İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİREK SOĞUTMALI VE ÇİFT MERDANELİ DÖKÜM YOLU İLE ÜRETİLEN 6XXX SERİSİ KAYNAKLI VE KAYNAKSIZ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ OYUKLANMA KOROZYONU DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Köksal KURT
(506041414)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Ağustos 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Eylül 2006

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mustafa ÜRGEN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Yılmaz TAPTIK
Prof.Dr. Fatma TEPEHAN

EKİM 2006

ÖNSÖZ

Bu çalışmamın gerçekleşmesinde desteğini ve bilgisini hiç esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Mustafa Ürgen'e, deneysel çalışmalarımda yardımlarından dolayı sayın Araş. Gör. Yük. Müh. Behiye Yüksel'e ve tüm korozyon laboratuarı çalışanlarına, SEM görüntüleri almamda sabrı ve ilgisi için sayın Sevgin Türkeli'ye, katkılarından dolayı Assan Alüminyum A.Ş. Ar-Ge departmanı çalışanlarına ve sınırsız güvenleri, maddi, manevi destekleri nedeniyle aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ekim, 2006 Köksal KURT

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ **v**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
ÖZET **viii**
SUMMARY **ix**

1. GİRİŞ **1**
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı 1

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ OYUKLANMA KOROZYONU **2**
2.1. Alüminyum Hakkında 3
2.2. Metallerde Korozyon 5
2.3. Alüminyumda Korozyon 6
2.3.1. Alüminyumda oyuklanma korozyonu 7
2.3.2. Oyuklanma korozyonu mekanizması 9
2.4. Oyuklanma Korozyonuna Alaşım Elementlerinin Etkisi 14
2.5. Segregasyon 16

3. ALÜMİNYUM KAYNAKLI YAPILAR VE KOROZYON **18**
3.1. Alüminyum Alaşımlarının Alaşım Etkisi 18
3.2. 6xxx Serisi Al-Mg-Si Alaşımı Kaynaklanabilirliği 19
3.3. Tungsten İnört Gaz Kaynağı (TIG) 19
3.4. Alüminyum Kaynağı Elektrot Seçimi 21
3.5. Kaynak-Korozyon İlişkisi 22

4. DC VE ÇİFT MERDANELİ DÖKÜMÜN YAPISAL FARKLARI **25**
4.1. Direk Soğutmalı (DC) İngot Döküm 26
4.2. Çift Merdaneli Döküm (TRC) Yöntemi 27
4.3. Çift Merdaneli Döküm İle Direk Soğutmalı 28

5. DENEY SONUÇLARI **29**
5.1. Amaç 29
5.2. Çevrimli Anodik Polarizasyon Testi 30
5.2.1. Deney malzemeleri görüntüleri 30
5.2.2. Deneyde kullanılan aletler 30
5.2.3. Deneyin yapılışı 31
5.3. Tuz Sprey Testi 32

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA **33**
6.1. Çevrimli Anodik Polarizasyon Testi Sonuçları 33

6.1.1. Sade yüzeylere ait anodik polarizasyon testi 33
6.1.2. Sade kesitlere ait anodik polarizasyon testi 34
6.1.3. Kaynaklı yüzeylere ait anodik polarizasyon testi 35
6.1.4. Kaynaklı kesitlere ait anodik polarizasyon testi 36
6.2. Tuz Sprey Testi Sonuçları 37
6.3. Kaynaklı ve Kaynaksız Numunelerin SEM Analizleri 39
6.4. Genel Sonuçlar 52

KAYNAKLAR **54**

ÖZGEÇMİŞ **56**

TABLO LİSTESİ

		Sayfa No
Tablo 2.1.	İşlenebilir alüminyum alaşımları.....	5
Tablo 2.2.	NaCl çözeltisinde alaşım elementlerinin oyuklanma potansiyeline etkileri.....…….....	16
Tablo 3.1.	Alaşım elementinin alüminyum kaynağı üzerindeki etkisi.....….....	19
Tablo 3.2.	Dolgu metaline göre kaynağın özellikleri.....…….....	22
Tablo 5.1.	Deneyde kullanılan alüminyum numunelere ait bileşim tablosu.....…….....	30
Tablo 6.1.	Sade yüzeye ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri	34
Tablo 6.2.	Sade kesitlere ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri ..	35
Tablo 6.3.	Kaynaklı yüzeylere ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri……..……...	36
Tablo 6.4.	Kaynaklı kesitlere ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri ….....	37

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Alüminyumun oksit tabakasında da devam eden hataları..... 4
Şekil 2.2 : Alümiyumun pH-E diaramı..... 7
Şekil 2.3 : Alüminyum yüzeyinde süreksizlik ve mikro korozyon hücresi… 8
Şekil 2.4 : Temsili oyuklanma korozyonu ve genel korozyon hücre mantığı 9
Şekil 2.5 : Cl^- 'un oksit yüzeyindeki su tabakasına penetrasyonu..... 10
Şekil 2.6 : Alüminyum oyuklanma korozyonun şematik gösterimi……..... 12
Şekil 2.7 : Al-Si alaşımında pH' ın 7 olduğu ortamda sayılara karşılık gelen klor iyonu konsantrasyonları (M): 1 (0), 2 (0.01), 3 (0.025), 4 (0.1), 5 (0.25) ve 6 (0.50)..... 13
Şekil 2.8 : Havalandırılmamış, 0.1M NaCl çözeltisindeki bazı alüminyum alaşımlarının anodik polarizasyon eğrileri 15
Şekil 3.1 : TIG kaynağının genel işleyişi 20
Şekil 3.2 : Al 7005 alaşımı- 5356 dolgu metali, bir yıl deniz suyuna maruz bırakılmış a) Kaynak sonrası maruz bırakılmış b) Kaynak ve yaşlandırma sonrası maruz bırakılmış. Elektrokimyasal deneyler ASTM G69'a göre yapılmıştır..... 23
Şekil 4.1 : DC yatay dökümün şematik şekli..... 26
Şekil 4.2 : Çift merdaneli döküm yönteminin şematik gösterimi …..... 27
Şekil 4.3 : Genel olarak çift merdaneli döküm sisteminin şematik gösterimi 28
Şekil 5.1 : Korozyon hücresi..... 31
Şekil 6.1 : Sade yüzeylere ait anodik polarizasyon eğrileri..... 33
Şekil 6.2 : Sade kesitlere ait anodik polarizasyon eğrileri..... 34
Şekil 6.3 : Kaynaklı yüzeylere ve dolgu metaline ait anodik polarizasyon eğrileri..... 35
Şekil 6.4 : Kaynaklı kesitlere ve dolgu metaline ait anodik polarizasyon eğrileri..... 36
Şekil 6.5 : Tuz testi sonrası numuneler a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC..... 38
Şekil 6.6 : Tuz testi sonrası 500x büyütmede SEM görüntüleri a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC..... 39
Şekil 6.7 : Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız yüzey numunelere ait düşük büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC……. 40
Şekil 6.8 : Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız yüzey numunelere ait yüksek büyütmelerdeki (2000x) SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC……... 41
Şekil 6.9 : Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız kesit numunelere

ait düşük büyütmelerdeki (50x) SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC……..... 42
Şekil 6.10 : Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız kesit numunelere ait orta büyütmelerdeki (500x) SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC…...….. 43

Şekil 6.11 : Al 6016 TRC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki (50x ve 500x) SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal……....…… 44
Şekil 6.12 : Al 6016 DC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki (50x ve 500x) SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal……..…….. 45
Şekil 6.13 : Al 6082 TRC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal …….....……. 46
Şekil 6.14 : Al 6082 DC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal…….....…….. 47
Şekil 6.15 : Kaynaklı yüzey numunelerinin dolgu metal ana metal oyuk yoğunluklarının şematik gösterimi, O hiç oyuk olmadığı, A az oyuk yoğunlu ve Y yüksek oyuk yoğunluğu..... 48
Şekil 6.16 : Al 6016 TRC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali …….....…….. 48
Şekil 6.17 : Al 6016 DC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali …….....…….. 49
Şekil 6.18 : Al 6082 TRC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali …….…… 50
Şekil 6.19 : Al 6082 DC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali …….....…… 51
Şekil 6.20 : Kaynaklı kesit numunelerinin dolgu metal ana metal oyuk yoğunluklarının şematik gösterimi, A az oyuk yoğunlu ve Y yüksek oyuk yoğunluğu …….....… 51

DİREK SOĞUTMALI VE ÇİFT MERDANELİ DÖKÜM YOLU İLE ÜRETİLEN 6XXX SERİSİ KAYNAKLI VE KAYNAKSIZ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ OYUKLANMA KOROZYONU DAVRANIŞI

ÖZET

Alüminyum otomotiv sanayinde giderek kullanımı artan bir mühendislik malzemesidir. Alüminyumun düşük ağırlığına rağmen sergilediği yüksek mukavemet ve kolay işlenebilirliği bunun nedeni olarak gösterilebilir. Yapısında alüminyumu daha çok barındıran taşıtların diğerlerine nazaran daha hafif olması, artan petrol fiyatları göz önünde bulundurulduğunda ekonomik olarak bir avantaj sağlamaktadır.

Alümiyum levha konvansiyonel olarak direk soğutmalı döküm (DC cast) ve sıcak hadde ile üretilirken ikinci adımı gerektirmeyen çift merdaneli döküm (TRC) yöntemi gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Ancak çift merdaneli döküm yönteminde üretim kademelerini kısaltırken, yöntemden kaynaklanan mikro yapısal oluşumlar başta korozyon davranışını etkileyen sorunlara yol açmaktadır.

Alüminyumun endüstriyel uygulamalarında tungsten asal gaz korumalı kaynak (TIG) yaygın bir birleştirme işlemi olarak kullanılmaktadır. Burada kaynak işleminin ve dolgu metali seçiminin korozyon direnci üzerindeki etkisi, malzemenin kullanılacağı yerin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle TIG kaynağında bunlara dikkat edilmelidir.

Bu çalışmada TIG kaynağı ile birleştirilmiş, iki farklı yöntemle üretilmiş Al 6016 ve Al 6082 alaşımlarının oyuklanma korozyonu davranışları, kaynak etkisi, üretim yöntemi ve alaşım katkısı göz önünde bulundurularak incelenmiştir.

THE PITTING CORROSION BEHAVIORS OF WELDED AND NON-WELDED 6XXX SERIES ALUMINIUM ALLOYS PRODUCED BY DIRECT CHILL CAST AND TWIN ROLL CAST

SUMMARY

Aluminium alloys find different application areas in automotive industry day to day. It is why aluminium has good corrosion resistance, formability and strength in spite of its lightness. If the increasing price of petrol is considered, vehicles that include more aluminium as a counterpart in their construction will have certain advantages.

In case aluminium sheet production, twin roll casting (TRC) becomes widespread instead of conventional method direct chill casting (DC) with reducing the production steps. Although TRC has some advantages, some micro structural questions are shown and affect the corrosion resistance, strength etc. of the material.

In some industrial applications aluminium has to be used as joints. One of the most prevalent methods is tungsten inert gas welding (TIG). In TIG welding heat exposure and filler metal selection are vital considering on the corrosion resistance and strength of the weldment.

In this study the pitting corrosion resistances are investigated of 6016 and 6082 aluminium alloys by keeping in mind the alloys, production methods and welding effect differences.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Alüminyum ve alaşımları mühendislik malzemeleri içerisinde gittikçe artan bir önem kazanmaktadır. Bunun temel nedeni düşük yoğunluğu dolayısıyla hafifliği, kolay şekillenebilirliği, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve çeliğe oranla atmosferik ortamda korozyona karşı daha dayanıklı olmasıdır. Tüm bu özellikleri ile uzun yıllardır uçak ve uzay endüstrisinde kullanılmaktadır. Enerji ve çevre koruma kaygıları kara taşıt araçlarında da pahalı olmasına karşın alüminyum alaşımlarının kullanılmasını gündeme getirmiştir. Bugün kara taşıt araçlarında alüminyum ve alaşımlarının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır.

Aüminyumun kara taşıt araçlarında kullanılmaya başlanması daha ucuz ve ekonomik alaşımların üretilmesini zorunlu kılmaktadır. Bugün 6XXX ve 5XXX serisi alüminyum alaşımları kara taşıt araçlarında yaygın kullanım alanları bulmaktadır.

Alüminyum alaşımlarını ucuzlatmanın bir diğer yöntemi de üretim sürecini kısaltmaktır. Konvansiyonel olarak alüminyum alaşımları direk soğutmalı döküm (DC cast) yöntemiyle dökülür. Daha sonra haddelenerek levha üretimi yapılır. Son yıllarda geliştirilen çift merdaneli döküm (TRC) yöntemi ile haddeleme sürecini kısaltmak ve dolayısıyla daha ekonomik üretim yapmak mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmanın öncelikli amacı; 6016, 6082 alaşımlarının korozyon davranışı ile döküm yöntemi arasındaki ilişkiyi araştırmaktır. Bu konuda daha önce yapılan araştırmalar sınırlıdır ve sistematik olmaktan uzaktır.

Alüminyum alaşımlarının yapısal uygulamalardaki kullanımı sırasında birleştirme yöntemi olarak kaynak işlemi önemli bir prosestir. Dolasıyla kaynaklanmış parçaların kaynak sonrası korozyon özelliklerinde olabilecek değişimler de önemli bir konudur. Bu çalışmanın ikinci amacı; kaynaklanan 6016 ve 6082 alaşımlarının kaynak sonrası korozyon davranışlarındaki değişimleri incelemektir.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ OYUKLANMA KOROZYONU

Metalik olmayan malzemeler mevzu bahis olduğunda korozyon terimi her zaman bu malzemelerin kimyasal etkilenmeler nedeniyle bozunması anlamına gelirken, aynı kavram metalik malzemeler için herzaman uygulanabilir değildir. Bir çok otorite, metalik malzemelerin korozyonu teriminin yararlı veya yararsız oluşuna bakılmaksızın ortamla metalin veya alaşımın bütün etkileşimleri kapsadığını düşünmektedirler. Bu durumda, korozyonun tanımı için dönüşüm kelimesine gönderme yapmak daha uygundur. Örneğin çinkonun belirlenen miktarlarda anodik olarak çözünüp katodik koruma uygulaması ve yine çinkonun elektrokaplaması veya alüminyum eloksalı da korozyon teriminin içerisine girer[1,2].

Öte yandan, korozyon terimi korunması gereken, kullanılmakta olan, metal ve alaşımın ortamla etkileşimi sonucu bozunarak bazı özelliklerinin kötü etkilenmesi olayını da tanımlamaktadır. Bu durumda korozyonun tanımı için bozunma kelimesine gönderme yapmak da doğru kabul edilebilir. Bozunma tanımı alüminyum gibi metalik malzemelere uygun olduğu gibi cam, beton gibi metalik olmayan malzemelere de uygundur ve bu tanımıyla daima istenmeyendir[2].

Bunların yanında korozyon büyük bir milli servet kaybıdır ve insanlık özel hayatında evinde, iş yerinde fabrikalarda korozyona aşinadır. Evlerde günlük hayatımızda korozyon, metal elektronik cihazlar, saklama kapları, ev altındaki su boruları, metal çit gibi ürünlerde karşımıza çıkabildiği gibi, sanayide boru sistemleri, makineler, metal konstrüksiyon gibi önemli araç ve donanımlarda karşımıza çıkmaktadır. Korozyonun maliyet sorunlarına neden olan büyük bir finansal yönü vardır. ABD'de korozyon her yıl sanayi ulusal üretimin % 4,9' una mal olmaktadır. Bu da yine ABD 'de her yıl meydana gelen yangın, hortum, sel ve depremlerin neden olduğu zarardan daha fazla bir zarara neden olmaktadır[3]. Korozyonu önlemek için yapılan araştırma harcamaları, kullanılan teçhizat ile kayıp tutarı giderek daha da artmaktadır. Korozyonun dolaylı olarak da kayıpları azımsanamayacak kadar önemlidir.

- Korozyon nedeniyle fabrikalardaki parça değişimi sırasında üretim zamanı kaybı

- Ürünlerin korozyonla kaybı
- Korozyon ürünlerinin neden olduğu verimlilik düşüşü
- Nükleer ve kimyasal korozyon ürünlerinin tehlikesi
- Neden olduğu arızalar sebebiyle yaralanmalar hatta ölümler nedeniyle gerçekleşen iş gücü kaybı
- Düşünülen kullanım ömrüne ulaşmak için korozyon hızının göz önünde tutarak mühendisler ürünü daha büyük tasarlarlar. Bu da ürünün maliyetine artı ekonomiye eksi katkı yapmaktadır[4].

2.1 Alüminyum Hakkında

Alüminyum düşük yoğunluklu (2,7 g/cm^3) yüksek korozyon dirençli, mekanik özellikleri geliştirilebilen ve kolay şekillendirilebilen malzeme niteliklerine sahip olması nedeniyle otomotiv sanayinde yenilik arayan üreticilerin gözünü kamaştırmaktadır.

İletkenlik açısından da alüminumun elektrik iletkenliğinin, bakırın %60'ı kadar olması elektrik mühendislerinin ilgisini çekmiştir[5].

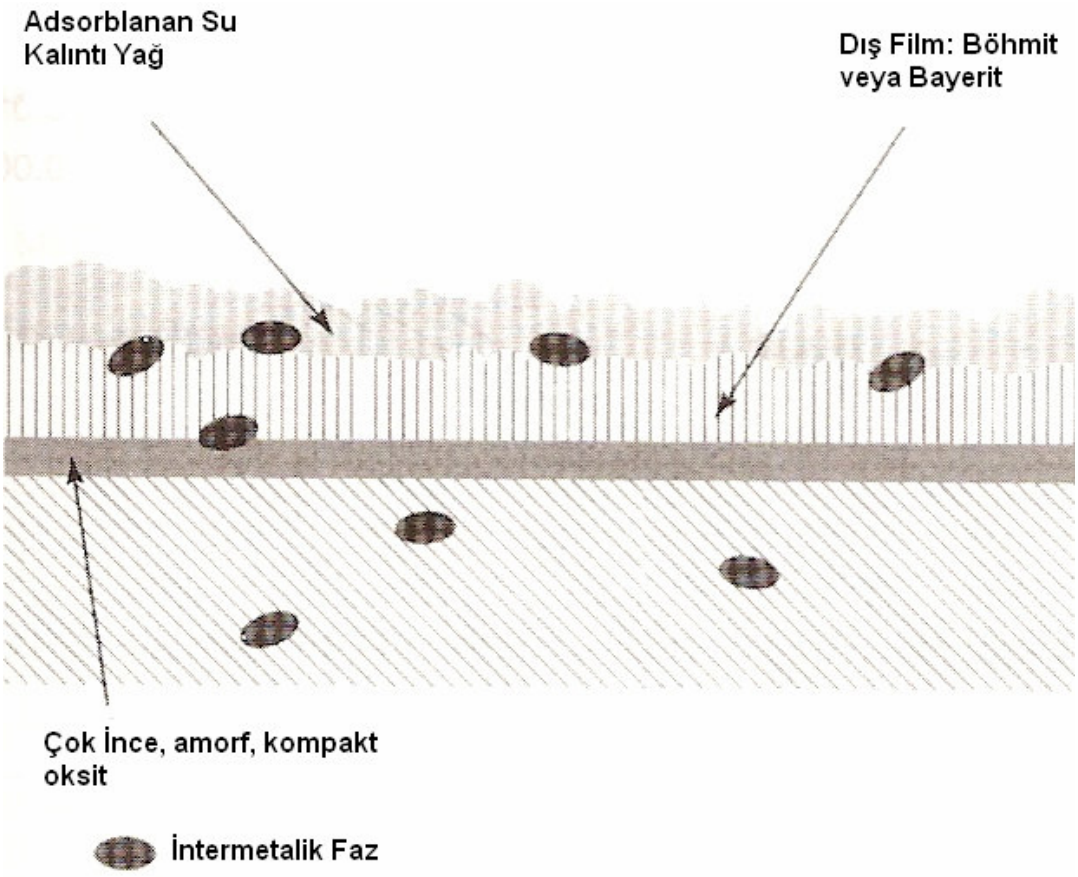
Alüminyum ergiyik halde rengi değişmez. Bu da kaynakçıların alüminyumun ne zaman ergimeye başladığına tam karar vermelerini zorlaştırır. Ayrıca alüminyum manyetik bir malzeme değildir böylece kaynak sırasında ark sıçraması sorunu olmaz[6].

Isıl genleşme katsayısı ($23,6x10^{-6}$) çeliğin iki katı civarındadır. Bu nedenle kaynak gibi işlemlerde distorsiyon olma ihtimali daha yüksektir. Yine kaynak işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken diğer nokta da sıvı alüminyum alaşımları gazları çok iyi soğurmasıdır.

Alüminyum alaşımlandırma yoluyla 120 BHN değerinde sertliğe, yine çekme mukavemeti de 650 MPa' a çıkabilmektedir[5].

Alüminyumun derin çekilerek şekillendirilebilmesi çeliğin 2/3'ü kadarken, young modülü 1/3' ü kadardır. Yani kolay şekillendirilebilir ancak eski şeklini alma isteği vardır[7].

Alüminyumun korozyona direncinin yüksek olması ise yüzeyinde havada bile oluşabilen yoğun ve kararlı oksit tabakası ihtiva etmesindendir. Alüminyumun oksijene karşı afinitesi çok yüksek olması nedeniyle alüminyum hemen [Al^{-}] şeklinde çözünüp oksijenle Al_2O_3 bileşiği oluşturarak, metal yüzeyi ile ortamın bağlantısını kesen pasif bir tabaka meydana getirip korozyonu engeller. Oluşan oksit tabakası iki tabakalı bir yapıdır. Üstte porlu görece daha kalın, porlu tabaka, altta ise amorf, kompakt ve daha ince bir tabaka daha vardır. Tabii oluşan oksit tabakası oluştuğu metal yüzeyinin alaşım ve yüzey hatası gibi özelliklerini de taşır.



Şekil 2.1: Alüminyumun oksit tabakasında da devam eden hataları[8].

Oluşan bu oksit tabaka çok sert bir yapıdır. Bu sayede alüminyum metalini aşınma ve çizilme gibi dış etkenlere karşı koruyabilir.

Alüminyum alaşımlandırma yoluyla çok farklı özellikler sunabilmektedir. Bunlarda farklı uygulama alanlarında kullanılabilmektedir. İşlenebilir alüminyum alaşımları ihtiva ettikleri alaşım elementi farklılıklarına göre sekiz seriye Tablo 2.1'de görülmektedir.

Tablo 2.1: İşlenebilir alüminyum alaşımları [1].

Seri	Temel Alaşım Elementi
1xxx serisi	Saf Alüminyum
2xxx serisi (Al-Cu)	Alüminyum
3xxx serisi (Al-Mn)	Alü.-Mangan
4xxx serisi (Al-Si)	Alü-Silisyum
5xxx serisi (Al-Mg)	Alü.-Magnezyum
6xxx serisi (Al-Si-Mg)	Alü-Silisyum-Magnezyum
7xxx serisi (Al-Mg-Zn)	Alü-Mg-Çinko
8xxx (Al-Cu-Mg-Li)	Alü-Bakır-Mg- Lityum

Uçak yapı malzemesi konumunu domine eden alüminyum alaşımları, üstteki Tablo 2.1' deki yeni gelişmeler doğrultusunda daha etkin bir malzeme olmaya devam edecektir. Örneğin uçak sanayinde kullanılan 7xxx serisi yeni temper ısıl işlemleriyle daha da geliştirilmiş yine 2024-T3 alaşımı yerine 2524-T3 alaşımı geliştirilerek daha iyi bir yorulma mukavemeti sağlanmıştır[9].

Otomotiv sektöründe de panel üretiminde bir yandan hafifleşme istenirken bir yanda da karışık şekilli parçaların imalatı düşündürmektedir. İç paneller daha iyi şekillendirilebildiği için 5xxx serisi, dış panellerde ise çekme çizgileri oluşmadığından 6xxx serisi tercih edilmiştir[7].

2.2 Metallerde Korozyon

Korozyon, genel anlamda metalin kimyasal reaksiyon sonucu hasar görmesi olayıdır. Metaller doğada mineraller halinde bulunurlar. İnsanoğlu metallerin üretiminde bu mineralleri hammadde olarak kullanırken, korozyon reaksiyonları (2.1) da metalleri kullanarak onları doğadaki hallerine geri dönüştürmektedir.

$$Me \longrightarrow Me^{n+} + ne^{-} \quad (2.1)$$

Reaksiyonda oluşan metal iyonu ortamda bulunan korozyon ajanı ile reaksiyona girerek metalik özelliğini yitirerek doğadaki haline dönüşmektedir. Korozyon çok kullanılan demir-çelik, alüminyum, bakır, çinko, kurşun yanında bütün metalleri etkilemektedir.

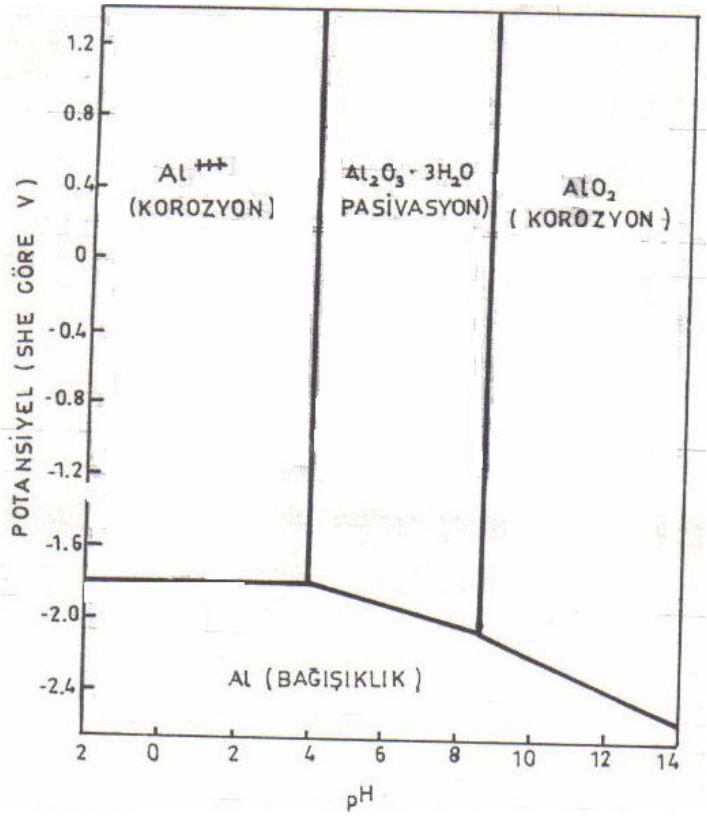
2.3 Alüminyumda Korozyon

Alüminyum hafif oluşu nedeniyle uçak-uzay sanayi ile beraber, gelişen otomotiv sanayinde de yakıt tüketimini azaltmak amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Daha hafif aracı hareket ettirmek için daha az yakıt harcanacağı aşikardır. Özellikle 19. yüzyılın sonlarına doğru ekonomik açıdan çok değerli bir mühendislik malzemesi haline gelmiştir[1]. Bu nedenle yakın zamanda Audi Otomotiv firması tüm gövdesinin % 40'ı alüminyumdan oluşan ilk otomobili üretmiştir.

Alüminyum sadece hafiflik özelliği ile ekonomik bir değer olması yanında korozyona dayanaklı oluşu ile de üretici ve tüketiciye bir kazanç sağlamaktadır. Tüketici de çelik araçlara nazaran daha uzun kullanım süresine sahip olan alüminyum gövdeli araçları tercih etmektedirler.

Alüminyumun sulu ortam ve havadaki kararlılığı oksijene olan afinitesinden kaynaklanır. Bu da ve paslanmaz çelik, titanyum gibi metallerde de görülen pasif oksit tabakaya sebep olarak korozyon direncinin artışıyla sonuçlanır[10].

Alüminyumda korozyonu Pourbaix Diagramlarıyla açıklayabiliriz. Termodinamik kuralların temelinde hazırlanmış bu diagramlarda metalin hangi potansiyelde ve hangi pH değerindeki ortamda nasıl davranacağını göstermektedir. Şekil 2.2'de alüminyumun pH=4-9 değerlerinde pasif olduğu yani yüzeyindeki oksidin kararlı olduğu görülmektedir. İşte bu durumda oyuklanma korozyonu tehdidi altına girmektedir. Diğer pH değerleri için yani çok asidik ve çok bazik ortamlarda pasif oksit film bozunur ve alüminyum metali korozyona açık hale gelir.



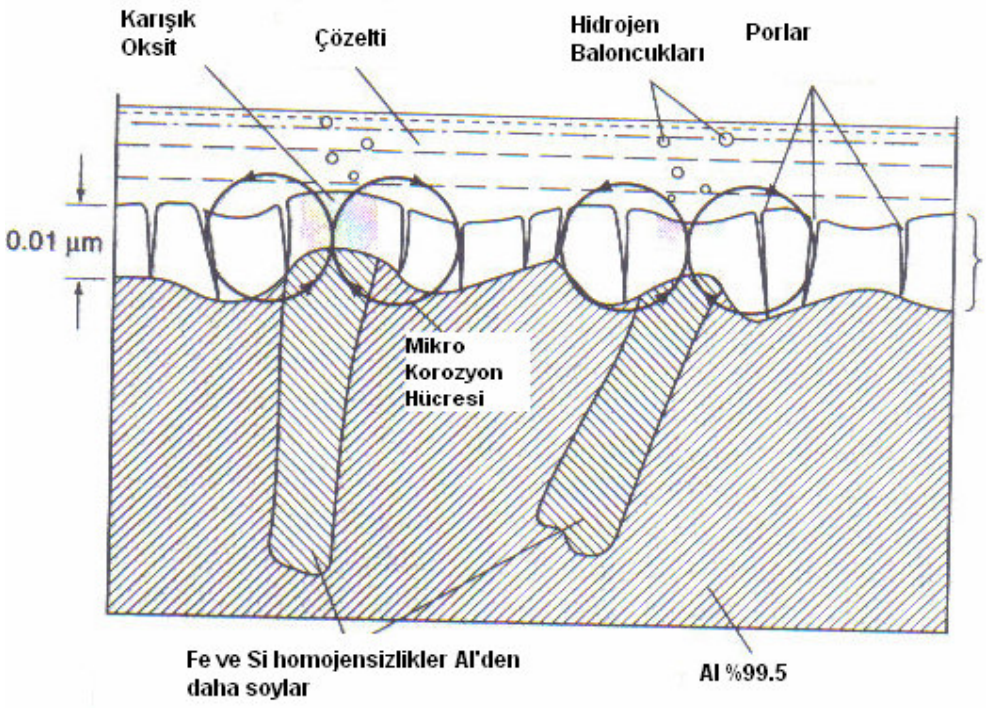
Şekil 2.2: Alümiyumun pH-E diaramı [11].

Üç önemli çeşit öne çıkar alüminyumda; üniform, taneler arası ve oyuklanma korozyonudur. Üniform korozyonu daha tahmin edilebilir olması ve düşük hızlarda gerçekleşmesi diğer türlere nazaran tehlikesini azaltmaktadır. Ancak, 130 ºC' de aktif olabilen taneler arası ve 15-60 ºC' de görülebilen oyuklanma korozyonu davranışı kestirilemez bu nedenle de çok tehlikelidir [10]. Ayrıca bu iki tip daha tehlikeli olan gerilmeli korozyon çatlağına yol açması nedeniyle de özel bir dikkat gerektirir. Ancak geri kalan korozyon türleri de malzeme için tehlikelidir.

2.3.1 Alüminyumda oyuklanma korozyonu

Oyuklanma korozyonu bölgesel korozyonun bir türüdür. Bu tip korozyon metal üzerindeki oksit filmin kararlı olduğu ortamlarda meydana gelmektedir. Oyuklanma korozyonu tanımı şöyle de yapılabilir: Belirli kritik potansiyel (Ep: oyuklanma potansiyeli) değerin altında ulaşıldığında pasif oksit filmin bozunarak alttaki metalin oyuk şeklinde korozyona uğramasıdır[1,4,12]. Malzeme kritik potansiyel olan oyuklanma potansiyeline ulaştığında, akım aniden çok yüksek değerlere ulaşılır. İşte bu Ep' nin ötesine geçilince oksit filmdeki zayıf noktalardan, bölgelerden bozunma

gerçekleşir. Mazhar, Arab ve Noor'a göre oyuklanma potansiyeli Cl^- iyonlarının yüzeye penetre etmesine bağlı olan anodik elektrokimyasal bir prosesdir. Bu oluşumunu da taşınan, adsorblanan ve reaksiyona giren klor iyonları konsantrasyonunun etkisi altındadır[13]. Bölgesel korozyona sebep, mikro korozyon hücresi oluşturan malzeme üzerindeki süreksizlikler, intermetalikler, inklüzyon veya boşluk varlığıdır. Ayrıca ortamda agrasif iyonların varlığı özellikle halojen grubu (Cl^-, F^- gibi) oyuklanma korozyonunu tetiklemektedir. Şekil 2.3' de alüminyum yüzeyindeki süreksizliği ve mikro kozoyon hücresi görülebilmektedir.



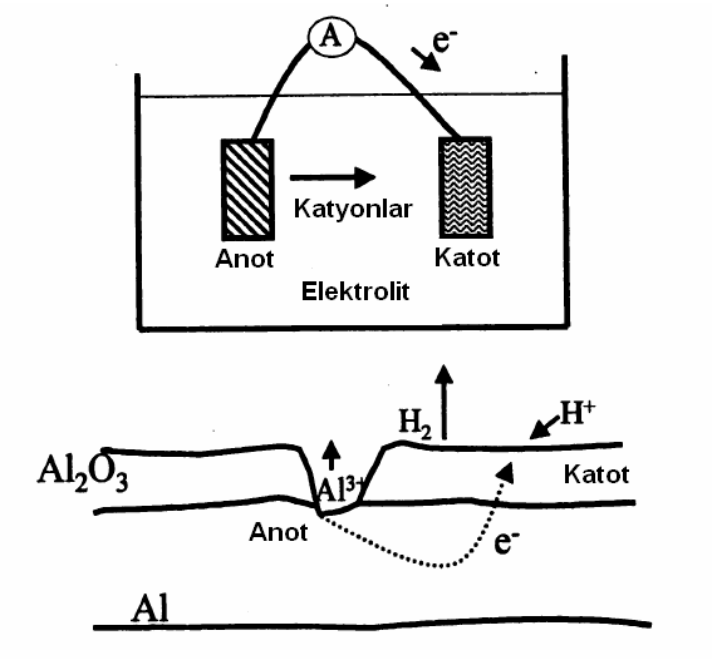
Şekil 2.3: Alüminyum yüzeyinde süreksizlik ve mikro korozyon hücresi [1].

Oyuklanma korozyonu;

- Cl^-' un pasif film çözelti ara yüzeyinde toplaması (açık devre potansiyeli ölçülürken) ve pasif film yüzeyinde prosesin başlaması
- Prosesin oksit filmi içinde ceryan etmesi.
- Oyuklanma potansiyeli altında, çok kısa süreliğine oluşup, büyüyüp tekrar pasifleşen yarı kararlı oyukların oluşması. Bu oyuklar oyuklanmanın ilk adımlarıdır.

- Kritik potansiyel değerinin yani oyuklanma potansiyelinin üstünde karalı pitlerin büyümesi

şeklinde dört evreden oluşmaktadır [12]. Şekil 2.4' de oyuklanmanın ve korozyon hücresinin temsili bir şekli bulunmaktadır.



Şekil 2.4: Temsili oyuklanma korozyonu ve genel korozyon hücre mantığı [3].

Alüminyum alaşımlarının oyuklanma korozyonu direnci ne kadar saf olduklarına bağlıdır. En saf metal en yüksek dirence sahiptir. İşlenebilir alaşımlar en yüksekten en düşük dirence doğru: 1xxx, 5xxx, 3xxx, 6xxx, 7xxx ve 2xxx alaşımı şeklinde sıralanmaktadır [1].

2.3.2 Oyuklanma korozyonu mekanizması

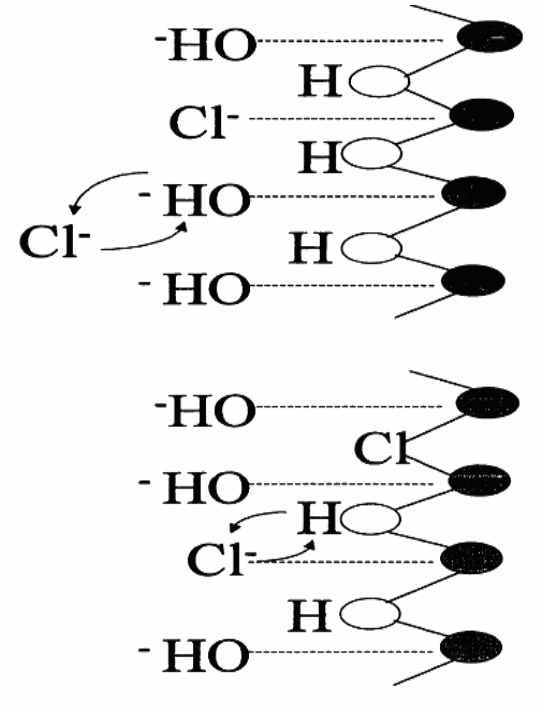
Oyuklanma mekanizması tam olarak anlaşılamamıştır [4,12]. Ancak yapılan çalışmalar bazı saptamalar ve modeller oluşturulmuştur. Genel olarak alüminyum Bölüm 2.3.1' de anlatılan evreleri takip eder. Üçüncü evreye kadar çok net bilgiler literatürde bulunmamaktadır.

Klor iyonu oksit filmi etkileşimi oksit yapısına yani alaşım elementine, mikro ve makro hatalara, çözelti bileşimine, sıcaklığa ve potansiyele bağlıdır [12].

Nötral (pH=4-9) kompleks olmayan çözeltilerde oksit film çözünürlüğü çok azdır ayrıca oksit film iletkenliği de çok azdır. Bu da redoks reaksiyonlarını engeller.

Ancak polarizasyon deneyleri sırasında az da olsa akım ölçülmüştür. Bu da oksit filmdeki hatalardan kaynaklanmaktadır.

Oksit film yüzeyine gelen Cl^- iyonları önce Şekil 2.5'deki gibi yüzeyde bulunan su tabakasına penetre etmektedir.



Şekil 2.5**:** Cl^- 'un oksit yüzeyindeki su tabakasına penetrasyonu [3].

Noktasal hata modeline göre Cl^- iyonları oksitteki anyon boşluklarına yerleşir. Bunun sonucu olarak da anyon boşlukları azalır ve katyon boşluğu artar. Ne zaman ki metal yüzeyinde katyon boşlukları yığılır o zaman oksit film bozunur [12].

Diğer bir görüş de: Cl^- iyonları ya absorve olarak ya da oksit filmle ilişki kurarak oksit filme hatta metale sızabilir. Malzemedeki hatalardan dolayı absorbsiyon enerjileri de yüzeyde bölgesel olarak değişmektedir. Bu absorbsiyon veya ilişki X-ışını fotoelektron spektroskopisiyle ölçülebilmektedir. Buna göre oyuk alanlarında tercihli olarak Cl^- adsobsiyonu yüksektir. Klor absobsiyonu zamana, klor konsantrasyonuna bağlıdır ve potansiyel ile lineer şekilde artar [12].

Bu durumda absorbsiyon alanları azaltılırsa eğer oyuklanma korozyonu azaltılabilir. Yine bu alüminyum alaşımının kendi özellikleriyle ilgilidir. Yani absorbsiyon

alanları ve de oyuk bölgesi gibi davranacak olan inklüzyonları, intermetalikleri ve mikro hataları engelleyerek oyuklanma korozyonu direnci artırılabilir [4,8].

Zayıf noktalarda mikroçatlakları oluşmasıyla birlikte çok kısa zamanda çok sayıda (10^7 cm^{-2}) oyuk oluşumu gözlenebilmektedir [8].

Kararlı büyüyen oyuklardan önce oyuk oluşumunun habercisi olarak yarı kararlı oyuklar oluşur. Bu oyuklar bir kaç saniye içinde başlar büyür ve tekrar pasifleşirler. Açık olarak belirlenen yarı kararlı oyuk çapı yaklaşık 0.1- 6 µm arasındadır. Alüminyumda kararlı oyuk oluşumu için $I_o/r_o = 10^{-2}$ A/cm olmalıdır. Burda I_o: oyuk akımı, r_o ise oyuk yarıçapıdır. Bu değere ulaşamayan oyuklar kararlı hale gelmeden tekrar pasifleşirler. Genel olarak kabul görürki; kararlı oyuk büyümesi için oyuk dibinde tuz filmi oluşması gerekli bir durumdur [12].

Oyuklanma korozyonu bir kere başladığı zaman bir daha kendini devam ettirebilir yani otokatalitiktir. Oluşan oyuk büyüklüğünün zamanın küpkökü ile doğru orantılı olduğunu ($d \alpha t^{1/3}$) savunulmaktadır[8]. Ancak Hunkeler ve Boehmi' nin çalışmalarında oyuğun büyüklüğünün direnç kontrollü olduğu çünkü oyuk büyüme hızı bulk elektrolitin iletkenliğine bağlı ve $d \alpha t^{1/2}$ olduğunu savunmaktadır. Buzza ve Alkira ise çalışmalarında yapay oyuk oluşturarak oyuk büyümesinin difüzyon kontrollü olduğunu saptamışlardır [12].

Oyuk kimyası da henüz tam olarak netleşmemiştir. Bu konuda da farklı görüşler vardır.

1) İlk görüşe göre elektrokimyasal reaksiyonlar:

Oyuk dibinde oluşan oksidasyon reaksiyonu:

$$2Al \longrightarrow 2Al^{3+} + 3e^- \quad (2.2)$$

Oyuk dışında redüksion reaksiyonu ise:

$$2/3O_2 + 3H_2O + 6e^- \longrightarrow 6OH^- \text{ veya} \quad (2.3)$$

$$6H^+ + 6e^- \longrightarrow 3H_2 \quad (2.4)$$

Böylece oyuk dışında alkali bir ortam oluşur.

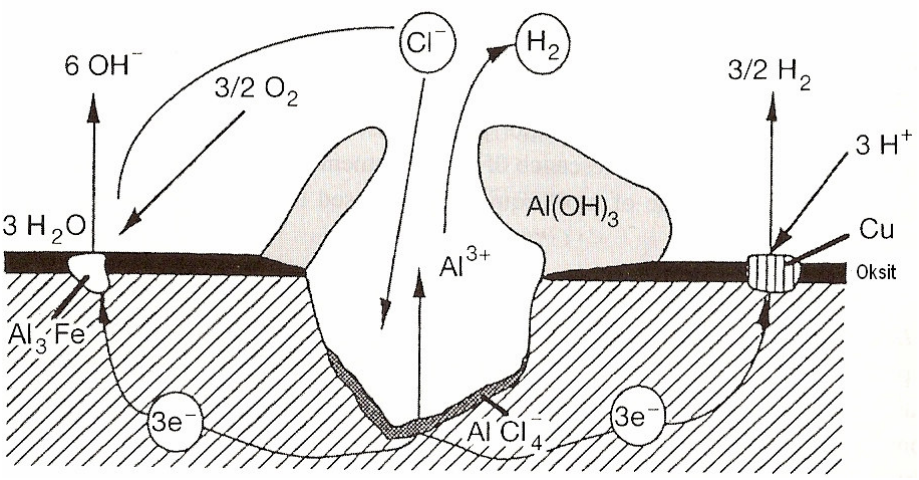
Toplam oyuk korozyonu reaksiyon ise:

$$2Al + 3H_2O + 3/2O_2 \longrightarrow 2Al(OH)_3 \quad (2.5)$$

Alüminyumun çözünmesi boyunca Al^{3+} iyonlarının oluşumu mobilitesi yüksek olan Cl^- iyonlarını oyuğa çeker. Nötralizasyon sonucu oluşan alüminyum klorür Şekil 2.5'teki gibi birikme yapar ancak bir yandan da Reaksiyon 2.6' daki gibi hidrolize olur.

$$Al^{3+} + 3H_2O \longrightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ \quad (2.6)$$

Reaksiyon 2.6 sonucu ortamın pH'ı düşer ve oyuklanma açısından agrasif bir ortam oluşur. Çözünen alüminyum iyonu oyuk dışına difüze olur yüzeyde alkali bir ortamla karşılaşıp Şekil 2.6'deki gibi alüminyum hidroksit şeklinde çökelir ve zamanla oyuğun ağzını kapatarak iyon giriş çıkışını engeller. Bu da zamanla oyuklanmanın yavaşlaması hatta durmasına neden olabilir [8].



Şekil 2.6: Alüminyum oyuklanma korozyonun şematik gösterimi [8].

2) İkinci görüşte bir Reaksiyon 2.7'deki alüminyum klorür tuzu oluşumuyla oyuk ucu katı bir tabaka olarak çökelir. $AlCl_3$' ün doymuş çözeltisinin pH'ı -0.3 civarındadır. Burdan da oyuk içinde oluşan ortamın asidik ve oyuklanma açısında agrasif olacağını göstermektedir[14].

$$Al + 3Cl^- \longrightarrow AlCl_3 + 3e^- \quad (2.7)$$

3) Üçüncü olarak Hagyar ve Williams' a göre çözünmüş Al^{3+} önce hidrolize zorlanır ve spontone şeklinde reaksiyonlar gelişir.

$$Al^{3+} + H_2O \longrightarrow H^+ + Al(OH)^{2+} \quad (2.8)$$

$$Al(OH)^{2+} + Cl^- \longrightarrow Al(OH)Cl^+ \quad (2.9)$$

$$Al(OH)Cl^+ + H_2O \longrightarrow Al(OH)_2Cl + H^+ \quad (2.10)$$

Reaksiyon 2.10'da oluşan alüminyum oksiklorür tuzu $Al(OH)_2Cl$' nun doymuş çözeltisinin pH'ı 3 civarındadır. Oyuk çözeltisi içinde bu tuz zamanla çöker[12].

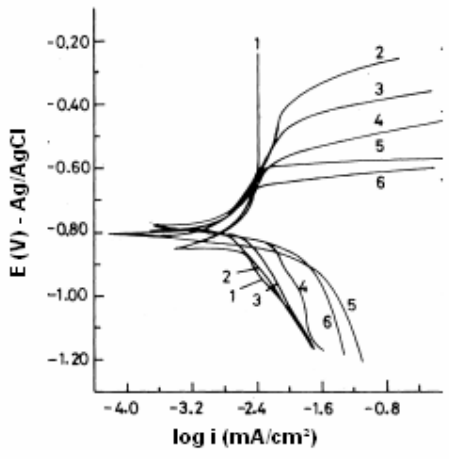
Birinci görüşteki gibi oyuklamayı duruduran veya yavaşlatan oyuk ağzında bir çökelme demirde de görülmektedir[4]. Bu tip oyuk ağzında çökelmeyi diğer görüşler paylaşmayıp oluşan tuzun oyuk dibinde çökeldiğine dair bulguları olduğunu iddia etmektedirler.

Bu görüşlerin yanında Park' ın çalışmasında AlFe civarında oluşan oyuktaki pH 'ın ise yüksek olduğunu ortaya oymuştur. Bunu da intermetaliğin matrise göre katot gibi davranarak matrisin çözünmesine ve üzerinde de oksijenin redüklenmesine neden oluşudur. Redüksiyon ürünü hidroksitler de alüminyum metalini çözer. Bu tip oluşan oyuklar ise alkalin oyuklar olarak bilinir ve anlaşılacağı gibi farklı bir mekanizma ile oluşur[12].

Oyuklanma korozyonu dış etkiler hayli etkilenmektedir. Bu dış etmenler:

a. Elektrolit kompozisyonu

Çözeltideki Cl^- iyonu arttıkça Ep oyuklanma potansiyeli düşer[4,13]. Şekil 2.7'de polarizasyon eğrisinin klor iyonunun çeşitli konsantrasyonlarda oyuklanma potansiyeli görülmektedir.



Şekil 2.7: Al-Si alaşımında pH' ın 7 olduğu ortamda sayılara karşılık gelen klor iyonu konsantrasyonları (M): 1 (0), 2 (0.01), 3 (0.025), 4 (0.1), 5 (0.25) ve 6 (0.50) [13].

Agrasif iyon dışında oyuklanma korozyonunu önleyici bazı iyonlar vardır. Bu iyonlar inhibitör denir. SO_4^- , ClO_3^- gibi örnekler verilebilir. İnhibitörler agrasif

olmaya anyonladır ve Ep' ye ve oyuklanma süresine arttırıcı, oyuk sayısında ise azaltıcı etkileri vardır[11].

b. Sıcaklığın etkisi

Sıcaklığın, oyuklanma potansiyeline etkisi alaşıma ve oksit filmin durumuna göre değişmektedir. Broli ve Holton'a göre 0 ile 40 ^{0}C arasında Ep' deki değişim ihmal edilebilir[14].

c. pH'ın etkisi

Aynen demir ve çelikte olduğu gibi klorür çözeltisinde alüminyumun Ep değeri pH'dan bağımsızdır. Diğer bir çalışmada da sabit Cl^- konsantrasyonunda pH'ın 5 ile 10 arasında değiştirilmesi oyuk başlama hızına etki etmemiştir[14].

Ancak Mazhar, Arab ve Noor' un Al-Si alaşımı üzerinde HCl çözeltisinde yaptığı çalışmaya göre alaşımın E_{kor} (Korozyon potansiyeli) ve Ep değerleri asid konsantrasyonu arttıkça daha negatif değerlere kaymıştır[13].

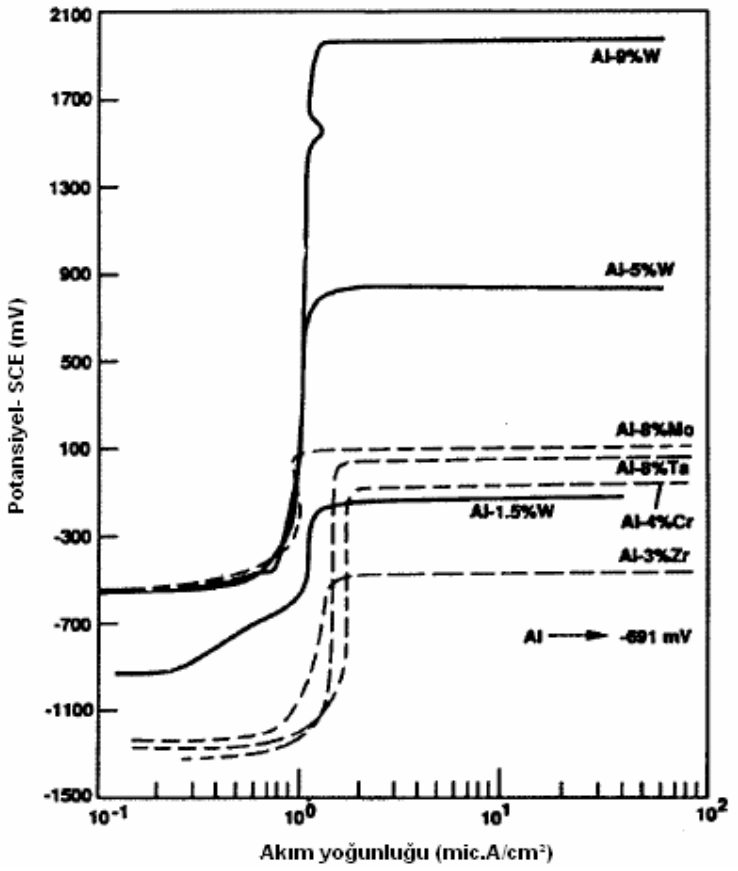
d. Malzeme yüzeyinin durumu

Alaşımda bulunan metalik veya non-metalik inklüzyonların tamamı, yüzeyde meydana gelmiş mekanik bir etki (çizik, çatlak gibi), veya alüminyumun kendiliğinden kaynaklanan mikro hatalar (atom boşluğu, dislokasyonlar vs.) oyuk çekirdeklenmsinin başlayabileceği muhtemel bölgelerdir. Fe, Si, Cu gibi empüritelerin homojen dağıldığı parçalar oyuklanma korozyonuna uğramazken, bu empüritelerin mikrosegregasyonu olan malzemeler oyuklanma korozyonuna maruz kalmışlardır. Bu durumda empürite miktarından ziyade homojen dağılımı daha büyük önem kazanmıştır[11,14]. Zira bu tür hatalar nedeniyle, kütlesel Al_2O_3'ün 8-9 eV olan yasak band aralığı alüminyum üzerindeki oksit filminde 3 eV'e düşmektedir[12].

2.4 Oyuklanma Korozyonuna Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alüminyum ticari alaşımlarının oyuklanmaya karşı direnci düşüktür. Ancak alaşım elementlerine göre oyuklanmaya daha dirençli de olabilirler daha hassas da olabilirler. Yarı kararlı alüminyum üretimi sırasında W, Ta, Mo ve Cr' un Ep' yi artırıcı etki yaptığı görülmüştür. Şekil 2.8'de havalandırılmamış 0.1M NaCl

çözeltisindeki bazı alüminyum alaşımlarının anodik polarizasyon eğrileri görülmektedir.



Şekil 2.8: Havalandırılmamış, 0.1M NaCl çözeltisindeki bazı alüminyum alaşımlarının anodik polarizasyon eğrileri [12].

Bazı alaşım elementlerinin bu katodik yöndeki etkileri, yapıdaki alaşım elementlerinin oksit filmine oksit halinde girerek, kompleks oksit bir film oluşturup pasif tabakayı takviye etmelerindendir. Örneğin temel alaşım elementi Mg olan 5XXX serisi alaşımlar çok iyi korozyon direncine sahiptirler. Ancak Cu korozyon direncini düşürür. Bu yüzden 7XXX serisi alaşımların korozyon direnci kötüdür[8].

Tablo 2.2'de bazı alaşım elemtlerinin NaCl çözeltisindeki oyuklanma potansiyeli üzerine etkileri verilmiştir.

Tablo 2.2: NaCl çözeltisinde alaşım elementlerinin oyuklanma potansiyeline etkileri[14].

Alaşım Elementi	Etki	Açıklama
Cu	+	$CuAl_2$ partükülleri yaşlanma (ısıl işlem) ile matris bakırını alır ve oyuk için uygun ortam oluşur Ep düşer
Mg	Etkisiz	0.95, 2.7 ve %4.5 eklemek
Mn	+	<% 0.8 oranda eklendiğinde peketkin değil Genel olarak +etki yapar
Si	-	<%0.83 eklemek pek etkili değil
Mo	+	Ep artar
Sn	-	Küçük miktarı eklemek Ep'yi düşürür
Zn	-	%1'den fazla eklenmesi Ep'yi hayli düşürür
Fe, Hg	-	Fe, Al içinde oluşturduğu intermetalikler katot etkisi alkali oyuklara neden olur
Cr	Etkisiz	Sadece %0.5'den küçük oranda eklendiğinde

2.5 Segregasyon

İntermetalikler ya bilerek mekanik özellikleri artırmak için elde edilir veya alaşımın içinde doğal empürite olarak vardır. Örneğin mukavemet kazandırma için yapılan suni yaşlandırma sonrası 6XXX serisi alaşımlarda Mg_2Si, 2017A alaşımında ise Al_2Cu intermetalik bileşiği meydana gelir[8,12].

Martis hem katı çözeltiyi hemde dağınık haldeki intermetalik bileşikleri içermektedir. Oda sıcaklığında alüminyumunda Fe, Ni veya Mg gibi alaşım elementlerinin çözünürlüğü çok azdır. Doymuş katı çözeltinin soğutulması ile bu tür malzemelerin segregasyonu görülmüştür[8].

İntermetalik bileşiklerin çözünme potansiyelleri alüminyumdan çok farklı olabilir:

- Daha az elektronegatif olabilirler. Bu durumda matrise göre katodik davranırlar ve matrisin anodik çözünmesine neden olurlar. Ve alkalin oyuklar oluştururlar.
- Daha elektronegatif olabilir. $MgZn_2$, Al_3Mg_2 veya Mg_2Si gibi intermetaliklerin ASTM G69'a göre yapılan deneyde çözünme potansiyelleri sırayla; -960 mV, -1150mV, -1190 mV' dur. Bunlar da matrise göre anodik davranıp kendileri çözünürler[8].

Bakırlı ve demirli intermetalikler korozyon direncini etkin bir şekilde düşürürler. Ancak demirli fazlarda Mn ve/veya Si varsa, bunlar Fe'nin hem anodik hem de katodik etkisini azaltırlar[12].

Bunların yanında Buchheit ve arkadaşlarının çalışmalarında 0.1 M NaCl çözeltisinde (pH'ı 4.2) Al 2024 alaşımının AlCuMg intermetaliğinin davranışını incelemişler. Buna göre Al ve Mg hemen matrise göre çözünmüşler ve geriye bakırca zengin bir patikül ve oyuk kalmıştır. Kalan Cu partikülü de matrise göre katodik davranıp oyuk çevresindeki matrisin çözünmesine neden olmuştur.

AlMgMn, AlMnCr ve AlMnSi intermetalikleri oyuklanma korozyonu açısından zarasız sayılırlar. Ancak matrise göre katodik değil belki ama anodik davranıp küçük oyuklara neden olabilirler. Burdan da anlaşılacağı gibi Mn varlığı oyuk potansiyelini pozitif yönde kaydırmaktadır[12].

Yücel'in yaptığı çalışmada Al 6016 ve Al 5854 alaşımlarının korozyon davranışı karşılaştırılmıştır. İlk alaşımdaki intermetalik partiküllerin sayısı ikinci alaşımdan daha fazla olduğunu görmüş. Al 6016 alaşımında AlFe(Mn)Si intermetaliğine, Al 5854' de ise Al_6(Fe, Mn) ve az sayıda Mg_2Si intermetaliği gözlemiştir[15].

3. ALÜMİNYUM KAYNAKLI YAPILAR VE KOROZYON

Kaynak işlemi otomotivden tutun da gemi sanayine ağır sanayinin her alanında kullanılan en gözde montaj yöntemidir. Endüstriyel proseslerle üretimi 1886 yılında başlansa da alüminyumun şuanki öneminin kavranması 2. Dünya savaşında çeliklerden çok daha hafif ama onlar kadar mukavim olan malzemenin uçak sanayinde ne kadar efektif olabileceği düşüncesiyle gerçekleşmiştir. Yine bu dönemde inert gaz korumalı TIG (Tungsten asal gaz) ve MIG (Metal asal gaz) yöntemlerinin geliştirilmesiyle agresif flakslar kullanmaksızın ark işlemiyle yüksek mukavemetli kaynaklar yapılabilmiştir[6]. Zamanla yaygınlığı artan alüminyumun alaşımlandırma yoluyla farklı özellikleri ortaya çıkmıştır ki bu da kaynak işlemini daha kompleks hala getirmiştir.

Alümiyumun kaynağında farklı yöntem vardır. Örnek olarak füzyon kaynak; iki parçanın ergitilerek birleştirilme yöntemi (TIG ve MIG), bir diğer örnek ise katı fazda birleştirme; yöntemde iki parçanın basınç ve/veya ısı ile birleştirilmesi esasıtır (sürtünen eleman ile birleştirme -FSW) verilebilir.

3.1 Alüminyum Alaşımlarının Alaşım Etkisi

Alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilirliği: Alaşım elementlerine, kaynak teknolojisine ve çentik hassasiyetine dayanır[16].

Alüminyum alaşımında üretilen kaynaklı bir parçada alaşımın türüne göre malzeme mekanik, kimyasal veya diğer özelliklerinin ne kadar değişeceği iyi anlaşılması gerekir. Zira malzeme ve makina tasarımında bu aşama hayati önem taşır.

Bu bağlamda alüminyumun esas alaşımlandırma elementleri, Cu, Si, Mn, Mg, Li ve Zn' dir. Bunun dışında Ni ,Cr ve Ti gibi elementlerin çok az katılmasıyla özel nitelikler kazandırılabilir. Bunların dışındaki diğer elementler ise alüminyumda empürite sınıfında sayılabilirler[6].

Tablo 3.1: Alaşım elementinin alüminyum kaynağı üzerindeki etkisi[6]

Alaşım Elementi	Alaşım Elementi Etkisi
Mg, Mn	Katı çözelti sertleşmesi sağlar.
Cu	Mukavemette önemli bir artış sağlar. Çökelme sertleşmesi yapar, korozyon direncini düşürüp, kaynaklanabilirliği azaltır.
Si	Mukavemeti ve sünekliği artırır.Mg ile birleşerek çökelme sertleşmesi yapar.
Zn	Mukavemet artırır, çökelme sertleşmesi yaparken gerilmeli korozyon çatlamasına neden olabilir.
Fe	Kalıntı elementtir.
Cr	Gerilmeli korozyon çatlaması direncini artırır.
Ni	Yüksek sıcaklık mukavemetini artırır.
Ti	Özellikle kaynak dolgu metalinde tane küçültücü işlevi görür.
Li	Elastik modülü mukavemeti artırır, çökelme sertleşmesi sağlar ve yoğunluğu düşürür.
Sc	Yaşlandırma sertleşmesi sağlar, kaynak metalinde tane küçültücüdür.

3.2 6XXX Serisi Al-Mg-Si Alaşımı Kaynaklanabilirliği

Bu seri alaşımın doğru dolgu malzemesi kullanıldığında TIG ve MIG kaynakları ile kaynak edilmesi kolaydır[17]. Bu tür alaşımın sertleştirme elemanı Mg_2Si' dur. Temel alaşımlandırma elementlerinin yanında az miktarda Mn, Cu, Zn, ve Cr katılabilir.Kaynak metali çatlağa hassastır. Bunu engellemek için dolgu metali olarak yüksek Si'li 4043 alaşımı veya sıcak çatlama riskini azaltan yüksek Mg'li 5356 alaşımı kullanılabilir[6].

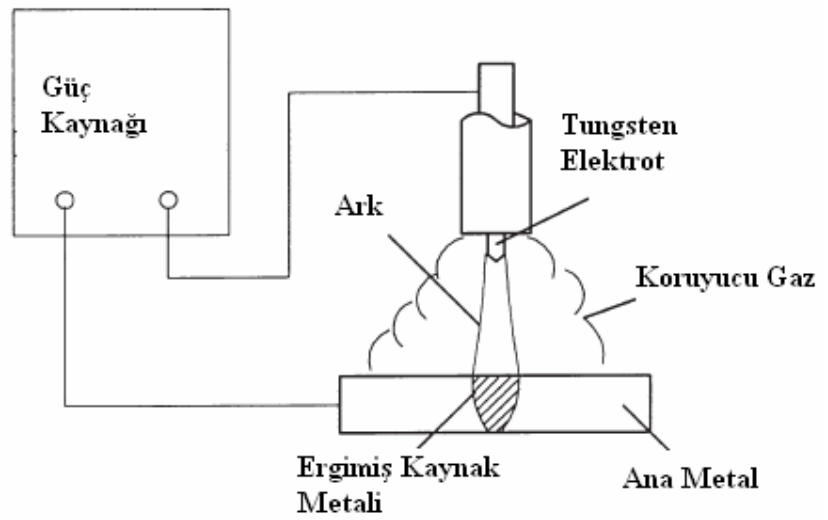
Isı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) kaynak sonrası yaşlanma gözlenebilir. Bu nedenle çökeltilerin büyüyüp mukavemeti etkin bir şekilde düşürmesi gözlenir. Bu mekanik özelliklerde yaklaşık %40 oranında özellik kaybına neden olabilir[17].

Bunu yanında doğal yaşlandırılmış 6XXX serisi alaşım suni yaşlandırılmış halinden daha az mukavemet kaybına uğrar. Ancak yüksek ısı uygulaması gerektirmeyen kaynak yöntemleri uygulanırsa mukavemet kaybı o kadar çok olmasa da T4 ısıl işlemindekine yakın bir değerde olacaktır[6].

3.3 Tungsten İnört Gaz Kaynağı (TIG)

TIG kaynak yönteminde: kısmi ergimelerde oksitlenmeyi engelleyen genelde argonun kullanıldığı perdeleyici gaz, akımı ileterek parça ile arasında ark oluşturan,

tükenmeyen ve ergime sıcaklığı yüksek tungsten elektrot kullanılarak metal parçaları birleştirme işlemidir[6,18]. Şekil 3.1'de TIG'in işleyişi görülmektedir.



Şekil 3.1: TIG kaynağının genel işleyişi [18].

Aslında bu yöntem kaynak yapılması zor olan titanyum ve alüminyum gibi hafif metaller için geliştirilmiştir.

TIG kaynağı geleneksel olarak elektrodun güç kaynağının eksi kutubuna bağlanarak ve doğru akım ile yapılmaktadır. Ancak bu yolla oksit tabakasının kaldırılması kolay değildir. Alternatif olarak elektrodun artı kutuba bağlandığında ise aşırı ısınma ve hatta elektrot ergimesi olabiliyor. Elle TIG kaynağında elektrodun artı kutuba bağlanması halinde dalgalı akım kullanılması ve elektrot soğutucu bir sistem bulunması gereklidir[6].

TIG yöntemi, gerisinde örtülü elektrotla ark kaynağı (SMAW) yönteminde olduğu gibi korozif flaks kalıntıları bırakmadığı için öncelikli kaynak yöntemlerinden biridir.

Genelde bu yöntem 1-6 mm arasındaki et kalınlıkları için uygundur[17].

Argon gazı dışında koruyucu olarak helyum gazı ve helyum-argon karışımı da kullanılır. Ancak kullanımı için helyumda doğru akım gerektirir. Daha kalın parçaların kaynaklanması mümkünken ark kararlılığını korumakta zorluk çekilir. Ayrıca ark başlatmak argon gazında daha basittir. Ve helyum argona göre çok pahalı olup ITAB kısmında hatalara neden olabilmektedir. Bu nedenle argonla birlikte nadiren kullanılır[6].

Bir yanda da gazların karışımı hem ark kararlılığını hem de nüfuziyet olumlu sonuçlar alınmasını sağlamıştır. Bunun içinde en iyisi %25 helyumlu karışımdır[6].

TIG kaynağı uçak ve nükleer reaktörlerde kullanılan bir işlem bu sebeple kalitesi çok önemlidir. Bu yöntemin kalitesi daha çok kaynak havuzu geometrisiyle karakterize edilebilir.Yine kalite belirlemede kaynak hızı, gaz akış hızı, akım ve temizleme oranı gibi parametreler de ayrıca önemlidir[18].

3.4 Alüminyum Kaynağı Elektrot Seçimi

Alüminyum her ne kadar dolgu metali kullanılmadan kaynaklanabilse de, dolgu metali kullanımı, kaynak sırasında çatlamayı önlediği ve korozyon direncini optimuma çıkardığı için tercih edilir[1].

Kaynak dolgu metali seçiminde amaç optimum seviyede mukavemete sahip, çatlak içermeyen kaliteli parça üretmektir. Bunun dışındaki parametreler de önemlidir. Örneğin korozyon direnci, renk uyumu, anodizasyona tepkisi. Belli başlı özellikler açısında bazı alaşımların uygun dolgu metali seçimleri Tablo 3.2' de verilmiştir.

Tablo 3.2: Dolgu metaline göre kaynağın özellikleri [6].

Ana Metal	En İyi Mukavemet	Süneklik	Korozyon Direnci
1100	4043	1050	1050
2219	2319	2319	2319
3103	4043	1050	1050
5052	5356	5356	5554
5083	5183	5356	5183
5086	5356	5356	5183
5454	5356	5554	5554
5456	5556	5356	5556
6061	5356	5356	4043
6063	5356	5356	4043
6082	4043	4043	4043
7005	5556	5356	5356
7039	5556	5356	5356

Tablo 3.2' e göre Al 6082 alaşımı için tüm özellikler açısından en iyi dolgu metali Al 4043 alaşımı olduğu görünmektedir. Genel anlamda 6XXX serisi alüminyum alaşımlarına bakıldığında mukavemet ve süneklik açısından en iyi özelliği 5XXX serisi dolgu metali karşılarken, deniz suyu içindeki korozyon direnci ve kolay kaynaklanabilirlik açsından en iyi özellikler yüksek silisyum içerikli Al 4043 alaşımı sağlamaktadır[1]. Sonuç olarak 6XXX serisinde optimum kaynak kalitesi için Al 4043 alaşımı tercih edilmektedir.

Dolgu metalinin seçiminde korozyon açısından alaşımların galvanik eşleşmelerine bakılır. Ana metal veya dolgu metalinden hangisi daha elektronegatifse galvanik etki nedeniyle korozif saldırıya o uğrar ve daha soy olanı korur. Bu göz önünde bulundurularak dolgu metali seçilir.

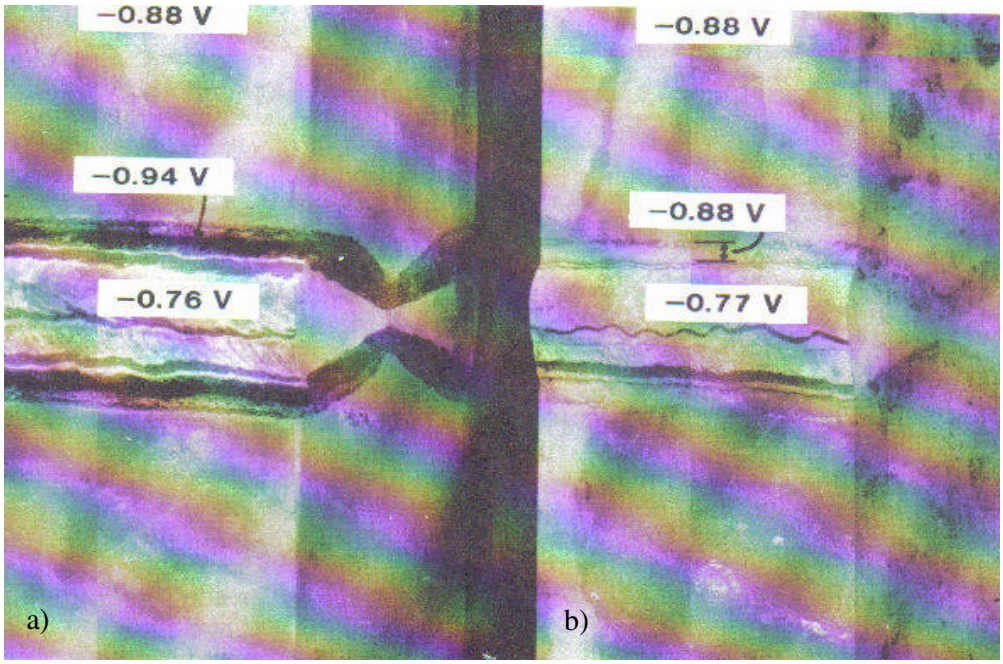
3.5 Kaynak-Korozyon İlişkisi

Kaynaklı yapılarda korozyon direnci ana metalin alaşımına, dolgu metaline ve uyuglanan yönteme göre değişmektedir. Uygulanan kaynak yöntemi nedeniyle malzeme ne kadar az ısıya maruz kalıyor ve bu doğrultuda ne kadar az mikroyapı değişimi görülüyorsa kaynaklı parçada korozyon direnci o kadar az düşer. Aslında ısıl işlem uygulanamayan alaşımlarda maruz kaldığı ısı nedeniyle korozyon davranışında etkin bir değişim görülmez. Alüminyum 6061 ve 60063 alaşımları ısıl işlem uygulanabilir olmalarına rağmen kaynaklı durumda yine de iyi korozyon davranışı gösterirler. Öte yandan Al-Cu alaşımlarında ITAB bölgesi diğer bölgelere göre katodik davranış gösterir[1].

Diğer taraftan uygun ortam ve uygun dolgu malzemesiyle yapılan kaynaklarda ITAB bölgesi korozyon direncinde düşüş yaşanmaz ve bu bölge korozyon için tercihli bir bölge değildir. Bu gemi yapımında ve deniz kenarındaki ekipmalarda görülebilmektedir[8].

Kaynaklı parçaların korozyon davranışını galvanik eşleşme etkilemektedir. Kaynaklı parçada daha negatif potansiyelli alaşım parçanın diğer bölgelerini korur. Alüminyum 6061-T6 alaşımında dolgu metali olarak Al 5356 alaşımının kullanılması durumunda dolgu metali korozyon saldırısına uğrayacaktır. Korozyona uğrayan alanın korunan alandan daha küçük olması durumunda korozyon saldırısı daha etkin olmaktadır[1].

Şekil 3.2' de Al 7005 ana metali Al 5356 dolgu metali ile kaynaklanıyor. Hemen kaynak sonrasında bir yıl süreyle deniz suyuna daldırılan parçanın ITAB bölgesinde ciddi oyuklanma korozyonu görülüyor. Zaten şekil üzerinde Diğer yanda kaynak sonrası yaşlandırılan parçadaki değişim her iki parça üzerinde de ölçülmüş korozyon potansiyeli değerlerinden anlaşılmaktadır.



Şekil 3.2: Al 7005 alaşımı- 5356 dolgu metali, bir yıl deniz suyuna maruz bırakılmış a) Kaynak sonrası maruz bırakılmış b) Kaynak ve yaşlandırma sonrası maruz bırakılmış. Elektrokimyasal deneyler ASTM G69'a göre yapılmıştır [1].

Kaynak yöntemi de kaynaklı parçanın korozyon davranışı üzerinde çok etkilidir. Buna göre Zucchi ve arkadaşlarının çalışmalarında FSW ve MIG (Al 5183 dolgulu) kaynaklı parçaların korozyon davranışını karşılaştırmışlardır.

Bu çalışmada oyuklanma deneyleri %3.5'lik NaCl, %0.3' lük H_2O_2 çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Buna göre FSW ve MIG kaynakları karşılaştırmasında FSW daha iyi korozyon davranışı sunuyor. Ayrıca MIG kaynaklı numuneler gerilmeli korozyon çatlamasına hassasiyet gösterirken FSW göstermemektedir.

FSW kaynaklı parçada kaynak, ana metale göre katodik olarak davranmıştır.

FSW yöntemi ark ergitme yöntemlerindeki gibi büyük mikroyapı ve mekanik özellik değişimi görünmez değişikliklerine neden olmaz. Dolgu metali ihtiyacı yoktur. Böylece kaynak da ana metalle aynı kimyasal kompozisyona sahiptir. Bu iki özellik de FSW kaynağı ile yapılan bağlantı elemanlarının korozyon hassasiyetlerini azaltmaktadır.

Bu tip çalışmaların ilklerinden, Frankel ve Xia' nın çalışmalarında FSW ve TIG yöntemleriyle kaynaklanmış 5454 alüminyum alaşımlarının oyuklanma ve gerilmeli korozyon çatlağı hassasiyetleri karşılaştırılmıştır. Buna göre FSW ile üretilen kaynaklar TIG(GTAW) ile üretilen parçalardan ve ana metalden daha yüksek oyuklanma korozyonu direnci göstermiştir [19].

4. DC VE ÇİFT MERDANELİ DÖKÜM YÖNTEMLERİ YAPISAL FARKLARI

Alüminyum sürekli levha üretimi gün geçtikçe önem kazanmakta olan bir yöntemdir. Bir sürekli döküm teknolojisi olan levha döküm prosesleri şimdilerde dünya haddelenmiş yarı mamul bobin üretiminde dikkate değer bir pay elde etmiştir(yaklaşık %30). Sürekli levha üretimi ile proses adımları azaltılmıştır. Üretimi adımlarının azaltılmasının birkaç avantajı vardır: geleneksel yönteme nazaran proses maliyetleri 2/3'ü, yatırım maliyetleri 3/4'ü kadarken, daha az üretim alanı ve işçilik gerektirmesidir. Sıcak haddeleme öncesi ön ısıtmaya gerek kalmaması nedeniyle enerji tasarrufu sağlanır. Verim %15-20 daha yüsek ve hammadde tüketimi %1.5-2 daha azdır[21]. Alümiyum levha üretiminde günümüzde iki ana yöntem vardır. Bunlar aşağıdaki gibidir.

- Geleneksel yöntem; direk soğutmalı (DC) ingot döküm
    - Dikey DC döküm; yarı sürekli
    - Yatay DC döküm; sürekli döküm
- Sürekli levha döküm
    - Hazelett yöntemi ile sürekli ince slab döküm
    - Çift (İkiz) merdaneli sürekli levha döküm (TRC)[20]

Geleneksel yöntem için üretim adımları;

Ergitme→ Dik veya yatay DC→ Sıcak haddeleme→ bobin sarma→ Soğuk haddeleme (birkaç ısıl işlem uygulanabilir)→ Yarı mamül-mamül

şeklindeyken sürekli levha döküm teknolojisinde aşağıdaki sırayı izler.

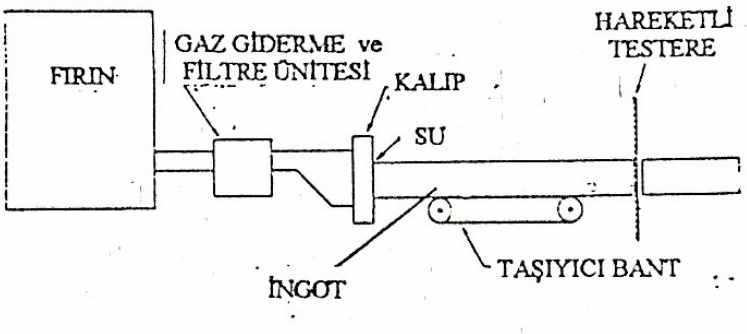
Ergitme→Levha Döküm → Bobin Sarma →Soğuk Hadde (birkaç ara tav uygulanabilir) → Yarı mamül-mamül [21]

4.1 Direk Soğutmalı (DC) İngot Döküm

DC döküm geleneksel alüminyum levha üretiminin başlangıcını oluşturur. Alüminyum ingot şeklinde sabit kalıplara dökülür. Döküm yönüne göre iki çeşittir. Dikey yerleştirilmiş sabit kalıba döküm yönteminde, döküm sürekliliği döküm çukuru ile sınırlı olduğundan, yöntem yarı süreklidir. Otomasyonu zor ve daha çok çalışan gerektirmesine rağmen farklı alaşımlar dökülmek istendiğinde yatay ingot dökümden daha avantajlıdır. DC dökümün avantajı tüm ingot boyunca tane boyutu, bileşim, mekanik özellikler ve döküm boşluğu bakımından homojen bir yapı ortaya çıkarmasıdır [20].

Dikey DC yönteminde limit boya ulaşıldığında katılaşmış ingotun döküm çukurundan çıkarılması için işlem durdurulur. Bu yöntemde bakırdan veya alüminyumdan yapılan kalıba su püskürtme, kalıptan çıkışta su püskürtme ve su havuzu soğutma sistemleriyle, ingotun tüm kesitinin katılaşma hızıyla aşağıya çekme hızı eşit olması sağlanmıştır.

Yatay DC yönteminde otomasyon sistemi kurulmasının kolay oluşu döküm parametrelerinin daha kontrol edilebilir olmasını sağlamaktadır. Bu yöntemde sistemi durdurmaya gerek olmaması zamanın daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Şekil 4.1'de yatay DC dökümün şematik görünümü vardır.



Şekil 4.1: DC yatay dökümün şematik şekli [20].

Burda önemli olan taşıyıcı bandın hızı yani döküm hızı ve kalıbın iyi yağlanmasıdır.

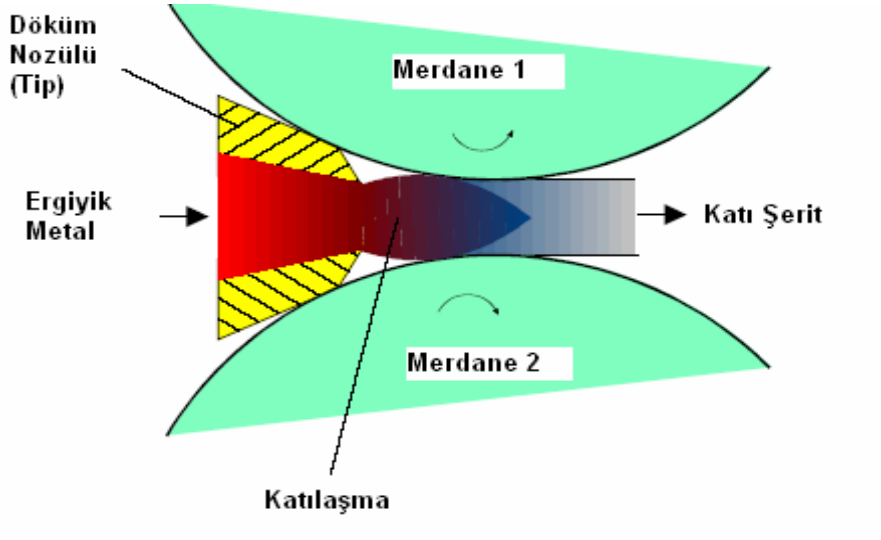
Kalıba girecek sıvı metalin debisini dengeli yayan bir ayırma levhası bulunur. Gaz giderme ve filtre ünitesinden evvel iki adet tutma fırını yardımıyla sürekli döküm rahatça gerçekleştirilir.

4.2 Çift Merdaneli Döküm (TRC) Yöntemi

Sürekli levha döküm folyo hammaddesi, boyanmaya hazır levha ve bazı durumlarda derin çekilebilen levha üretiminde kendini kanıtlamıştır. Çok çeşitli levha döküm teknolojileri hadde alaşımlarının dökümüne uygundur ve kalınlığı 3mm' den 20 mm' ye ve genişliği 2150mm' ye kadar levha üretimine olanak tanır[21].

Bu yöntem ilk olarak Henry Bessemer tarafından 1856 yılında tasarlanmış ancak ticari üretime geçişi Hunter Engineering tarafından 1950 yılını gerçekleştirilmiştir[20].

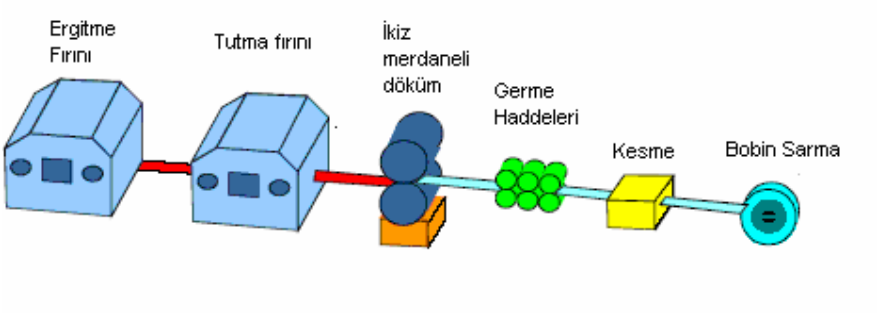
Şekil 4.2'de TRC dökümün genel bir şekli vardır.



Şekil 4.2: Çift merdaneli döküm yönteminin sematik gösterimi [21].

Ergitilen metal gaz giderme ve filtrelemeden sonra tandişe gelir ve levha genişliğini belirleyen nozülden merdanelere girer ve istenirse sarılmaya istenirse de soğuk haddeye geçilir. Döküm kalınlığı merdaneleri hareket ettiren bir hidrolik sistem yardımıyla belirlenir[21].

Merdanelerin soğutması içerisinde suyun geçebileceği kanallar sayesindedir. Levhanın katılaşması merdaneler arasındaki en dar bölgeden önce gerçekleşir. Ve alüminyumun merdaneler üzerine yapışmasını önlemek için merdaneler üzerine su bazlı grafit veya da boron nitrat solüsyonu verilir[20]. Genel olarak TRC yöntemi Şekil 4.3' şematize edilmiştir.



Şekil 4.3: Genel olarak çift merdaneli döküm sisteminin sematik gösterimi [21].

4.3 Çift Merdaneli Döküm İle Direk Soğutmalı

TRC'de katılaşma bölgesi 10 ile 20 mm uzunluğundadır ve bunu takiben aynı alanda sıcak haddelenmiş alan bulunur. Levha genellikle 400°C ile 550 °C arasında ve doğrudan yüksek sıcaklıkta bobin olarak sarılabilir. DC döküm sonrası ingot kalınlığı 300-600 mm arasındayken, TRC'de 3-10 mm arasındadır. Ve direk soğuk haddeye verilebilir. Halbuki ingot önce tekrar 500-550 °C'ye ısıtılıp sıcak hadde yapılmalıdır. TRC yönteminde üretim kapasitesi DC yöntemine göre düşüktür[21,22].

TRC yönteminin özel döküm yapısı alüminyumun bir yandan 300 °C/sn hızla soğuyup öte yandan DC döküm yöntemine göre hücresel deformasyon yok denecek kadar azdır.

Öte yandan TRC ürünlerin derin çekilebilirliği sıcak hadde ürününden daha azdır ve yeniden kristalleşme sıcaklığı daha yüksektir.

Ancak soğuk hadde süresince DC ürününde TRC'ye oranla daha fazla deformasyon sertleşmesi meydana gelir.

TRC numunede çözünemeyen partiküller daha küçük ve dairesel şekilliyken DC üründe daha az sayıda, daha büyük ve hadde yönünde yönlemiştir[22].

TRC levhalarda merkezdeki segregasyon klasik bir oluşumdur. Artan merdane hızı ve alaşım konsantrasyonu ile artar[20].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1 Amaç

Alüminyum alaşımları günümüzde git gide artan bir ilgiyle çok daha fazla sektörde uygulama alanı bulmaktadır. Bunun temelinde daha önce de bahsedilen, alüminyumun fiziksel ve kimyasal yapısı yatmaktadır. Ancak bilindiği gibi alüminyumunda diğer tüm metallerde olduğu en önemli zaaflarından biri korozyondur. Özellikle oyuklanma korozyonu alüminyum gibi pasif oksit tabakası oluşturarak kendini dış etkenlerden koruyan metaller için çok büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Oyuklanma korozyonu, uygun bir ortamda tamamen korunaklı olduğunu düşünülen malzemelerin oksit tabakasında oyuklar açarak ilerler ve ana metalin zamanla bu açılan oyuklardan çözünmesiyle malzemenin büyük hasarlara uğramasına sebebiyet verir. Bunun yanında malzemeye kaynak işlemi gibi oyuklanma korozyon davranışını tamamen değiştirebilen bir işlem uygulandığında hasarın nerden ve nasıl meydana geleceğini tahmin etmek çok daha zordur. Ayrıca malzemenin üretim yöntemi de malzeme alaşımı ve malzeme üzerine yapılan işlemler kadar malzemenin korozyon davranışını etkilemektedir Bu nedenle hangi alüminyum malzemenin ve alaşımının hangi ortamda bu tür korozyona karşı davranışını tahmin edebilmek için bazı testler kullanılmaktadır. Bu tezde şimdilerde otomotiv sanayinde ağarlığı gittikçe artan kaynaklı ve kaynaksız haldeki Al 6016 ve 6082 alaşımlarının;

- Alaşıma
- Üretim yöntemlerine (DC döküm, çift merdaneli sürekli döküm)
- Uygulanan işleme (TIG kaynağı) göre,

hem dinamik çevrimli polarizasyon ve tuz püskürtme testleri yardımıyla, hem herbirinin oyuklanma korozyonu davranışları belirlemek, hem de birbirleriyle karşılaştırılarak hangi malzemenin daha yüksek oyuklanma korozyonu direnci göstereceğini saptamak amaçlanmıştır. Bu testlerin yanında malzemelerin korozyon

davranışlarını tam anlamıyla kavramak için taramalı elektron mikroskobu ve EDS cihazları kullanarak karakterizasyon yapılmıştır.

5.2 Çevrimli Anodik Polarizasyon Testi

5.2.1 Deney malzemeleri

Deney numunelerinden; ikiz merdaneli döküm (TRC) numuneleri Assan Alüminyum A.Ş. ve direk soğutmalı döküm (DC cast) numuneleri ise AMAC (The August Metal and Alloy Company) firmaları tarafından üretilmiş ve bütün numuneler Assan Alüminyum A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Numunelerin kimyasal kompozisyonu Tablo 5.1' de verilmiştir.

Tablo 5.1: Deneyde kullanılan alüminyum numunelere ait bileşim tablosu

Numune Kodu	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
6016 DC	1.124	0.162	0.078	0.069	0.374	0.003	0.019	98.12
6016TRC	1.126	0.22	0.080	0.062	0.390	0.002	0.006	98.07
6082 DC	0.91	0.432	0.077	0.482	0.836	0.025	0.049	97.12
6082TRC	0.908	0.382	0.005	0.466	0.769	0.002	0.006	97.42

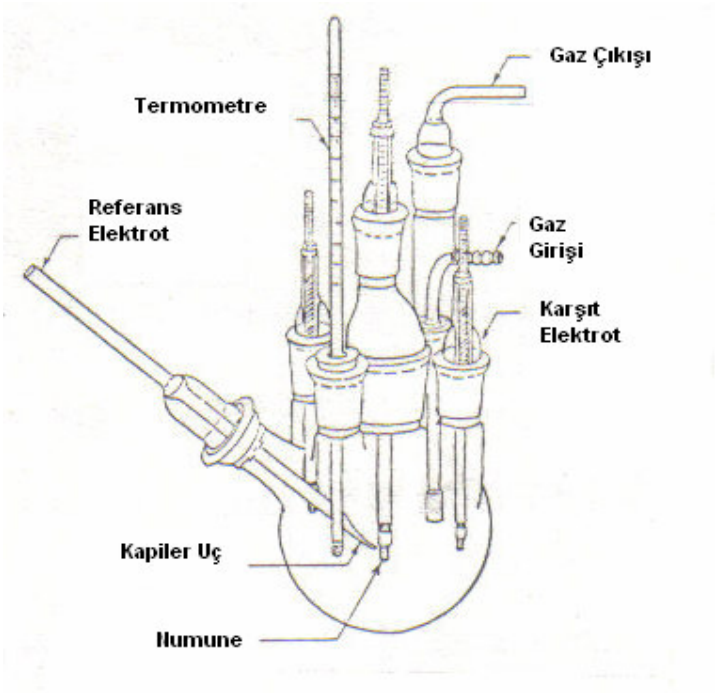
Numunelerin tümü THY Kaynak Atölyesi' nde, 80- 100 A akım, argon koruyucu gaz, dolgu olarak Al 4043 alaşımı ve elle TIG kaynak yöntemi kullanılırak kaynaklanmıştır.

Parlatılmış numunelerin temizlenmesinde aseton ve alkol kullanılmıştır. Deneyde elektrolit olarak ASTM G5 standartlarına göre saf su ile hazırlanmış ağarlıkça % 3.5' luk NaCl çözeltisi kullanılmıştır. Çözeltideki oksijeni çıkarmak için yüksek saflıkta N_2 gazı kullanılmıştır.

5.2.2 Deneyde kullanılan aletler

Polarizasyon deneyinde Şekil 5.1' deki 5 girişli korozyon hücresi kullanılmıştır. Karşıt elektrot olarak grafit kullanılırken, referans elektrot olarak da kapilar içine yerleştirilen doymuş kalomel elektrot kullanılmıştır. Azot gazı tüpü ve gazın belli bir ayarda çözeltiden geçmesini sağlayan flowmetre deney düzeneğine eklenmiştir. Ölçüm ve dataların toplanmasını VoltaLab 40 potansiostat yapmıştır ve bir bilgisayar yardımıyla datalar elde edilmiştir. Numunelerin taramalı elektron mikroskobu(SEM) incelemesi öncesi numuneler temizlenmesi ve temiz kalması için ultrasonik

temizleme cihazından ve numune kabında faydalanılmıştır. Daha sonra numunelerin, Joel 5410 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterizasyonu için önce karbon kaplama cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.1: Korozyon hücresi

5.2.3 Deneyin yapılışı

Oyuklanma korozyonu davranışını belirlemek için yapılan çevrimli dinamik polarizasyon testi ASTM G5 standartına göre şu şekilde yapılmıştır: Korozyon hücresine kapilar uç, numune ve karşıt elektrot çözelti içinde kalacak kadar çözelti eklenip numune yerleştirilmeden 1 saat boyunca N_2 gazı geçirilmiştir. Parlatılmış numuneler önce aseton daha sonra alkolle temizlenip 15 dakikalık açık devre potansiyeli (ADP) ölçümü için hücreye yerleştirmiş, ardından ADP ölçümü ve polarizasyon testi süresince azot gazı çözeltiden geçirilmeye devam edilmiştir. Daha sonra tüm numuneler için ADP değeri üzerine (-200 mV) eklenerek çevrimli polarizasyon testi başlangıç potansiyeli, 0.16 mV/sn tarama hızı ve dönüş akım yoğunluğu olarak da 1mA/cm² değeri girilmiştir. Ve oyuklanma deneyinde grafik histerisis çizip geri döner ve başlangıç potansiyelinde sona erer. Numune çözeltiden çıkarıldıktan sonra alkolle temizlenip numune kabına alınmıştır..

Daha sonra SEM öncesi numune yüzeyi görüntü kalitesi için alkol içinde ultrasonik temizlemeye tabi tutulduktan sonra içinde bulunduğu reçine SEM'e zarar vermemesi

için yüzey iletken olan karbonla kaplanıp, oyuk morfolojisi ve dağılımını belirlemek için SEM'de görüntü alınmıştır. Gerek görülen yerlerde Noran 2100 model EDS cihazı ile elementel analiz yapılmıştır..

5.3 Tuz Sprey Testi

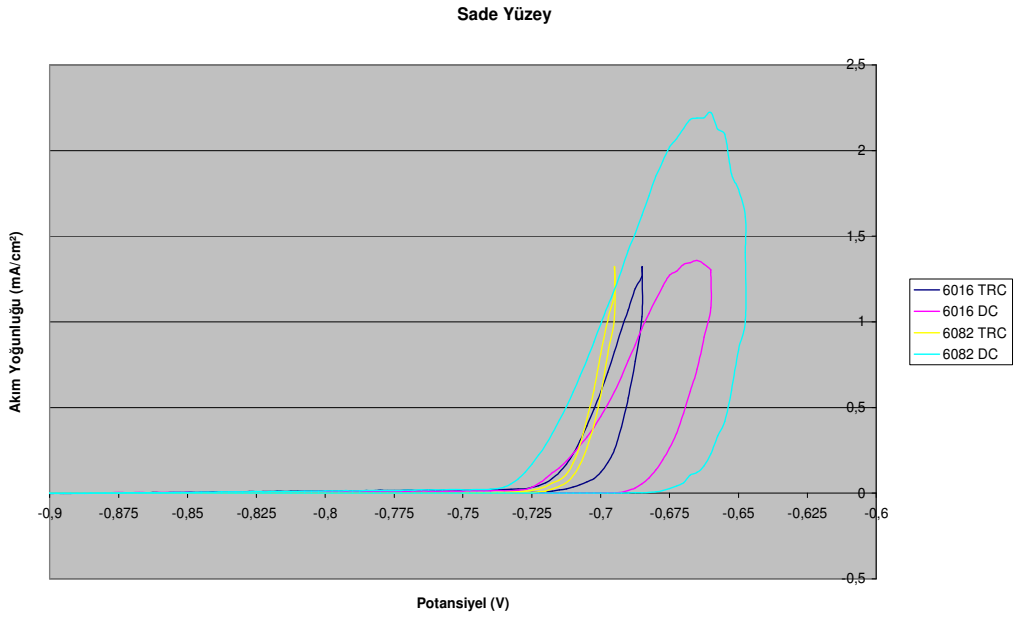
Tuz sprey testi, Genaral Motors firmasının uluslararası mühendislik standartlarına uygun olarak yapıldı: 2 mm kalınlığında kaynaklı levha şeklindeki numuneler önce aseton içinde 10 dak. ultrasonik olarak temizlendi. Numuneler daha sonra belirli açılarla test cihazının içindeki numuneliklere yerleştirilip, cihaz, 48 saat boyunca kabin içi sıcaklık 35 ^{0}C olacak şekilde, püskürtme ise her saat 15 dak. dozlama (tuz püskürtme), 45 dak. ortamda tutma şeklinde ayarlandı. Deney sonunda numuneler alkolle temizlenip korundu.

6. DENEY SONUÇLARI

6.1 Çevrimli Anodik Polarizasyon Testi Sonuçları

6.1.1 Sade yüzeylere ait anodik polarizasyon testi

Sade yüzeylere ait polarizasyon eğrileri Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1: Sade yüzeylere ait anodik polarizasyon eğrileri

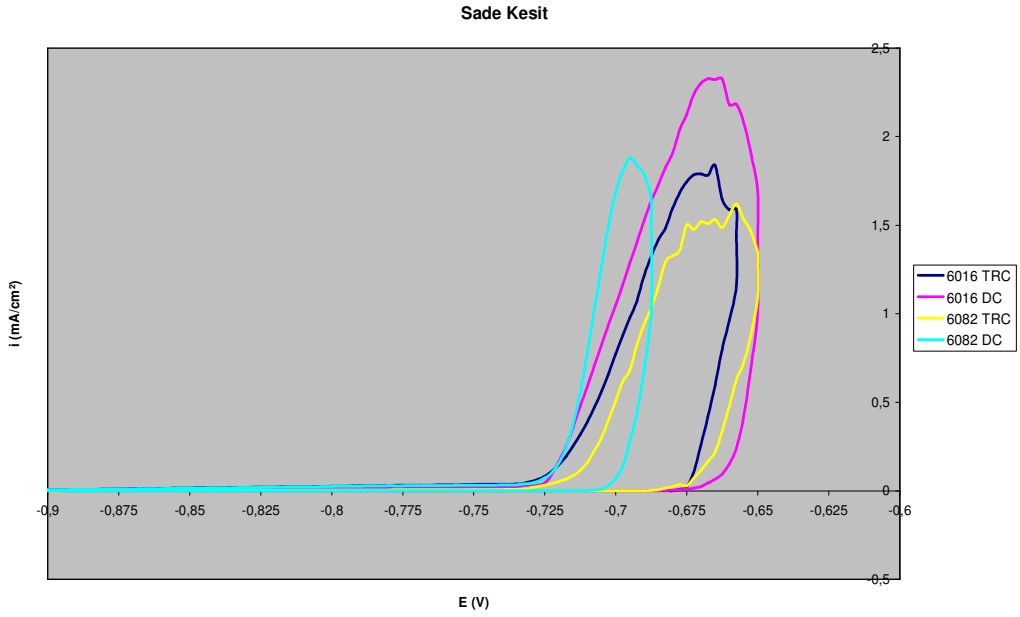
Şekil 6.1'de görüldüğü gibi DC numuneler daha elektropozitif bir davranış göstermişlerdir. Tablo 6.1'de numunelerin oyuklanma potansiyeleri (Ep) ve repasivasyon (Epp) değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1: Sade yüzeye ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri

Sade yüzey	Ep (mV)	Epp (mV)	Ep-Epp(mV)
6082 DC	(-) 665	(-) 735	70
6016 DC	(-) 685	(-) 725	40
6016 TRC	(-) 700	(-) 720	20 (Dar)
6082 TRC	(-) 715	(-) 720	5 (Dar)

6.1.2 Sade kesitlere ait anodik polarizasyon testi

Sade yüzeylere ait polarizasyon eğrileri Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2: Sade kesitlere ait anodik polarizasyon eğrileri

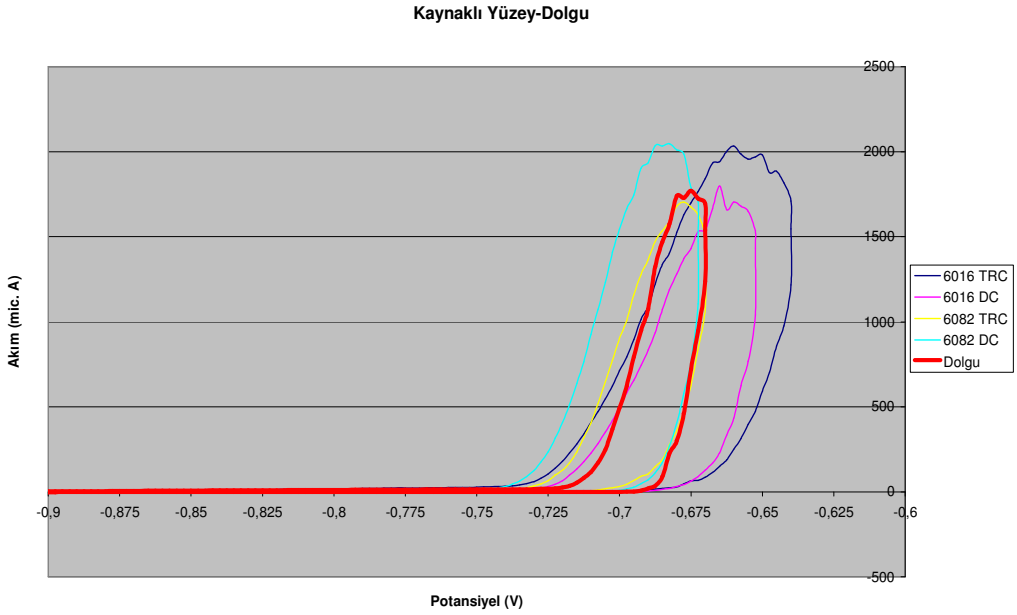
Şekil 6.2'de TRC numuneler yaklaşık aynı Ep değerleri göstermekteler. Yine 6016 alaşımı daha iyi bir oyuklanma davranışı göstermektedir. Tablo 6.2'de sade kesitlere ait Ep ve Epp değerleri verilmiştir.

Tablo 6.2: Sade kesitlere ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri

Kaynaklı Kes.	Ep (mV)	Epp (mV)	Ep-Epp(mV)
6016 DC	(-) 660	(-) 725	65
6082 TRC	(-) 670	(-) 725	55
6016 TRC	(-) 675	(-) 715	40
6082 DC	(-) 700	(-) 720	20(Dar)

6.1.3 Kaynaklı yüzeylere ait anodik polarizasyon testi

Kaynaklı yüzeylere ait polarizasyon eğrilerine ek olarak dolgu metalinin polarizasyon eğrileri Şekil 6.3'de verilmiştir. Bu sayede elektrokimyasal olarak dolgu metalinin mi yoksa ana metalin mi korunacağı görünmektedir.



Şekil 6.3: Kaynaklı yüzeylere ve dolgu metaline ait anodik polarizasyon eğrileri

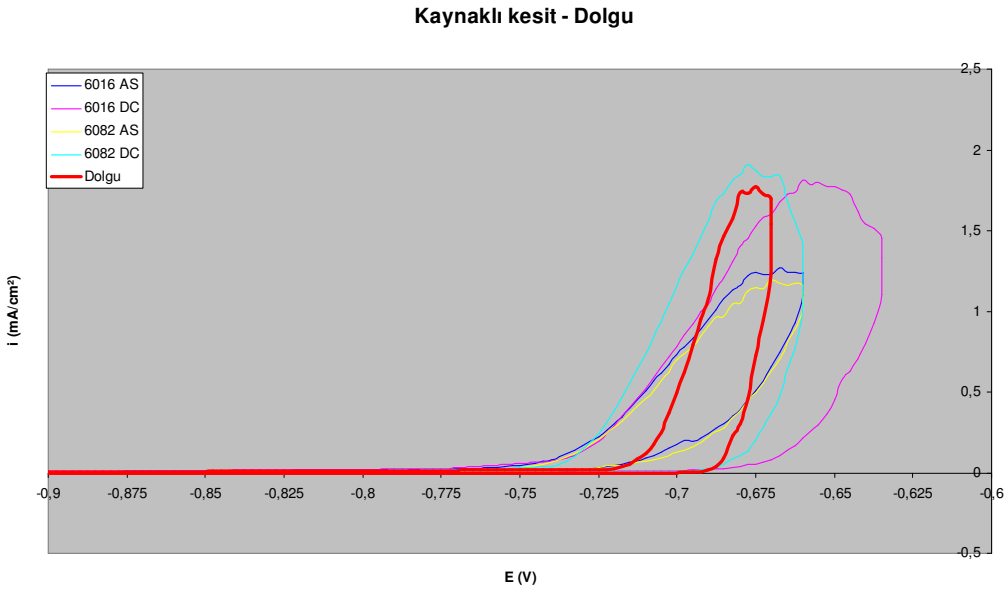
Kaynaklı yüzeylerde Al 6016 alaşımların dolgu metalinden daha pozitif Ep' e sahip oldukları görülmektedir. Al 6082 alaşımları ise dolgu metaline göre daha elektronegatif davranmıştır. Tablo 6.3'de kaynaklı yüzeylere ait Ep ve Epp değerleri verilmiştir.

Tablo 6.3: Kaynaklı yüzeylere ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri

Kaynaklı	Ep (mV)	Epp (mV)	Ep-Epp(mV)
6016 TRC	(-) 665	(-) 725	60
6016 DC	(-) 670	(-) 715	45
6082 TRC	(-) 685	(-) 720	35
6082 DC	(-) 685	(-) 730	45

6.1.4 Kaynaklı kesitlere ait anodik polarizasyon testi

Kaynaklanmış numunelerin kesitlerinde, yüzeylerine göre oyuklanma potansiyelinde fark olup olmadığını görmek için kesitler de korozyon deneyine tabi tutulmuşlardır. Şekil 6.4' de dolgu metalinin de karşılaştırma için eklendiği polarizasyon eğrileri bulunmaktadır.



Şekil 6.4: Kaynaklı kesitlere ve dolgu metaline ait anodik polarizasyon eğrileri

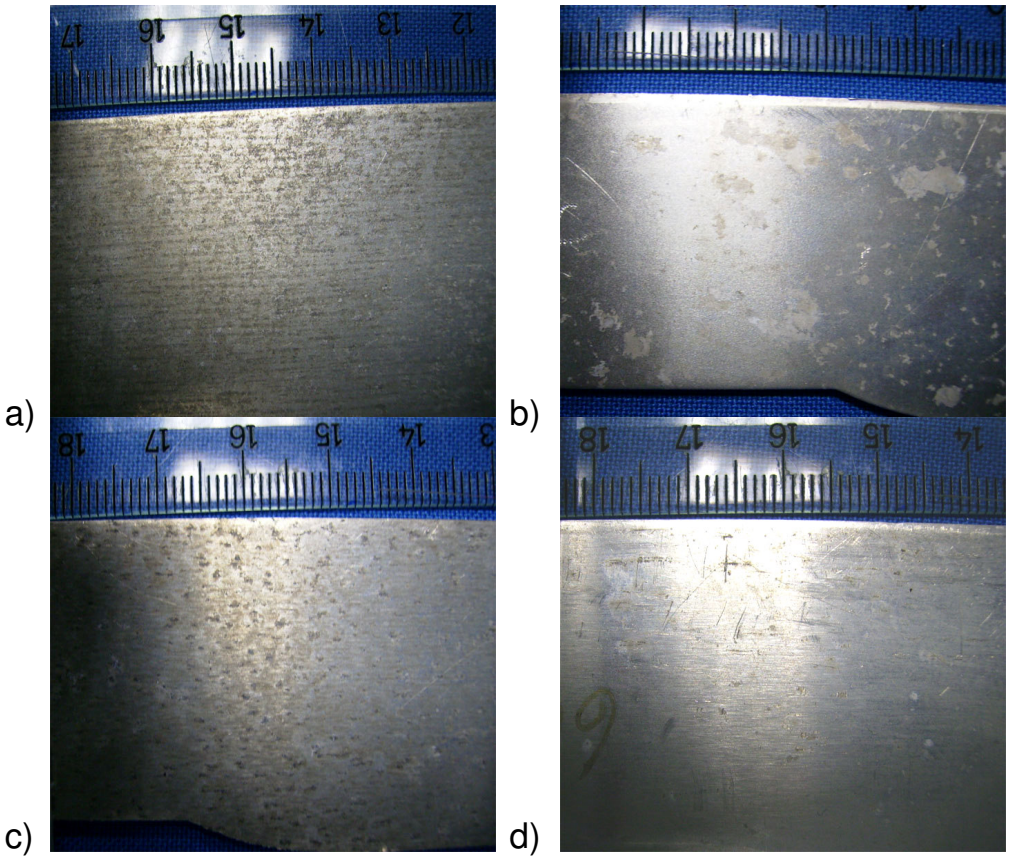
Kaynaklı kesitlere ait Ep ve Epp değerleri Tablo 6.4' de verilmiştir.

Tablo 6.4: Kaynaklı kesitlere ait oyuklanma ve repasivasyon potansiyelleri

Kaynaklı Kes.	Ep (mV)	Epp (mV)	Ep-Epp(mV)
6016 DC	(-) 665	(-) 730	65
6082 DC	(-) 675	(-) 730	55
6016 TRC	(-) 700	(-) 735	35
6082 TRC	(-) 700	(-) 735	35

6.2 Tuz Sprey Testi Sonuçları

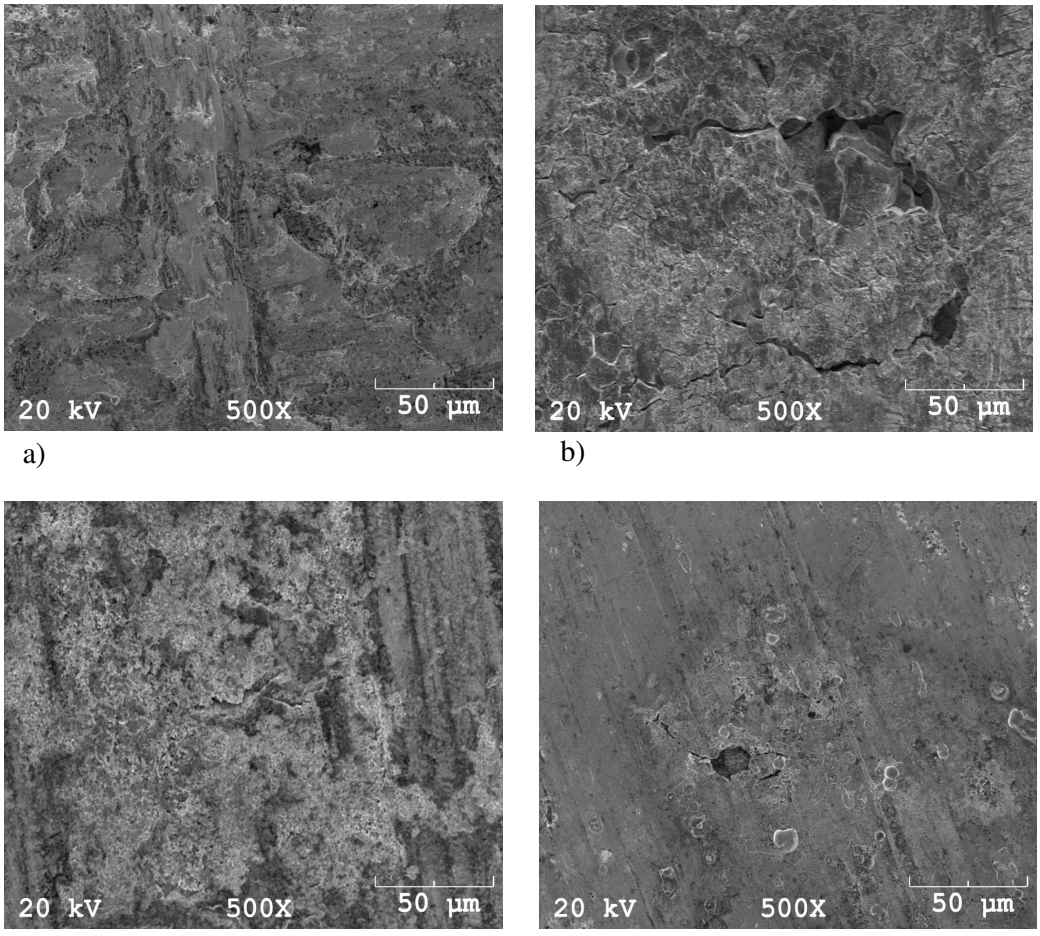
GM uluslararası mühendislik standarlarına göre tuz sprey testine tabi tutulan numunelerde Şekil 6.5'de verilmiştir. Tuz püskürtme deneyi yardımıyla otomotiv parçalarının korozyon direncinin belirlenmesi için test gereği kaynaklanmış 4 test numunesi incelenmiştir. Numunelerin kaynak bölgesi deney öncesi taşlanmamıştır. Şekil 6.5'de tuz sprey testi sonrası numunelerin görüntüleri bulunmaktadır. Görüldüğü gibi TRC numuneler DC numunelere oranla daha yoğun oyuklanma göstermiştir. Özellikle 6082 DC numunesi az sayıda oyuk ve parlak bir yüzey göstermektedir. Zaten tuz testi öncesi de TRC numunelerinin yüzeylerinin daha kirli bir görüntüye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Assan AŞ'nin mikroyapı çalışmalarında TRC numunelerin yüzeyinde büyük segregasyon varlığı tespit edilmiştir. TRC numunelerde fazlaca oluşan bu oyukların yüzeyde biriken segregasyon nedeniyle olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.5: Tuz testi sonrası numuneler a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC

Alaşım açısından bakıldığında özellikle DC numunelerde daha belirgin olarak Al 6082 alaşımı çok az sayıda oyuk göstermiş burdan da oyuklanma korozyonuna direncinin daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. TRC numunelerde alaşım farkı az da olsa Al 6082 alaşımı lehine görünmektedir. TRC numunelerde alaşım etisinden çok üretim yönteminin oyuklanma korozyonu direncine etkisinin daha yüksek olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Şekil 6.6' da daha açık görüldüğü gibi DC numuneler oyuk morfolojisi açısından daha derin, büyük ve az sayıda oyuk göstermektedir. Bu SEM görüntüleri Şekil 6.7'deki polarizasyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri ve oyuk morfolojisi ile birbirlerini doğruladıkları görülmektedir.



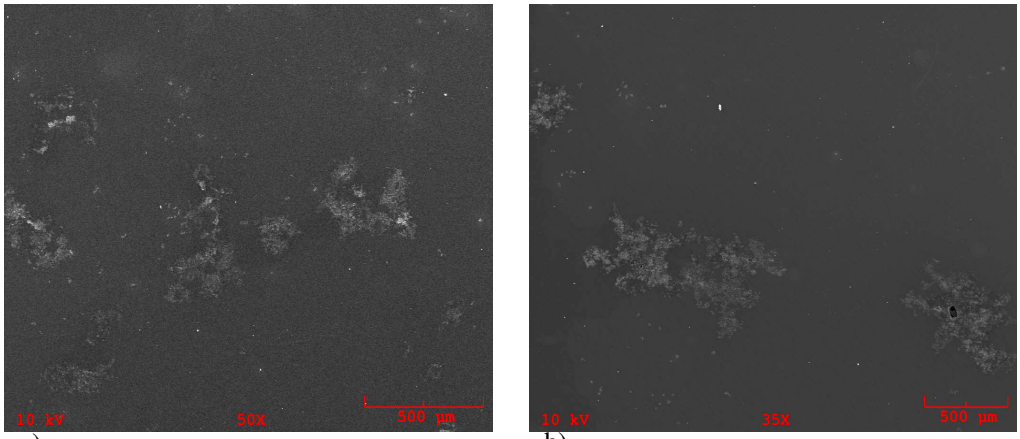
a) b)

c) d)

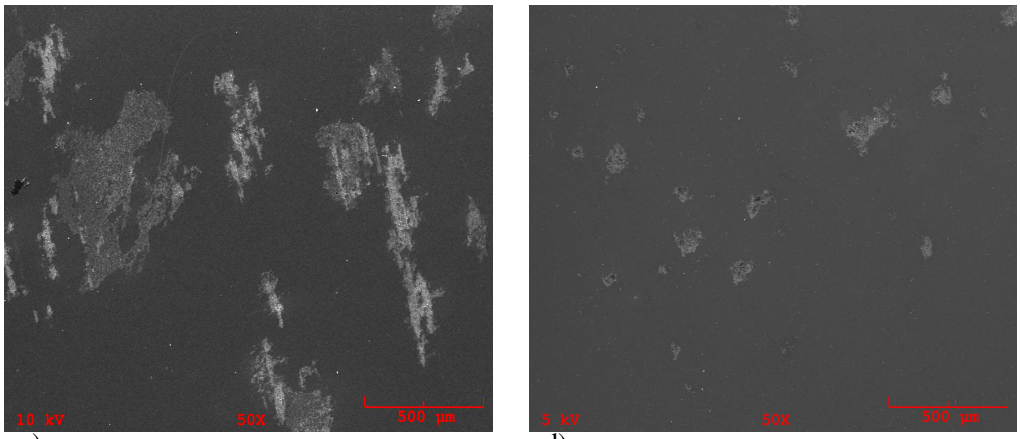
Şekil 6.6: Tuz testi sonrası 500x büyütmede SEM görüntüleri a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC

6.3 Kaynaklı ve Kaynaksız Numunelerin SEM Analizleri

Anodik polarizasyon testine tabi tutulduktan sonra yüzeyi karbon kaplanan kaynaksız yüzey numunelere ait SEM fotoğrafları Şekil 6.7'da verilmiştir.



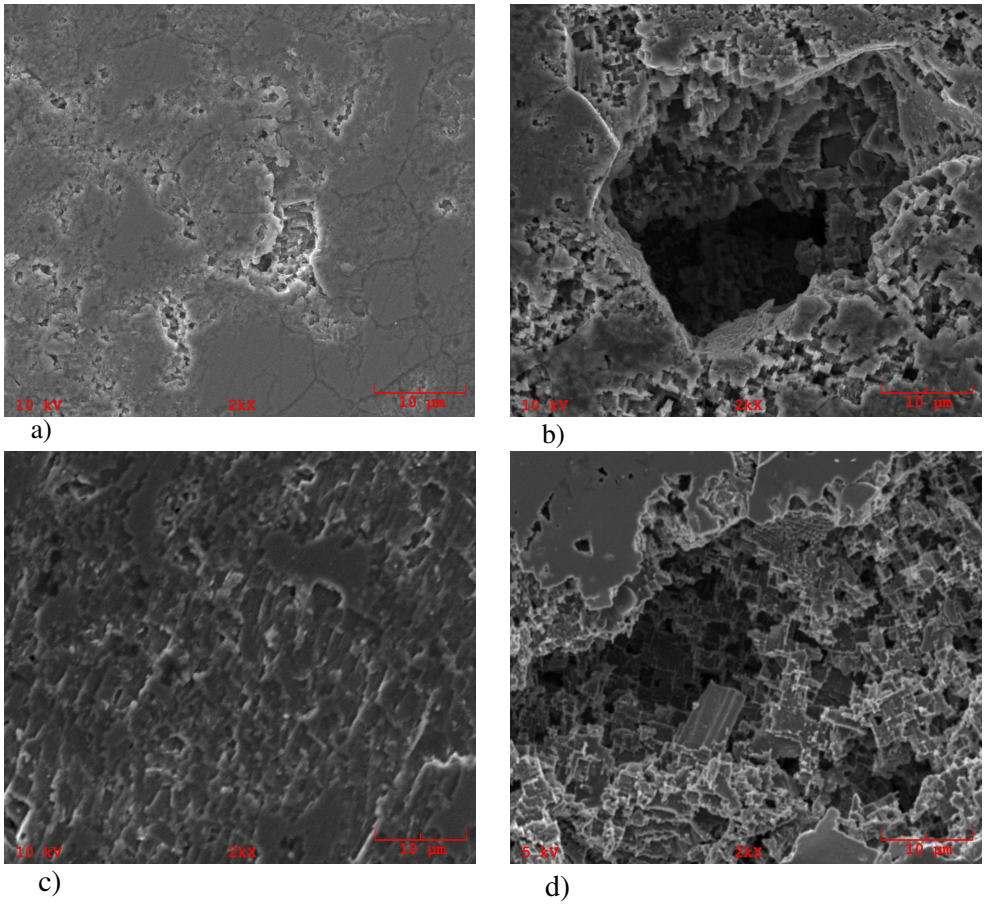
a) b)



c) d)

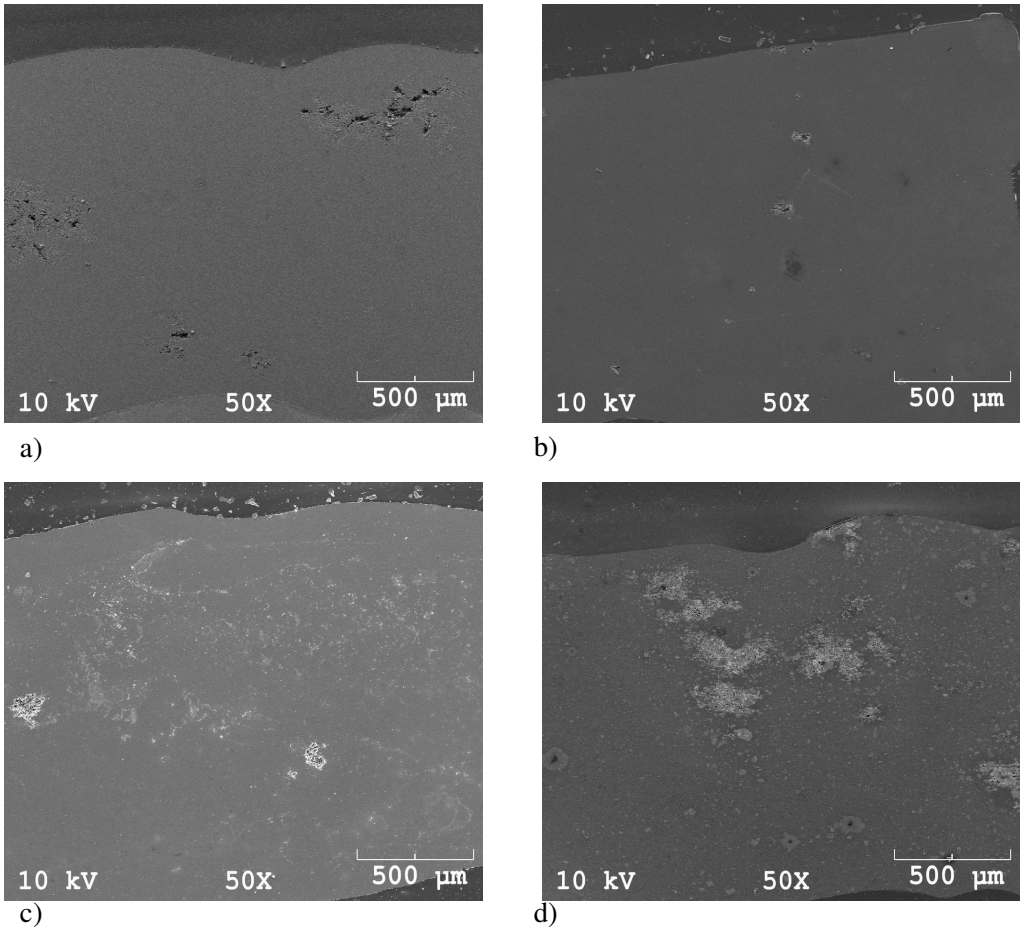
Şekil 6.7: Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız yüzey numunelere ait düşük büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC

Görüleceği gibi DC numunelerde oyuklar büyük, derin ve kristolografikken, TRC numunelerde daha sığ, küçük yuvarlak ağızlı oyuklar görülmektedir. Kaynaksız yüzeylere ait oyuk morfolojileri Şekil 6.8'de daha net bir şekilde anlaşılmaktadır. Ancak alaşıma göre sadece DC numunelerde Al 6082 alaşımının oyuklarının daha büyük olduğu söylenebilir.



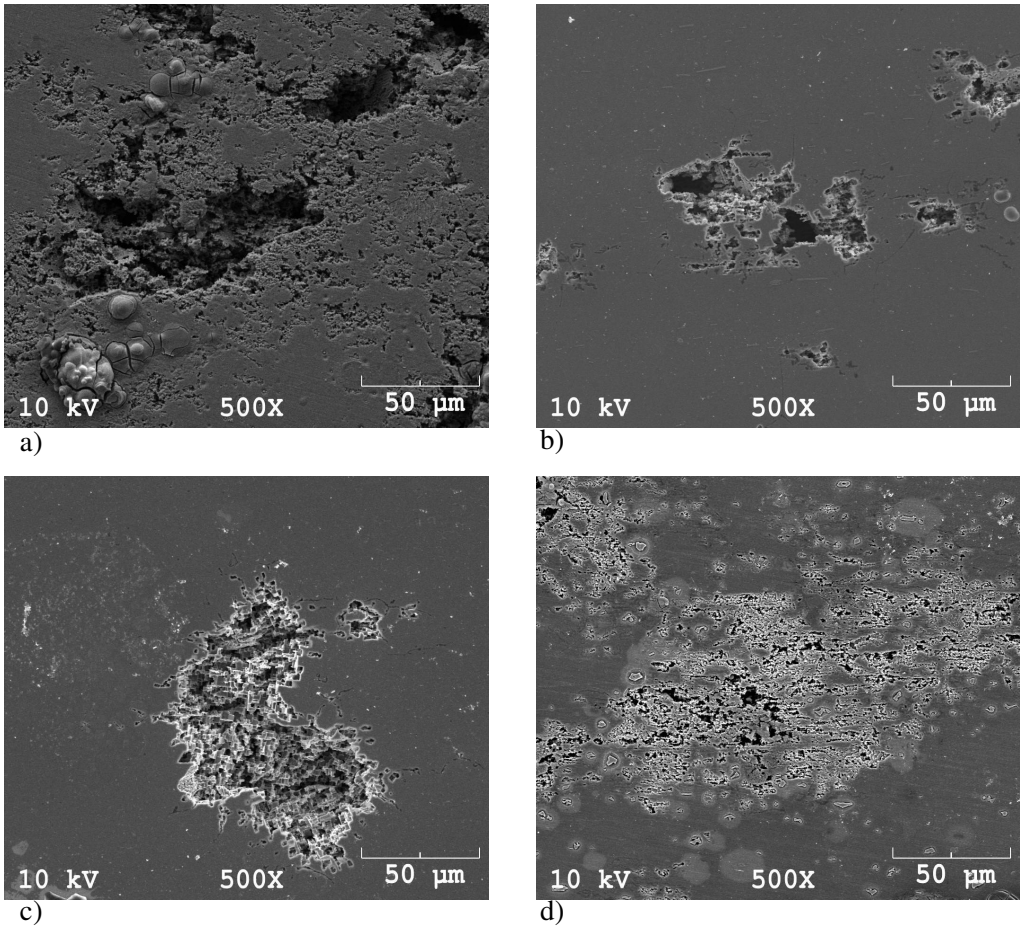
Şekil 6.8: Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız yüzey numunelere ait yüksek büyütmelerdeki (2000x) SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC

Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız kesit numunelerin SEM fotoğrafları Şekil 6.9' de görülmektedir.



Şekil 6.9: Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız kesit numunelere ait düşük büyütmelerdeki (50x) SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC

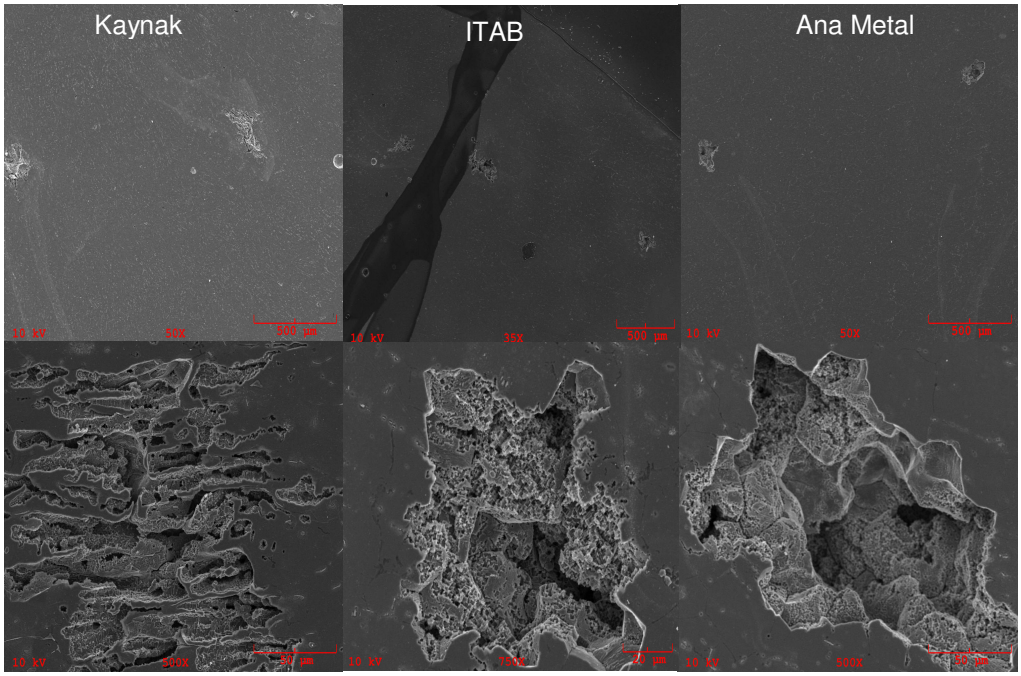
TRC yöntemiyle üretilen kaynaksız kesit numunelerde yüzey numunelerine göre oyuk morfolojileri değiştiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise TRC üretiminde yüzeylerde ve yüzeylere yakın olan bölgelerdeki yoğun segregasyonun malzemenin kesitinde görülmeyişi olarak açıklanabilir. Bu değişim Şekil 6.10' da daha belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 6.10: Anodik polarizasyon testi sonrası kaynaksız kesit numunelere ait orta büyütmelerdeki (500x) SEM fotoğrafları, a)Al 6016 TRC, b)Al 6016 DC, c)Al 6082 TRC ve d)Al 6082 DC

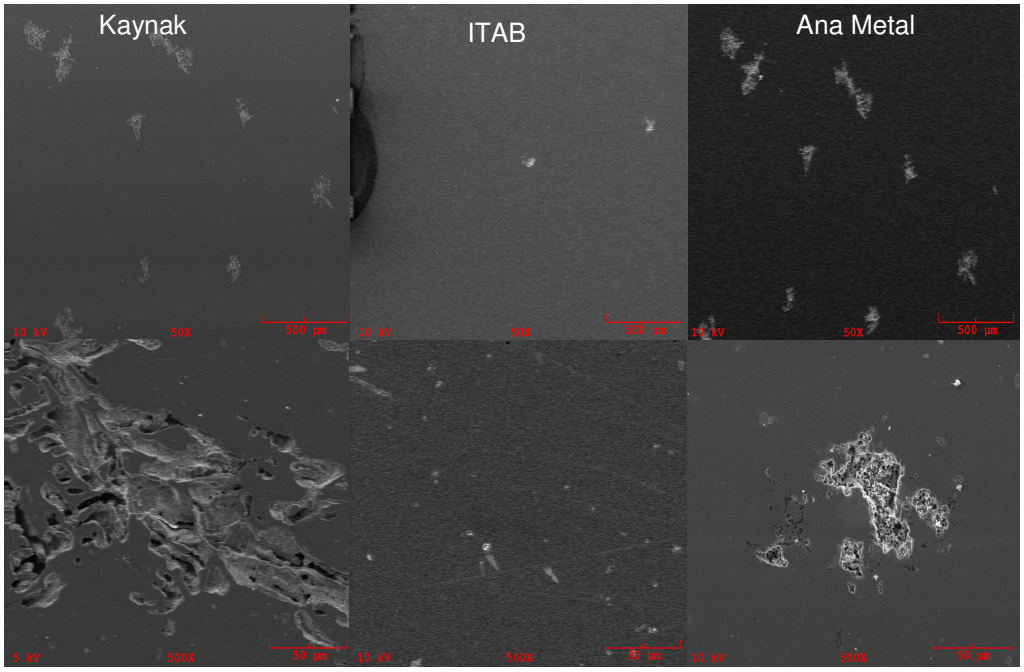
Ayrıca Şekil 6.10'da dikkat çeken diğer bir unsur da Al 6082 DC numunesinin morfolojisindeki değişimdir. Daha küçük ve sığ oyuklar gözlenmiştir. Bu da anodik polarizasyon deneyindeki histerisisinin daha dar olmasını açıklamaktadır. Daha dar histersis daha sığ, küçük ve repasivasyonu daha çabuk ve kolay olan oyukların varlığını göstermektedir.

Al 6016 TRC kaynaklı yüzeyinin polarizasyon sonrası SEM fotoğrafları Şekil 6.11'de verilmiştir.



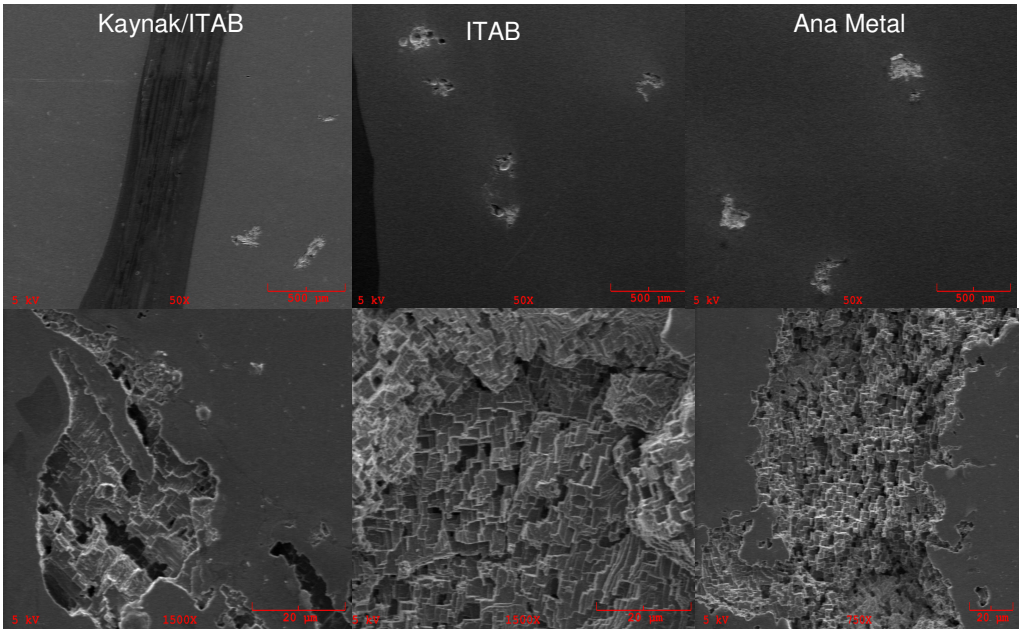
Şekil 6.11: Al 6016 TRC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki (50x ve 500x) SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal

Al 6016 DC kaynaklı yüzey numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 6.12'de verilmiştir. Ana metalde dolgu metalinden daha az yoğunlukta oyuğa rastlanmıştır. Burdan küçük alanlı dolgu metalinin galvanik olarak ana metali koruduğu anlaşılmaktadır.



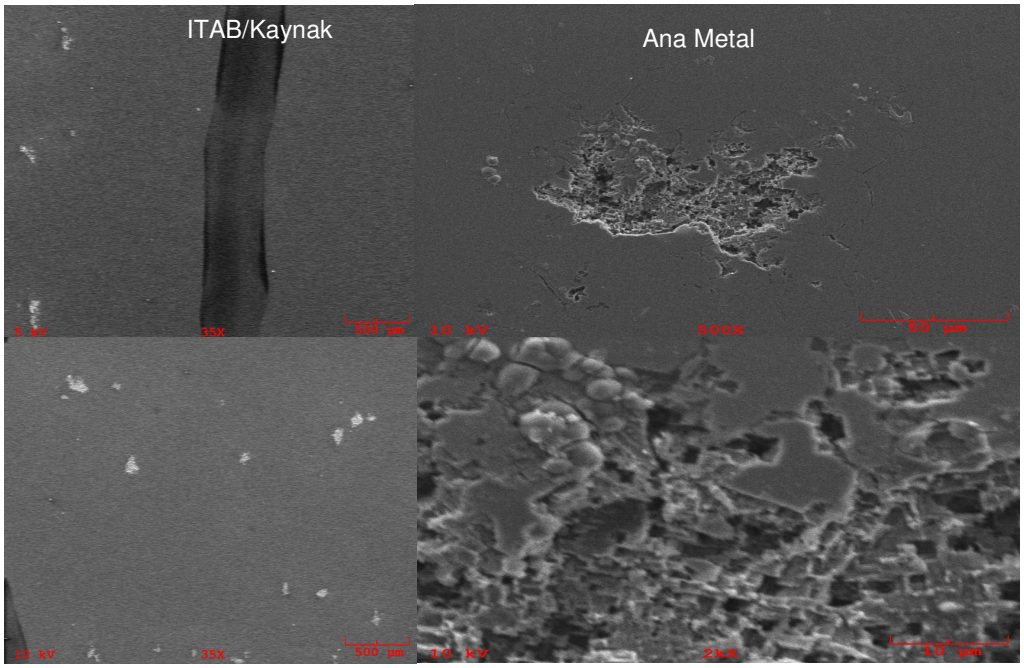
Şekil 6.12: Al 6016 DC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki (50x ve 500x) SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal

Al 6082 TRC kaynaklı yüzeyine ait SEM analizi Şekil 6.13'de verilmiştir. Şekildende görüldüğü gibi dolgu metalinde daha az yoğunlukta oyuk vardır. Bunun anlamı ise dolgu metalinin ana metal tarafından korunduğudur.



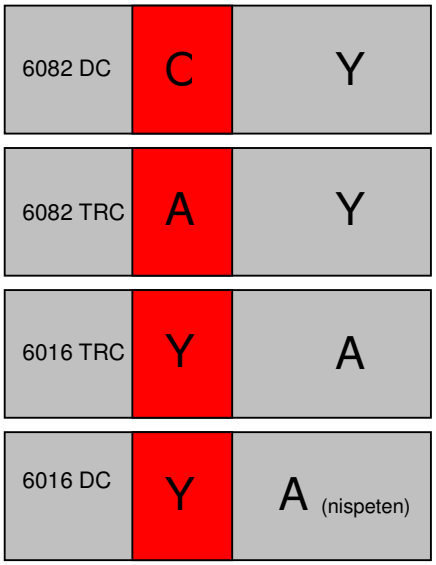
Şekil 6.13: Al 6082 TRC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal

Al 6082 DC kaynaklı yüzeyinin anodik polarizasyon deneyi sonrası SEM fotoğrafları Şekil 6.14'de verilmiştir. Dolgu metalinde hiç oyuğa rastlanmamıştır. Bu durumda ana metal dolgu metalini oyuklanma korozyonuna karşı korumuştur. Görülen oyuklar tamamiyle ana metalde oluşmuş oyuklardır.



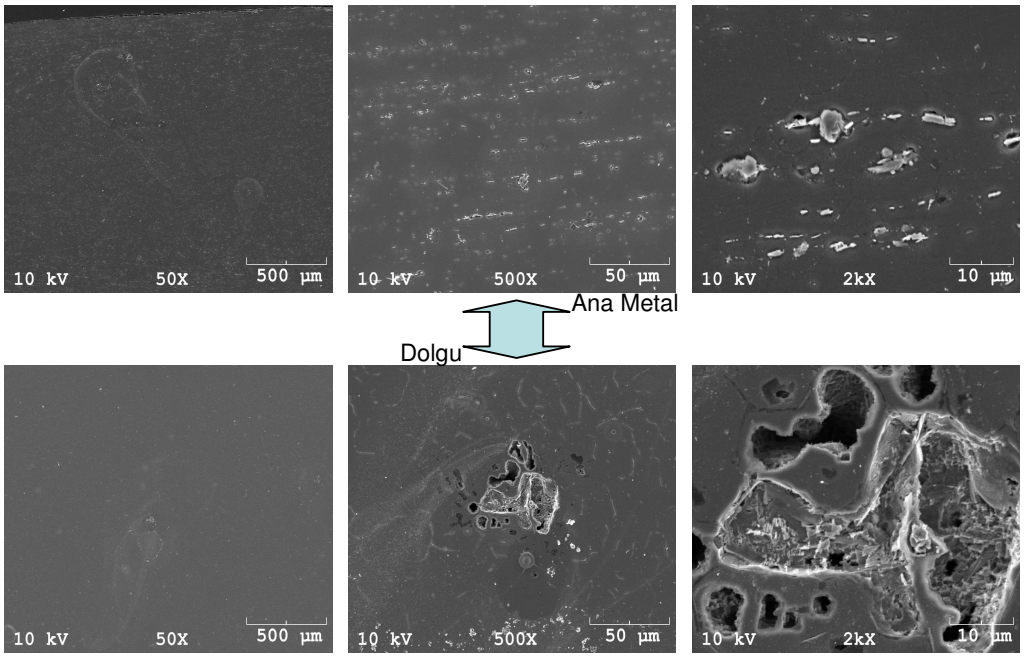
Şekil 6.14: Al 6082 DC kaynaklı yüzey numunesine ait düşük ve orta büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, soldan sağa sıra ile kaynak, ITAB, ana metal

Kaynaklı yüzey numunelerin dolgu metal ve ana metal oyuk yoğunlukları net bir şekilde şematik olarak Şekil 6.15'de gösterilmiştir.



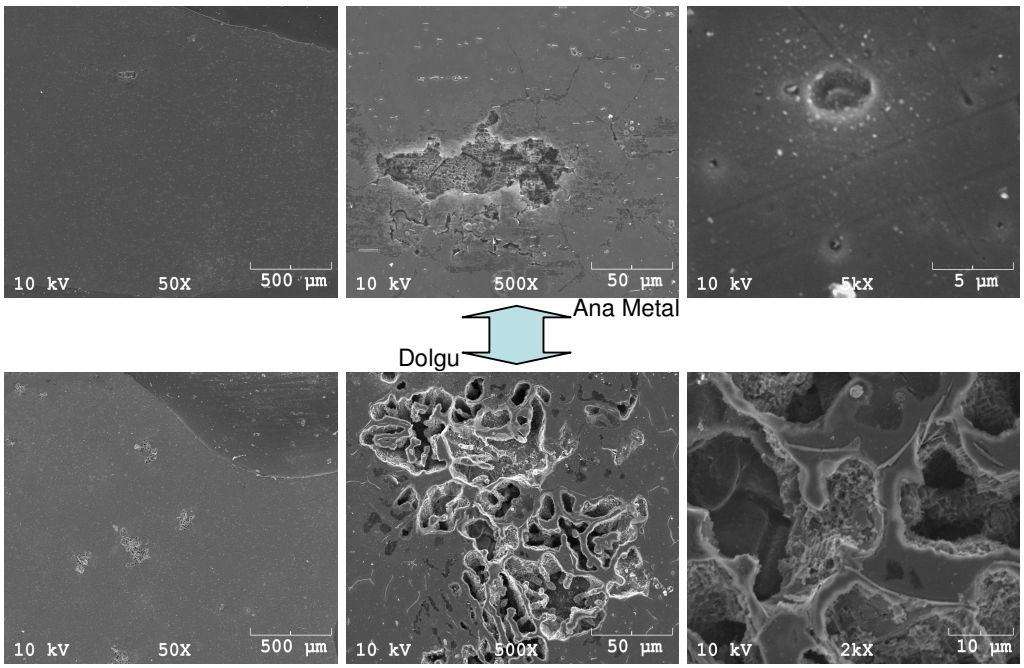
Şekil 6.15: Kaynaklı yüzey numunelerinin dolgu metal ana metal oyuk yoğunluklarının şematik gösterimi, O hiç oyuk olmadığı, A az oyuk yoğunlu ve Y yüksek oyuk yoğunluğu

Kaynaklı kesit numunelerin anodik polarizasyon deneyinden sonra SEM analizleri yapılmıstır. Şekil 6.16'de Al 6016 TRC kaynaklı kesit numunesine ait SEM fotoğrafları bulunmaktadır. Dolgu metalinde az sayıda döküm yapısını andıran büyük boyutta oyuklar görülmüştür.



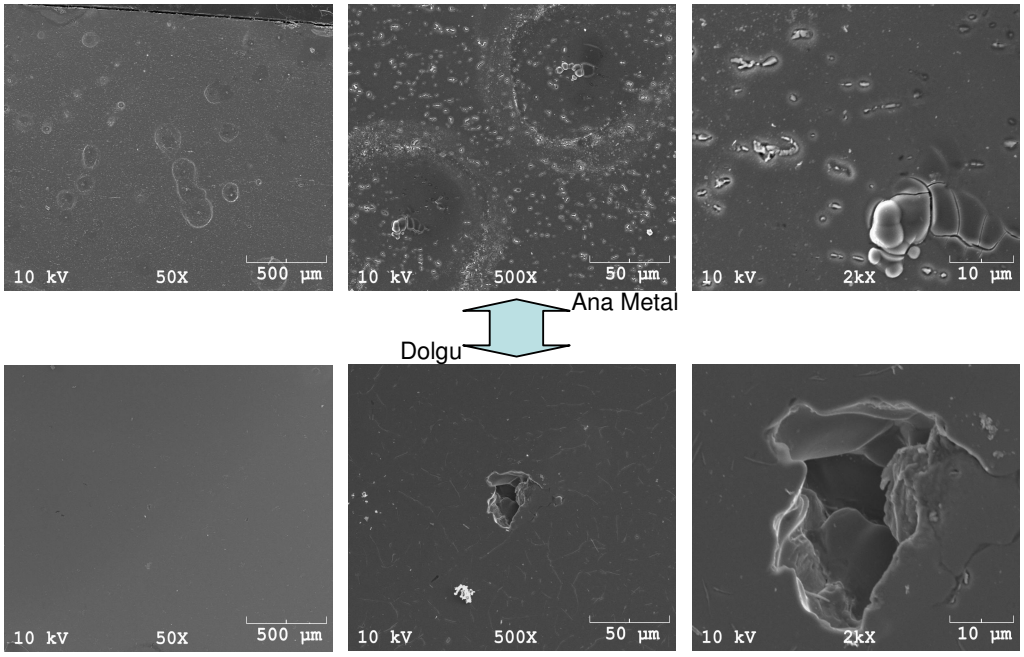
Şekil 6.16: Al 6016 TRC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali

Oyuklanma deneyi sonrası Al 6017 DC numunesinin taramalı elektron mikroskobu fotoğrafları Şekil 6.17'de görüldüğü gibidir; dolgu metali daha yoğun, ana metal daha az yoğun oyuklanma göstermiştir. Ana metalde büyük, tipik alüminyum oyuklarının yanında çok sayıda küçük oyuklar da görülmüştür.



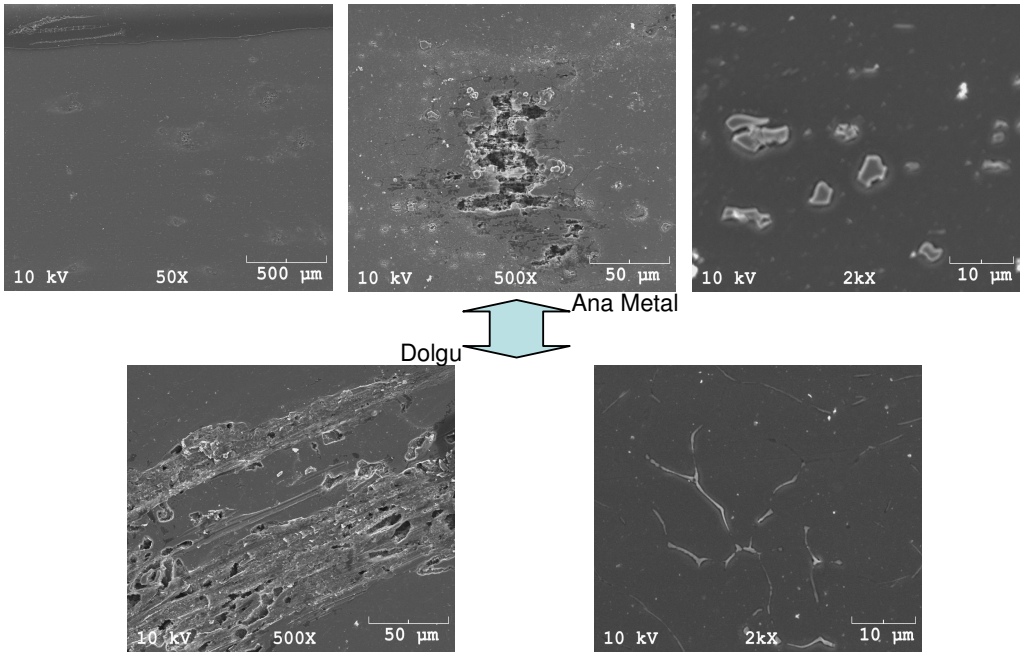
Şekil 6.17: Al 6016 DC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali

Al 6082 TRC numunesinin oyuklanma deneyi sonrası SEM analizleri Şekil 6.18'de görülmektedir. Dolgu metalinde az sayıda oyuğa büyük oyuklara rastlanırken, ana metalde çok sayıda ve küçük oyuklar görülmüştür.



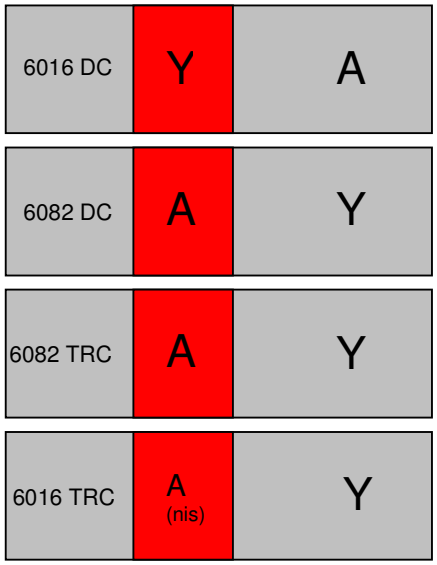
Şekil 6.18: Al 6082 TRC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali

Al 6082 DC kaynaklı kesit numunesinin anodik polarizasyon deneyi sonrası SEM görüntüleri Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekilde dolgu metalinde kaynak işlemi nedeniyle oluşan bir hatadan dolayı döküm tipi oyuklanma görülmektedir. Bunun dışında tane sınırlarının belirginleşmesi intergranuler korozyonun başlangıcını göstermektedir. Ana metalde ise yine büyük alüminyum tipi oyukların yanında küçük çok sayıda oyuk da bulunmaktadır.



Şekil 6.19: Al 6082 DC kaynaklı kesit numunesine ait düşük, orta ve yüksek büyütmelerdeki SEM fotoğrafları, üstte ana metal, altta dolgu metali

Kaynaklı kesitlerde numunelerin ana metal dolgu metali arasındaki oyuk yoğunluğu farkı şematik olarak Şekil 6.20'de net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6.20: Kaynaklı kesit numunelerinin dolgu metal ana metal oyuk yoğunluklarının şematik gösterimi, A az oyuk yoğunlu ve Y yüksek oyuk yoğunluğu

6.4 Genel Sonuçlar

1) Assan Alüminyum AŞ'nin yaptığı mikroyapı incelemelerinde, TRC numunelerin yüzey ve yüzey altında çok yoğun segregasyon oluşumu gözlenmiştir. Bunun da yüzey numunelerinde, DC ürünlerinin TRC ürünlerinden daha pozitif bir oyuklanma potansiyeline sahip olmasının asıl nedeni olduğu düşünülmektedir. Zira segregasyonlar, oksit tabakasını zayıflatarak oyuk çekirdeklenmesi için tercihli bölgeler olmaktadır.

Daha negatif potansiyellerde oyuklanmaya başlayan TRC numuneler daha çabuk yeniden pasifleşmiştir. Bu da dar bir histerisis oluşumuna neden olmaktadır. Dar histerisis, oluşan oyukların daha büyüyüp derinleşmeden tekrar pasifleşmesi anlamına gelir. Bu durum malzeme için oyuklanma korozyonu açısından artı bir özelliktir. Ancak çok sayıda oyuk dekoratif açıdan kötü bir görüntü arz eder.

Tuz püskürtme deneyi sonuçları da bu bulguları doğrulamaktadır. DC numunelerin yüzeyi parlak ve az sayıda oyuk gösterirken, TRC numunelerin çok sayıda oyuk oluşumuna izin verdiği görülmüştür (Şekil 6.5, Şekil 6.6).

Oyuklanma potansiyelleri göz önüne alınarak yapılan değerlendirmelerde alaşım türüne göre oyuklanma potansiyelleri arasında anlamlı farklar yoktur(Oyuklanma potansiyelleri 25 ile 40 mV arasında değişmektedir). Ancak tuz püskürtme deneyi sonuçlarına göre Al 6082 alaşımları daha iyi bir oyuklanma direnci göstermiştir denebilir. Bunu da yapısında bulunan Mn elementinin oyuklanma direncine pozitif etkisinin neden olduğu düşünülmektedir.

2) Kesitlerde öyle yüzeyde toplanan segregasyon etkisinin olmaması nedeniyle net bir DC, TRC oyuklanma korozyonu direnci karşılaştırılması yapılamamakla birlikte en iyi oyuklanma potansiyelini Al 6016 DC numunesinde gözlenmektedir.

3) Kaynaklı yüzeylerde dolgu metalinin fazlalığını taşlarken yüzeyden de epey içeri girildiği için TRC numunelerin yüzeyindeki yoğun segregasyon tehdidi ortadan kalkmıştır. Bu bağlamda Al 6016 alaşımları en pozitif oyuklanma potansiyellerine hatta dolgu metalinden de daha soy değerlere ulaşması, dolgu metalinin anametali galvanik olarak korumasına neden olmuştur. Bu malzemenin, dolgu metalinden oyuklanma korozyonuna uğraması daha fazla hasara neden olmaktadır. Bu durumda Al 6016 alaşımı için kullanılan dolgu metalinin oyuklanma korozyonu açısından doğru bir seçim olmayabileceği sonucuna varılmıştır.

4) Kaynaklı kesitlerde TRC numuneler dolgu metalinden daha negatif oyuklanma potansiyeline sahipken DC numuneler daha pozitif potansiyelere sahiptirler. Bu durumda bu dolgu metali TRC numuneler için uygundur diyebiliriz. Şekil 6.20'da oyuklanma yoğunlukları farkı verilmiştir. Burada Al 6082 DC numunesi, dolgu metalinden daha pozitif oyuklanma potansiyeli değerleri gösterse de dolgu metalindeki kaynak hatası olduğu düşünülen bir bölgede görülen yoğun oyuk dışında oyuklanma göstermemiştir. Bu nedenle dolgu metalindeki bu bölgenin malzemenin hasarında en etkin bölgelerden olacağı açıktır.

5) Kayak işlemi sonrası numunelerin oyuklanma potansiyellerindeki değişim çok azdır. Kaynaklı kesit numuneler ile sade kesit numunelerin oyuklanma potansiyelleri farkı 5 ile 25 mV arasında değişmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **Davis, J. R.**, 1999. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. Ed, ASM International.,Materials Park, Ohio.

[2] **Society of Petroleum Engineer AIME,** 1997. Society of Petroleum Engineers., Richardson, Texas.

[3] **Nabi, T. A.,** 1999. Electrochemical Atomic Force Microscopy and Development of a Mechanism For Aluminium Corrosion and Passivation, *PhD Thesis*, The George Washington University, Washington DC.

[4] **Jones, D. A.,** 1996. Principles and Prevention of Corrosion. Prentice Hall, Upper Saddle River,New Jersey.

[5] **Sevinç C.,** 2002. Zırhlı muhabere araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının kaynak edilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[6] **Mathers, G.,** 2000**.** The Welding of Aluminium and Its Alloys,. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, England.

[7] **Bolt, P.J., Lamboo, N.A.P.M. and Rozier, P. J.C.m.,** 2001. Feasibility of Warm Drawing Aluminium Products, Journal of Materials Processing Technology, **115**, 118-121.

[8] **Vargel, C.,** 2004. Corrosion of Aluminium. Elsevier Ltd, Boston.

[9] **Braun, R., Dalle Donne, C. and Staniek G.,** 2000. Laser beam welding and friction stir welding of 6013-T6 aluminium alloy sheet, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, **31**, 1017-1026.

[10] **Soukieh M.,** 2004. Corrosion behaviour of Al6061-T6 alloy surface modified by N_2^+ ion implantation, Radiation Effects & Defects in Solids, **159**, 503-510.

[11] **Babacan O.,** 1982. 2017 Alaşımımnın Gerilmeli Korozyon Çatlaması, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[12] **Szklarska-Smialowska Z.,** 1999. Pitting corrosion of aluminium, Corrosion Science, **41**, 1743-1767.

[13] **Mazhar, A.A., Arab, S.T., Noor, E.A.,** 2001. The role of chloride ions and pH in the corrosion and pitting of Al-Si alloys, Journal of Applied Electrochemistry, **31**, 1131-1140.

[14] **Szklarska-Smialowska Z.,** 1987. Pitting Corrosion of Metals, National Association of Corrosion Engineers. Houston, Texas.

[15] **Birol, Y. and Birol, F.,** 2004. Corrosion behavior of twin-roll cast Al-Mg and Al-Mg-Si alloys, Material Forum, **28**, 338-344.

[16] **Krüger, U.,** 1994. Weldability, Training in Aluminium Application Technologies, Berlin, < http://www.eaa.net/education/TALAT/lectures/4202.pdf >.

[17] **Gürdaş, M.,** 1999. Kaynaklı konstrüksiyonlarda alüminyum ve alaşımlarının kullanımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[18] **Tarng, Y.S., Tsai, H.L. and Yeh, S.S.,** 1999. Modeling, optimization and classification of welding quality in tungsten inert gas welding, International Journal of Forum, **28**, 338-344.

[19] **Zucchi, F., Trabanelli, G. and Grassi V.,** 2001. Pitting and stress corrosion cracking resistance of friction stir welded AA 5083, Materials and Corrosion, **52**, 853-859.

[20] **Büyükbaş, F., 2001**. Çift merdaneli sürekli levha döküm yöntemi ile üretilmiş AA3003 alaşımlı alüminyum levhalarda proses parametrelerinin özelliklere etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[21] **Kammer, C.,** 1999. Continous casting of aluminium, Training in Aluminium Application Technologies, European Aluminium Association. http://www.eaa.net/education/TALAT/lectures/3210.pdf

[22] **Zhou, S.X., Zhong, J., Mao, D. and Funke, P.,** 2003. Experimental study on material properties of hot rolled and continuously cast aluminum strips in cold rolling, Journal of Materials Processing Technology, **134**, 363-373.

ÖZGEÇMİŞ

1982 Çorum doğumludur. Lise öğrenimini Çorum Anadolu Lisesi'nde 2000 yılında tamamladı. Aynı yıl İ.T.Ü. Metalurji ve Malzme Mühendisliği bölümünde eğitime başladı. 2004 yılında Metalurji ve Malzeme Müh. almaya hak kazandı. Lisans eğitiminin ardından aynı yıl İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Mühendisliği yüksek lisans programına girdi ve halen eğitimine devam etmektedir.