasındaki etkileşimin ürünü çözünür bir bileşik olmamalıdır. LFER kuralı ise farklı sabitler kullanarak, çeşitli şekillerde bu konuda kullanılabilir (Örneğin; sübstitüentin indüktif etkileri).

İnhibitör etkinliği inhibitör molekülünün içerdiği fonksiyonel gruplara bağlıdır. Molekül çok uzun bir alifatik zincir içermediği durumda fonksiyonel grubun elektronik yapısı oyuk oluşumunu önlemede etkin rol oynar. Molekülün alifatik zincirle birlikte karboksil grubu da içerdiği durumda inhibitörün etkinliği metal yüzeyine hidrofobik özellikleri kazandıran alifatik zincirle artar. Karboksil grupları da molekülü metal yüzeyine bağlaması ve oyuğun oluştuğu noktalarda pH tamponu görevi yapması nedeniyle oyuk oluşumunu önlemede büyük rol oynar[35,37].

BÖLÜM 4. METALLERİN YORULMASI

Yorulma hasarı, tasarım mühendisliğinin en büyük problemi olarak güncelliğini korumaktadır. Bu problem özellikle dalgalı ve değişen tekrarlı yüklerin uygulandığı durumlarda ve konstrüksiyon malzemesinin çok fazla yüzey pürüzlülüğü ihtiva ettiği hallerde etkili olmaktadır. Uygulamada, makinelere ve dolayısı ile makine parçalarına genellikle büyüklüğü ve yönü, düzenli veya düzensiz olarak zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler ile eğme ve burma momentleri etki ederler. Bu tür zorlama altındaki bir makine elemanı kendi akma sınırının altındaki bir gerilmeye beklenmedik bir tarzda kırılabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir. Zorlama sırasında yük istendiği kadar tekrarlanabilir veya zorlamanın yapılmadığı zaman aralıkları mevcut olabilir[42].

Yorulma zorlamasında yükün zamana bağlı olarak nasıl değiştiğinden çok, en alt ve en üst sınır değerlerinin büyüklüğü önemli olduğundan, yük değişimi genellikle sinüzoidal olarak kabul edilir. Birim zamandaki çevrim sayısı (periyot, yük tekrarı), çok düşük veya malzemenin ısınmasına neden olacak kadar çok yüksek olmamak şartıyla, yorulma ömrünü (kırılmaya kadar geçen çevrim sayısı) önemli ölçüde etkilemez. Kuvvetin veya momentin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Yorulma deneylerinde kuvvet veya momentin uygulanma şekli "R" değeri ile belirtilir. $R = -1$ değeri uygulanan kuvvet veya moment değerinin sıfır konumuna göre ters işaretli olduğunu ifade eder. Yorulma zorlamasının iki hali için özel isimler kullanılmaktadır: Kuvvet veya moment aynı büyüklükte fakat biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise "değişken zorlama" ve malzeme dayanımı bakımından "değişken yorulma dayanımı" değeri söz konusudur. Kuvvet veya moment sıfır değeri ile belirli bir değer arasında değişiyor ise "dalgalı zorlama" ve malzeme dayanımı bakımından "dalgalı yorulma dayanımı" değeri deyimleri kullanılır[42].

Yorulma hasarı üzerinde etkili olan faktörlerin çokluğundan dolayı otomotiv ve uçak endüstri sindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makina parçalarının servis ortamında meydana gelen hasarlarının % 80-90 'ı yorulma kırılmasıdır[42].

4.1. Yorulma Kırılmasının Nedeni

Yorulmanın meydana geliş biçimi tam olarak bilinmemekle beraber, plastik şekil değiştirmelerin rol oynadığı kabul edilmektedir. Yorulma zorlamasında sadece dış kuvvetler değil, ısıl genleşme ve büzölmelerden doğan ısıl gerilmeler de etkilidir[43].

İşletme koşullarındaki zorlamalar sonucu ortaya çıkan gerilmeler mukavemet bilgisinin temel denklemlerine her zaman uymaz, dolayısıyla çekme veya basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılma, eğme ve burma gerilmeleri de yüzeyden ortaya doğru doğrusal bir azalma göstermeyebilirler. Uygulamada bu kuramsal gerilme dağılımlarında az veya çok sapmalar görülür. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozif etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikro yapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenler ile yerel "gerilme yığılmaları" oluşur. Yorulma çatlağı gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlar. Ayrıca bir makine elemanı veya yapı elemanın öz titreşim frekansına yakın bölgelerde zorlanması sonucu rezonans titreşimlerine veya her zaman önlenmesi mümkün olmayan aşırı yüklere dayanacak şekilde tasarlanmış olması da yorulma çatlaklarına yol açabilir. Yorulma hasarının diğer bir nedeni de montaj hatalarıdır. Örneğin, balansı bozulmuş bir milde, hesaplarda ön görülenden daha yüksek gerilmeler oluşabilir. Ayrıca zorlanan bölgelerde dolgu kaynağı işlemlerinin uygun olarak yapılmaması halinde de yorulma çatlakları görülebilir[42].

4.2. Çatlak Oluşumu

Yüzey özellikleri metalik parçaların yorulma dayanımında büyük etkiye sahiptir, çekme dayanımında ise yorulmaya nazaran daha az etkiye sahiptir. Yorulma

olayında çatlama genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çünkü eğme ve burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda en yüksek gerilme yüzeylerde oluşur. Eksenel gerilme halinde, gerilmenin tüm kesite üniform dağılması beklenirken rasgele yüklenmiş çok taneli malzemelerde gerilme üniform dağılmayıp yüzeyde maksimum değerde alabilir. Yüzeyde başlayan yorulma çatlakları daha sonra çentik etkisi yapacağından gerilme konsantrasyonuna ve dolayısı ile çatlakların hızlı ilerlemesine yol açacaktır. Çatlak ilerlemesi ile azalan kesit uygulanan yükü taşıyamaz ve ani kopma meydana gelir. Yorulmanın çatlakların teşekkülü, çatlakların yayılması ve malzemenin kopması gibi üç kademe meydana geldiği düşünülmektedir[44].

Çatlak teşekkülü için genellikle şu üç ana şartın gerçekleşmesi gereklidir[43].

1. Yeteri derecede yüksek bir çekme gerilmesi
2. Uygulanan gerilmenin değişimi
3. Uygulanan gerilmenin tekrar sayısı

Bu ana faktörler yanında pek çok yan faktörler de çatlak teşekkülüne zemin hazırlarlar. Malzeme yapısının düzensiz olması halinde çatlak, yüzeye en yakın düzensizlikten (boşluk, kalıntı, sert ikinci faz parçacıkları) başlar. Düzensizliklerin şekilleri, cinsleri ve büyüklükleri yorulma çatlakları başlatmada etkilidir. Düzensizlikler yorulma çatlaklarını hızlandırabildikleri gibi yavaşlatabilmektedir[45].

4.3. Yorulma Zorlamalarında Kırılma Olayı

Sürekli artan zorlamalarda şekil değiştirmenin tek yönlü olmasına karşın, yorulma zorlamasında kuvvet veya moment, dolayısıyla şekil değiştirme sürekli yön değiştirerek artma-azalma gösterir. Söz konusu şekil değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından taşınabilirler. Kalıcı şekil değiştirmeler kristal kafesin çarpılması ile değil, kafesin değişik bölümlerinin yeni bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesi yoluyla oluşurlar. Kafes kısımlarının birbirlerine

göre ötelenmelerine kayma adı verilir ve olay kayma düzlemleri olarak adlandırılan tercihli bazı düzlemlerde olur. Kayma düzlemlerinin kristal kafesindeki konumu kristal yapısı ile ilgilidir[42].

Yorulma zorlaması sırasında tekrarlanan kalıcı şekil değiştirmelerin yeteri kadar birikimi sonucu, malzemenin dayanımının aşıldığı noktalarda mikroskobik boyuttan da küçük çatlaklar oluşur. Zorlama sırasında dışarıdan verilen enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak bunlar mikro ve makro çatlaklar olarak birleşir ve sonunda bu çatlaklardan herhangi biri yorulma kırılmasına neden olur.

Hasar çok küçük ve sınırlı bir bölgede başlayıp çatlak olarak ilerlediğinden dışardan herhangi bir kalıcı şekil değiştirme görülmez ve bu nedenle yorulma kırılmaları şekil değiştirmesiz olarak nitelenir. Hasarın ilk oluştuğu nokta çoğunlukla yüzeyde veya yüzeyin hemen altındadır, ancak heterojenliklerin veya malzeme hatalarının durumuna göre malzemenin iç kısmında da bulunabilir[42].

Yorulma kırılmasını kolaylaştıran etkenler pek çok olmasına rağmen dış etkenler (şekil, yüzey durumu ve zorlama şekli) ile iç etkenler (malzemenin durumu) olarak ikiye ayrılabilir[42].

4.3.1. Dış etkenler

1. Konstrüksiyonla ilgili çentikler, (yağ delikleri, kama yuvaları, keskin kesit değişimleri, faturalar, enine delikler vb.)
2. Kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yerler, (cıvata kafaları, krank millerinin dirsekleri, sıkı geçmeler vb.)
3. Kuvvet etki noktaları, (toleranslı veya sıkı geçmeler, dingil başlıkları ve diğer noktasal veya çizgisel etkiyen kuvvetler)
4. Talaşlı işlemler sırasında oluşan yüzey zedelenmeleri, (taşlama izleri, taşlama çatlakları, torna izleri, yüzey çizikleri vb.)
5. Diğer yüzey zedelenmeleri, (korozyona uğramış noktalar, aşınmış bölgeler, sertleştirme çatlakları, hadde veya dövme hataları vb.)

4.3.2. İç etkenler

1. Curuf kalıntılarının yoğunlaştığı bölgeler veya tek tek iri curuf kalıntıları, curufların, oksitlerin, nitrürlerin ve karbürlerin tane sınırlarına çökelmeleri.
2. Her türlü birikmeler(segregasyonlar).
3. Yüzey kabarcıkları.
4. Tane sınırlarında oksitlenme (yanma) veya tanelerin içinde oksijen miktarının artması. Her ikisi de sıcak şekil verme veya ısıl işlem sırasında aşırı yüksek sıcaklıklar nedeni ile ortaya çıkabilir.
5. İç çatlak kümeleri: Haddelenmiş veya dövülmüş çeliklerde veya çeliklerin ark kaynağı dikişlerinde görülür.
6. Bölgesel yüzey sertleştirilmesi yapılmış malzemelerin yük taşıyan bölgelerinde veya çentiklerinde, sertleştirilmiş ve sertleştirilmemiş kısımlar arasındaki keskin geçişler.
7. Kaynak dikişlerinde gaz boşlukları, gözenekler, curuf kalıntıları, çatlaklar, erime oyukları bulunması. Kaynak bağlantılarının gerilme giderme ve normalizasyon tavlalarının yapılmaması.
8. Kaynak dikişi dışındaki elektrot ateşleme izleri.

4.4. Yorulma Kırıklarının Görünümü

Yorulma kırıklarının görünümü özellikle çelikler için, hemen hemen her olayda zorlamanın şekil ve seviyesi ile zorlamanın zamanla değişimi hakkında bilgi verir. Kırılmanın başladığı yerler genellikle saptanabilir. Yorulma kırılmasının ilerlemesinden de noktasal veya çevresel çentik etkilerinin var olup olmadığı anlaşılabilir. Çeliklerin çekme ve eğme zorlamalarında kırık yüzeyindeki görünümleri bakımından birbirinden tamamen farklı iki bölge ortaya çıkar:

- a) Düzgün ve mat veya bazen sürtünerek parlatılmış bölge: “Yorulma çatlağı”
- b) Kaba kristalli, yarıklar içeren, kısmen kalıcı şekil değiştirmiş ve son çevrim sırasında zorunlu olarak ani kırılmış bölge: “Son kırılma yüzeyi”

Yorulma çatlağında, zorlamanın durdurulduğu aralıklar veya zorlama seviyesinin

değişimi nedeniyle, ağaçlarda görülen yaş halkalarına benzer "duraklama çizgileri" bulunabilir. Duraklama çizgileri yorulma kırılmasının kesin bir işaretidir ve bu çizgilerin şeklinden yorulma kırılmasının başlaması ile ilerlemesi hakkında bilgiler elde edilir[42].

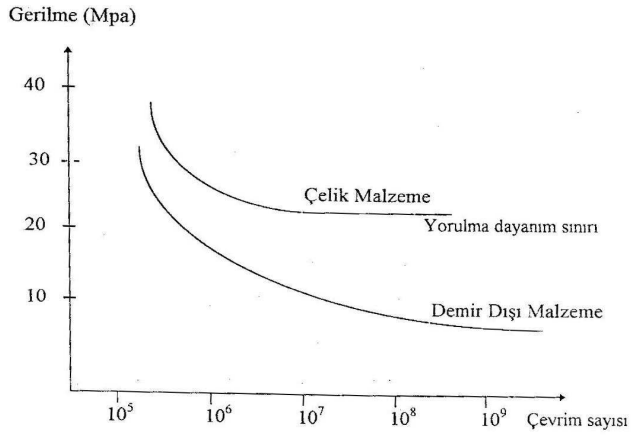
4.5. Yorulma Dayanımının Saptanması

Malzemelerin yorulma dayanımının saptanması için eksene paralel doğrultuda mekanik veya elektrolitik olarak parlatılmış düzgün deney parçaları kullanılır.

Yorulma dayanımı normal olarak Wöhler yöntemi ile bulunur. Bu yöntemde, malzeme, biçim ve yüzey kalitesi bakımından tümüyle aynı olan deney parçalarının her biri aralıksız şekilde ve farklı seviyelerde zorlanarak kırılmanın olduğu çevrim sayıları saptanır. Bir deney serisinde çoğunlukla 8-12 adet parça gereklidir. Belirli bir deney parçası için başlangıçta ayarlanan yorulma zorlaması deney sırasında değiştirilmez, yani tek kademeli yorulma deneyi söz konusudur. Buna karşın çok kademeli yorulma deneylerinde zorlama deney sırasında sistematik olarak değiştirilir.

Farklı sabit gerilmeler altında, malzemenin kaç çevrim sonunda çatlayacağı veya kırılacağı Wöhler diyagramı ile belirlenir. Wöhler diyagramının düşey ekseninde gerilme genliği (σ_g), yatay ekseninde ise, ortalama gerilme (σ_{ort}) sabit kalmak şartıyla ilk deney parçasına, üst gerilme genellikle akma sınırına yakın olacak şekilde yüksek düzeyde, daha sonraki deney parçalarına ise gittikçe daha düşük gerilme uygulanarak malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) bulunur[44].

Bir deney serisi sonunda uygulanan gerilme genliklerine karşı bulunan çevrim sayıları bir eğri olarak çizilerek Wöhler eğrisi (Şekil 4.1.) elde edilir. Wöhler eğrisinde çevrim sayısının yer aldığı apsis logaritmik, gerilme genliğinin yer aldığı ordinat ise metrik olarak seçilir.



Şekil 4.1. Wöhler eğrisi[44]

Wöhler diyagramında eğrinin yatay hale geldiği gerilmeye “Yorulma Dayanım Sınırı” (YDS) denir. Bu gerilmenin altındaki periyodik gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanabileceği kabul edilir. Demir Çelik grubu malzemelerde YDS, malzemenin çekme mukavemeti (σ_c) ve brinel sertlik değerinden (BSD) faydalanarak;

$$YDS \approx \pm 0,5\sigma_c \approx \pm 0,18BSD$$

olarak kabul edilebilir. Demir dışı malzemelerde ise;

$$YDS \approx 1/3\sigma_c$$

olarak kabul edilmektedir. Bu YDS, Wöhler eğrisinde 10^6 ile 10^8 çevrime karşı gelen gerilme genliğini vermektedir[44].

Genellikle malzemenin statik çekme dayanımı arttıkça, malzemenin yorulma dayanım sınırı da yükselir. Çekme dayanımını artırmadan sadece yorulma dayanımını arttıran alaşım elementi yoktur. Sünek malzemelere uygulanan son mekanik işlemlerinde yorulma dayanımına etkisi vardır. Soğuk işlem ile sertliği ve yüzey düzgünlüğü artırılan malzemenin yorulma dayanımı, sıcak işlem görmüş aynı malzemeye göre daha yüksektir[46].

4.6. Yorulma Deneyi Türleri

Yorulma deneyi sırasında deney parçasına uygulanan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Başlıca yorulma deneyi türleri; aksenal gerilmeli, eğme gerilmeli, burma gerilmeli ve bileşik gerilmeli olmak üzere dört çeşittir.

Eksenel gerilmeli yorulma deneyinde, numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune enince de üniform olarak dağılır. Eksenel gerilmelerin söz konusu olduğu bir örnek, içten yanmalı motorların biyel kollarıdır. Ancak burada aksenal gerilme yanında eğme kuvvetleri de etkilidir.

Eğme gerilmeli yorulma deneyi kendi arasında ikiye ayrılır;

- a) Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi
- b) Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi

Birinci deney türünde, numune tarafsız bir düzleme (veya eksene) göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Taşıtların yaprak (makas) yayları buna güzel bir örnektir[47].

İkinci deney türünde numune devamlı dönen bir tarafsız eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Hareket halindeki taşıtların akslarında, her türlü millerde sıkça rastlanılır.

Burma gerilmeli yorulma deneyinde, deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma (dönme) zorlaması uygulanmaktadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür burma gerilmeleri oluşur.

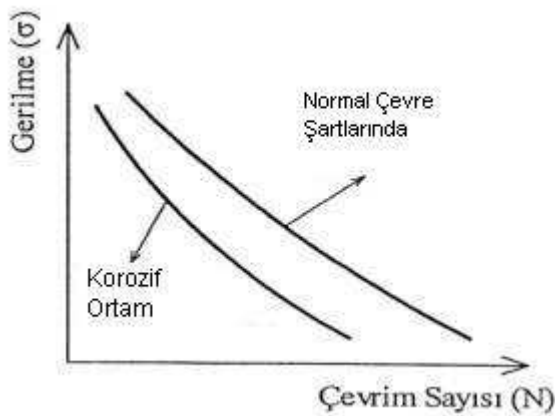
Bileşik gerilmeli yorulma deneyinde, yukarıda sayılan farklı gerilme türlerinden ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusu olur. Uygulamada en çok rastlanan bileşik gerilme durumu

eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu durum ile eksenel ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu durumdur. Motorların krank mili başlıklarındaki gerilme, eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilme türüne en güzel bir örnektir[44].

4.7. Korozyonun Yorulma Ömrüne Etkisi

Yorulma yükleri korozyon ortamında uygulandığında, zararlı etkiler yorulma ve korozyonun ayrı ayrı uygulanmasından daha fazladır. Bu durumda uygun bir yüzey koruması öngörülmemiş ise yorulma dayanımında önemli azalma gözlenir. Gerilmesiz ön korozyonda oluşan hasarın şiddeti ön korozyonun süresine ve korozyon ortamına bağlıdır[42].

Yorulma çatlak başlangıç aşaması süresince korozyon yorulmasının temel mekanizması, metal yüzeyini korozyon ortamının bozması ve parça yüzeyinde oksit film tabakasının oluşturulmasıdır. Genellikle bu oksit tabakası bir koruyucu tabaka gibi davranarak metalin daha fazla korozyon olmasını önlemektedir. Fakat çevrimsel yükler bu tabakada bölgesel çatlaklar oluşturmakta ve metalin tekrar çevre ile temasını sağlamaktadır. Aynı zamanda korozyon yüzey düzgünlüğünü bozduğundan gerilme konsantrasyonlarına sebep olmaktadır[48]. Şekil 4.2. 'de korozyon ortamının gerilme-ömür grafiğine etkisi görülmektedir.



Şekil 4.2. Korozyon ortamının G-N diyagramına etkisi[44]

Korozif ortamda yorulma dayanımı yük frekansına önemli derece bağlıdır. Yorulma dayanımı çevrim frekansının azalması ile düşmektedir. Bu etki özellikle 10 Hz 'den daha düşük çevrimlerde önem kazanmaktadır[49].

Çevrimsel yüklere maruz mühendislik parçaları servis süresince korozif çevrede çalıştıklarında malzeme yüzeyinde çatlak oluşumunu kolaylaştıran merkezler vardır. Bu merkezler;

- Yüzeyde oluşan kayma basamakları veya çukurluklar
- Koruyucu oksit tabakasının kırıldığı yerler
- Yüzeğe yakın kalıntılar[26].

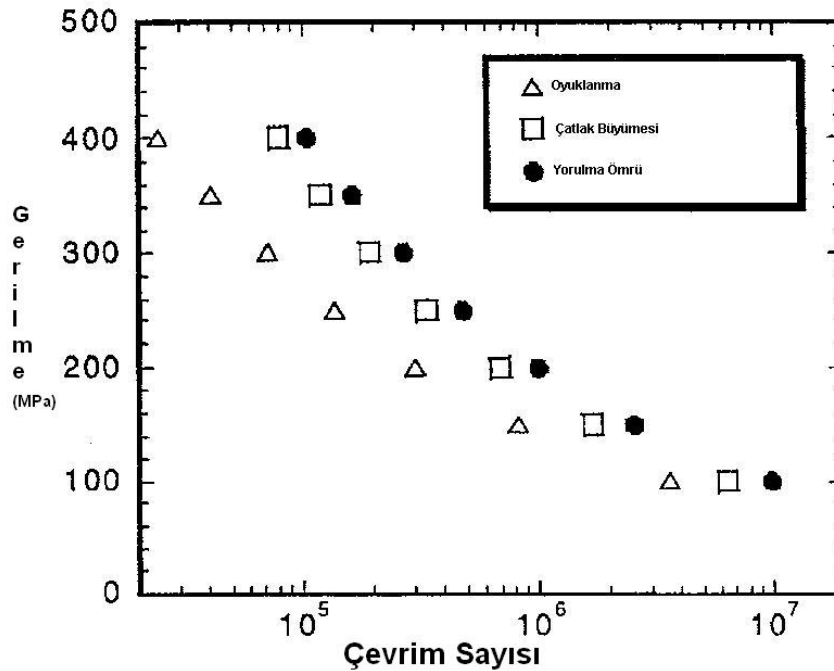
4.8. Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Özellikleri

Alüminyum alaşımların düşük yorulma dayanımı, tüm metallerde etkin olan faktörlere ilaveten, bu alaşımlarda, tane sınırlarının yakınında bulunan, nispeten düşük sertlikteki çökeltisiz bölgeler ve yarı kararlı çökelti partiküllerinden kaynaklanmaktadır. Bu partiküllerde gerilme yoğunlaşması olmakta ve aşırı yaşlandırma ya da çözünme gibi nedenlerle, kayma bantları üzerinde partiküllerin yok olması, bu bölgelerde gerilme yoğunlaşmasını daha da arttırmaktadır. Bu da kırılma sürecini hızlandırıcı bir faktör olmaktadır. Sözü edilen sorunu önlemek için, kaymanın, diğer bileşenlerce yapı içinde homojen olarak dağıtılması önerilmiş ve bu öneri ışığında, metallerarası bileşik ya da empürite içeren ticari alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımının, yüksek saflıktaki alaşımlardan daha yüksek olacağı ileri sürülmüştür[50].

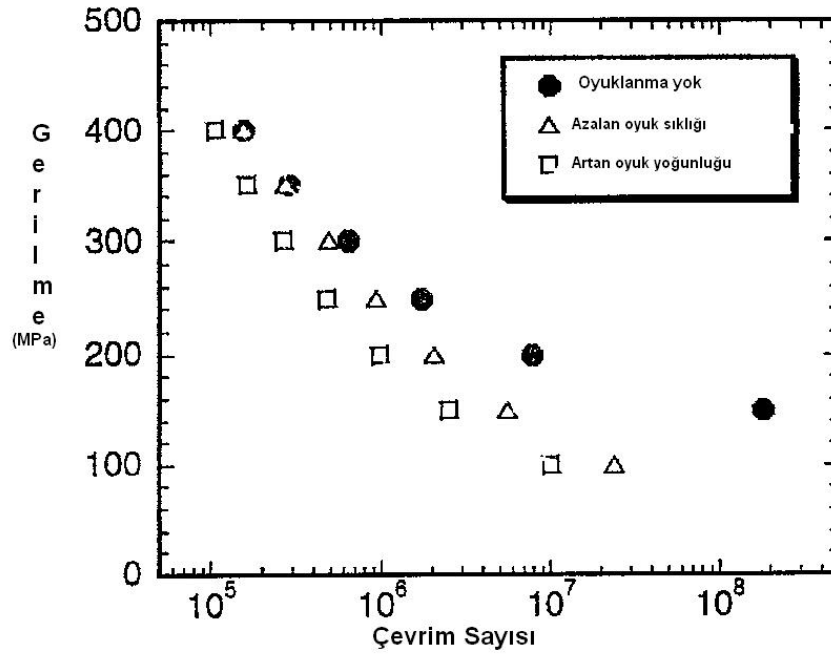
Yorulma koşulları altında, yüzeyi giydirilmiş sacların yorulma dayanımı, giydirilmemiş duruma göre önemli ölçüde azalmaktadır. Örneğin, 2014 Alclad alaşımının, atmosfer koşullarında yapılan düzlemsel eğme yorulma dayanımı, giydirilmemiş haline göre % 50 daha düşüktür. Bu olumsuz etki, yorulma çatlaklarının, yüzeydeki yumuşak giydirilmiş tabakada kolaylıkla başlamasından kaynaklanmaktadır. Eksenel yorulma koşullarında, ya da bir sistemin alt elemanı olarak çalışan malzemelerde, giydirilmiş tabakanın olumsuz etkisi daha azdır[50].

Bazı alaşım sistemlerinde yapıya küçük miktarda (%0,5) gümüş ilavesi, yaşlandırma sonrası, yapı içerisinde çok ince çökelti partikülleri oluşturarak alaşımın çekme dayanımını arttırmakta, ancak bu sırada yorulma dayanımı azalmaktadır. Bu alaşımın aynı sıcaklıkta yaşlandırma süresinin artırılması ise, yapıda daha büyük ikinci faz partikülleri oluşturmakta ve çekme dayanımı bir miktar azalmaktadır. Ancak, kaba boyutlu bu ikinci faz partikülleri, kaymayı yapı içerisine dağıtıcı bir rol üstlenerek yorulma dayanımını arttırmaktadır. Dolayısıyla, bu durum, ince ve nispeten kaba yapılu iki tip partikül içeren bir yapının, hem çekme hem de yorulma dayanımının yüksek olacağını göstermektedir[50].

Korozyon, alüminyum alaşımlarının yorulmaya karşı gösterdiği dayanımı azaltır. Çökelmeye tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarda yorulmalarda meydana gelebilecek çatlak başlangıçlarına ve bu çatlakların büyümesine sebep olabilecek oyuklanma korozyonu, yorulma ömürlerini aşağı çekmektedir(Şekil-4.3.). Alüminyum alaşımlarında yorulma ömrünün aşağı çekilmesinde artan korozyon süresi ile oyuk büyüklüğü ve yoğunluğu ana parametredir(Şekil-4.4.)[51,52].



Şekil 4.3. 2024-T3 alüminyum alaşımına ait oyuklanma ve çatlak büyümesinin yorulma ömrüne olan etkisi[57]



Şekil 4.4. 2024-T3 alüminyum alaşımında oyuk yoğunluğunun yorulma ömrüne olan etkisi[57]

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Malzeme

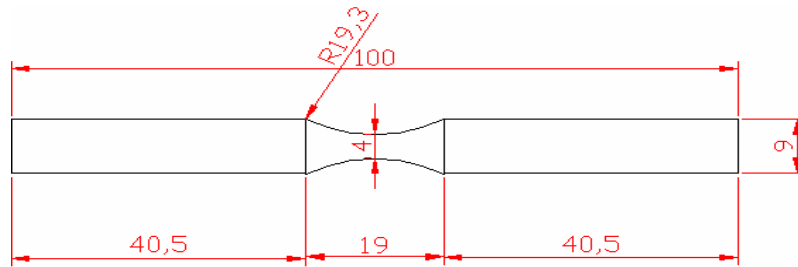
Deneyisel çalışmada kullanılan 7075-T6 alüminyum alaşımı Seydişehir Alüminyum tesislerinde 14 mm çapına ekstrüzyon edilmiş olarak temin edilmiştir. Kullanılan alaşımının kimyasal içeriği Tablo 5.1. 'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kullanılan deney malzemesinin kimyasal bileşimi (% ağırlıkça)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr
0,48	0,43	1,98	0,14	2,63	5,51	0,001	0,18

5.2. Talaşlı İmalat

14 mm çapında temin edilen çubuk profil 7075-T6 alüminyum alaşımı bilgisayar kontrollü tezgahta talaşlı imalat ile hassas bir şekilde 100 adet işlenip Şekil 5.1. 'deki boyutlarına getirilmiştir.



Şekil 5.1. Yorulma deneylerinde kullanılan deney parçasının imalat resmi

5.3. Yüzey Durumu

Talaşlı imalatı takiben yorulma deney numuneleri birer dakika süreyle 800,1000 ve 1200 numara zımpara ile zımparalanmıştır. Daha sonra 3 µm Al₂O₃ ile 2 dakika boyunca parlatılmıştır. Bu yüzey kalitesinin tüm deney parçalarında eşit bir şekilde sağlanılmasına gayret edilmiştir.

5.4. Çekme Deneyi

Bilgisayar kontrollü tezgahta talaşlı imalat ile hassas bir şekilde çekme deney numunesi standartlara uygun bir biçimde hazırlanmıştır. Çekme deneyi Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarındaki Instron marka çekme cihazında yapılmıştır.

5.5. Anodik Oksidasyon (Eloksal) İşlemi

Yorulma deney numuneleri Bilecik Arslan Alüminyum Ltd.Şti. 'de 6, 12 ve 23 µm tabaka kalınlıklarında eloksal işlemine tabi tutulmuştur.

5.5.1. Yağ alma

50-60 °C sıcaklığındaki alkalik yağ alma banyosunda yorulma numuneleri 7 dakika süre ile bekletilir sonra durulanır.

5.5.2. Dağlama

Yağ almadan sonra durulanan yorulma numuneleri 60 °C sıcaklığındaki ve 65 gr/lit oranındaki dağlama banyosunda E.6 yüzeyi için 20 dakika bekletilir. Bu işlemden sonra yorulma numuneleri iki adet durulamadan geçerek temizlenir. Nötrlizasyon işlemine geçilir.

5.5.3. Nötrlizasyon

Oda sıcaklığındaki ve 90 gr/lt oranındaki banyoda yorulma numuneleri bir dakika süre ile bekletilerek dağlama banyosundan kalan koyu tabakanın nötrleştirilmesi sağlanır. Bu işlemden sonra yorulma numuneleri temiz bir şekilde eloksal banyosuna asılmaya hazırdır.

5.5.4. Eloksal işlemi

Yorulma numuneleri 210 gr/lt oranındaki, 2 Amper, 21 Volt ve 19 °C'de bir ortamda 6 µm için 10 dakika, 12 µm için 20 dakika, 23 µm için 35 dakika olacak şekilde eloksal işlemine tabi tutulur. İşlem bitiminde yorulma numuneleri dört durulamadan geçirilerek asitten iyice arındırılarak tespit (fiksaj) işlemine hazır duruma getirilir.

5.5.5. Tespit işlemi (Sealing)

Yorulma numuneleri durulandırdıktan sonra tespit banyosuna konularak eloksal olmuş yüzeyin 98 °C lik bu banyoda sertleştirilmesi işlemidir. Gözenekler tamamen sertleşir ve korozyona dayanıklı hale gelmektedir. Bu banyoda parçalar mikron başına 4'er dakika bekletilmiştir. Bu işlem eloksal işleminin en son aşamasıdır.

5.6. Metalografik İncelemeler

5.6.1. Optik mikroskop incelemeleri

Yüzeyi farklı tabaka kalınlıklarında Al₂O₃ ile kaplanan yorulma deney numuneleri yüzey ve yüzeye yakın kısımlarına ait iç yapı incelemeleri Olympus marka optik mikroskopta yapılmıştır. Yorulma deney numunelerinden parçalar kesilerek zımparada parlatılmış ve 3 µm Al₂O₃'de parlatma işlemini takiben % 3 Nital ile dağlanmış ve daha sonra mikroskopta inceleme yapılarak gerekli içyapı fotoğrafları alınmıştır. Optik mikroskop incelemeleri SAU Metalurji ve Malzeme

Mühendisliği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

5.6.2. Taramalı elektron mikroskop (sem) incelemeleri

SAU Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan elektron mikroskopu kullanılarak yapılan çalışmalarda kırk yüzeyleri üzerinde yorulma çatlak başlangıç ve ilerleme özellikleri incelenmiştir.

5.7. Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarlarına ait döner eğme şartlarında, frekansı 95 Hz (5700 devir/dak) olan Şekil 5.2.'de gösterilen HI-TECH marka deney makinesinde yapılmıştır. Bazı gerilme değerleri için yorulma deneyleri tekrarlanmıştır.



Şekil 5.2. Yorulma makinesi

7075-T6 alüminyum alaşımının ana malzemesi ve 6, 12, 23 μm Al_2O_3 tabaka kalınlıklarındaki 34 adet yorulma deney numunelerine farklı miktarlardaki gerilmeler uygulanarak havadaki yorulma ömürleri grafiği çıkarılmıştır.

5.7.1. Ön korozyonlu yorulma deneyleri

Ön korozyonlu yorulmada kullanılmak üzere pH:6,5 değerinde ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi hazırlanmıştır. Ön korozyonlu yorulmada kullanılacak olan plaka ve yorulma deney numunelerinin kritik kesiti hariç geri kalan bölgeler korozyondan etkilenmemesi için balmumu ile Şekil 5.3.'deki gibi kaplanmıştır.



Şekil 5.3. Balmumu ile kaplanmış yorulma deney numuneleri

7075-T6 alüminyum alaşımının ana malzemesine ve 6, 12, 23 μm Al_2O_3 tabaka kalınlıklarındaki 56 adet yorulma deney numuneleri kapalı bir kabın içinde 6, 48, 96, 240 saat ön korozyona tabi tutulup her bir numuneye farklı miktarlardaki gerilmeler uygulanarak ön korozyonlu yorulma ömürleri grafiği çıkarılmıştır.

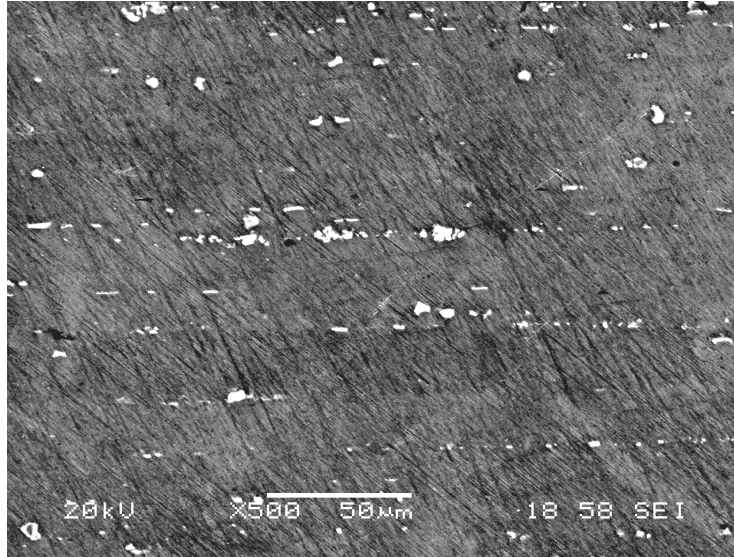
5.7.2. Gerilme hesabı ve deney parçasının bağlanması

Yorulma deneyleri sırasında en küçük çapı 4 mm olan deney parçasına uzaklığı (moment kolu) 125,7 mm olan yükleme noktasından ağırlık asılarak yorulma deney numuneleri eğilmeye zorlanmaktadır. Kritik kesitteki eğilme gerilmesi, uygulanan gerilmeye bağlı olarak kısaca aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\sigma \text{ (N/mm}^2\text{)} = 32 \cdot P \cdot L / (\pi \cdot d^3) \quad (5.1)$$

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmada kullanılan malzemenin sertliği 120–130 BSD değeri aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Yapılan çekme deneyinden çekme dayanımı 465 MPa olarak belirlenmiştir. Malzemenin boyuna doğrultuda alınmış ve polisaj edilmiş numune yüzeyine ait mikroyapı Şekil 6.1.'de verilmiştir. Mikroyapıda çok sayıda, farklı boyutlarda ve düzensiz geometriye sahip ikinci faz partiküller görülmektedir.

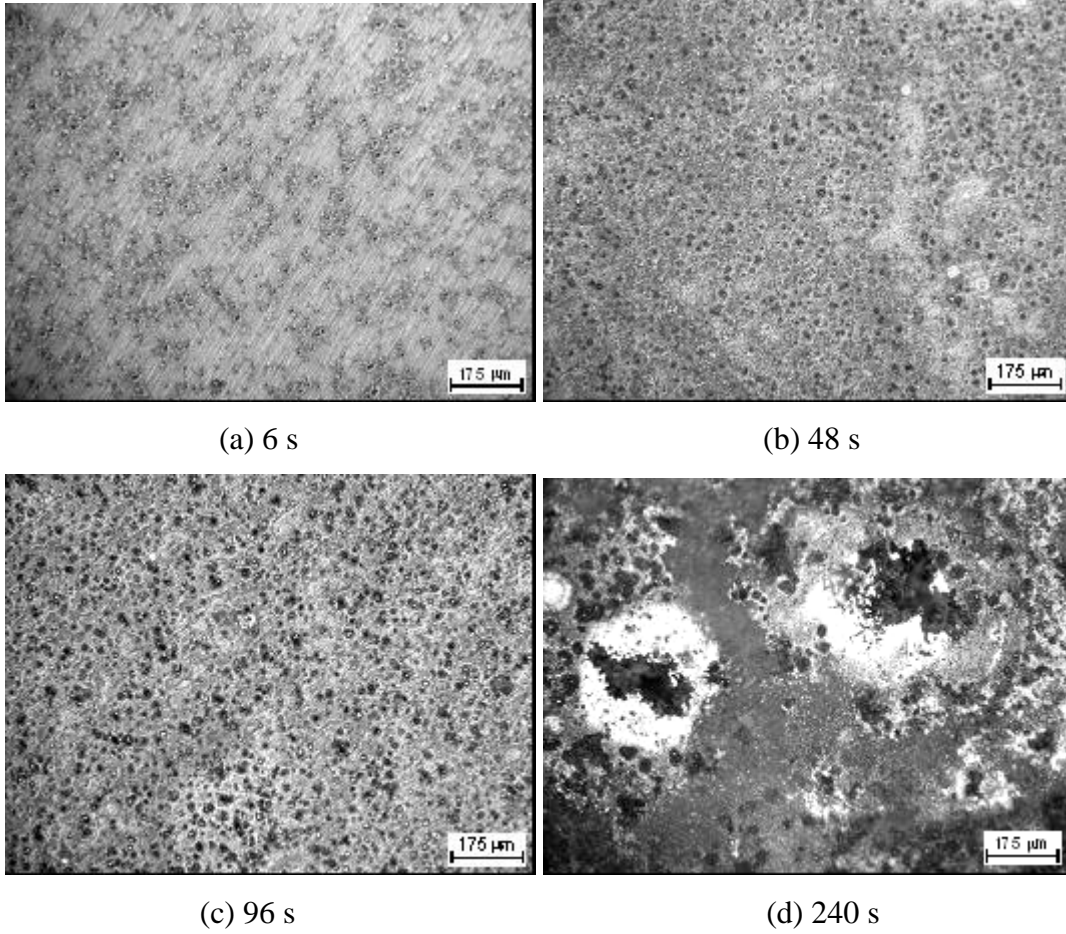


Şekil 6.1. 7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik olarak parlatılmış yüzeyinin mikroyapı fotoğrafı

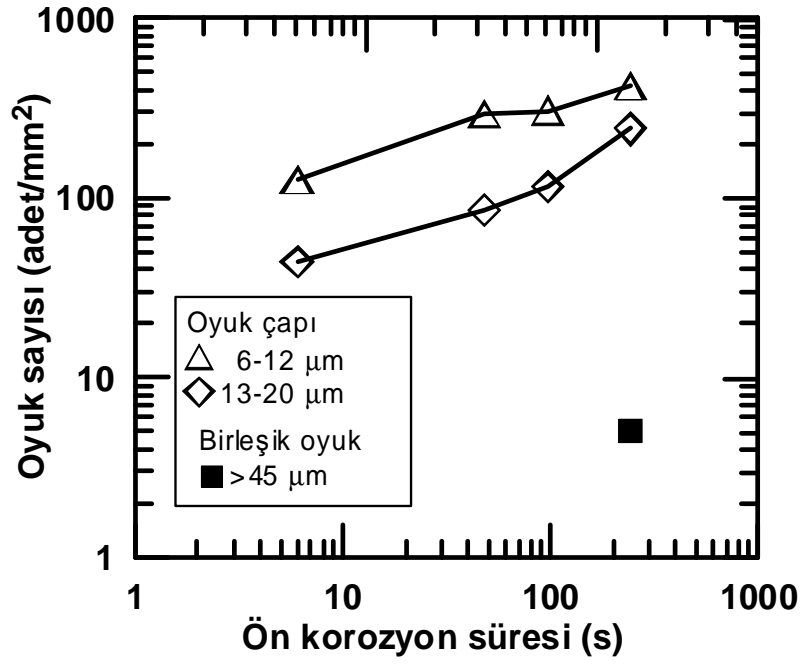
6.1. Ön Korozyon Deney Sonuçları

%3,5'lik NaCl çözeltisinde 6, 48, 96 ve 240 saat sürelerle ile daldırılarak bekletilmiş numunelerin yüzey görünümleri Şekil 6.2.'de verilmiştir. Görüldüğü gibi oyuk boyutları ve yoğunluğu belirgin bir şekilde ön korozyon süresiyle orantılı olarak artmaktadır. Ön korozyon süresine bağlı olarak birim alanda tespit edilen oyuk sayısı Şekil 6.3.'teki grafikte verilmiştir. Şekil 6.2.d'de görülen küçük çaplı oyukların zamanla birleşerek oluşturdukları yarık görünümlü oyuklar ancak 240 saatlik korozyon süresinde oluştuğu ve sayısının

milimetre karede 10 adeti aşmadığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan boyut gözetmeksizin, oluşan toplam oyuk sayısı milimetre karede yaklaşık 700 adete ulaşmaktadır. Oyuk yoğunluğu ve büyüklüğü optik mikroskop yardımıyla yüzeyden yapılan incelemeler ile belirlenmiştir. Ancak, bazı durumlarda, yüzeyin altındaki oyuk büyüklüğü yüzeyde görülen oyuk büyüklüğüne nazaran daha büyük olabildiği literatürde belirtilmektedir[51].

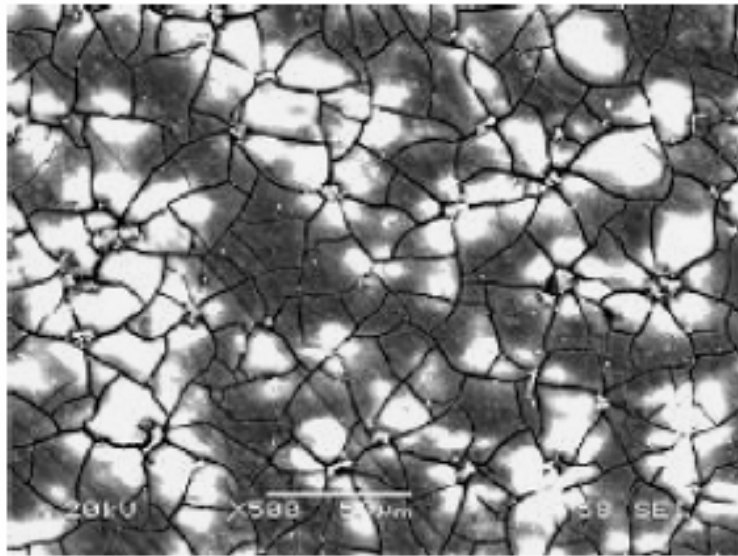


Şekil 6.2. Farklı zaman dilimlerinde numune yüzeyinin %3,5'lik NaCl çözeltisine daldırılmasından sonra oyuk oluşumu



Şekil 6.3. Farklı büyüklüklerdeki oyuk sayısının ön korozyon süresine bağlı olarak değişimi

Şekil 6.4.'te 240 saat ön korozyona tabii tutulmuş parça yüzeyi görülmektedir. 240 saat ön korozyon testleri sonucunda yapılan elektron mikroskobu çalışmaları göstermiştir. Korozyon ürünleriyle yüzeyi kaplanmış numune yüzeylerinde çamur “mud” çatlağı olarak anılan çatlaklar tespit edilmiştir. Bu oluşum genel korozyon sonucu oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 6.4. Tipik çatlaklar bulunan ön korozyona tabii tutulmuş yüzey

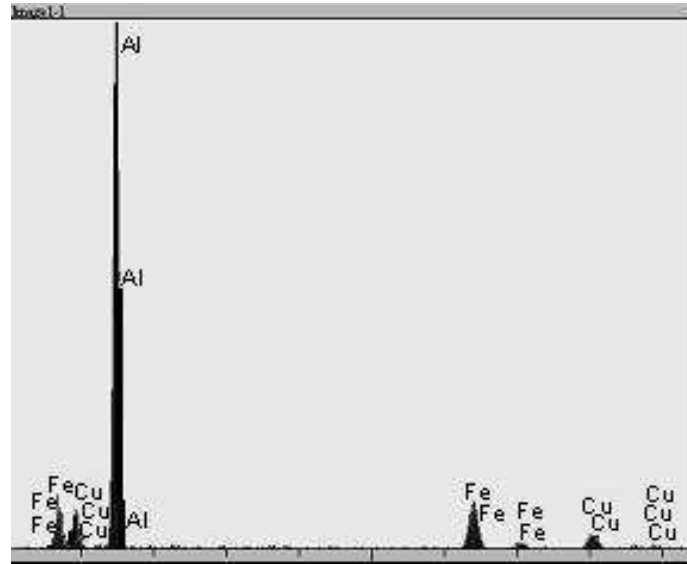
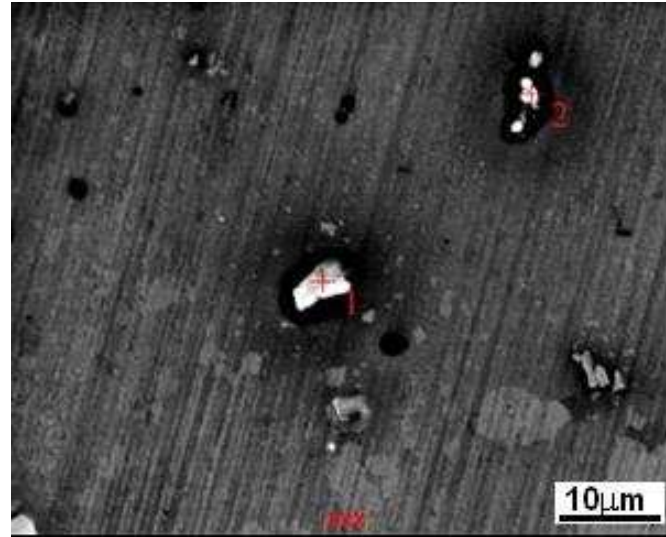
6 saat ön korozyona uğratılmış numunenin yüzeyinden alınan elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü ve EDS sonuçları Şekil 6.5.'de verilmiştir. SEM görüntüsünden, partiküllerin çevresinin korozyon etkisiyle çözündüğü dikkat çekmektedir. Partikülleri çevreleyen matris bölgesinin çözünmesi, literatüre göre bu partiküller katot olarak davrandığını ve $Al_2_3CuFe_4$ veya Al_7Cu_2Fe bileşiminde olduğunu işaret eder. EDS analiz pik değerler incelendiğinde, söz konusu partiküller ancak $Al_2_3CuFe_4$ bileşimini sahip olabileceği anlaşılmaktadır. Her hangi bir hatanın oluşumunu önlemek için EDS analiz ön korozyon testinden önce ve sonra tekrarlanmış olmasına rağmen belirgin bir farklılık görülmemiştir. Literatürde 7075-T6 alaşımında görülen partiküllerin %80'ninin Al, Cu ve Fe esaslı olduğu rapor edilmektedir. C-tipi partiküller olarak bilinen bu partiküller gösterdikleri farklı elektrokimyasal potansiyel özellikleri nedeniyle matris yapıya göre katot davrandığı özellikle vurgulanmaktadır[21].

Şekil 6.6.'da 6µm kalınlıkta oksit film tarafından tamamen kaplanamamış partikül görüntüsü verilmektedir.

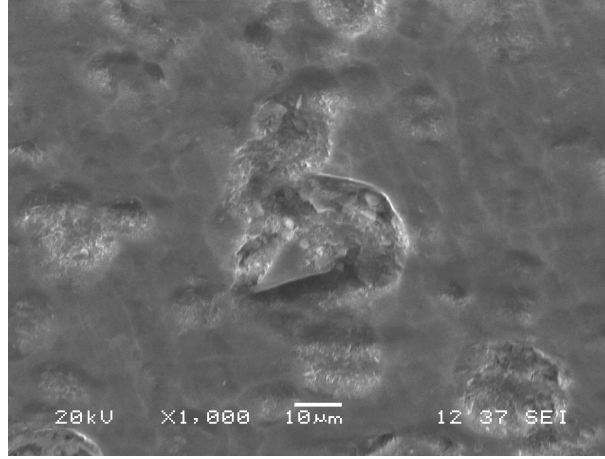
Şekil 6.7.'de en uzun test süresi olan 240 saatlik bekleme sonrası 6 ve 12 µm kalınlığa sahip numunelerin (x180 büyütme için) yüzey görünimleri verilmiştir. Numunelerin yüzeylerinin optik mikroskop incelemesinden artan oksit kalınlığıyla oyuk boyutu ve dağılımından azalma belirlenmiştir. En kalın (23 µm) kaplama kalınlığı için yüzeyde kayda değer bir oyuk oluşumuna rastlanmamıştır. Bilindiği gibi, oyuklanma oksit filmin noktasal olarak tahrip olmasıyla ilgilidir[21], kalın oksit tabakalı parça yüzeylerinde kaplanmamış ikinci faz partikülleri ile kaplamanın kendisinden kaynaklanabilecek hataların bulunma olasılığı ve var olan hatalardan ana malzemeye ulaşan galvanik seri oluşturabilecek süreksizlik (kusur) bulunması daha zordur.

Oksit kaplı levha numunelerle farklı 6, 48, 96 ve 240 saat süreyle %3.5'lik NaCl çözeltisinde bekletilerek yapılan korozyon testlerine ait SEM ve Optik mikroskop çalışmalarından, artan korozyon süresi ile yüzeyde çok sayıda farklı boyutlarda oyuk oluşumları tespit edilmiştir. Kaplamasız numune yüzeyleriyle (Şekil 6.2.) karşılaştırıldığında oksit filmin yüzeyi önemli ölçüde koruduğu ancak artan süre ile oyuk sayısında artış belirlenmiştir.

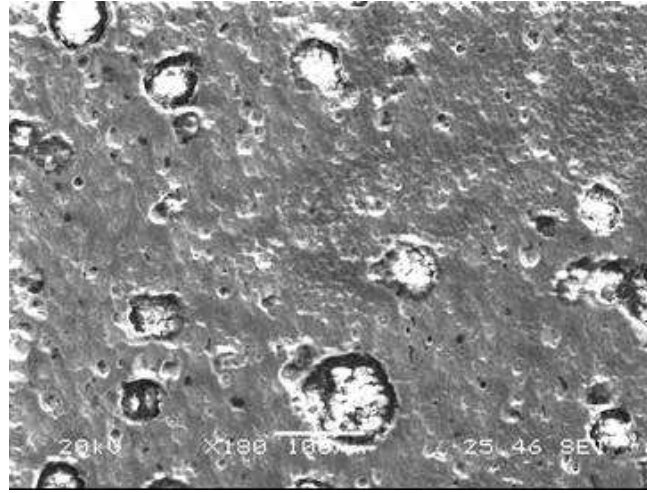
Pao[51] ön korozyon oyuklarının alüminyum üzerinde yorulma çatlaklarının oluşum süreci üzerinde kötü etkileri olduğunu belirtmiştir. Korozyon oyuklarının bileşik partikülleri ve bunları çevreleyen matris arasındaki elektrokimyasal reaksiyonlar vasıtasıyla oluştuğunu açıklamaya çalışmıştır. Harlow[53] oyuk korozyonunun oluşumun da partiküllerin etkili olduğunu göstermiştir.



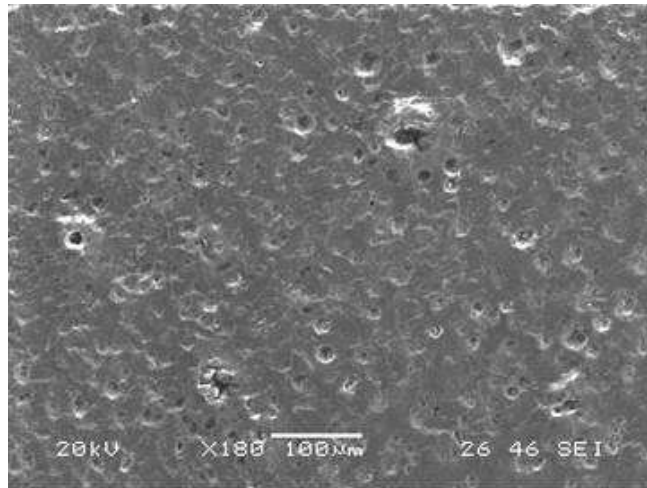
Şekil 6.5. 6 saatlik ön korozyonlu numunenin elektron mikroskobu ve EDS analiz sonuçları



Şekil 6.6. 6 µm oksit film kaplı numunenin partiküllerinin yüzey görünüşü



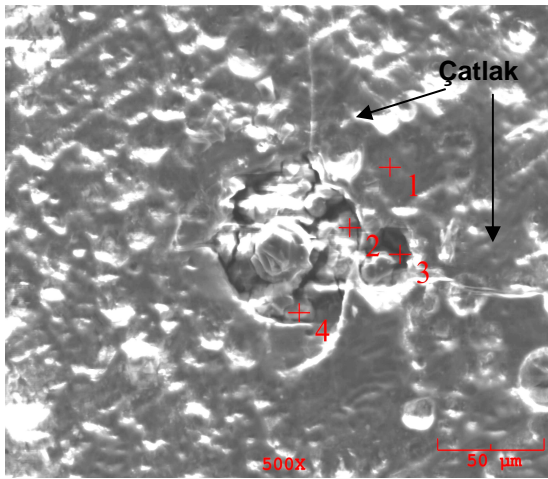
(a)



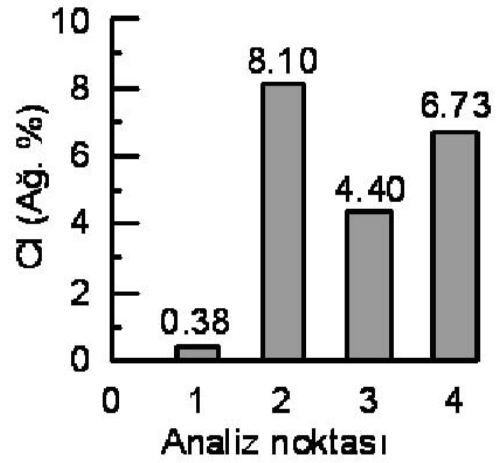
(b)

Şekil 6.7. 240 saatlik ön korozyon testinden sonra (a) 6 µm (b) 12 µm kaplanmış numunelerin yüzey görünüşü

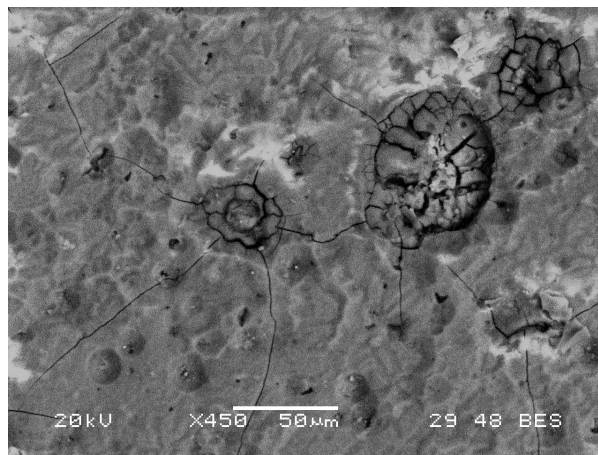
Şekil 6.8.'de görülen 6 ve 12 μm oksit kaplı numune yüzeyinde oyuk civarında ve oyuk bölgesindeki üç farklı noktadan alınan EDS analizinden klor iyonu miktarı aynı şekilde birlikte verilmiştir. Klor iyonlarının oyuk oluşum ve büyümesini hızlandırdığı düşünülmektedir. Klor miktarının özellikle oyuk bölgesinde yoğunlaşmış olması, oyuk oluşumunda önemli rol oynadığı bilinen klor iyonlarınca koruyucu film tabakasını tahrip ederek süreci başlattığı konusunda fikir vermektedir. Oyuk ağız kısmında meydana gelen çatlakların oluşumu ise osmotik basınca bağlanmaktadır[54]. Çatlaklar, farklı kısımlardan alınmış SEM–BES mikro grafiklerinde açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 6.8.c). Benzer sonuçlar, literatürde de belirtilmektedir.



(a)



(b)

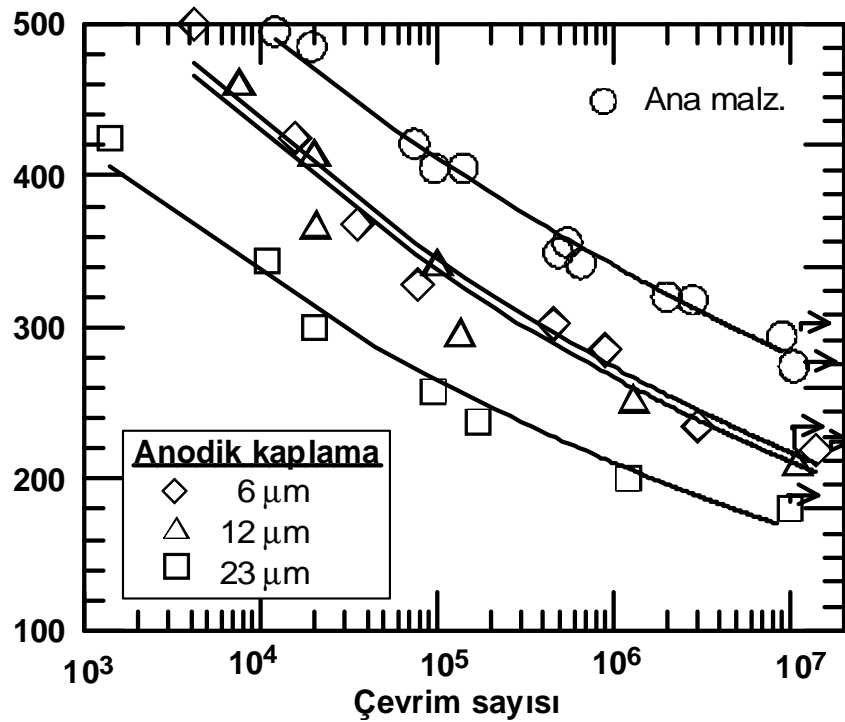


(c)

Şekil 6.8. a) 6 ve b) 12 μm oksit kalınlığına sahip numunelerde oyuk oluşumları ve çatlak durumu. Oyuk bölgesinde tespit edilen Cl miktarı

6.2. Yorulma Deneyleri Sonuçları

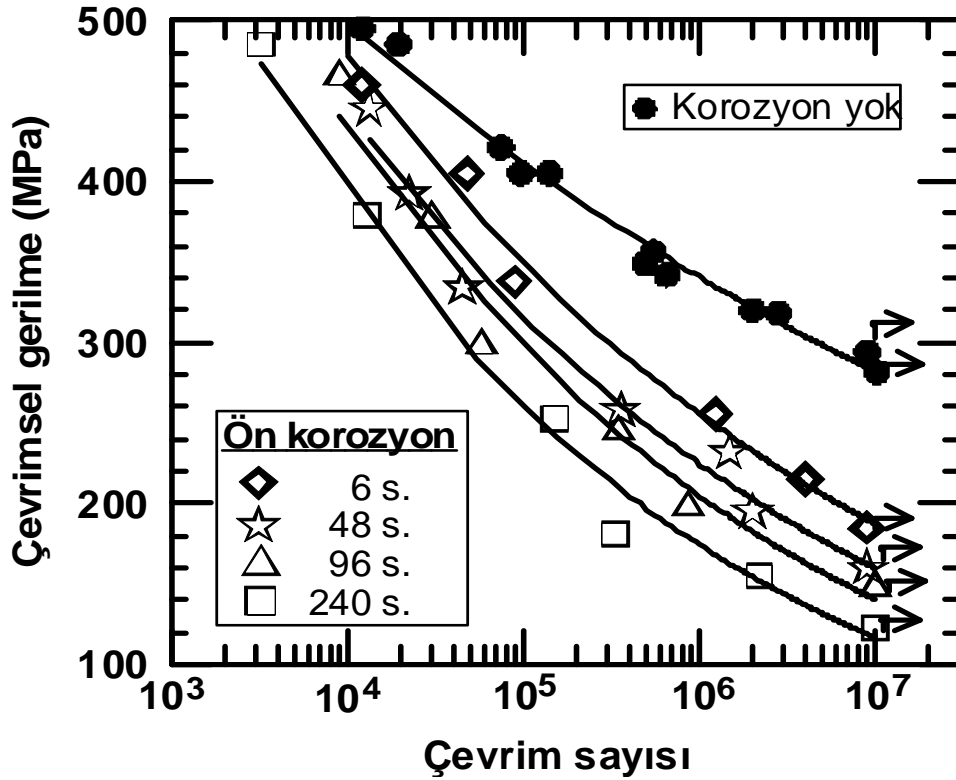
Farklı üç kalınlığa (6, 12, 23 μm) anodik oksidasyon yöntemiyle kaplanmış ve kaplanmamış (ana malzeme) numunelere ait yorulma eğrileri Şekil 6.9.'da verilmiştir. Uygulanan kaplama işlemi genel olarak yorulma eğrilerini aşağı çekmekte, diğer bir deyişle yorulma dayanımını düşürmekte ve artan kaplama kalınlığı ile yorulma ömrü azalmaktadır. 10^7 çevrim sayısı için çevrimdeki yorulma dayanımı dikkate alındığında, kaplama işlemi yaklaşık %40'lık azalmaya neden olmaktadır. Anodik oksitle kaplanmış numunelerde yorulma dayanımında ki azalma pürüzlü, sert ve gevrek yapıdaki kaplama tabakasının aynı zamanda artık çekme gerilmeleri içermesine bağlanmaktadır[51,52]. Yorulma çatlakları küçük sayıda ki çevrimler sonucunda dahi kolaylıkla oluşabilmektedir. Yorulma eğrileri dikkate alarak şunu söylemek mümkündür ki, her bir kaplama kalınlığı için çatlağın oluşmadığı belirli bir gerilme eşik değeri vardır.



Şekil 6.9. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin yorulma eğrileri

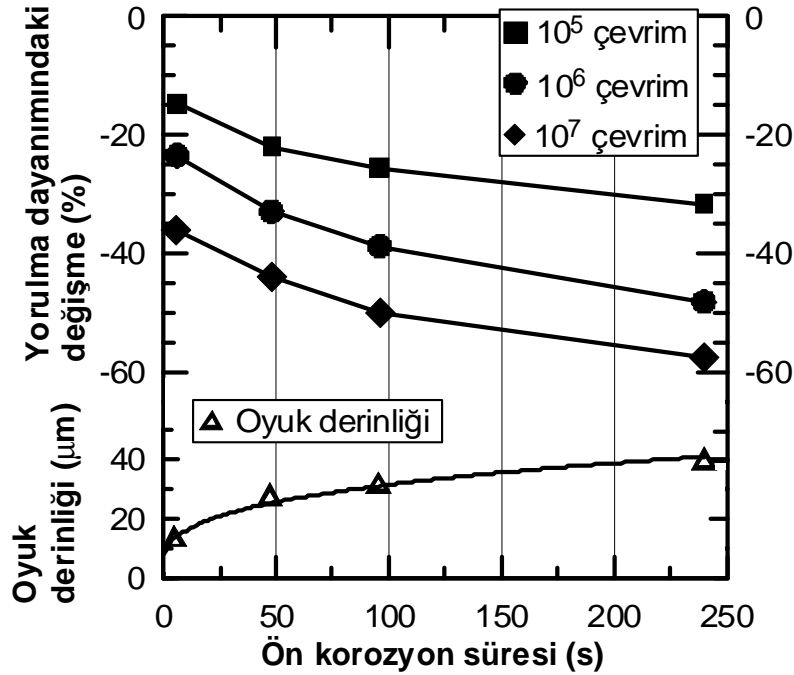
Ön korozyona tabi tutulmuş ve korozyon uygulanmamış numunelere ait Wöhler eğrileri Şekil 6.10.'da verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde ön korozyonlu numuneler ön korozyona uğratılmamış olana göre daha düşük yorulma dayanımı

gösterdiği anlaşılmaktadır. Artan ön korozyon süresiyle yorulma dayanımı veya verilen bir gerilme değeri için elde edilen yorulma ömrü belirgin bir şekilde azalmaktadır.



Şekil 6.10. Ön korozyona uğratılmış ve uğratılmamış numunelerin yorulma eğrileri

Ön korozyon süresine bağlı olarak ölçülen ortalama oyuk derinliği ile yorulma dayanımı arasındaki değişim Şekil 6.11.'de verilmiştir. Artan çevrim sayısı ile yorulma dayanımındaki değişim miktarı daha da belirginleşmekte, 10^7 çevrim için dayanımdaki azalma miktarı %58'e ulaşmaktadır. Ayrıca, artan ön korozyon süresiyle ölçülen oyuk derinliğinde değişim incelendiğinde, yorulma davranışı ile oyuk derinliği arasında kuvvetli bir ilişkinin varlığına işaret etmektedir. Yorulma ömrünün 10^6 ve 10^7 çevrim sayıları arasında %15 - %58 aralığında dayanımda azalma görülmüştür.



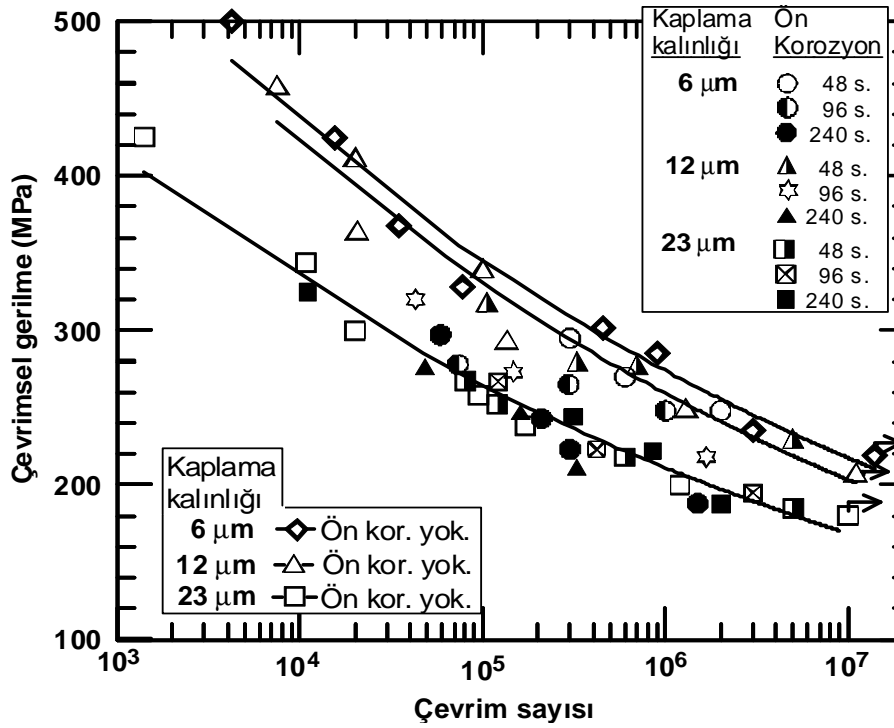
Şekil 6.11. Yorulmaya karşı direnç ve ortalama oyuk derinliğinin ön korozyon süresi ile değişimi

Şekil 6.11.'den anlaşılacağı gibi yorulma dayanımında azalmaya neden olan oyuk derinliğinin ön korozyon süresiyle artmış olması tek başına değerlendirilmemelidir. Artan süreyle oyuk yoğunluğunun artması, beraberinde çatlak başlangıç ihtimalini artıracak unutulmamalıdır. Kırık yüzeyleri üzerinde yapılan çalışmalardan, ön korozyona tabi tutulmuş numunelerde 15-20 µm gibi küçük oyuk derinliği bile çevrimsel gerilmenin büyüklüğüne bağlı olarak yorulma çatlak oluşturmak için yeterli olabilmektedir. Çatlak veya yarık görünümlü bileşik oyukların nispeten düşük çevrimsel gerilmeler altında bile yorulma ömrünü önemli oranda azaltıcı etkiye neden olduğu görülmüştür.

Sankaran[52] ortalama oyuk derinliği ve ilk çatlak boyutunun yorulma ömrü üzerindeki azaltıcı etkisini göstermiştir. DuQuesnay[55] ön korozyona uğratılmış 7075-T6511 alüminyum alaşım plaka numunesi üzerinde yorulma deneyleri yapmıştır. Buna göre oyuk derinliğinin korozyon yorulma ömrünü belirlemede ana parametre olduğunu ifade etmiştir.

Oksit kaplanmış numunelerin ön korozyonlu ve korozyonsuz durumları için yorulma dayanımlarındaki değişim Şekil 6.12.'de gösterilmiştir. 6 saatlik ön korozyona uğratılmış numunelerin yorulma davranışlarında herhangi bir değişim görülmediği ve karışıklığı neden olmaması için bu numunelere ait veriler grafikte gösterilmemiştir. Yorulma eğrileri

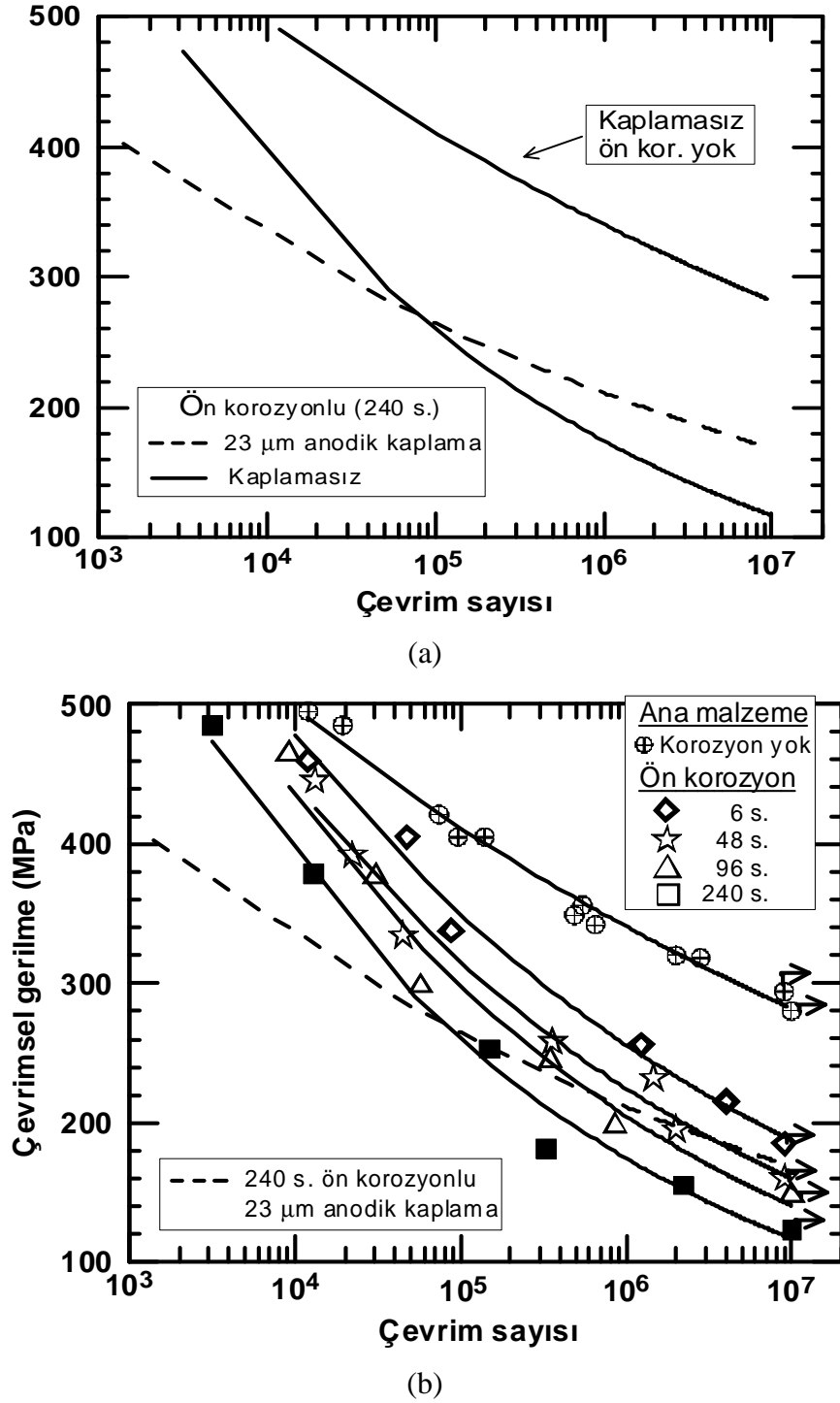
dikkatlice incelendiğinde, 6 ve 12 μm kaplamalı numunelerin 48 saatlik ön korozyondan etkilenmediği anlaşılmaktadır. Fakat her iki kaplama için ön korozyon süresiyle yorulma ömrü azalmıştır. 12 μm kaplama kalınlığının 96 saatlik ön korozyona karşı yeterli koruma sağlayamadığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, Şekil 6.12.'de görüldüğü gibi 23 μm ' lik en kalın oksit tabakasına sahip numuneler, ön korozyon süresi ne olursa olsun yorulma davranışları değişmemiş, yorulma verileri kabul edilebilir bir bant içinde kalmıştır.



Şekil 6.12. Ön korozyonlu ve ön korozyonsuz, oksit kaplı numunelerin yorulma eğrileri

Değerlendirmenin daha kolay yapılabilmesi için, 240 saat ön korozyona uğratılmış 23 μm oksit kaplı ve ana malzemelere ait yorulma eğrileri Şekil 6.13.'de verilmiştir. Her iki grup numuneler aynı süre korozif etkiye maruz bırakılmalarına rağmen, kısa ömürlü yorulma bölgesinde, kaplanmış parçaların yorulma ömrünün daha kısa, uzun ömürlü yorulma bölgesinde ise yorulma dayanımları daha yüksektir. 23 μm kalınlıkta oksit kaplı parçanın korozyondan etkilenmediği göz önüne alınırsa, kısa ömür yorulma bölgesindeki düşük dayanımın kaplamanın varlığından kaynaklandığı kolayca söylenebilir. Ana malzeme yüzeyinde çok sayıda oyuk bulunması, çatlak çekirdeklenmesinin ağırlıklı olduğu uzun ömürlü yorulma bölgesinde yorulma ömrünü önemli ölçüde etkilemiş ve söz konusu oyuklardan yorulma çatlaklarının gelişmesine neden olmuştur. Oksit kaplı parçada ise kayda değer oyuk

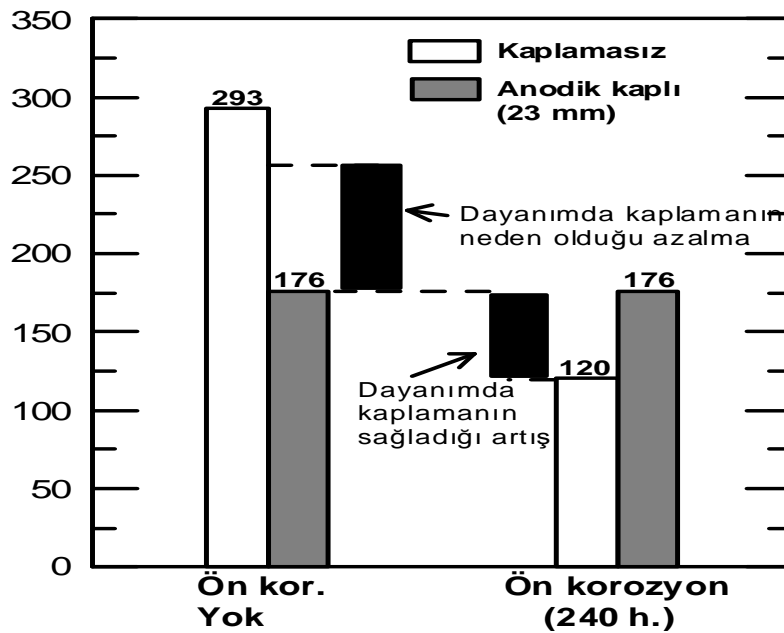
oluşmadığından yorulma dayanımı etkilenmemiştir. Grafikten (Şekil 6.13.b), 23 μm oksit kaplanmış parçaların uzun ömürlü yorulma bölgesindeki yorulma dayanımı kaplamasız 48 saat ön korozyonlu parçalarınkine yaklaşık eşittir denilebilir.



Şekil 6.13. Farklı sürelerde ön korozyona tabi tutulmuş ana malzemelerin ve 23 μm oksit kaplı parçaların yorulma eğrileri

23 μm oksit kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ön korozyonlu ve korozyonsuz yorulma dayanımındaki değişim grafiksel olarak Şekil 6.14.'de verilmiştir. 7075-T6 alüminyum alaşımına ait havadaki yorulma dayanımı anodik kaplama ile azalmıştır. Çatlak büyüklüklerinin azalması kısmen kaplama kalınlığına bağlanmıştır. Oyuklanmaya korozyonunun etkisi açısından bakarsak kalın kaplama tabakaları korozyona karşı yüksek direnç oluşturmaktadır. 10^7 çevrim esas alındığında, 23 μm oksit kaplama yorulma dayanımında %47'lik iyileşme tespit edilmiştir.

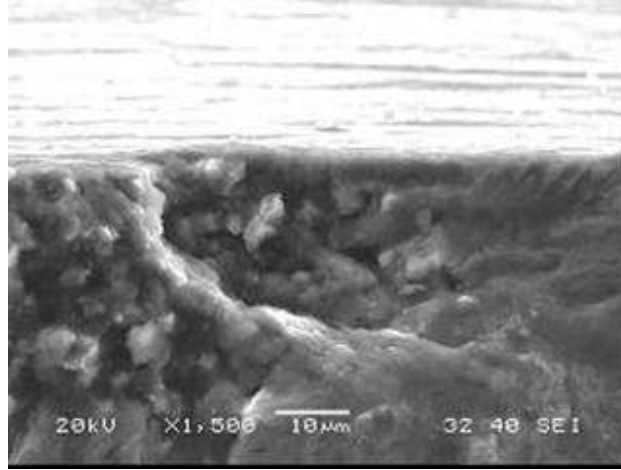
Sadeler[56] yorulma çatlaklarının kaplama içerisinde meydana geldiğini ve ana malzemeye doğru devam ettiğini öne sürmüştür. Alüminyum alaşımlarına yapılan anodik oksit kaplamanın yorulma dayanımını azalttığı ayrıca korozyona dayanımını artırdığını söylemiştir.



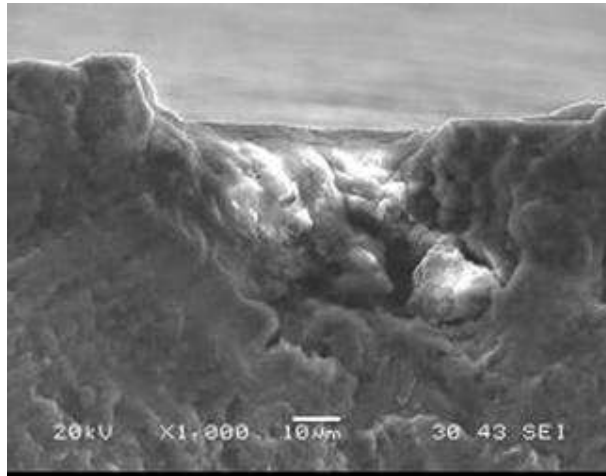
Şekil 6.14. 23 μm oksit kaplamalı ve kaplamasız numunelerin ön korozyonlu ve korozyonsuz yorulma dayanımındaki değişim

6.3. Yorulma Numunelerinde Kırık Yüzeyi İncelemesi

6 ve 240 saat ön korozyona tabi tutulmuş ve 256 ve 155 MPa çevrimsel gerilmeler altında test edilmiş parçaların kırık yüzeylerinden alınan SEM fotoğrafları Şekil 6.15.'de verilmiştir.



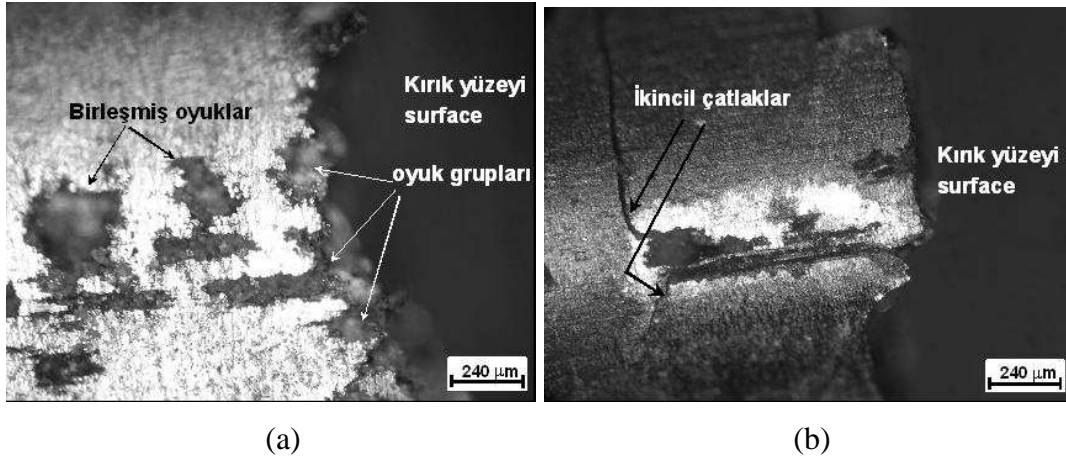
(a)



(b)

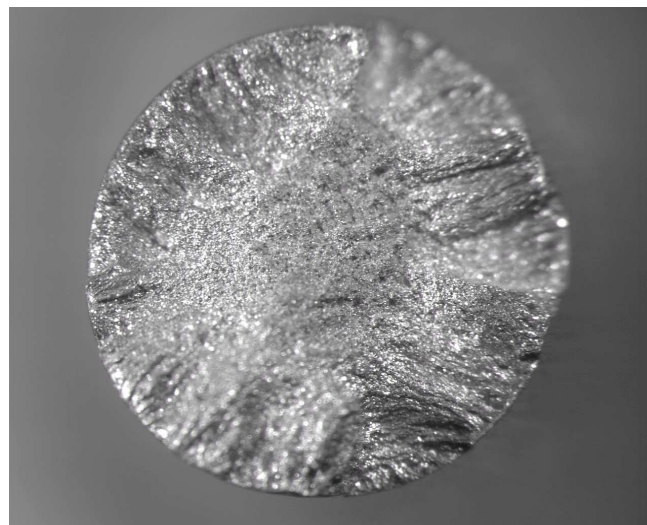
Şekil 6.15. Kırılmış numunelere ait (a) 6 saatlik ön korozyon ve 256 MPa gerilme uygulanmış, (b) 240 saatlik ön korozyon ve 155 MPa gerilme uygulanmış, elektron mikroskobu fotoğrafları

Kırılmış numunelerin yan yüzeylerinde oyuk grupları ve birleşmiş oyukların oluşturduğu çentik etkisine sahip süreksizlikler Şekil 6.16.'da verilmiştir. Numunenin kritik bölgesinde keskin oyuk diplerinden yorulma çatlaklarının geliştiği ve yer yer ikinci çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir(Şekil 6.16.b).

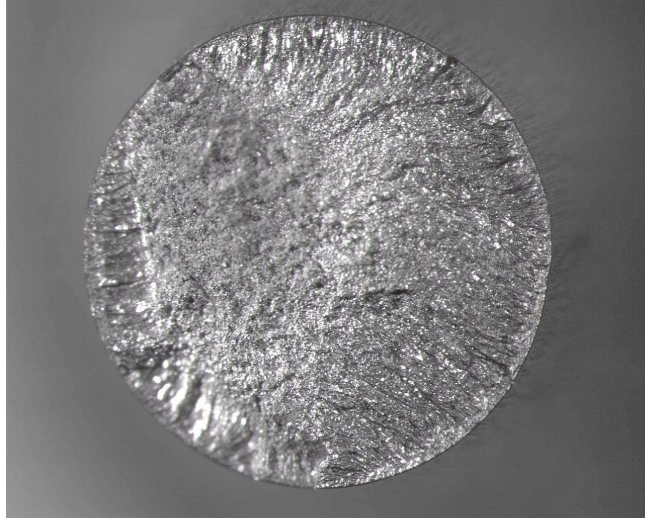


Şekil 6.16. 240 saat ön korozyona tabi tutulmuş numunelerin optik mikroskoptaki yan yüzey görünümü (a) oyuk grupları ve birleşmiş oyuklar (b) ikincil çatlak şekli

6, 12, 23 μm oksit kaplı numunelere ait optik mikroskop kırık yüzeyleri ve 23 mikron oksit kaplı numunede tespit edilen ikincil çatlaklara ait SEM fotoğrafları Şekil 6.17.'de verilmiştir. Oksit kalınlığı arttıkça, çevrimsel gerilme altında yüzeyde daha çok sayıda çatlak oluştuğu dikkat çekicidir(Şekil 6.17.a-c). 23 μm oksit kaplı parçalarda, kritik kesite yakın noktalarda, ikincil çatlaklar, özellikle yüksek gerilmeye zorlanmış parçalarda kendini göstermektedir. Uzun ömürlü yorulma bölgesinde yer alan, dolayısıyla düşük gerilmeler altında zorlanan parçalar kırık yüzeyinde kaplama ile ana malzeme ara yüzeyinde yer yer ayrılmalar tespit edilmiştir(Şekil 6.17.e).



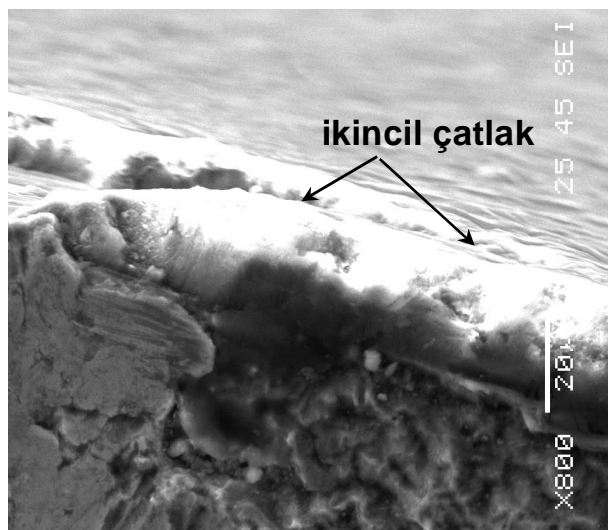
(a) X22



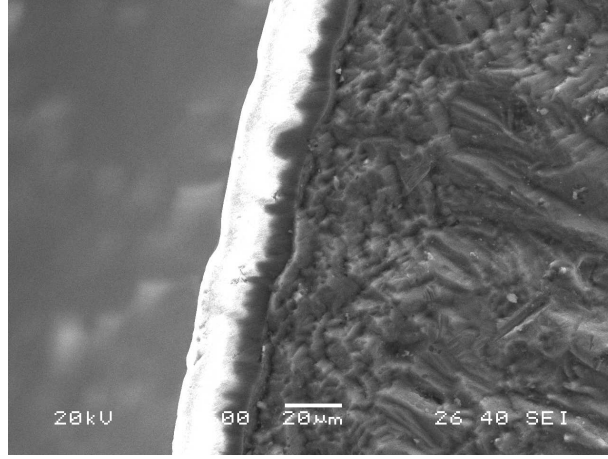
(b) X22



(c) X22



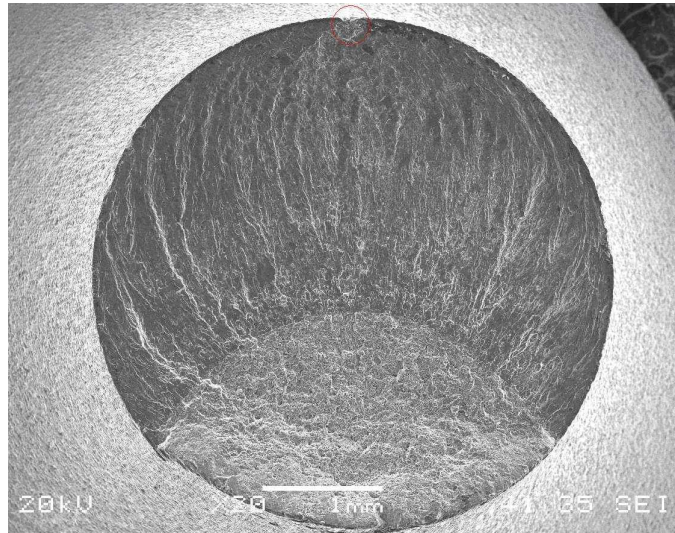
(d)



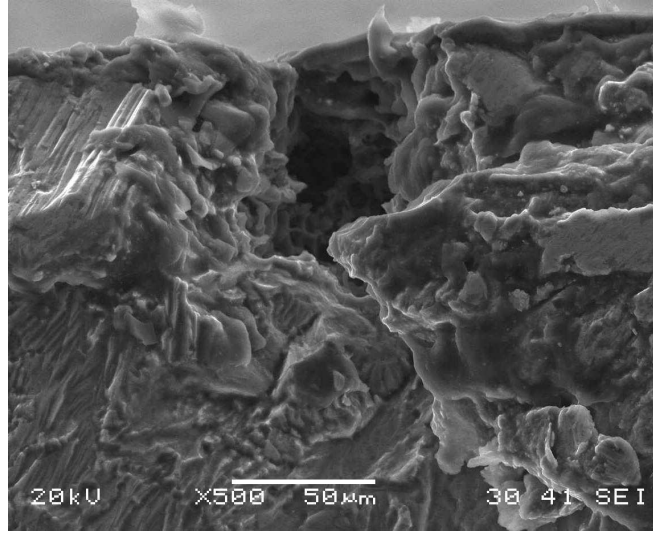
(e)

Şekil 6.17. a) 6, b) 12, c) 23 μm oksit kaplı numuneye ait X22 büyütme için optik mikroskop kırık yüzeyleri ve d), e) 23 μm oksit kaplı numunenin çatlak yüzey SEM fotoğrafları

240 saat ön korozyona tabi tutulmuş 6 μm oksit kaplanmış yorulma numunesinin çatlak yüzeyine ait SEM mikro fotoğrafı Şekil 6.18.'de verilmiştir. Şekil 6.18.a'da numunenin en üstünde oluşan şiddetli korozyon oyuğu yorulmadan kaynaklanan çatlak oluşumunun merkezidir(Şekil 6.18.b).



(a)



(b)

Şekil 6.18. 240 saat ön korozyona tabi tutulmuş 6 mikrometrelilik kaplamalı yorulma numunesinin kırık yüzeyine ait SEM mikro fotoğrafı

6.4. Genel Sonuçlar

1. Yorulma deneylerinden, söz konusu alaşımın 10^4 - 12×10^6 çevrim sayısı aralığında malzemenin yorulma sınırına sahip olmadığı ve 10^7 çevrim sayısı için yorulma dayanımı 295 MPa olarak belirlenmiştir.
2. Ön korozyon süresinin artmasıyla malzemede oyuk dağılımı, yoğunluğu ve derinliği artış göstermektedir. Oyuklar, çentik etkisi yaparak yorulma dayanımını %58 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Uygulanan oksit kaplama işlemi genel olarak yorulma dayanımını azaltmıştır. Kaplama işlemi 10^7 çevrim sayısı için yorulma dayanımında yaklaşık %40'lık azalmaya neden olmuştur.
3. Genel olarak uygulanan oksit kaplama yüzeyin korozyon direncini artırmıştır. Ancak uzun süreli (96 saat ve daha uzun) ön korozyon süreleri için sadece 23 µm oksit kaplama kalınlığı yüksek oyuklanma direnci gösterebilmiştir.
4. Uzun ömürlü yorulma bölgesi için, 23 µm oksit kaplanmış parçalar, ön korozyona maruz bırakılmış parçalar içerisinde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu anlaşılmıştır.
5. 10^7 çevrim esas alındığında, 23 µm oksit kaplama kaplamasız parçalara göre yorulma dayanımında %47'lik iyileşme sağlamıştır.

6.5. Öneriler

Yapılan çalışmalar neticesinde, kaplamanın yapısı nedeniyle yorulma dayanımı azaltmakta ve artan tabaka kalınlığı ile etkisi daha da artmaktadır, diğer taraftan kalın oksit kaplama korozyon açısından tercih edilir davranış sergilemektedir. Kaplamanın korozyon direnci yetersiz ise, ön korozyon testinden sonra yorulma deneyine tabii tutulan parçaların yorulma ömürleri daha da kısalmaktadır. Malzeme yüzeyinde ince ancak korozyon direnci yeterince yüksek bir kaplamanın oluşturabilmesi durumunda yorulma dayanımında önemli iyileşmeler sağlanacağı düşünülmektedir. İleride yapılacak çalışmalar açısından; özellikle daha düşük iç gerilme oluşturan, homojen yapıya sahip, yeterince tok ve korozyon direnci yüksek kaplamaların üretilmesi son derece faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] KIZILBEY, M., 7075 Alüminyum Alaşımı ve Hata Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000
- [2] VAN HORN, KENT R., Aluminum, American Society For Metals, Vol.II, 1968
- [3] YÜKSEL, E.E, 7075 Alüminyum Alaşımında Basamaklı Yaşlandırma ile Özellikleri Kontrol İmkanları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ FBE, 1991
- [4] POURBAIX, M., Atlas D'Equibres Electrochimiques a 25 °C, Gauthier-Villars and C Editeur , 1963; France
- [5] FREEMAN, A.J., Cooling Water Treatment In Process Industries, Corrosion, 1986
- [6] URAL. K., 7075 Alüminyum Alaşımının Retregasyon İşleminde Optimum Şartların Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [7] MONDOLFO, L.F., Aluminium Alloys Structure and Properties, Butterworth and Co. (Publishers) Ltd., England, 1976; 693-724
- [8] TOMASHOW, N.D, Theory Of Corrosion and Protection of Metals, The Science Of Corrosion, The Mc Millan Comp, U.S.A, 1966; 619-622
- [9] BARGEL, J., SCHULZE, G., Malzeme Bilgisi, Çev. Güleç, Ş., Aran. A., Cilt I, Tübitak, 1985
- [10] VAN HORN, KENT, R., Aluminum, American Society For Metals, Vol.I, 1968
- [11] ÜÇİŞİK, A.H., Alüminyum Alaşımları, İ.T.Ü Maden Fakültesi Fiziksel Metalurji Kürsüsü, 1978; 1-44
- [12] TEKİN, E., Demir Dışı Metaller ve Uygulamalı Optik Metalografisi, Yayın No:101, Ankara, 1982; 125-193
- [13] FLINN, R.A., TROJEN, P.K., Engineering Materials and Their Application, Houghton Mifflin Comp., Boston, 1975; 141-149

- [14] <http://aluminium.matter.org.uk>
- [15] ASM Handbook, Heat Treating, Vol. 4, ASM International, Materials Park, Ohio, 1990
- [16] COŞGUNER. A.O., 5000 Serisi Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Termomekaniksel Prosesleri, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001
- [17] www.matweb.com
- [18] COŞKUN. K., Hadde Alüminyum Alaşımların Uçaklarda Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002
- [19] ROBERTS, S.G., High Performance Alloys, University of Oxford Department of Materials Lecture Notes, Oxford, 2001
- [20] SWANSON, R.E., BERNSTEIN, I.M., THOMPSON, A.W., Stress Corrosion Cracking of 7075 Al in The T6-RR Temper, Scripta Metallurgica, Vol.16, 1982; 321-324
- [21] DENNY, A.J., Principles and Prevention of Corrosion, Second Edition, Department of Chemical and Metallurgical Engineering University of Nevada, Reno, 1996
- [22] TSAI, W.T., DUH, J.B., YEH, J.J., LEE, J.T., CHANG, Y.C., Effect of pH on Stress Corrosion Cracking of 7075-T7451 Aluminum Alloy in 3,5 wt% NaCl Solution, Corrosion, Vol.46, No.6, 1990; 444-449
- [23] NGUYEN, D., RAJAN, K., WALLACE, W., Discussion of “Effect of Retrogression and Reaging Treatment on The Microstructure of Al-7075-T651, Metallurgical Transactions A, Vol.16A, 1985, 2068
- [24] RYUM, N., Further Investigation On the Precipitation Kinetics In An Al-Zn-Mg- Alloy, Z.Metal 1kde, Vol.66, 1966; 344-346
- [25] www.aluminyumsanayi.com (Timur Ulucak –Web Sitesi)
- [26] SURESH, S., Fatigue of Materials, Cambridge University Press, New York, USA, 1991
- [27] THEOHARİ, S., Th.Dimogerontakis, Yor-Ming Wang, Hong-Hsiang (Harry) Kuo, Sheila Kia, Tsangaraki-Kaplanoglou, Effect of Alloy Types on The Anodizing Process of Aluminum, Surface&Coating Technology 200, 2006; 2634-2641
- [28] SANCAKDAR, V., BENGÜ, E., Eloksal Kalitesini Etkileyen Ekstrüzyon Parametreleri, Seydişehir 2.Alüminyum Sempozyumu, 2002

- [29] DORUK, M., Korozyonun Temel İlkeleri Üzerine, V.Korozyon Sempozyumu, Adana, 1996; 1-31
- [30] ÜNERİ, S., Korozyon Mühendisliği, Segem, Ankara, 1981
- [31] ÜNERİ, S., Korozyon İnhibitörlerinin Prensipleri ve Pratiği, Segem, Ankara, 1984
- [32] AKSÜT, A.A., İnhibitörler ve Bunların Korozyonu Önleme Mekanizması, Standart ve Ekonomik Dergi , 21, 1982; 18-31
- [33] ERBİL, M., Korozyon-I, Segem, Ankara, 1984
- [34] ÜNERİ, S., Metallerin Çukurcuk Korozyonu, I. Korozyon Sempozyumu, Ankara, 1988; 1-29
- [35] NACE, Corrosion Basics An Introduction. An Official NACE Production, Houston, 1984
- [36] DAVIS, J.R., Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Materials Park, Ohio, 1999
- [37] SMIALOWSKA, Z.S., Inhibition of Localized Corrosion, Proceedings of the 7th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Italy, 1990; 979-997
- [38] WRANGLER, G., An Introduction to Corrosion and Protection of Metals, Chapman and Hall Ltd., London, 1985
- [39] FONTANA, M.G., GREENE, N.D., Pitting Corrosion Engineering, McGraw-Hill Book Co., New York, 1984
- [40] LYBERATOS, G., KOBOTIATIS, L., Inhibition of Aluminum 7075 Alloy Corrosion by Concerted Action of Nitrate and Oxalate Salts. Corrosion, 47(11), 1991; 820-824
- [41] SAMUELS, B.W., SOTOUDEH, K., FOLEY, R.T., Inhibition and Acceleration of Aluminum Corrosion, Corrosion, 37(2), 1981; 92-97
- [42] TAUSCHER, H., Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, Tübitak MBEAM, Gebze, 1983
- [43] SARITAŞ, S., Mechanical Properties Of Two Low Alloy Powder Forged Steels, Doktora Tezi, Manchester, 1979
- [44] ÇİMENÖĞLU, H., KAYALI, E., Malzemelerin Yapısı Ve Mekanik Davranışları, İ.T.Ü. Yayınları, İstanbul, 1991

- [45] AKDOĞAN, G., Elektrohidrolik Tahrikli Düşük Frekanslı Bir Yorulma Test Cihazının Tasarımı Ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, F.B.E, Ankara, 1989
- [46] ÇETİN, R., VAROL, R., Bilyalı Dövme İşlem Parametrelerinin Yorulma Ömrü Üzerine Etkisi, 4. Denizli Malzeme Sempozyumu, 1991; 427-435
- [47] KAYALI, E.S., ENSARİ, C., DİKEÇ, F., Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İ.T.Ü Yayınları, 1990
- [48] BANANTINE, J.A., COMER, J.J., Fundamentals of metal fatigue analysis, Prentice-Hall Inc., USA, 1990
- [49] LAIRD, C., Fatigue Failures, Metals Handbook Desk Edition, (Ed: BOYER H.E., GALL T.L.), American Society for Metals, Ohio, USA, 1985
- [50] POLMEAR, I.J., Light Alloys Metallurgy of the Light Metals, Edward Arnold, Great Britain, 1989
- [51] PAO, P.S., FENG, C.R., GILL, S.J., Corrosion 56, 2000; 1022–1031
- [52] SANKARAN, K.K., PEREZ, R., JATA, K.V., Material Science Engineer A 297, 2001; 223–229.
- [53] HARLOW, D.G., WANG, M.Z., WEI, R.P., Metall. Trans. 37A 2006; 3367–3373
- [54] ISAACS, H.S., Corrosion Science 29, 1989; 313-323
- [55] DUQUESNAY, D.L., UNDERHILL, P.R., BRİTT, H.J., Int. J. Fatigue, 25 (2003); 371–377
- [56] SADELER, R., J.Mater Sci. 41 (2006); 5803-5809
- [57] Final Technical Report, Grant F49620-98-1-0198, Lehigh University, 16

ÖZGEÇMİŞ

Eyüp Cirik, 16.03.1980'de Kütahya'da doğdu. 1998 yılında Kütahya Sağlık Meslek Lisesi, Sağlık Memurluğu Bölümünden mezun oldu. 1998 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü 2002 yılında mezun oldu. 2003 yılından itibaren Sakarya Eğitim ve Araştırma Hastanesinde görev yapmaktadır.