



**ESD İLE İNTERMETALİK KAPLANMIŞ
PASLANMAZ ÇELİKLERİN
KARAKTERİZASYONU VE
KOROZYON DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erol BAYSAN

Danışman

Doç. Dr. Yusuf KAYALI

METALURJİ VE MALZEME

MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2022

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANSTEZİ

ESD İLE İNTERMETALİK KAPLANMIŞ PASLANMAZ
ÇELİKLERİN KARAKTERİZASYONU VE KOROZYON
DAVRANIŞI

Erol BAYSAN

Danışman

Doç.Dr. Yusuf KAYALI

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2022

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ESD İLE İNTERMETALİK KAPLANMIŞ PASLANMAZ ÇELİKLERİN KAREKTERİZASYONU VE KOROZYON DAVRANIŞI

Erol BAYSAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Yusuf KAYALI

Paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda daha iyi korozyon direncine sahip olmaları nedeniyle endüstrinin çeşitli sektörlerinde (kimya, petro-kimya endüstrisi, kağıt endüstrisi, nükleer mühendislik gibi) geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun yanı sıra yüksek korozyon direnci sayesinde medikal alanda da implant malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca paslanmaz çeliklerin üstün özelliklerini geliştirmek için yüzey kaplama işlemleri yapılmaktadır. Bu kaplama işlemleri çelik yüzeylere borlama, nitrüleme, termal spreycaplama, fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme, elektro-kıvılcım biriktirme işlemleri ile uygulanmaktadır. Bu konuda en umut verici yöntemlerden biri elektro-kıvılcım biriktirme (ESD) kaplama tekniğidir. Temel olarak ESD, elektrot malzemesinin yüksek frekanslı ve yüksek akımlı elektrik akımları kullanılarak metalik bir alt tabakanın yüzeyine kaynaklanmasına (biriktirilmesine) izin veren bir mikro kaynak işlemidir.

Bu çalışmada, FeAl ve NiAl intermetalikleri AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çelikler üzerine ESD tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Öncelikle ESD kaplama için uygun deneysel parametreler belirlendi. İkinci olarak, kaplanmış yüzeylerde oluşan mikroyapılar ve fazlar, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterize edildi. Daha sonra elde edilen tabakaların yüzey sertlikleri mikrosertlik yöntemi ile ölçülmüştür. Son olarak intermetalik kaplanmış paslanmaz çeliklerin korozyon özellikleri elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmiş ve birbirleriyle

karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak intermetalik kaplamalar ile her iki paslanmaz çeliğin hem sertlik değerleri hem de korozyon dirençleri artmıştır.

2022, xiii + 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: AISI 304 paslanmaz çelik, AISI 316L paslanmaz çelik, ESD kaplama, İntermetalik bileşikler, Elektrokimyasal korozyon.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

CHARACTERIZATION AND CORROSION BEHAVIOR OF INTERMETALLIC COATED STAINLESS STEELS WITH ESD

Erol BAYSAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Supervisor: Assoc.Prof. Yusuf KAYALI

Stainless steels have a wide range of uses in various sectors of the industry (such as chemistry, petro-chemical industry, paper industry, nuclear engineering) due to their better corrosion resistance at high temperatures. Besides this it is also used the medical field as an implant material owing to its high corrosion resistance. In addition surface coating processes are carried out to improve superior properties of stainless steels. These coating processes are applied to steel surfaces by boronizing, nitriding, thermal spray coating, physical vapor deposition, chemical vapor deposition, electro-spark deposition processes. One of the most promising methods in this regard is the electro-spark deposition (ESD) coating technique. Basically ESD is a micro-welding process that allows electrode material to be welded (deposited) to the surface of a metallic substrate using high-frequency and high current electric currents.

In this study, FeAl and NiAl intermetallics were coated on AISI 304 and AISI 316L stainless steels using ESD technique. First of all for ESD coating was determined appropriate experimental parameters Secondly microstructures and phases formed on the coated surfaces were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). After that the surface hardness of the obtained layers were measured by the microhardness method. Finally corrosion properties of intermetallic coated stainless steels were determined using electrochemical methods and compared

with each other. As a result, both the hardness values and corrosion resistances of both stainless steels have increased with intermetallic coatings.

2022, xiii + 69 pages

Keywords: AISI 304 stainless steel, AISI 316L stainless steel, ESD coating, Intermetallic compounds, Electrochemical corrosion.



TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın, Doç. Dr. Yusuf KAYALI'ya, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın, Prof. Dr. Aysel BÜYÜKSAĞIŞ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Ersan MERTGENÇ'e her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Erol BAYSAN
Afyonkarahisar 2022

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Paslanmaz Çelikler	2
2.1.1 Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri	3
2.1.2 Paslanmaz Çeliklerin İçerisindeki Alaşım Elementleri ve Etkileri	4
2.1.3 Paslanmaz Çelik Türleri.....	5
2.2 Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	6
2.2.1 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları	8
2.2.2 AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik	10
2.2.3 AISI 316L Östenitik Paslanmaz Çelik	11
2.3 İntermetalik Bileşikler	11
2.3.1 İntermetaliklerin Kullanım Alanları	13
2.4 Alüminyum Esaslı İntermetalik Bileşikler	13
2.4.1 Nikel Alüminidler	15
2.4.1.1 NiAl Bileşiği	16
2.4.2 Demir Alüminidler	17
2.4.2.1 FeAl Bileşiği.....	19
2.5 Elektro-Kıvılcım Biriktirme (ESD) Yöntemi	22
2.5.1 ESD Yönteminin Tarihçesi	22
2.5.2 ESD Yönteminin Çalışma Prensibi ve Uygulaması.....	23
2.5.3 ESD Yönteminin Avantajları	25
2.5.4 ESD Yönteminin Kullanım Alanları.....	25

2.6 Korozyon	26
2.6.1 Korozyon Çeşitleri	27
2.6.1.1 Genel Korozyon	28
2.6.1.2 Aralıklı Korozyon.....	28
2.6.1.3 Taneler Arası Korozyon	28
2.6.1.4 Çukurcuk Korozyon	29
2.6.1.5 Gerilmeli Korozyon.....	29
2.6.1.6 Seçimli Korozyon.....	30
2.6.1.7 Erozyonlu Korozyon	31
3. MATERİYAL ve METOT	32
3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	32
3.1.1 Deney Numuneleri	33
3.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar ve Metod	33
3.2.1 ESD Yöntemi ile Malzemelerin Kaplama İşlemi	33
3.2.2 İntermetaliklerin Hazırlanması ve Ergitme işlemi	34
3.2.3 Döküm İşlemleri.....	35
3.2.4 Metalografik İşlemler.....	36
3.2.5 Mikrosertlik Ölçümü.....	39
3.2.6 XRD (X-Işınlının Difraksiyon Analizi)	39
3.2.7 Elektrokimyasal Deneyler	40
3.2.8 Yüzey ve Yapı Analizleri.....	41
4. DENEYSEL SONUÇLAR	42
4.1 Tabaka Karakterizasyonu	42
4.2 X-Işınları Analizi	45
4.3 Sertlik ve Tabaka Kalınlıklarının Analizi	47
4.4 Elektrokimyasal Korozyon Sonuçları	48
4.5 Elektrokimyasal Korozyon Sonrası SEM-EDX Analizleri	54
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	59
5.1 Sonuçlar	59
5.2 Öneriler	60
6. KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	69

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrad derece
Ø	Çap
GPa	Gigapaskal
MPa	Megapaskal
M	Metal
µm	Mikrometre
µg	Mikrogram
µA	Mikroamper
mV	Milivolt
mm	Milimetre
mbar	Milibar
bar	Basınç birimi
gr	Gram
kg	Kilogram
cm	Santimetre
V	Volt
µF	Mikro farad
atm	Atmosferik basınç birimi
kw	Kilowatt
Hz	Hertz
Kα	K alfa radyasyonu
kΩ	Kiloohm
mpy	Korozyon hızı yıldamıl olarak
wt %	Yüzdece ağırlık
% at	Yüzdece atom ağırlığı
I _{corr}	Korozyon akımı
E _{corr}	Korozyon potansiyeli
R _p	Polarizasyon direnci
i _{corr}	Korozyon akım yoğunluğu
Cl ⁻	Klor
SO ₄ ⁻	Sülfat
Br ⁻	Brom
I ⁻	İyot
NiO	Nikeloksit
NiA ₂ O ₄	Nikel alüminat
Al ₂ O ₃	Alümina
HNO ₃	Nitrikasit
HCl	Hidrojen klorür
NaCl	Sodyum klorür
OH ⁻	Hidroksit
H ₂ O	Su
H ₂	Hidrojen gazı

Simgeler (Devam)

NaOH	Sodyum hidroksit
Fe	Demir
Ni	Nikel
Mo	Molibden
Zr	Zirkonyum
Y	İtriyum
Hf	Hafniyum
Nb	Niyobyum
C	Karbon
Si	Silisyum
Mn	Mangan
S	Kükürt
P	Fosfor
Cu	Bakır
N	Azot
Cr	Krom
NiAl	Nikel alümina
FeAl	Demir alümina
FeOH	Demir hidroksit
FeCl ₃	Demir(III) klorür
Cr ₂ O ₃	Krom(III) oksit
NH ₄ Cl	Amonyum klorür
pH	Bir çözeltinin asitlik ve bazlık derecesi

Kısaltmalar

AISI	Amerikan demir ve çelik enstitüsü
ESD	Elektro kıvılcım biriktirme
HAZ	Isıya maruz kalmış bölge
HMK	Hacim merkezli kübik
HB	Brinell Sertlik
HV	Vickers Sertlik
EDX	Enerji dağıtıcı X-ışını analizi
EN	Avrupa standartları
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TIG	Tungsten inert gaz
UNS	Metal ve alaşımlar için birim numaralandırma sistemi
XRD	X - ışını difraksiyonu
YMK	Yüzey merkezli kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Değişik paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel dağılımları	5
Şekil 2.2 Bazı paslanmaz çelik türlerin mikroyapıları	6
Şekil 2.3 Östenitik paslanmaz çeliklerde temel alaşım elementi ilaveleri	7
Şekil 2.4 (a) Hacim merkezli kübik (HMK) ve (b) Yüzey merkezli kübik (YMK) yapılarından türemiş bazı basit intermetalik kristal yapılar	14
Şekil 2.5 Ni-Al faz diyagramı	15
Şekil 2.6 NiAl bileşiği kristal yapısı	16
Şekil 2.7 Fe-Al ikili faz diyagramı	18
Şekil 2.8 B2 kristal yapısına ait FeAl bileşiği	19
Şekil 2.9 ESD yönteminin uygulama şeması	24
Şekil 2.10 Aralık korozyonu	28
Şekil 2.11 Çukurcuk korozyonu mekanizması.....	29
Şekil 2.12 Seçimli korozyon	30
Şekil 2.13 Erozyon korozyonu	31
Şekil 3.1 a) AISI 304 paslanmaz çeliğin mikroyapısı, b) AISI 316L paslanmaz çeliğin mikroyapısı.....	32
Şekil 3.2 Kaplama ve korozyon numunelerinin şematik gösterimi	33
Şekil 4.1 AISI 304 paslanmaz çeliğin üzerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların SEM resimleri	42
Şekil 4.2 AISI 316L paslanmaz çeliğin üzerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların SEM resimleri	44
Şekil 4.3 AISI 304 paslanmaz çeliğin üzerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların XRD analizleri	45
Şekil 4.4 AISI 316L paslanmaz çeliğin üzerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların XRD analizleri	46
Şekil 4.5 %3,5 NaCl çözeltisinde ESD yöntemi ile FeAl ve NiAl kaplanmış AISI 304 paslanmaz çeliğin Tafel eğrileri	51
Şekil 4.6 %3,5 NaCl çözeltisinde ESD yöntemi ile FeAl ve NiAl kaplanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin Tafel eğrileri	53

Şekil 4.7 a) Ni-Al, b) Fe-Al faz diyagramları	54
Şekil 4.8 ESD yöntemi ile a) Kaplamasız b) FeAl ve c) NiAl intermetalik kaplanmış AISI 304 paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon deneyleri sonrası SEM-EDX analizleri.....	55
Şekil 4.9 ESD yöntemi ile a) Kaplamasız b) FeAl ve c) NiAl intermetalik kaplanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon deneyleri sonrası SEM-EDX analizleri.....	56



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Paslanmaz çeliklerin kullanım dağılımına göre uygulama alanları	3
Çizelge 2.2 Östenit-Ferrit oluşturuç elementler ile nötr elementler ve etkileri	4
Çizelge 2.3 Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri.....	8
Çizelge 2.4 Östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları	9
Çizelge 2.5 AISI 304 paslanmaz çeliğin mekanik genel özellikleri.....	10
Çizelge 2.6 İntermetalik bileşiklerin kritik özellikleri	13
Çizelge 2.7 FeAl intermetalik bileşiğine ilave edilen elementler ve geliştirdiği özellikler	21
Çizelge 2.8 Korozyon çeşitleri	27
Çizelge 2.9 Çeşitli alaşımlarda gerilmeli korozyon çatlamasına yol açan ortamlar	30
Çizelge 3.1 AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çeliklerin kimyasal analiz değerleri....	32
Çizelge 3.2 AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çeliklerin FeAl ve NiAl ile ESD kaplama esnasında uygulanan voltaj ve frekanslar.....	33
Çizelge 4.1 Tabaka kalınlığı ve sertlik değerleri.....	47
Çizelge 4.2 Kaplanmış ve kaplanmamış AISI 304 paslanmaz çeliklerin % 3,5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri	48
Çizelge 4.3 Kaplanmış ve kaplanmamış AISI 316L paslanmaz çeliklerin % 3,5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri	52

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Elektron-Kıvılcım biriktirme (ESD).....	23
Resim 3.1 a) Elektro-Kıvılcım biriktirme (ESD) cihazı, b) deneyin yapılışı.....	34
Resim 3.2 Vakum ark ocağı.....	35
Resim 3.3 a) Bakır kalıbın ark ergitme ve döküm fırınına yerleştirilmesi, b) Döküm işlemine tabi tutulan kalıbın çıkarılması, c) 3 mm kalınlığında dökülmüş intermetalik alaşımı	36
Resim 3.4 Numune Kesme cihazının a) dış görünüşü, b) iç görünüşü	37
Resim 3.5 Numune kalıplama cihazı	37
Resim 3.6 Zımpara ve parlatma cihazı.....	38
Resim 3.7 Taramalı elektron mikroskobu.....	38
Resim 3.8 Mikrosertlik cihazı.....	39
Resim 3.9 X-Işınları difraksiyon cihazı	39
Resim 3.10 Elektrokimyasal korozyon a) Deney düzeneği, b) Deney hücresi.....	40

1. GİRİŞ

Malzemelerin kullanım alanlarının artması ve tedarik etme noktasındaki ihtiyaçlar her geçen yıl hızlı bir artış göstermektedir. Bu durum çok sayıda malzeme üretilmesini, çok sayıda malzeme çeşitliliği ve malzemelerin çeşitli modifikasyonlarla değişik alanlarda değişik amaçlar için kullanılmasına neden olmaktadır. Birçok modifikasyon metodlarının önde gelenlerinden biride kaplama yöntemleridir.

Kaplama yöntemleri malzemelerin yüzeyinde çeşitli modifikasyonlar gerçekleştirerek malzemeyi istenilen hedef doğrultusunda en uygun şekle getirebilmektir. Örnek verilecek olursak galvanizleme yoluyla çeliğin çinko ile kaplanması sonucunda çelik paslanmaya karşı dayanım kazanır. Havacılık endüstrisindeki türbin kanatların kaplanmasıyla korozyon direnci termal sprey kaplama yöntemiyle iyileştirilmektedir.

Kaplama uygulamalarında çeşitli yöntemlerle birlikte değişik enerji türleride kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi bu enerji çeşitlerinden birisi olarak öne çıkmaktadır. Elektro-kıvılcım biriktirme (ESD) elektrik enerjisi kullanılan bir yöntemdir.

ESD metodunda kaplanacak katot, kaplama metali anot olarak görev yapar. Anot ve katot arasında belli bir kapasite ve frekansla kısa süreli pulslar kıvılcım oluşturur. Bu kıvılcım anot malzemenin katot yüzeyi üzerine aktarım yaparak yapışmasını sağlar (Korkmaz 2008).

Bu çalışmada ESD yöntemiyle, intermetalik (FeAl, NiAl) kaplanmış AISI 304 ile AISI 316L östenitik paslanmaz çelik malzemeler SEM, XRD ile karakterize edilmiş, korozyon özellikleri elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Paslanmaz Çelikler

Altın ve platin gibi saf metaller dışında kalan bütün metaller doğada oksitleri veya bileşikleri şeklinde bulunurlar. Enerji kazanılarak elde edilen demir kararsızdır ve doğadaki kararlı yapısına dönme isteği paslanma olarak adlandırılmaktadır. Paslanma sadece demirin oksit ve hidroksitleri için kullanılan özel bir terimdir. Paslanma oluşumu saf demirin oksijen ile etkileşimi sonucu ortaya çıkar (Kayır ve Baççıl 2008).

Bütün paslanmaz çelikler temelde, içeriğinde demir ve en az %10,5 krom bulundurur. Paslanmaz çeliğin içerdiği krom malzemenin bütün yüzeyini kaplayan koruyucu, yapışkan, uyumlu özellikleri olan oksit tabakası oluşturmak için havadaki oksijen ve nem ile etkileşime girerek bir kromoksit filmi meydana getirir. Oluşan bu film zarar gördüğünde, çeliğin içindeki krom, havadaki oksijen ve nem ile etkileşime girerek oksit filmini yeniden oluşturup kendisini tekrar tamir eder. Krom oranı çelik de %10,5 üstünde olursa malzemenin korozyona karşı dayanımında artar. Çeliğe molibden ve nikel eklendiğinde de korozyon direnci artış gösterir. Azot ilavesi mekanik mukavemeti artırır (Newson 2002, Kayır ve Baççıl 2008).

Paslanmaz çeliklerin yüksek deformasyon sertleşmesi, süneklik kabiliyeti, mekanik ve işlenebilirlik gibi özelliklerinin olması çok büyük önem arz etmektedir. Ayrıca korozyona karşı dirençlerinin yüksek olması, ömürlerinin uzun olması, çalışma sıcaklık aralıklarının genişliği, üst seviyede mekanik özellikleri ve değişik üretim yöntemleriyle üretilme özelliği gibi faktörlerle değişik uygulama ve alanlarda yaygın kullanım alanlarını artırmaktadır (Günay vd. 2018, Yavuzer 2019).

Yağ endüstrisinde kullanılan borular, ısı değiştiriciler, nükleer reaktör kanalları, nükleer santrallerde kullanılan fırın ve kazan parçaları, kimyasal uygulama ve kağıt endüstrisi bileşenleri paslanmaz çeliklerin uygulama alanlarından bazılarıdır. Çizelge 2.1'de paslanmaz çeliklerin genel anlamda uygulama yöntemleri özetlenmiştir (Soncu 2008).

Çizelge 2.1 Paslanmaz çeliklerin kullanım dağılımına göre uygulama alanları (Soncu 2008).

Uygulamalar		Yüzdeleri
Endüstriyel ekipmanlar	Kimya ve güç endüstrileri	34
	Yiyecek ve meşrubat endüstrisi	18
	Nakliye	9
	Mimari uygulamalar	5
Tüketici malları	Ev aletleri	28
	Küçük elektronik cihazlar	6

Paslanmaz çelik ürünlerin; Çizelge 2.1’de gösterilen dağılımlara göre uygulama alanlarının bazıları hem düşük sıcaklıklarda hem de yüksek sıcaklıklarda kullanılmaktadır. Her iki uygulamaya göre uygun olan çelik türü östenitik paslanmaz çeliklerdir (Soncu 2008).

2.1.1 Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri

Paslanmaz çelikler; mekanik direnç, imalat kolaylığı, korozyon direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklardaki dayanım, görünüm, uzun ömür ve hijyenik özellikleri bakımından tercih edilmektedir (Aran ve Temel 2003).

- **Mekanik Direnç:** Paslanmaz çeliklerin çoğunda soğuk şekillendirme ile pekleşme olur ve mekanik direnci artar. Bu nedenle tasarımlarda malzeme kalınlığı azaltılarak fiyat ve parça ağırlığında ciddi düşüşler gözlenir. Bazı türlerinde ısıtım işlemleri ile ürüne yüksek mekanik direnç kazandırılır.
- **İmalat Kolaylığı:** Paslanmaz çeliklerin tümü kaynak, kesme, talaşlı imalat işlemleri, sıcak ve soğuk şekil verme ile rahatlıkla biçimlendirilirler.
- **Yüksek ve Düşük Sıcaklıklarda:** Bazı alaşım türlerinde yüksek sıcaklıklarda bile tufalleşme ve malzemenin mekanik direncinde ciddi düşme görülmez. Ayrıca bu alaşım türleri düşük sıcaklıklarda bile tokluklarını muhafaza ederler ve gevrekleşmezler.

- **Görünüm:** Paslanmaz çelikler değişik yüzey kalitelerinde üretilirler. Bu yüzeylerin bakımı, kalitesi ve görünümü basit olduğu için rahatlıkla uzun ömür korunabilir.
- **Uzun Ömür:** Paslanmaz çeliklerin bakımı kolay ve dayanıklı oldukları için, malzemenin bütün ömrü ele alındığında ekonomiktirler.
- **Hijyenik Özellik:** Paslanmaz çelikler kolay temizlenebildiği için gıda, ilaç, hastane, mutfak gibi alanlarda yaygın şekilde kullanılır.
- **Korozyon Direnci:** Paslanmaz çeliklerin hepsinin korozyon dirençleri de yüksektir (Aran ve Temel 2003).

2.1.2 Paslanmaz Çeliklerin İçerisindeki Alaşım Elementleri ve Etkileri

Paslanmaz çeliklerin içerisindeki alaşım elementleri östenit oluşturunca ve ferrit oluşturunca olarak iki kısma ayrılır. Östenit oluşturunca, ferrit oluşturunca ve nötr elementlerin etkileri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 Östenit-Ferrit oluşturunca elementler ile nötr elementler ve etkileri (Odabaş 2004).

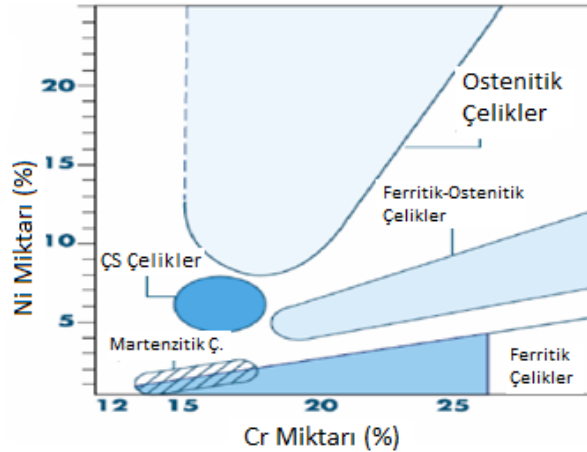
Elementler	Etkileri
Krom	Ferrit oluşumunda etkili olmakta, malzemenin oksidasyon ve korozyon dayanımının yükselmesine katkı sağlar.
Molibden	Ferrit oluşumunda etkilidir. Malzemelerin yüksek sıcaklıklarda dayanıklı olmasını ve redükleyici ortamlarda korozyon dirençlerinin artmasına katkı sağlar.
Niyobyum ve Titanyum	Bu elementler paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyon hassasiyetini azaltmak için karbonla birleşerek karbür oluşması için yapıya eklenmektedir. Niyobyum karbür yapıcı elementtir ve ilave olarak tanelerin küçülmesine ve ferrit oluşumuna katkıda bulunur. Paslanmaz çeliklerde sürünme dayanımını artırmasına karşılık sürünme sünekliğini azaltır. Yüksek mukavemetli bazı alaşımlarda sertliği ve mukavemet değerleri artması için eklenmektedir.
Fosfor, Kükürt, Selenyum	Paslanmaz çeliklerin işlenebilme kabiliyetlerini yükseltmekte ancak kaynak sırasında sıcak çatlak oluşmasına neden olmasından dolayı kaynak kabiliyetini sınırlamaktadır. Paslanmaz çelikler Tungsten inert gaz (TIG) kaynak kullanılarak birleştirildiğinde nüfuz etmesini artırır

Çizelge 2.2 (Devam) Östenit-Ferrit oluşturu elementler ile nötr elementler ve etkileri (Odabaş 2004).

Karbon	Paslanmaz çeliklerde kuvvetli östenit oluşturu element olup krom ile reaksiyona girerek taneler arası korozyona neden olan karbürleri oluşturu.
Nikel	Östenit oluşumunu sağlamakta ve paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıkta direncini, korozyona karşı dayanımı ve sünekliğini artırmaktadır.
Azot	Östenit oluşumuna çok kuvvetli etkide bulunmakta olup, çoğu zaman östenit oluşturmada nikel elementi kadar etkilidir.
Bakır	Paslanmaz çeliklere bazı ortamlardaki korozyon dayanımlarını artırmak amacıyla katılmakla beraber gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti azaltır ve yaşlanma yoluyla sertleşmeyi teşvik eder.
Mangan	Düşük sıcaklıklarda östenitin kararlı olmasını sağlarken yüksek sıcaklıklarda ferrit oluşturmaktadır.
Silisyum	Paslanmaz çeliklerin tufallenmeye karşı dayanımını yükseltmektedir. Mikroyapıda %1'den daha fazla olduğunda ferrit ve sigma fazlarının oluşumuna etki etmektedir. Her türlü paslanmaz çeliğe oksit giderme için bir miktar eklenir.

2.1.3 Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çeliklerde önemli alaşım elementleri mevcuttur. Bu elementlerin başlıcaları sırasıyla krom, nikel, molibden ve mangan elementleridir. Bu elementler içerisinde; iç yapının ferritik veya östenik olmasını krom ve nikel elementleri belirler (Uysal 2006). Değişik paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel dağılımları Şekil 2.1'de sunulmuştur.

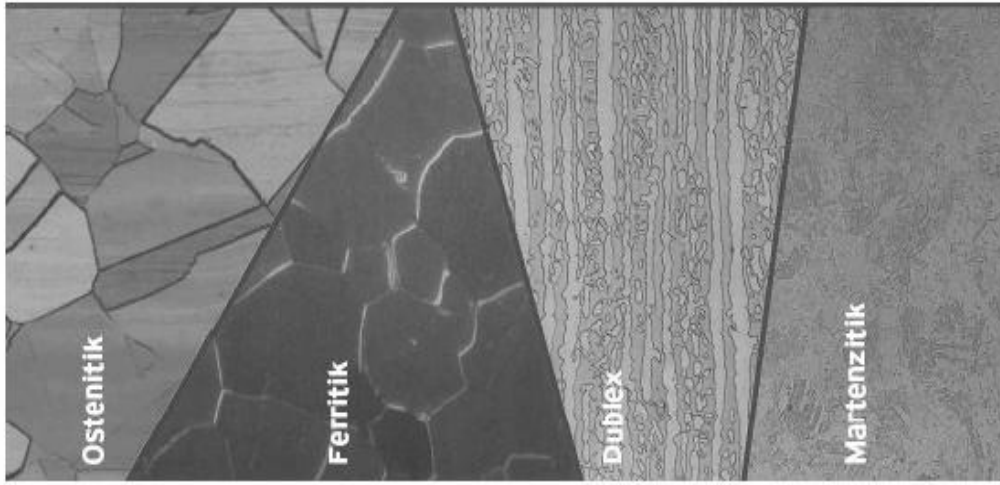


Şekil 2.1 Değişik paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel dağılımları (Uysal 2006).

Bazı paslanmaz çelik türlerinin mikroyapıları Şekil 2.2’de verilmiştir.

Paslanmaz çelikler 5 ana başlıkta sınıflandırılabilirler:

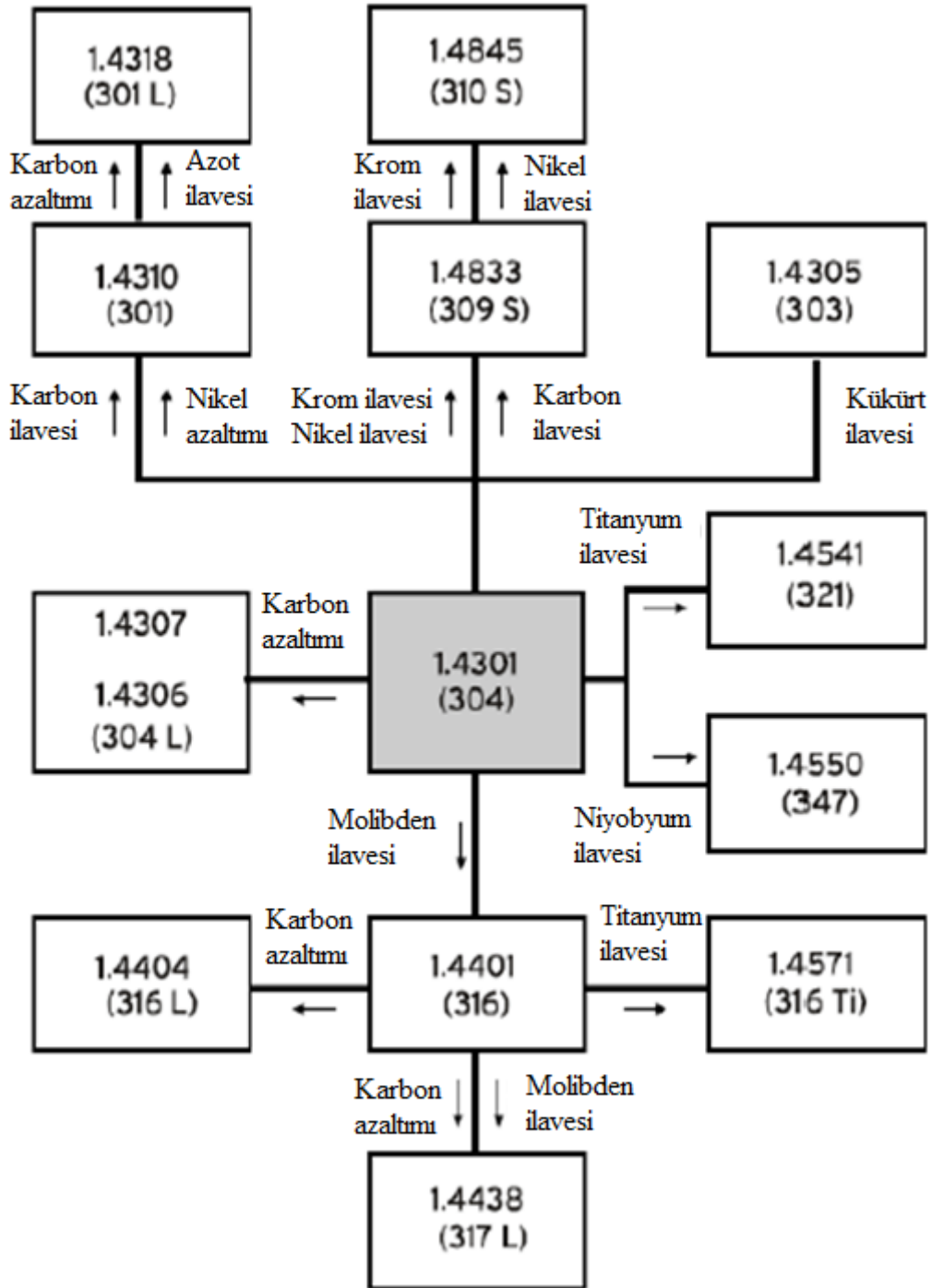
- 1) Östenitik,
- 2) Östenitik-Feritik (dublex),
- 3) Ferritik,
- 4) Martenzitik,
- 5) Çökeltme sertleşmesi uygulanabilen paslanmaz çelikler (Aran ve Temel 2003).



Şekil 2.2 Bazı paslanmaz çelik türlerin mikroyapıları (Aran ve Temel 2003).

2.2 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, genellikle %12 ile %25 krom, %8 ile %25 nikel, %20 oranına kadar da mangan içerebilirler. Elementlerden mangan ve nikel temel östenit oluşturuıcı elementlerdir. Östenitik paslanmaz çelikler hem kullanım hem de alaşım kalitelerinin fazlalığı yönünden en zengin gruptur. Aynı zamanda hem yüksek sıcaklıklarda hem de oda sıcaklığında yüzey merkezli kübik kafes sistemine sahip östenitik iç yapılarını koruma ettiklerinden dolayı sertleştirme ve normalleştirme ısı işlemleri yapılamamaktadır. Şekillendirilebilme özellikleri, süneklikleri, toklukları düşük sıcaklıklarda bile iyidir. Manyetik olmayan bu çeliklerin mekanik dayanımları ancak soğuk şekillendirmeye yükseltilebilir (Erdoğan 2000). Östenitik paslanmaz çeliklerde temel alaşım element ilaveleri Şekil 2.3’te sunulmuştur.



Şekil 2.3 Östenitik paslanmaz çeliklerde temel alaşım elementi ilaveleri (Saritaş 2012).

Östenitik paslanmaz çelik türlerinden en yaygın olarak kullanılan çelikler 304, 316 ve bunlar gibi 300 serisi çeliklerdir. Geniş alanlarda kullanılan bazı östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşenleri gösteren Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri (Kocabekir 2006).

ASTM	Kimyasal Bileşim, %									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Diğer
201	0,15	5,5-7,5	1,00	0,06	0,03	16-18	3,5-5,5	-	0,25	-
304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	18-20	8-10,5	-	-	-
304L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	18-20	8-12	-	-	-
304LN	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	18-20	8-12	-	0,1-0,16	-
316	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	16-18	19-22	2-3	-	-
316L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	16-18	10-14	2-3	-	-
316LN	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	16-18	10-14	2-3	0,1-0,16	-

Östenitik paslanmaz çeliklerin genel anlamda özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Korozyon dirençleri iyidir,
- Kaynak edilebilirlikleri yüksektir,
- Hijyenik şekilde kullanım gösterirler,
- Yapıları sünek olduğu için kolay şekillendirilirler,
- Manyetik özellik sergilemezler,
- Yüksek ve düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri yeterlidir,
- Mukavemetleri sadece soğuk şekillendirme ile artırılabilir (Aran 2003, Lippold and Kotechi 2005).

2.2.1 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları

Östenitik paslanmaz çelikler korozyon dirençleri, mekanik özellikleri, biçimlendirme kabiliyetleri bakımından çok uygun olmasıyla beraber, alaşım çeşitliliği ve kullanım alanları bakımından Çizelge 2.4’de görüldüğü gibi paslanmaz çelik üretiminin %80-90’ını kapsamaktadır (Doruk 2005, Türkyılmazoğlu 2006).

Bu çeliklerin korozyona karşı dayanımları ferritik ve martenzitik paslanmaz çeliklerden daha yüksektir. Ferritik paslanmaz çeliklerde görülen süneklikten gevrekliğe geçiş sıcaklığı altındaki gevrekleşme sorunu, östenitik paslanmaz çeliklerde görülmez. Çünkü iç yapının östenit olmasından dolayıdır. Hem sıfır altı hemde yüksek

sıcaklıklardaki korozyon dayanımları ve mekanik özelliklerinin üstünlüğü östenitik paslanmaz çeliklerin yaygın alanda rakibi olmayan bir yapı çeliği olarak kullanılmasını sağlar (Kaluç ve Tülbentçi 1998).

Sünekliği, korozyon direnci ve şekillendirilebilirliği ile AISI 304 östenitik paslanmaz çelik en geniş alanda kullanılan türdür. AISI 304 çeliğine molibden katılarak AISI 317 ve AISI 316 çelikleri üretimi sağlanır. AISI 304 çeliğinden kaynak sırasında ısı altında kalan yerde ve taneler arası korozyona sebep olan karbür çökmesini engellemek suretiyle AISI 304L paslanmaz çeliği oluşturulmuştur. Diğer kalite çeliklerinden AISI 309 VE AISI 310 çelikleri oksitleyici ortamlarda ve yüksek sıcaklıklarda kullanılır (Aran ve Temel 2003). Östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları Çizelge 2.4’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.4 Östenitik paslanmaz çeliklerin kullanım alanları (Erdoğan 2000).

Tür	Tipik Uygulamalar
301	Yüksek pekleşme hızı, yüksek dayanım, yüksek sünekliğin gerekli olduğu durumlarda kullanılır. Tren yolu arabaları treyler gövdeleri uçak parçaları, sıkma bilezikleri, otomobil tekerlek kapakları, çeşitli süslemeler
304	Kaynak sırasında karbür çökmesi sınırlamak için tip 302’nin düşük modifikasyonu. Kimyasal yiyecek işleme ekipmanları, soğuk kaplar, saç kaplamalar
304L	Kaynak sırasında karbür çökmesini sınırlamak için tip 304’ün daha fazla düşük karbon modifikasyonu. Kömür silo hatları, sıvı gübreleme tankları
309	Yüksek sıcaklık dayanımı ve oksitlenme direnci, uçak ısıtıcıları, ısıl işlem ekipmanları, tavlama kapakları, fırın kaplamalar, pompa parçaları
310	309’dan daha yüksek oksitleme direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı, ısı değiştiricileri, kaynak dolgu metalleri, gaz türbin bıçakları
316	304’den daha yüksek korozyon direnci, yüksek sürtünme dayanımı, kimyasal taşıma ekipmanları, maya tüpleri
316L	Tip 316’nın daha fazla karbon modifikasyonu taneler arası karbür çökmesini önlemek zorunda olduğu kaynaklı yapılar, 316L yoğun kaynak gerektiren yerlerde kullanılır.
321	Çok şiddetli korozyon şartlarına maruz kaynaklı bağlantılar, kaynatma kazanları, kübin ısıtıcılar
347	Yüksek sürtünme dayanımıyla birlikte tip 321’e benzer, uçak egzost bacaları, jet motor parçaları, kimyasal maddeler için kaynaklı tanker arabaları.

2.2.2 AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik

Temel paslanmaz çelik kalitelerinden biri olan AISI 304 paslanmaz çelik en geniş kapsamlı kullanılan çelikdir. Bu kalite paslanmaz çelik, EN normuna göre 1.4301 veya X5CrNi18-10, UNS normuna göre ise S30400 olarak isimlendirilmektedir. AISI 304 kalite paslanmaz çelik; mekanik özelliğinin, kimyasal bileşiminin, oksidasyon-korozyon direncinin, kaynak yapılabilirliğinin, fiyatına göre çok iyi olmasından dolayı tercih edilmektedir. Aynı zamanda AISI 304 kalite çeliği; kolay şekil verebilmesinden dolayı, rahat kaynak yapılabilmesi açısından ve piyasada kolay bulunabilirliği nedeniyle en sık tercih edilen çelik kalitesidir (İnt.Kyn.1).

AISI 304 paslanmaz çelikler kimya endüstrisi, medikal, havacılık sektörü, taşımacılık, gıda endüstrisi, ev aletleri, savunma sanayi, petrokimya gibi birçok sektörlerde yaygın bir şekilde kullanımlarına sahiptir (Tekaslan 2008). AISI 304 çeliğin mekanik genel özellikleri Çizelge 2.5’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.5 AISI 304 çeliğin mekanik genel özellikleri (Osmanoğlu 2012).

Mekanik Özellikler	Değerler
Çekme mukavemeti	500 -700 MPa
Akma mukavemeti (%2)	≥ 190 MPa
Sertlik, Brinell (HB)	≤ 215

AISI 304 paslanmaz çelik, korozyon ve şekillendirilebilme özelliklerinin iyi olması nedeniyle soğuk perçimlemede, bira, şarap, süt gibi içeceklerin taşınması ve depolanmasında, pencere ve kapı çerçeveleri, çatı oluklarında, soğutma kapları gibi çokça uygulamalarda yaygın şekilde kullanılır. AISI 304 paslanmaz çelik 820 °C’ye kadar oksidasyon, korozyon ve sürtünme direncine sahiptirler. Daha yüksek sıcaklıklar için AISI 304H türü çelikler, taneler arası korozyon direncini artırmak için ise, karbon miktarı azaltılmış AISI 304L tipi çelikler üretilmiştir (Kaluç 1988, Aldemir 2000).

2.2.3 AISI 316L Östenitik Paslanmaz Çelik

Düşük karbonlu paslanmaz bir çelik kalitesine sahip olan AISI 316L paslanmaz çeliği oldukça yaygın kullanılır. Bu kalite paslanmaz çelik, EN normuna göre 1.4404 veya X2CrNiMo17-12-2, UNS normuna göre ise S31603 olarak isimlendirilir. AISI 316L paslanmaz çelik, AISI 304 paslanmaz çeliğine göre daha çok Mo ve Ni içerir. Aynı zamanda AISI 316L paslanmaz çelik malzemelerinin kimyasal olarak içeriği sayesinde asidik sıvılar, deniz suyu vb. gibi koşulları sert ortamlarda bile korozyon dirençleri mükemmeldir. Kaynakla birleştirilecek parçalar, ısınmadan dolayı korozyona maruz kalırlar. Bu şekildeki durumların önüne geçmek için AISI 316 paslanmaz çelik yerine düşük karbon içeriği olan AISI 316L çeliği kullanılır. Bu yüzden AISI 316L paslanmaz çelik kalın kesitlerde ve kaynak sonrası tavlama işlemi gerektirmez (İnt.Kyn.2).

AISI 316L paslanmaz çeliğinin korozyon dayanımı AISI 316 ile aynı olduğu bilinmektedir. Kaynak ve gerilim giderme neticesinde tanecik arası korozyon dayanımı 400°C kadar yükselbilmekte, oksidasyon dayanımı ise 860°C'ye kadar iyi bir performans sergilediği belirtilmektedir. İyi şekil verme, iyi tokluk gösterme ve kaynaklanma özelliğini (-196°C)'ye kadar sağlayabilmektedir. AISI 316L paslanmaz çeliği kombi ve şofben gibi doğalgaz-LPG ile çalışan cihazların atık gaz bacalarında, şömine havalandırmalarında, baca bağlantıları ve baca kılıflarında kullanılmaktadır. Ayrıca tuzlu suya dayanıklı olduğundan gemi sanayisinde de yaygın olarak kullanılır (Töre 2007).

AISI 316L paslanmaz çeliğin kullanım alanları kimyasal içeriği ve kalitesi sayesinde çok yaygındır. Kimya ve petrokimya endüstrisi, saklama kazanları ve aşındırıcı sıvıların tanklarında, buhar kazanları, gıda tesisleri, boya endüstrisi, madencilik gibi farklı ve yaygın kullanım alanına sahiptir (İnt.Kyn.2).

2.3 İntermetalik Bileşikler

İntermetalik bileşikler diğer bir ifadeyle metaller arası bileşikler olarak adlandırılırlar. Seramikler ve metaller arasında yer alan çoğunlukla kimyasal olarak birbirine

benzemeyen iki ya da daha fazla saf metalin dar bileşim aralıklarında ve basit oranlar etrafında meydana getirdiği kristal yapıları bileşiklerdir. Metalik bağları bir malzeme sınıfı olan intermetalikler kritik düzenleme sıcaklığında uzun aralıklı düzenli kristal yapıları meydana getiren metalik karakterde bileşiklerdir. Örnek olarak ışığı yansıtıcıları ve iletken olmaları verilebilir. Stokiyometrik dağılımın dışında intermetalikleri oluşturan metallerin birbiri içinde çözünürlüğü olmayan intermetaliklerin tek fazlı üretimleri oldukça zordur. Birbiri içinde çözünürlüğü olan intermetaliklerin fazın tokluk etkisi malzemeye çok büyük fayda sağlar. Ayrıca bazı intermetalikler sadece metalik bağ ile bağlanmazlar. Örneğin NiAl intermetalik bileşiğinde hem kovalent bağ hem de metalik bağ vardır (Özdemir 2004).

İntermetalik bileşiklerin; korozyon dayanımı, kararlılığı ve mukavemeti, yüksek ergime noktası gibi özellikleri öne çıkmaktadır. Bu avantajlarından dolayı genel bir şekilde intermetalik bileşiklerden yararlanılır. Ancak bu bileşiklerin kullanımını azaltan durum gevrek karakterde olmalarıdır. Bunun nedeni çevresel faktör, deformasyon sertleşmesi, yetersiz kayma sistemi, yüzey enerjili tane sınırları gibi nedenler gösterilebilir. Gevrek özelliği yüzünden şekil verme kabiliyetleri oldukça zordur. İntermetaliklerin kullanımını azaltan diğer durumlarda düşük kırılma tokluğu, yüzey çentik hassasiyeti, aşırı yorulmadan kaynaklanan çatlak büyümesi ve düşük süneklikleri gösterilebilir. İntermetaliklerde süneklik ve tokluğu geliştirilebilmenin yolu, mukavemeti düşürmeden mikroyapısı sayesinde olur. Mikroyapısal kontrolü; tane boyutu, kristal ve çok fazlı yapı değişimi ile yapılır (Özdemir 2004).

İntermetalik bileşiklerin faydaları;

- Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet,
- Yüksek oksitlenme ve korozyon dayanımı,
- Birim yoğunluk başına yüksek mukavemet,

İntermetaliklerin dezavantajları;

- Oda sıcaklığında düşük süneklik,
- 600°C'nin üstündeki sıcaklıklarda mekanik mukavemette ani düşüş olarak bilinir (Özdemir 2004).

2.3.1 İntermetalik Bileşiklerin Kullanım Alanları

İntermetalik bileşiklerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin geliştirilmesi ile birçok uygulamalar için kullanılabileceği belirlenmiştir. İntermetalik bileşiklerin kritik özellikleriyle kimyasal ve fiziksel karakterleri arasındaki ilişki Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6 İntermetalik bileşiklerin kritik özellikleri (Özdemir 2004).

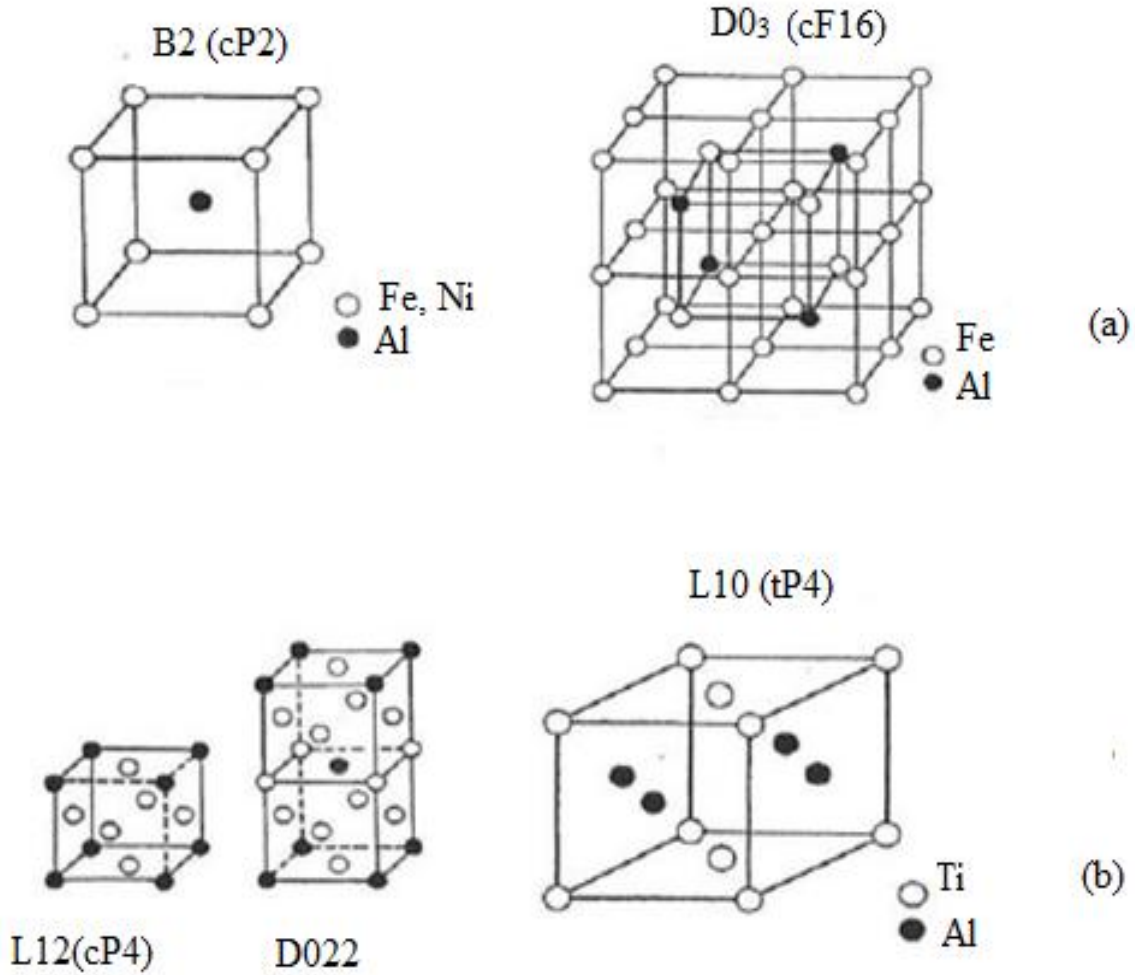
Özellik	Karakteristik Tanım
Sürtünme mukavemeti	Ergime sıcaklığı ve bağ yapısı
Oksitlenme direnci	Oksit oluşturan elementin yüksek aktivitesi
Süneklik	Kristal yapı, stokiometri
Isıl genleşme	Ergime sıcaklığı, bağ yapısı, kristal yapı
Elastik modül	Kristal yapı, bağ yapısı
Alaşımlama potansiyeli	Faz alanı genişliği
Yoğunluk	Elementler, kristal yapı

İntermetalik bileşiklerin uygulama alanları genel olarak otomotiv, uzay, magnetik enerji depolama, piller, hidrojen depolama, ısıtıcı elemanlar, fırın donanımı, takımlar ve kalıplar, aşındırıcı ortamlar, kimya endüstrisi için borular, kladlama, kaplamalar, elektronik devreler olarak sıralanabilir. (Özdemir 2004).

2.4 Alüminyum Esaslı İntermetalik Bileşikler

Alüminyum esaslı intermetaliklerden, titanyum, demir ve nikel alüminidler üzerinde son zamanlarda yapılan araştırmalarda üretim işlemleri ve alaşımlama kontrol altında tutularak mikroyapıları, kristal yapıları, tane yapıları iyileştirilerek gevreklik sorunları çözülmeye çalışılmıştır. Yeterli seviyede alüminyum içeren bileşiklerde yüzeyde, oksitleyici ortamda, koruyucu ve kompakt alümina (Al_2O_3) meydana gelir. Bu bileşikler oldukça yüksek ergime noktalı, düşük yoğunluklu, yüksek mukavemet ve korozyon dayanımı iyi olan bileşikleridir. Alüminid esaslı yapılarda atomların dağılımları Şekil 2.4'de gösterilmiştir. Burada belirtilen yapı sembolleri, günümüzdeki kullanımına göre

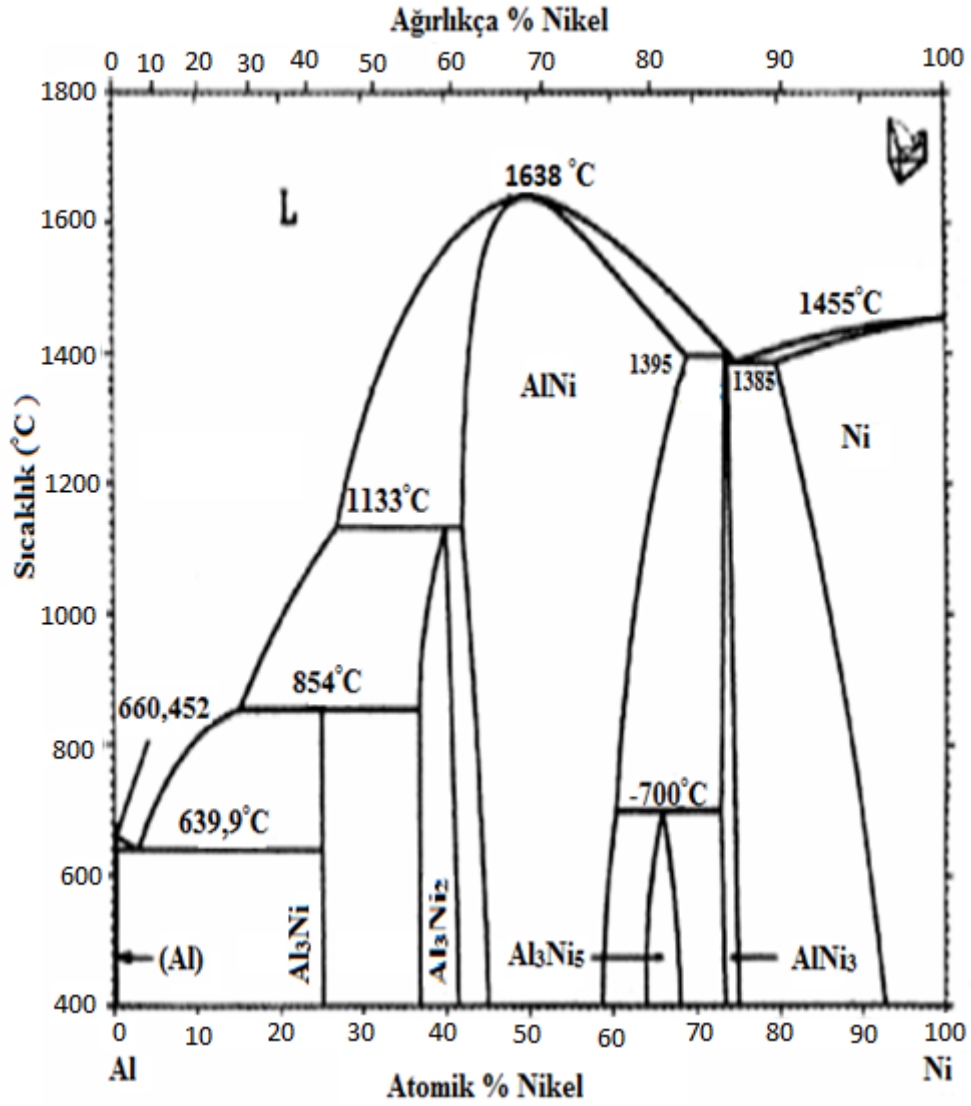
verilmiştir. Sırasıyla ilk olarak kristal yapı tipi tanımı sonrasında kristal yapıli faz formülü arkasından Pearson sembolü ve son olarak seçilen birim hücredeki atomların sayısı yazılmıştır. Şekil 2.4’de L12(CP4) yapı gösterimi, AB₃ formülüne sahip yüzey merkezli kübik yapıyı ifade eder, atomlar kafes köşelerinde ve birim hücrede dört atom içerir. L10 (tP4) ise, AB formülü ile tanımlanan tetragonal kristal yapıya sahip, atomlar kafes köşelerinde ve birim hücrede dört atom içerir. D022 yapısı geometrik sıkı paket bir yapıdır. Alüminidler genellikle belirtilen bileşim aralığının üstünde oluşur ve stokiyometriden sapma artarken düzen oranı da düşmektedir. Yapıda, ilave edilen elementler herhangi bir düzensizlik oluşturmada yerleşir (Özdemir 2004).



Şekil 2.4 a) Hacim merkezli kübik (HMK) ve b) Yüzey merkezli kübik (YMK) yapılarından türemiş bazı basit intermetalik kristal yapılar (Özdemir 2007).

2.4.1 Nikel Alüminidler

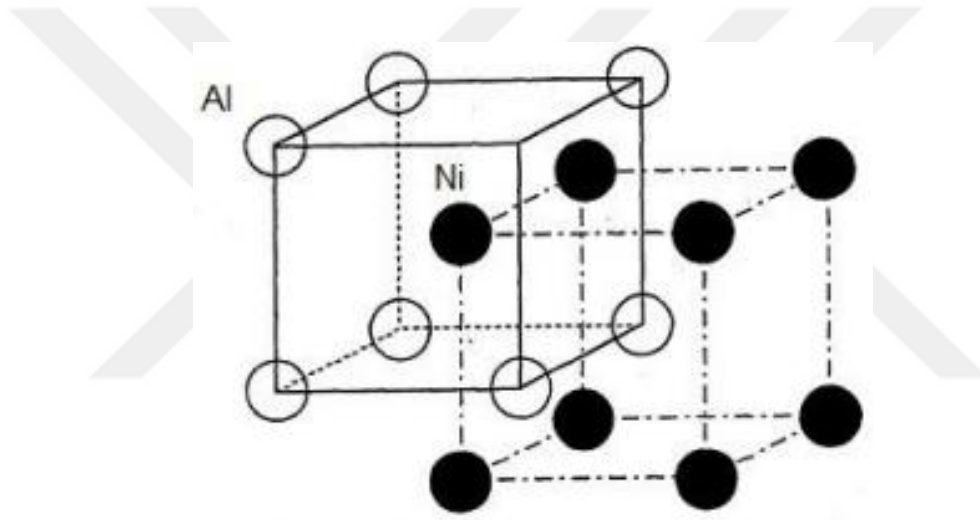
Nikel alüminidler, yüksek sıcaklıklarda oksijen içeren ortamlarda yüzeyde oluşan nikel oksit (NiO), nikel alüminat (NiAl_2O_4) ve Al_2O_3 olarak şekillenen koruyucu oksit tabakalarına, yüzey ergime derecesine ve iyi mukavet özelliklerine sahiptir. Nikel alüminidler sahip olduğu özellikler sayesinde yüksek sıcaklık uygulamaları ve kaplama işlerinde önde gelen malzemeler olarak belirlenir. Ni-Al faz diyagramında Al_3Ni_5 , Al_3Ni_2 , Al_3Ni , Ni_3Al , NiAl intermetalik bileşikleridir. Bu intermetaliklerin faz diyagramı Şekil 2.5’ de verilmiştir. Ni_3Al ve NiAl , nikel alüminidlerin en kararlı yapılarıdır (Özdemir 2004).



Şekil 2.5 Ni-Al faz diyagramı (Özdemir 2004).

2.4.1.1 NiAl Bileşiği

İntermetalik bileşiklerden en geniş gruptan biri olan NiAl bileşiği, kübik B2 yapısındadır (Şekil 2.6). İçeriğinde %50 Al bulunur ve 1640°C ergime sıcaklığına sahiptir. Stokiyometri bileşiminde yoğunluğu 5,9 g/cm³ ile Ni içeren geleneksel bileşimlerle kıyaslandığında oldukça düşük bir değerde bulunur. Bu değerin artması Al'un azalmasıyla olur. Stokiyometri bileşimindeki NiAl'un oda sıcaklığındaki Young modülü 235 GPa seviyelerindedir. Düşük sıcaklıklarda sürünme dayanımı nispeten yüksek olmasına rağmen, bu durum yüksek sıcaklıklarda doğrusal olarak hızla düşme göstermektedir (Ergin 2007).



Şekil 2.6 NiAl bileşiği kristal yapısı (İnt.Kyn.3).

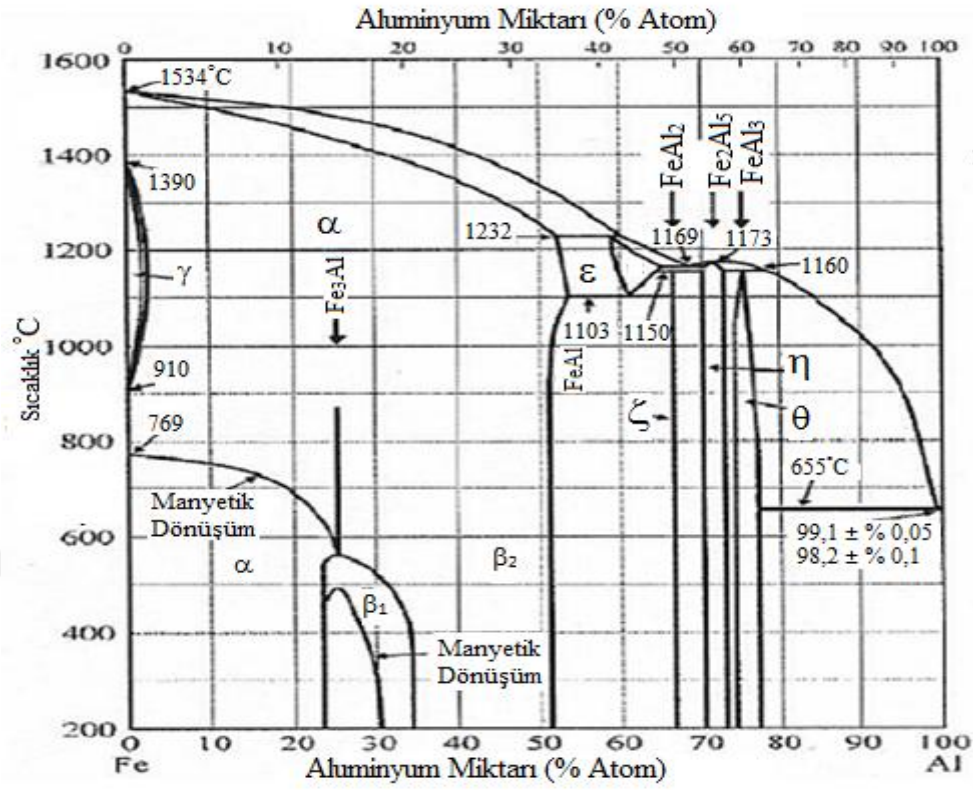
%60'dan fazla Ni içeren NiAl bileşiğinde martenzitik dönüşüm gözlenebilir. Fakat Ni₃Al ve Ni₅Al₃ ayrışması ve çökmesi durumu düşük sıcaklıklarda su verme işlemiyle, yüksek sıcaklıklarda ise tavlama işlemi ile giderilir. Bu martenzitik dönüşüm sıcaklığı, %60 Ni için 240 °C sıcaklığından, %70 Ni için ise 1000 °C sıcaklığa kadar Ni'in doymuşluğunun yükselmesi ile doğrusal olarak yükselir. Yine bu Ni oranı yüksek olan NiAl martenzitik dönüşüm, yüzeysel uygulama gerilimlerine yol açar. Yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmesi için aday olan ve diğer alüminidlerden farklı B2 yapısı ile NiAl bileşiği, oksidasyon süresince oluşan Al₂O₃ ile birlikte çok iyi oksidasyon dayanımı gösterirler. Gerçek intermetalik oksidasyon dayanımı bazı silisitlerden başka sadece NiAl bileşiğinde gözlenir. Yüksek oksidasyon dayanımının

fiziksel anlamda nedeni, içerisindeki Al oranının yüksek olmasıdır. Aynı zamanda Al difüzyonunun, iç hacim oksidasyonundan kaçınılması durumuyla ve bütün sıcaklıklarda kararlı alüminanın yüzeyde hızlı bir şekilde meydana gelmesidir. Zr, Y, Hf gibi elementlerin mikro alaşımlamasıyla oksidasyon dayanımının arttığı bilinir. NiAl bileşikler; düşük sıcaklıklarda düşük süneklik ve düşük kırılma tokluğuna sahip olmalarına rağmen düşük yoğunluk, yüksek ergime sıcaklığı, iyi ısı iletkenliği, 1300 °C'ye kadar mükemmel oksitlenme direnci sayesinde sabit kanatlar ve gaz tribün motor pervaneleri gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında aday malzeme haline gelmiştir. NiAl bileşiği kimya, plastik, gıda, ilaç ve otomotiv endüstrisi gibi uygulama alanlarına sahiptir. Ayrıca ısı bariyer kaplamalarda ve sabit kalıp yapımında kullanılmaktadır (Evcin 2006).

2.4.2 Demir Alüminidler

Demir alüminid alaşımları; yüksek mukavemete, yüksek ergime noktasına demir içeren parçalara göre daha düşük yoğunluk, yüksek sertliğe, yüksek elastik modüle, nispeten düşük malzeme maliyetine, ticari metalik alaşımlardan farklı olarak yüksek elektrik dayanımına, mükemmel korozyon ve oksitlenme dayanımına sahiptirler. Bu alaşımların zayıf noktaları ise; oda sıcaklığında düşük süneklik ve kırılma tokluğu, zor elde edilmeleri, 500-600°C seviyelerinde mukavemetin düşme durumu, rutubet olması durumunda oda sıcaklığında ve orta sıcaklıkta bölgesel gevrekleşme hassasiyeti, atmosferik su buharı ve metaller arasında hidrojenle kimyasal tepkime sonucunda gevrekleşme oluşmasıdır (Martinez vd. 2006).

Fe-Al ikili faz diyagramında bulunan intermetalik bileşikler (FeAl, Fe₃Al, FeAl₂, Fe₂Al₅, FeAl₃) Şekil 2.7'de verilmiştir. Bu intermetalik bileşikler arasında bulunan B2 yapısıyla FeAl bileşiği, DO₃ yapısıyla Fe₃Al bileşiği, Fe-Al sisteminin demirce zengin bölümünde bulunan en kararlı yapılar olarak dikkat çeker. Ayrıca elektrik, ısı, mekanik ve fiziksel yönden çekici özellikler gösterirler (Lilly vd. 1998, Martinez vd. 2006).



Şekil 2.7 Fe-Al ikili faz diyagramı (Handbook 1992).

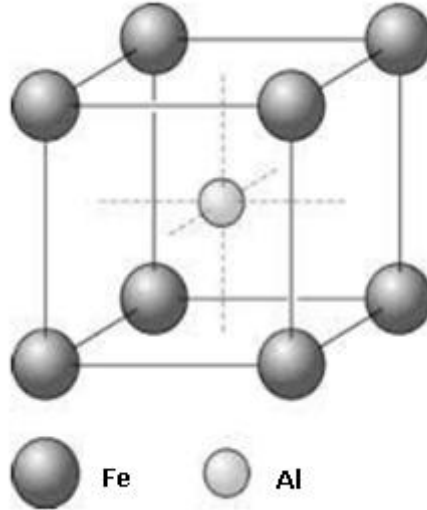
Demir alüminidler, sürünme dirençlerini belirleyen noktalar kararlı yapıda ikinci faz partikülleri ya da mevcut yapıda yer alan ince disperse hale gelmiş partiküllerdir. Bu sürünme dirençleri 500-600 °C sıcaklıkları arasında, karbür ya da çözelti ilave edilmesiyle geliştirilir (Morris vd. 2004).

Demir alüminidlerin üretim yöntemleri; mekanik alaşımlama yöntemi, haddeleme, döküm ve ergitme ya da toz metalurjisidir. Demir alüminidler döküm işleminde hidrojeni kolayca absorbe ederek gaz boşlukları meydana getirir. Eğer demir alüminidlere nemli bir havada ergitme yapılacaksa Ar ve He gibi koruyucu gaz ortamı gereklidir. Demir alüminidlere şekil verebilmek için ise ekstrüzyon ya da sıcak işlem uygulanır (Liu vd. 1998). Demir alüminidleri üretebilmek için uygulanan yöntemlerden biride basınçlı sinterleme yöntemidir. Bu yöntemde az miktarda cihaz ve malzeme kullanılır. Bununla birlikte deformasyon aşamasında işlemeye ihtiyaç duyulmaz, malzemenin son haline yakın üretim olur ve malzemede mikroyapı kontrolü sağlanır (Gedevanishvili ve Deevi 2002).

Demir alüminidler, yüzeylerinde koruyucu alümina tabakası meydana gelmesi sebebiyle oksidasyon ortamında mükemmel seviyede korozyon dayanımı gösterirler. Bu sayede demir alüminidler gaz filtreleri, kömür enerji dönüşüm sistemlerinde, korozyon dayanımını artırmada hem kaplama malzemesi hem de ara yüzey tabakasında bağlayıcı özellik göstermesi ile aranan malzemeler haline getirmiştir (Gedevanishvili ve Deevi 2002).

2.4.2.1 FeAl Bileşiği

FeAl intermetalliği verilen hacim merkezli kübik B2(cP2) kristal yapısındadır. Şekil 2.8'e göre kübün her birimi her köşede bir adet olduğundan sekiz Al atomu bulundurur. Atomun her köşesi komşusu olan sekiz birim hücre tarafından paylaşılır. Bu kısma kadar basit kübik yapıya benzeyen B2 kristal yapı iç içe geçmiş iki kübik yapıdan meydana gelir. Alt-latis olarak isimlendirilen yapının diğer bölgesindeki durumda ise Fe atomları alt birim hücrenin köşelerini oluşturur. Düzlemsel AB şeklinde dizilen yapı bileşenleridir. A atomları, birim kafes yapının hacim merkezine, B atomları da birim kafesin köşelerine konumlanırlar (Grapke 1999).



Şekil 2.8 B2 kristal yapısına ait FeAl bileşiği (İnt.Kyn.4).

Fe-Al faz diyagramına göre B2 kristal yapıya sahip FeAl intermetalliği %36-52 Al içerir ve yaygın bir intermetalik aralığında kararlıdır (Cohron vd. 1998). FeAl intermetalliği,

Fe₃Al intermetalikliğine göre daha yüksek ergime sıcaklığı, daha düşük yoğunluk, iyi korozyon ve oksidasyon dayanımı gösterir. Bunun yanında 800°C'ye kadar yüksek süneklik ve mukavemet özellikleri göstermeleri çok fayda sağlamaktadır (Liu vd. 1998). Demir esaslı alaşımlarla ve çelik ile kıyaslandığında daha iyi mukavemet-ağırlık oranına ve düşük yoğunluğa sahiptir. Bu özelliğinden dolayı FeAl intermetalik bileşiği süper alaşımlar ve paslanmaz çeliklerin kullanıldığı özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanıldığı için çokça araştırılmıştır. FeAl intermetalik bileşiği metalik ısıtma elemanları ile kıyaslandığında ise yüksek elektrik dayanımına sahip olduğu gözlenir (Jordon ve Deevi 2003).

FeAl intermetalik bileşiği; makine parçaları, ısıtma ekipmanları, yüksek sıcaklık yapı malzemeleri, gaz filtreleri, kalıp ve alet parçaları, karbürleyici çevrelerdeki endüstriyel sistemler için yapısal elemanlar, araba parçaları, yürüyen fırın kirişleri için raylar, korozyon direncini artırmak için kaplama malzemeleri gibi kullanım alanlarına sahiptir (Liu vd. 1998).

Tek kristale sahip FeAl intermetalik bileşiği, düşük sıcaklık seviyelerinde basmada, sünekliğide düşüktür. Çok kristale sahip FeAl bileşiğinin stokiyometrik alaşımındaki çekme sünekliği, hemen hemen basma sünekliği kadar düşük seviyededir. Süneklik özelliği hem azalan bir Al, hemde stokiyometrik sapma durumunun artmasıyla artış gösterir. Havada FeAl bileşiği gevrekli. Bu gevrek karakterizasyonu, Fe zenginliğinde uzama oranı %2-3'tür. Aynı zamanda stokiyometrik bileşime yakın olan bileşimlerde tüm B2, faz kararlılığı yönünde ilerler. FeAl bileşiğinin havada kırılması stokiometrinin duyarlılığı ile bağlantılıdır. Gevrekliğin bağlı olduğu durum ise FeAl bileşiğinin çatlaklarında görülen hidrojen iyonu çözülmesidir. Ayrıca bu durum artış gösteren deformasyon miktarı ile azalma gösterir. Yapıda bulunan boşlukların sertliği, akma dayanımını artmasını sağlar ama sünekliğide azalmasına neden olur. Söz konusu etkilerin azalması neticesinde FeAl kuru oksijen durumunda, kopma uzaması %18'e kadar tamamıyla sünek hale gelebilir (Metals Handbook 1990, Cohron vd. 1998).

FeAl intermetalik bileşiği, yüksek korozyon direnci, yüksek aşınma dayanımı ve iyi kaynak özellikleriyle bilinir (Metals Handbook 1990). FeAl intermetalik kırılma ve

deformasyon davranışları, belli metalurjik kurallara göre tasarım ve üretim mertebeleriyle geliştirilir. Bu kuralları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Al miktarının kontrol altında tutarak (< % 38),
- Koruyucu yüzey kaplamaları meydana getirerek,
- Tane büyüklüğü inceltirilerek,
- Yavaş soğuma ile (< 400 °C) ısı boşluk oluşumunun azaltılması,
- Faydalı olan elementlerin bileşiğe katılmasıdır.

Çizelge 2.8’de FeAl intermetalğine ilave edilen elementler ve bu elementler sayesinde gelişen özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.7 FeAl intermetalik bileşiğine ilave edilen elementler ve geliştirdiği özellikler (Liu vd. 1998).

Alaşıım Elementi	Özellikleri
Bor	Tane sınırlarını kuvvetlendirir.
Karbon	Kaynak yapılabirliğini iyileştirir ve karbürlerin oluşmasını sağlar
Zr boratları/ karbürler	Tane büyüklüğünün rafinesi ve lifli tane yapısının korunması için
Mo	Sürünme direncinin ve mukavemetinin artırılması

FeAl intermetalik bileşiği için, tanelerarası kırılma durumu, oda sıcaklığındaki düşük gerilme süneklikleri tanelerin büyüklük durumlarına bağlıdır. Bu yüzden küçük taneli ürünler çok daha iyi süneklik gösterir. Eğer belli bir bölgede kırılma olursa bu durum havadaki nem ile Al atomlarının etkileşimiyle oksit oluşumu ve hidrojen gazının oluşması kimyasal reaksiyon ile açıklanabilir. Hidrojen atomunun çatlak uçlarına girmesi, FeAl intermetalik bileşiğinde gevrekliğe neden olur. Bu lokal gevreklik FeAl intermetalik bileşiğindeki düşük süneklik ve zayıf gevrekliğin tek nedeni olmayıp, Al miktarının artması tane sınırının zayıflığına sebep olur ve gerilme sünekliğinde sınırlandırır. Aynı zamanda FeAl intermetalik bileşiğindeki ısı boşluklarda kristallografik düzlemler boyunca meydana gelen kırılmaları çoğaltır (Liu vd. 1998). Fakat bu tip ürünlerin mekanik davranışları, mikroyapı kontrolü ya da alaşımlama yoluyla geliştirilir (Martinez vd. 2006).

2.5 Elektro-Kıvılcım Biriktirme (ESD) Kaplama Yöntemi

2.5.1 ESD Yönteminin Tarihçesi

Sürtünme neticesinde oluşan elektrik yükünün boşalmasını çok eski tarihlerden beri bilinmekte ve incelenmektedir. ESD ise birbirine çok yakın mesafedeki malzemelerin arasındaki gerilim potansiyel farkının kritik değerin üzerine çıkmasıyla meydana gelir (Korkmaz 2008).

1924’de ESD işlemlerinin yüzey özellikleri üzerine etkisi ile bilinen en erken örnekler Rawdon tarafından Birleşik Devletler Standartlar Ofisin’de bulundu. Rawdon, bakır ve nikel gibi elementler benzer işlem yapıldığında sertlikleri aynı kalırken, demirin yine demir bir elektrotla kıvılcım işlemi yapıldığında daha sertleştiğini görmüştür (Johnson ve Sheldon 1986).

Rawdon’un farkettiği aynı durumu, 1957’de Welsh’de farketmiştir. Welsh, elektro kıvılcım meydana getirdiği yerdeki ortamın seçimiyle yüzey sertliğinin etkilendiğini göstermiştir. Bununla beraber Welsh, oksijen ve azot gibi bir kısım elementlerin sertlik değişimlerine faydası olduğunu tespit etmiştir (Johnson ve Sheldon 1986).

Sovyetler Birliğinde 1944’e kadar elektro-kıvılcım yöntemi ile ilgili yoğun şekilde çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemin yüzey sertleştirme özelliğini gösteren çok fazla Sovyet yayını çıkmıştır ve bu yöntem sayesinde kalıplar, torna aletleri, bıçaklar (frezeleme kesicileri, türbin bıçakları) gibi malzemelerin aşınma direncine karşı ömrünü uzatmak için uygulanan en değerli yöntemlerden biri olmuştur (Johnson ve Sheldon 1986).

Sovyetler Birliği, ESD yönteminden iyi faydalanırken, batı ülkelerin bu yöntemi keşfetmede geç kalmıştır. 1974’de Amerika Birleşik Devletleri’nde Johnson ve diğerleri nükleer reaktör kullanımlarının desteklenmesi konusunda elektro-kıvılcım kaplamalarla umut veren incelemeler gerçekleştirmiştir. Ancak bu yöntemin tamamının kabul edilebilir olması için proses kontrolü, kaplama düzeni, düzgün yüzey bitişleri, yeniden

üretilebilirlik gibi konularda geliştirilmesinin gerektiği raporlanmıştır. Fakat tam aksine gelişmemiş hatta daha da geriye gidip kötüleşme söz konusu olmuştur (Johnson ve Sheldon 1986).

2.5.2 ESD Yöntemin Çalışma Prensibi ve Uygulanması

Yıpranmış veya hasara uğramış malzemeler üzerine sert kaplamaların biriktirilmesine dair günümüzde birçok uygulama vardır. Bu uygulamalardan biride elektro kıvılcım biriktirme yöntemidir ve Resim 2.1’de gösterilmiştir.

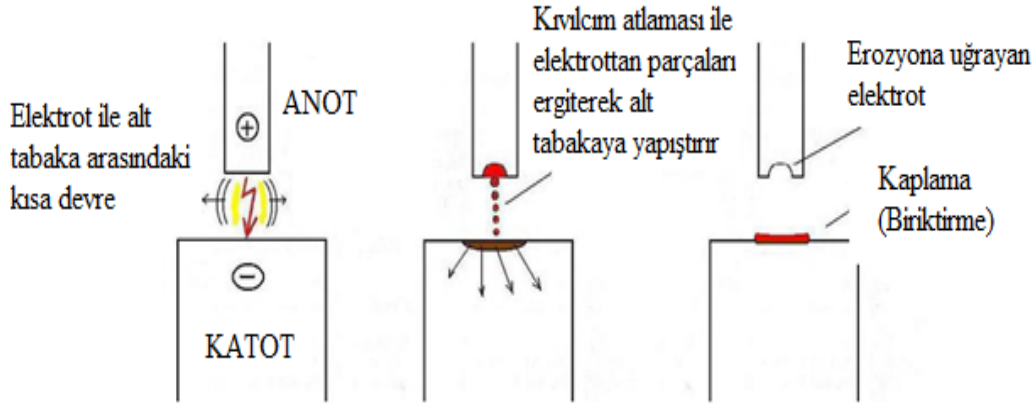


Resim 2.1 Elektro-kıvılcım biriktirme (ESD) cihazı.

Elektro-kıvılcım biriktirme, alt katmanda yer alan yumuşak bir malzeme ile daha dirençli ve sert üst tarafta yer alan bir malzemenin elektro-kıvılcım depolaması ile gerçekleşen özel çok küçük bir birleştirme işlemidir (Brown vd. 1990). Kendi çevresinde dönen ya da titreyen bir elektrot alt tabaka üzerine devamlı olarak uzunlaması yönünde hareket eder (Lensjak ve Tusek 2002). Kondansatörlerin alt tabaka ile elektrot arasında kısa devre meydana getirmesi sonucunda elektrot azalarak kıvılcım atlama işlemi gerçekleşir. Bu kısa devre sayesinde malzeme üzerine elektrot parçacıkları taşıyan kıvılcımlar atlamış olur (Johnson 2002, Tang vd. 2010). Bu uygulamalar çoğunlukla ekipman ve aletlerin uzun ömürlü olması için, kusurlu parçaları onarmak hedefiyle kullanılmaktadır (Reynolds 2003). ESD yöntemi ile alüminyum, çelik ve bakır gibi büyük çapa sahip metal malzemelerin kaynağında ve kaplamasında uygulanmaktadır (Syed 2010).

ESD yönteminde bir tane güç kaynağı vardır. Bu güç kaynağı elektrik sinyalleri oluşturarak güç kaynağında bulunan kondansatör yardımıyla kısa devre meydana gelmesi sağlanır. Güç kaynağında bulunan (-) anot çıkışı kaplanan malzemeye bağlanır. Katot (+) çıkışı ise, elektrotun olduğu yere bağlanır. Bu durumun esas hedefi kıvılcım atlama işlemidir. Bu işlem esnasında elektrotun veya alt tabakanın hareketli olması gerekir. Alt tabakanın kendi çevresinde dönmesi ya da sabit bir elektrotun titreşimiyle devamlı bir kısa devre yerine çok yoğun aralıklarla kesilen bir kısa devre meydana gelmesi gerçekleşir. Böylelikle elektrottan parçaların koparılması ve alt katmana yapışması söz konusu olur (Şekil 2.9).

Başka bir ifadeyle açıklayacak olursak; güç kaynağı bulunan kondansatörlerde depolanan elektrik enerjisi, elektrot alt katmana temas etmesiyle elektrik enerjisi alt katmana boşalır. Bu boşalma sayesinde elektrot ile alt katman arasında ark meydana gelir ve sonrasında anlık olarak sıcaklığın yükselmesine, aynı istikamette plazma kanalı meydana gelmesine neden olur. Bu yüksek sıcaklık ve ani genleşme bir vakum etkisi yaratarak eriyen elektrotu alt katmana çekerek yapıştırır. Yapışan elektrot malzemesi ile karışarak alaşımlama oluşur (Mısırlıoğlu 2006).



Şekil 2.9 ESD yönteminin uygulama şeması (Korkmaz 2008).

ESD yöntemi manuel yapılabildiği gibi günümüzde otomatik olarak da yapılabilmektedir.

2.5.3 ESD Yönteminin Avantajları

Bir kaplama işlemi olarak yaygın olarak kullanılan ESD yönteminin, diğer yüzey işlemi tekniklerine göre aşağıda belirtilen avantajları ortaya çıkarmaktadır (Yılmaz 2012). Bu avantajlar;

- Kaplama alt tabakanın bulk özelliklerini değiştirmedeği gibi alt tabakadaki hasarlar ve metalurjik değişimler en az seviyede kalır.
- Bir kısım alaşımlar amorf özellikte bir yapı sergilerken, soğumaları yüksek hızlı olduğu için nano yapılar oluşur.
- ESD kaplamalar benzer durumdaki bazı kaplama teknikleriyle karşılaştırıldığında birbiri ile kaynaşmış metalurjik yapı, yüksek mukavemetli yapışma, iyi özelliğe sahip erozyon ve aşınma durumları sergilemektedir.
- Bu yöntem mikro-ark kaynak yöntemi olmasına rağmen, her bir kıvılcımdaki enerji çok zayıf olup ya da aktarılan enerjinin az olması, alt tabaka malzeme içinde depolanan ısıyı düşük tutmasını sağlar ve bu sayede alt tabaka ortam sıcaklığında kalmış olur.
- Kaplamalar değişik kalınlıkta ve düzende meydana getirilebilir. Herhangi bir elektriksel özellikte iletken bir malzeme bir metalik alt tabaka üzerine biriktirilebilir (Yılmaz 2012).

ESD yöntemi kullanılmasıyla birlikte aynı zamanda oksitlenme azalır, korozyon dayanımı artar, aşınma, erozyon ve aşınma direncini geliştirir, bakım masrafları azalır, yüksek çalışma sıcaklıklarında termal yükler azalır ve sıcak korozyonu ya da sülfidasyonu engellenir (Başargan 2010).

2.5.4 ESD Yönteminin Kullanım Alanları

ESD yönteminin kullanım alanları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Korkmaz 2008).

- Tıp alanında ve dişçilik gibi cerrahi ve muayene gereçlerinde,
- Gemi yapımı ve karmaşık malzemelerde,
- Jeotermal sistemler, fosil enerji ortamları ve nükleer enerji ortamlarında,

- Uzay ve havacılık sektöründeki uygulamalar için yüksek sıcaklık komponentlerde,
- Metalurjik işlemler ve el gereçlerinde,
- Endüstriyel kesme aletlerinde,
- Gaz ve buhar türbin kanatçılarındaki kaplamalarda,
- Ormancılıkta uygulanan kağıt, toprak ve ağaç ürünlerini işleme aletlerinde,
- İlaç endüstrisi ve petrokimyada kullanılan sistemlerde,
- Yüksek sıcaklık sensörlerinde,
- Çok büyük ebatlardaki tekstil ve tarım aletlerinin aşınmaya dayanımlı yüzeylerinde,
- Kalıp dökümcülüğünde vs.

2.6 Korozyon

Korozyon, herhangi bir metalin bulunduğu ortam içerisinde elektrokimyasal ve kimyasal etkileşimler neticesinde bozulması şeklinde açıklanabilir. Metal ve alaşımların gaz ortam içerisinde oksitlenmesi olayına kimyasal korozyon, metal ve alaşımların sulu ortamda yükseltgenmesi olayına da elektrokimyasal korozyon olarak adlandırılır (Uysal 2006).

Metaller doğada oksitler, sülfürler gibi çok kararlı farklı bileşikler halinde bulunduklarından dolayı tekrar kendi haline dönme yatkınlığı korozyon olarak adlandırılır. Metalin bulunduğu ortam ile reaksiyonu neticesinde meydana getirdikleri bileşiklere korozyon ürünleri denir. Korozyon ürünleri şartlara bağlı olarak metal yüzeyinden çabuk uzaklaştığı gibi metal yüzeyinde de kalabilir. Eğer korozyon ürünleri yüzeyden çabuk uzaklaşırsa korozyon devam eder, eğer korozyon ürünleri yüzeyde kalması durumunda ise korozyon zamanla azalır ya da durabilir. Metal yüzeyinde kalan ve sıkı bir film oluşturan ürünler (genellikle oksitler), korozyonun belirli bir dereceye kadar korozyonu engelleyebilirler. Bu şekildeki oksitlere koruyucu metal oksitler denir. Koruyucu metal oksitler, oksidin metal ile çevresi arasına bir yalıtkan olarak girmesi sayesinde korozyonu yavaşlatır. Bu özellikten dolayı metalin korozyon hızı oksit filminin dayanımı arttıkça azalır (Üneri 1984, Roberge 1999, Eren 2005).

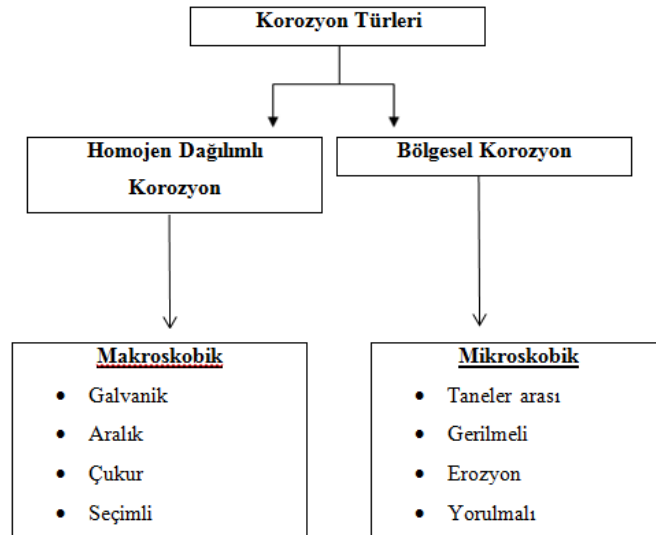
Paslanmaz çelikler, yüzeylerde bulunan oksit filmi nedeniyle korozyon dirençleri yüksek olur. Bu filmin devamlı, gözeneksiz, çözünmeyen ve kendi kendini tamir eden bir yapıya sahip olduğu bilinir. Bu yapının korozyon direnci; haddeleme, ısıt işlem, dağlama gibi gördüğü yüzey işlemleri, kaynak işlemleri, bileşimin etkisi ve imalatı ile belirlenir (Aran ve Temel 2003).

Paslanmaz çeliklerin yüzeyindeki pasif tabaka kimyasal ve mekanik etkiyle zarar görebilir. Korozyona bağlı malzemedeki hasarlar; genel korozyon, taneler arası korozyon, aralık korozyon, gerilmeli korozyon ve noktasal korozyon şeklinde oluşur (Aran ve Temel 2003).

2.6.1 Korozyon Çeşitleri

Korozyonu biçimlerine göre ayırmak gerekirse bölgesel ve homojen dağılımlı korozyon olarak iki sınıfta incelenebilir. Bölgesel korozyon mikroskobik ve makroskobik olarak iki kısma ayrılır. Paslanmaz çeliklerde en çok görülen korozyon çeşitleri Çizelge 2.9’de verilmiştir.

Çizelge 2.8 Korozyon çeşitleri (Bülbül 2009, Kayali 2011).



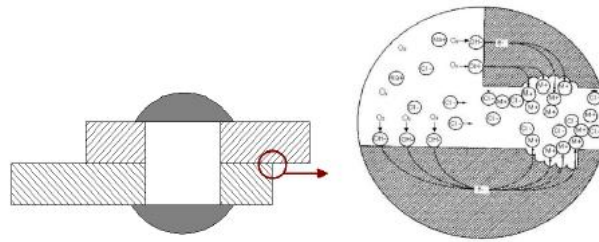
2.6.1.1 Genel Korozyon

Genel korozyon bütün yüzey üzerinde yürüyen bir korozyon türüdür. Genel korozyon asidik veya güçlü alkali çözeltilerde meydana gelir. Genel korozyona karşı dayanım çelikte krom ve molibden miktarının artırılmasıyla geliştirilebilir (Önal 1997).

Metalin yüzeyinde matlaşma veya bir renk değişimi neticesinde belli olur. Örnek olarak bakırın renginin matlaşması, demirin paslanması, nikel yüzeylerin sislenmesi, gümüş de görülen kararma bu tür korozyonlardır. Genel korozyon neticesinde yüzeyde dalgalı ve kaba bir görüntü oluşur ve zımparalama, parlatma işlemleriyle genel korozyon temizlenebilir (Çolak 2010).

2.6.1.2 Aralık Korozyonu

Farklı ya da aynı türden iki paslanmaz çelik parçanın bağlantı bölgesindeki yarıklar, aralıklar ve sıvı ile doldurulan dar aralıklarda görülen korozyon çeşitidir (Şekil 2.10). Hava ile teması güçsüz olan dar aralıklardaki belirli miktarda oksijen pasif oksit filmini onaramadığından derişim pili meydana gelir. Aynı zamanda bu bölgede korozyonu hızlandıran ürünlerin birikmesi söz konusudur. En uygun yöntem olarak bu bölgelerin sızdırmaz olarak yapılmasıdır (Aran ve Temel 2003).



Şekil 2.10 Aralık Korozyonu (Bülbül 2009).

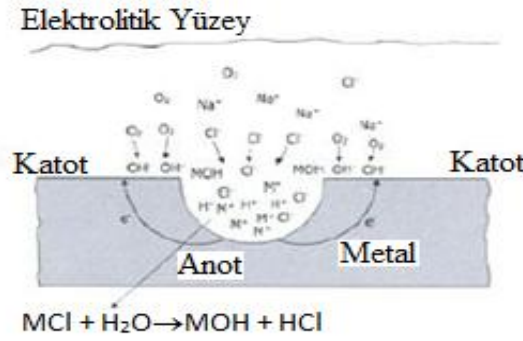
2.6.1.3 Taneler Arası Korozyon

Karbon oranı % 0,03'den büyük olan kararsız östenitik paslanmaz çeliklerde 550-850 °C sıcaklık arasında karbür çökmesi tane sınırlarında meydana gelir ve çelik taneler arası

korozyona maruz kalır. 1140-1150°C’lerde yüksek sıcaklık tavlama ile karbürleri çözülmesini sağlamak ve yeniden çökmesine izin vermeyen bir hızda soğutmak, (Nb, Ti) paslanmaz çelik kullanmak ya da karbon oranını azaltmak gibi seçeneklerle taneler arası korozyon önlenir. Taneler arası korozyon için hafif korozif ortamlarda veya atmosferik ortamlarda önlem almaya gerek yoktur (Aran ve Temel 2003).

2.6.1.4 Çukurcuk Korozyonu

Metalik malzemenin yüzeyinde lokal olan küçük bölgelerde çukurcuk şeklinde meydana gelen korozyondur (Perez 2004). Şekil 2.11’de çukurcuk oluşumu verilmiştir. Bu korozyon tipinde meydana gelen çukurlar genellikle gözle görülemeyecek küçüktür ve çukur derinlikleri çoğunlukla çapları kadardır.



Şekil 2.11 Çukurcuk korozyonu mekanizması (Roberge 1999).

Malzeme kaybı çok az olmasına rağmen, çukurcuk korozyonu en çok sorun yaratan korozyondur. Bunun sebebi ise noktaların çevresinde başlayan çatlaklar korozyonunda etkisi sayesinde hızla ilerleyerek malzemenin bir anda kırılmasına ve çok az bir sürede devre dışı kalmasına neden olur. Oluşan çukurların içi çoğunlukla korozyon ürünleri ile dolu olduğundan çukur sayısını ve derinliklerini görmek oldukça zordur (Yalçın ve Koç 1998).

2.6.1.5 Gerilmeli Korozyon

Gerilmeli korozyonun meydana gelmesi için, malzemeye basma ve çekme istikametinde gerilme uygulanıyor olmalıdır. Aynı zamanda oluşan bir çatlak başlangıcı devamında bu

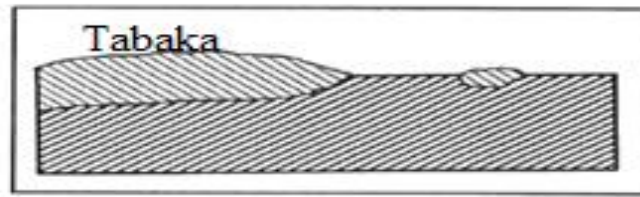
durumu destekleyici bir elektrolit yer almalıdır. Bu korozyon türünde ki çatlak elektrolit ve malzemeye göre değişkenlik göstererek tane içinde ve taneler arasında, her türlü malzemede meydana gelmektedir. Gerilmeli korozyon, aynı zamanda tanelerarası korozyonun özel bir türü olduğundan hidrojen gevrekliği de denebilir (Bülbül 2009, Çolak 2010). Duyarlı bir malzeme, zaman, çekme gerilimi ve aşağıdaki Çizelge 2.10'da görüldüğü gibi etkili ortam gibi unsurlar ile gerilmeli korozyon meydana gelir.

Çizelge 2.9 Çeşitli alaşımlarda gerilmeli korozyon çatlamasına yol açan ortamlar (Gürlek 2009).

Alaşım	Ortamlar
Yüksek dayanımlı çelikler	Klorürler
Bakır alaşımları	Amonyum iyonu, aminler
Petrol sondaj çelikleri	Hidrojen sülfür ve karbondioksit
Paslanmaz çelikler	Kaynar klorür, kaynar derişik hidroksitler
Nikel alaşımlar	Sıcak derişik hidroksitler, hidroflorik asit buharı

2.6.1.6 Seçimli Korozyon

Bir alaşımı meydana getiren elementlerden birinin korozyona karşı hassasiyeti olması durumunda oluşur. Örneğin pirinç alaşımında bulunan çinkonun bakırdan önce korozyona uğramasına seçimli korozyona uğramış denir. Şekil 2.12'de seçimli korozyon gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Seçimli korozyon.

Seçimli korozyonu engellemek için alaşım içindeki çinko oranını %15'in altına düşürülmelidir. Pirinç içerisine %1 miktar kalay eklenirse korozyon direncinde artış gözlenir. Eğer fosfor, antimon, arsenik elementlerinden az oranda eklenir ise inhibitör olarak etki gözlenir (Yalçın ve Koç 1998).

2.6.1.7 Erozyonlu Korozyon

Metal yüzeyden korozyon ürünlerinin uzaklaştırılması durumunu korozif çözeltinin akış hızı belirliyorsa, korozyonla beraber erozyonda oluşur. Böylelikle korozyon hızıda artar. Şekil 2.13’de erozyon korozyonu gösterilmiştir. Çözeltinin akışı yönünde rahatlıkla görülen dalga şeklinde oyuklar meydana gelir. Erozyonlu korozyonun durumunu belirleyen en önemli etken çözeltinin akma hızıdır. Erozyonun şiddetinin artması akma hızının artmasıyla olur. Korozyonun sebebiyet verdiği ufak bir oyuklanmanın akışın meydana getirdiği etkiyle erozyonlu korozyon durumu başlamış olur (Yalçın ve Koç 1998).



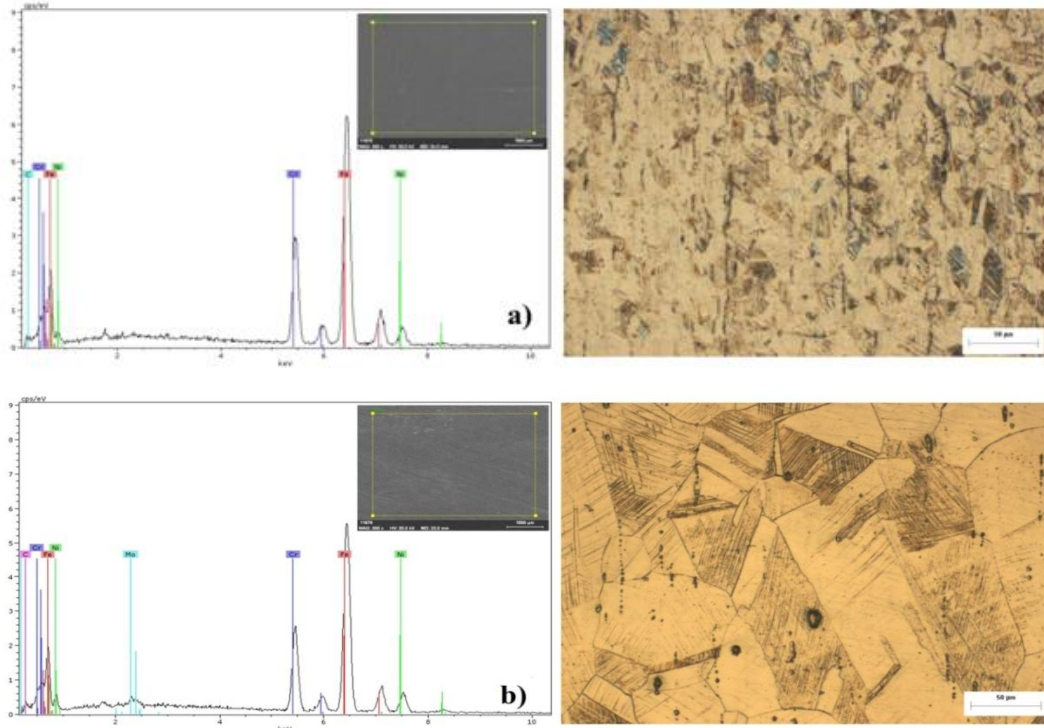
Şekil 2.13 Erozyon korozyonu.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, çalışmalarda kullanılan çelik malzemeler, deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar ve uygulama metotları hakkında bilgiler yer almıştır.

3.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda boyutları $\varnothing$ 15 mm olan AISI 304 ve AISI 316L östenitik paslanmaz çelik malzemeler ANIL PASLANMAZ ÇELİK'den temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda yer alan AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çeliklerinin mikroyapı görüntüleri Şekil 3.1'de ve kimyasal analizleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.



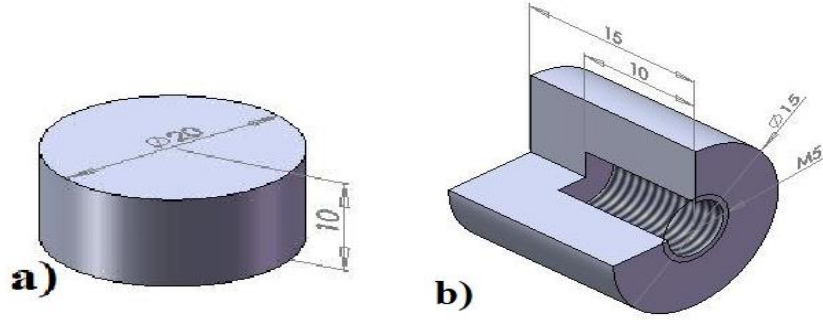
Şekil 3.1 a) AISI 304 paslanmaz çeliğin mikro yapısı, b) AISI 316L paslanmaz çeliğin mikro yapısı.

Çizelge 3.1 AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çeliklerin kimyasal analiz değerleri.

Çeliğin cinsi	Bileşim (% Ağırlıkça)										
	C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	S	P	Cu	N	Ti
AISI 304	0,05	18,02	8,02	0,368	1,413	2,11	0,003	0,025	0,34	0,054	0,008
AISI 316L	0,02	16,89	10,62	0,39	1,50	2,11	0,03	0,033	0,34	0,054	0,008

3.1.1 Deney Numuneleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplama ve korozyon numuneleri ve ebatları Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Deneylerde kullanılan a) Analiz ve b) Korozyon numunelerinin şematik gösterimi.

3.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihazlar ve Metot

3.2.1 ESD Metodu ile Malzemelerin Kaplama İşlemi

Elektro Kıvılcım Biriktirme metodu ile kaplama işlemi yapılan AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çelik malzemelerin, FeAl ve NiAl intermetalik elektrotlarla kaplama esnasında kullanılan voltaj ve frekansları Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çeliklerin FeAl ve NiAl ile ESD kaplama esnasında uygulanan voltaj ve frekanslar.

Numuneler	Elektrot	Kapasite(μ F)	Voltaj (V)	Frekans (Hz)
AISI 304	FeAl	80	70	500
AISI 304	NiAl	80	70	500
AISI 316L	FeAl	80	70	500
AISI 316L	NiAl	80	70	500

Kaplama cihazı olarak kapasitans aralığı 10 μ F ile 310 μ F aralığında, voltaj aralığı ise 30V ile 150V aralığında ve deşarj frekansı 500 Hz’e kadar çıkabilen Kanada yapımı HUYS 630 marka ESD kaplama cihazı kullanılmıştır. Bu işlem sırasında koruyucu gaz olarak argon gazı kullanılmıştır.

Kaplama işlemi için daha sabit bir temas sağlayan dönen bir aplikatör uygulayıcısı, akım geçişinin oluşabilmesi için hazırlanan deneysel düzenek ve kaplama cihazına ait görüntüler Resim 3.1’de gösterilmiştir.



Resim 3.1 a) Elektro-kıvılcım biriktirme (ESD) cihazı, b) deneyin yapılışı.

3.2.2 İntermetaliklerin Hazırlanması ve Ergitme İşlemi

Eşit atomik veya molar oranlarda hazırlanmış olan Fe ve Al kompozisyonları, hassas terazi yardımıyla tartılmış ve homojenzasyonu sağlamak amacıyla manuel olarak (el yardımı ile) 30 dakika karıştırılarak, homojenliğinden emin olunan tozlar, tabletler haline getirilmek için toz basma kalıbının içerisine konulmuştur. Toz basmak için kullanılan çelik kalıplara eklenen tozlar hidrolik pres yardımıyla 80-100 bar basınç uygulanarak 12 mm çapın da tabletler haline getirilmiştir.

Tablet haline getirilen alaşımlar Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümünde bulunan Vakum Ark Ocağında ergitme işlemine tabi tutulmuştur (Resim 3.2).



Resim 3.2 Vakum ark ocağı.

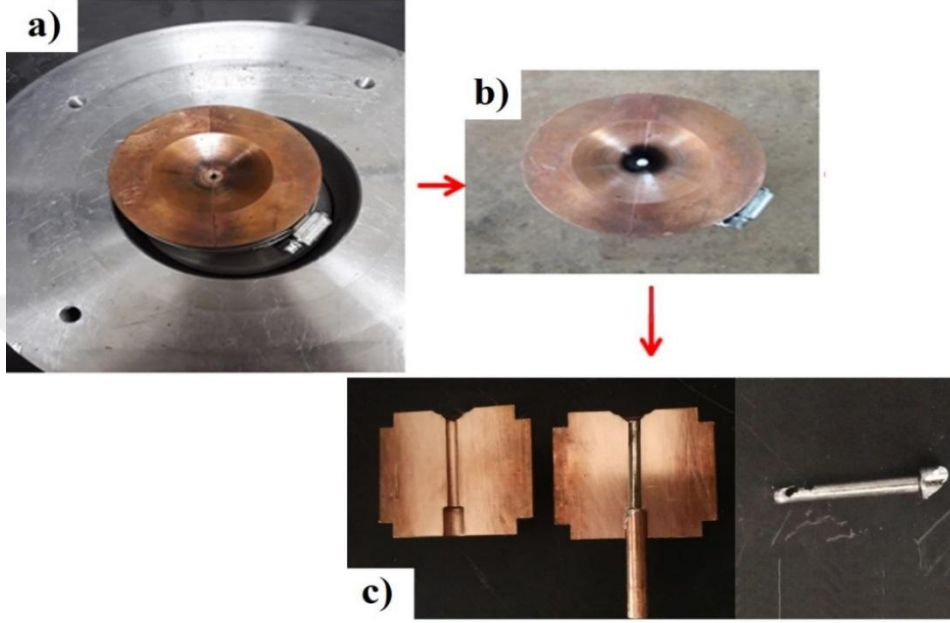
Ergitme işlemi esnasında cihaz 5×10^{-5} mbar'ın altında vakuma alınmıştır. Vakuma alma işleminin ardından, koruyucu atmosfer oluşturmak amacıyla ergitme haznesi ~ 1.4 atm basınç değerine sahip olacak şekilde yüksek saflıkta argon gazı ile doldurulmuştur. Bu sayede oksitlenme riski minimuma indirilerek güvenli bir ergitme sağlanmaya çalışılmıştır.

3.2.3 Döküm İşlemleri

İntermetalik üretiminde en çok kullanılan yöntemlerden biri emme döküm yöntemidir. Döküm işlemi için yüksek saflığa sahip bakır kalıba, istenilen çapta numune elde etmek için, belirlenen miktarda master alaşım yerleştirilmiştir. Hazırlanan numune kalıp haznesine konulduktan sonra $\sim 2.9 \times 10^{-4}$ mbar'ın altında vakuma alınmış, daha sonra hazne 1.2- 1.3 atm argon gazı ile doldurulmuştur (Resim 3.3).

Vakum ark ocağı döküm işlemine hazır hale gelmesi itibariyle numune 6 mm çapa sahip tungsten elektrod vasıtasıyla 150-160 amper şiddetinde; numune üzerinde plazma

oluşturularak ergitilmiştir. Ergitme sonucunda basınç farkı ilkesi kapsamında bakır kalıbın içine oturtulduğu 3 mm çapa sahip döküm haznesinin alt tarafında bulunan vananın açılması ile kalıba emdirilmiş, eriyiğin kalıba geçiş sağlaması ile kalıp su ile hızlı bir şekilde soğutulmuştur.



Resim 3.3 a) Bakır kalıbın ark ergitme ve döküm fırınına yerleştirilmesi, b) Döküm işlemine tabi tutulan kalıbın çıkarılması, c) 3 mm kalınlığında dökülmüş intermetalik alaşımı.

NiAl ve FeAl bileşiminde ergitilen çubuklar geleneksel olarak tam FeAl veya NiAl yapısını sağlamak amacıyla uzun süreli ısıtma işlemine maruz bırakılmamış döküldüğü durumda kullanılmıştır. Kaplama sırasında ergiyik duruma geçen çubukların atomik yapısı bozulması ile ısıtma işleminin bir faydası olmamaktadır.

3.2.4 Metalografik İşlemler

Metalografik işlemlerde öncelikle hazırlanan numuneler mikroyapı incelemeleri için kaplama yapılan numunenin ortasından kesilir. Resim 3.4’de kesitten kesim işlemini yapan 3x 380 V ve 50/60 Hz özelliklerine sahip METKON METACUT-M250 marka cihaz Resim 3.4’de gösterilmiştir.



Resim 3.4 Numune Kesme Cihazının a) dış görünüşü, b) iç görünüşü.

Kesim işleminden sonra zımpara işlemi gerçekleştirileceğinden, bu işlem sırasında numunenin daha iyi şekilde tutulabilmesi için kalıplama işlemi yapılır. Numune üzerine kalıplama malzemesi konularak, 30 kg ağırlığında en yüksek baskı 10 bar, en yüksek sıcaklık 200 °C ve toplam 0,7 kW güce sahip EVOLUTION REMET IPA 30 marka kalıplama cihazı ile kalıplama işlemi gerçekleştirilir. Resim 3.5'te numune kalıplama cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.5 Numune Kalıplama Cihazı.

Hazırlanan numuneler mikro yapıları incelenmesi için önce zımparalama, daha sonra parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Zımpara işlemlerine, ilk önce 120 numaralı zımparayla başlanmış daha sonra sırasıyla, 240, 320, 400, 600, 800, 1000,1200 numaralı zımparalar ile devam edildi ve sonrasında parlatma işlemleri yapıldı. Bu işlemler, METKON marka, Gripon 2V model zımpara cihazı ile gerçekleştirildi. Resim 3.6’da zımpara cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.6 Zımpara ve Parlatma cihazı.

Zımparalama ve parlatma işlemleri yapıldıktan sonra parçaların dağlama işlemlerine geçilir. Parlatılan yüzeyler bir birim HNO_3 , bir birim HCl ve bir birim saf su olan paslanmaz çelik dağlayıcısı ile dağlanır.

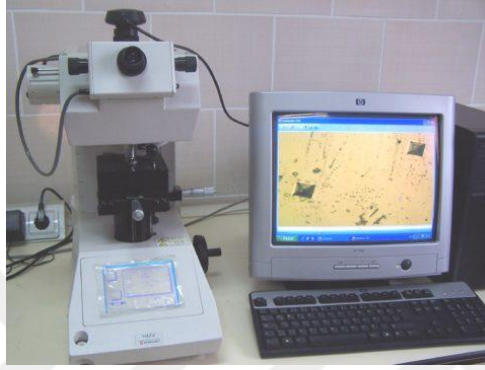
Mikro yapılar aynı şekilde LEO 1430 VP marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca aynı mikroskoba takılı optik mikrometre sayesinde tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Bu tabaka kalınlıkları numunenin yüzeyinden yapılan yaklaşık 15 ölçümün ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Resim 3.8’de SEM cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.7 Taramalı elektron mikroskobu.

3.2.5 Mikro Sertlik Ölçümü

Parçaların yüzeylerinde bulunan kaplamaların sertlik ölçümleri, SHIMADZU HMV-2L ASSY model sertlik cihazı yardımıyla yüzeyden 100 gr yük altında Vickers uç uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış numunelerin yüzeyinden 10 ölçüm alınarak ortalamaları tespit edilmiştir. Resim 3.9’da sertlik cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.8 MikroSertlik cihazı.

3.2.6 XRD (X-Işınları Difraksiyon Analizi)

XRD ile yapılan analiz, ESD yöntemi ile yüzeyde meydana gelen kaplama tabakasının karakterizasyonu için uygulanmıştır. Parçaların XRD analizleri, 20° ile 90° arasında, SHIMADZU marka X- 6000 model cihaz, bakır (Cu) X-ışını tüpüne sahip $1,544 \text{ \AA}$ dalga boyuyla bakır K_{α} radyasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Resim 3.10’da "X-Işınları Difraksiyon Analiz" cihazı gösterilmiştir.



Resim 3.9 X-Işınları Difraksiyon Cihazı.

3.2.7 Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Yüzey İşlemler laboratuvarında bulunan ve Echem Analyst Soft Programı yardımıyla desteklenen Gamry Reference 600 Potansiyotat/Galvanostat cihazında, elektrokimyasal deney yapılmıştır. Akım-potansiyel eğrilerinin bulunmasında kullanılan elektrokimyasal korozyon sistemi Resim 3.11’de gösterilmiştir. Elektrokimyasal korozyon deneyine başlamadan önce ilk olarak 30 °C’ de onbeş dakika aseton, sonra onbeş dakika etil alkol ve sonrasında onbeş dakika çift distile edilmiş suda ultrasonik olarak temiz hale getirilen parçalar son olarak 40 °C’de etüv fırınında kurutma işlemine tabi tutulmuştur.



Resim 3.10 Elektrokimyasal korozyon a) Deney düzeneği, b) Deney hücresi.

Temizlenen parçalar %3,5 NaCl çözeltisinde bir saat bekletilmiştir. Aynı çözeltilerde daha sonra 20 °C’de potansiyodinamik korozyon deneyleri başlatılmıştır. Meydana gelen akım yoğunluğu-potansiyel eğrilerinden korozyon hızı, korozyon akımı (I_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}), polarizasyon direnci (R_p), % inhibisyon değerleri elde hesaplanmıştır. Korozyon akımının yüzey alanına bölünerek korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) elde edilmiştir. Her işlem için beş deney yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. % İnhibisyon değerleri, i_{corr} değerleri kullanılarak aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\% \text{ İnhibisyon} = \left[1 - \frac{i_{corr}(\text{Kaplama})}{i_{corr}(\text{Kaplama})} \right] \times 100 \quad (3.1)$$

3.2.8 Yüzey ve Yapı Analizleri

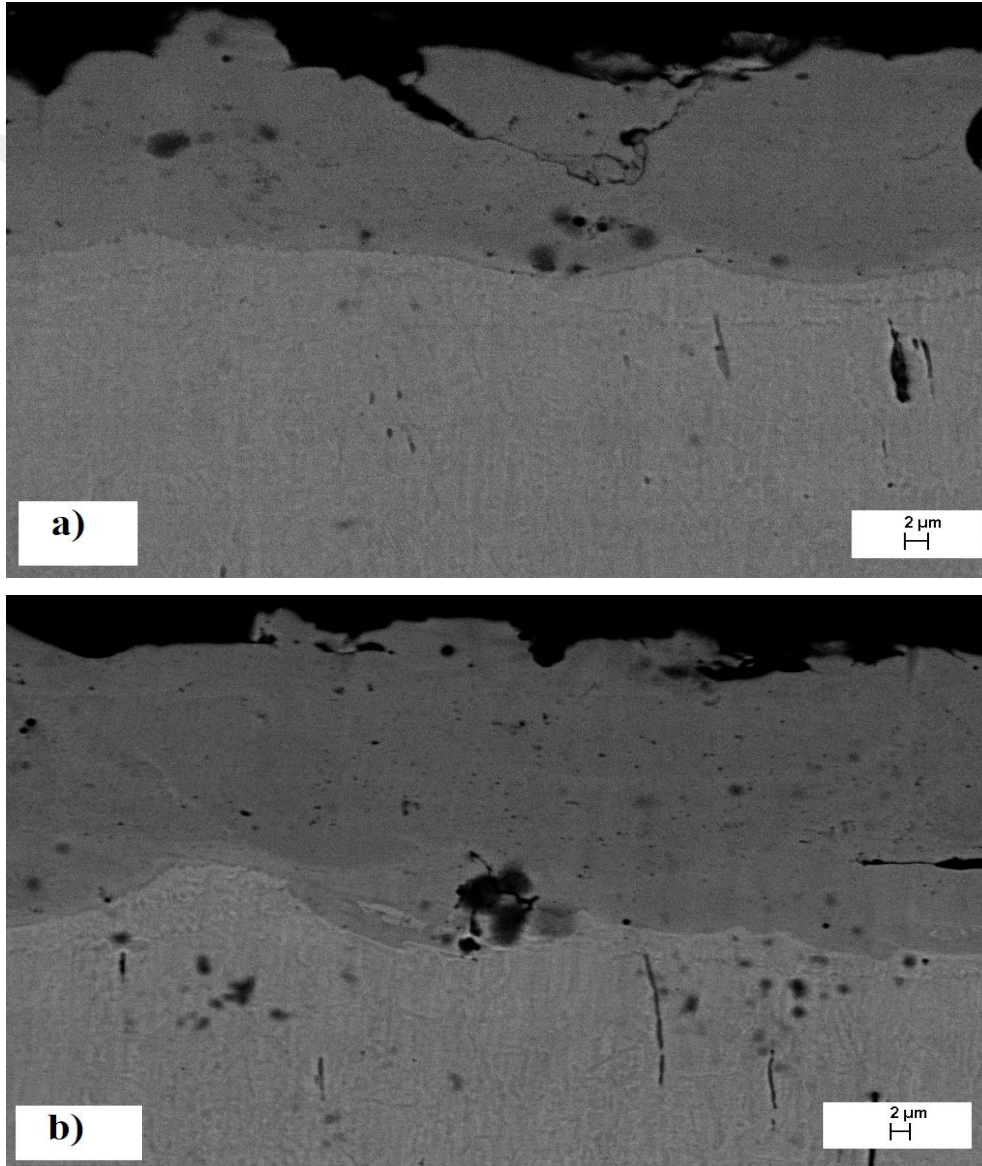
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan LEO 1430 VP marka taramalı elektron mikroskopunda, korozyon deneyleri sonrası SEM görüntüleri çekilmiştir. Yine aynı taramalı elektron mikroskobuna bağlı RÖNTEC EDX cihazı ve QUANTAX SOFT programı uygulanarak EDX analizleri çıkartılmıştır.



4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Tabaka Karakterizasyonu

Şekil 4.1’de AISI 304 paslanmaz çeliğinin ESD yöntemi ile FeAl ve NiAl intermetalik bileşikleri ile kaplanması sonucu oluşan kaplamanın kesit SEM görüntüleri verilmektedir.

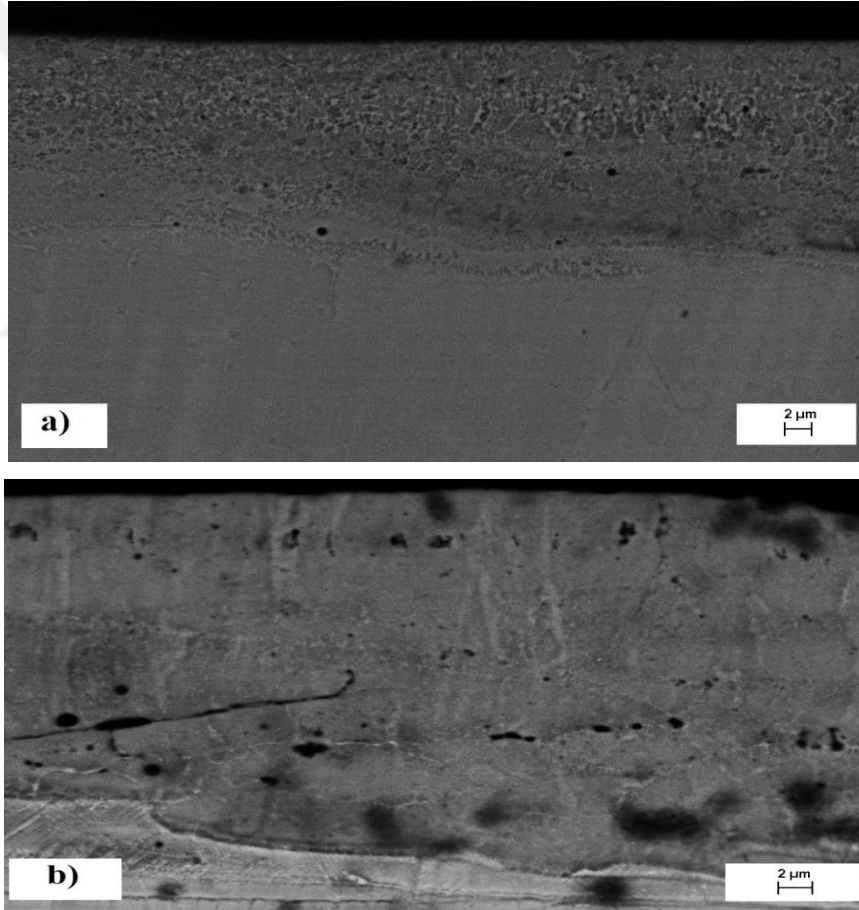


Şekil 4.1 AISI 304 paslanmaz çeliğin üzerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların SEM resimleri.

Her iki kaplamanın daha koyu bir renk alması ile beraber daha düşük bir atom numarasına sahip element ile kaplandığı yani Al içerdiği anlaşılmaktadır. AISI 304 paslanmaz çeliği yüksek miktarda Cr içermesi ve aynı zamanda %8 Ni içermesi ile beraber östenitik bir yapıdadır. Her iki kaplamanın altlık malzeme ile rahatlıkla karıştığı ve özellikle ana metal ile kaplama arasında küçük bir ısı etkili bölge (HAZ) oluştuğu gözlenmektedir. Ancak bu bölge, FeAl kaplama ile AISI 304 paslanmaz çelik arayüzeyi çok daha dar iken NiAl ile olan arayüzeyin daha kalın olduğu fark edilmektedir (Şekil 4.1a, b). AISI 304 paslanmaz çelikte bulunan Ni (Çizelge 3.1) ile kaplamadan gelen Ni birleşerek arayüzeyde daha fazla Ni oluşmasına neden olmuştur. Kaplama katmanları arasında az da olsa süreksizlikler mevcuttur. Bu süreksizlik iki katman arasında yığılma hatası olarak tanımlanır ve bazı durumlarda, Şekil 4.1a'da görüldüğü gibi, oksidasyon ve/veya genleşme katsayılarının uyumsuzluğu nedeniyle, çatlamlar meydana gelmesine neden olur (Horie vd. 2010, Ebhota ve Jen 2018). Oluşan bu çatlaklar arasına giren Cl^- iyonları, kaplamada bulunan Fe ve Al ile çözünür klorür tuzları uzaklaştırarak korozyonun artmasına neden olur. Ayrıca küçük çatlakta başlayan korozyon küçük anot büyük katot geometrik etkisinden dolayı malzemeyi çok hızlı bir şekilde korozyona uğrattır. Şekil 4.1b'de AlNi kaplama ile altlığın birleştiği bölgede (siyah küçük bölge) ESD yönteminden kaynaklanmaktadır. ESD ile kaplama uygulanırken bazı bölgelerde AISI 304 paslanmaz çelik eriyerek kaplamanın daha kolay yapışmasını sağlar. Şekil 4.1'a ve Şekil 4.1b'de kaplamalar içinde görülen siyah noktalar gözenekleri temsil etmektedir.

AISI 316L'de, Ni miktarı AISI 304'e göre daha fazla olup, Mo miktarı AISI 304'den iki kat fazladır. Ağırlıkça %2 Mo içermesi nedeniyle AISI 316L paslanmaz çeliğin karbür yapma eğilimi AISI 304 çeliğe göre daha fazla olacaktır. Ancak Mo, Cr elementinden daha fazla karbür yapıcı özellikte olduğu için, tercihli olarak Mo_xC_y karbürleri oluşma ihtimali daha yüksektir. Buna karşın, AISI 316 paslanmaz çelik yapısında bulunan C miktarı daha az olduğu için bu risk minimum düzeydedir. AISI 304 paslanmaz çeliğin SEM görüntülerinde (Şekil 4.1a) olduğu gibi, AISI 316L paslanmaz çeliğinin kaplanması sırasında da boşluklar oluşmuş ve hatta NiAl kaplı AISI 316L paslanmaz çelikte en alta açık gri renkli bir bölge oluştuğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak kesit alanında büyük bir çatlak ve irili ufaklı gözenekler oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 4.2b).

AISI 316L paslanmaz çeliğinin ESD yöntemi ile FeAl ve NiAl intermetalik bileşikleri ile kaplı SEM kesit alanları Şekil 4.2’de verilmektedir. Şekil 4.2’a ve Şekil 4.2b’de üç bölge olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.2a’da bu bölgeler üstten altta doğru FeAl intermetalik kaplama-arayüzey ve AISI 316L paslanmaz çelik şeklindedir. Her katman oluşumunda bir önceki katman üzerindeki eriyik olarak dökülen damlanın hava ile teması sonucu Şekil 4.2a’da görüntülendiği gibi, ESD ile yığılmış tabakada tane incelmeye benzeyen yapılar oluşmasına neden olmuştur. Bu oluşumlar, metalurjik olarak, ana altlık malzeme ile karışımın birleşmesi sonucu, hızlı katılaştıran üst yüzeylerde eşkenarlı dendritik yapı oluşturmaya neticesindedir (Yamada vd. 1990, Fukumoto ve Kurz 1999).



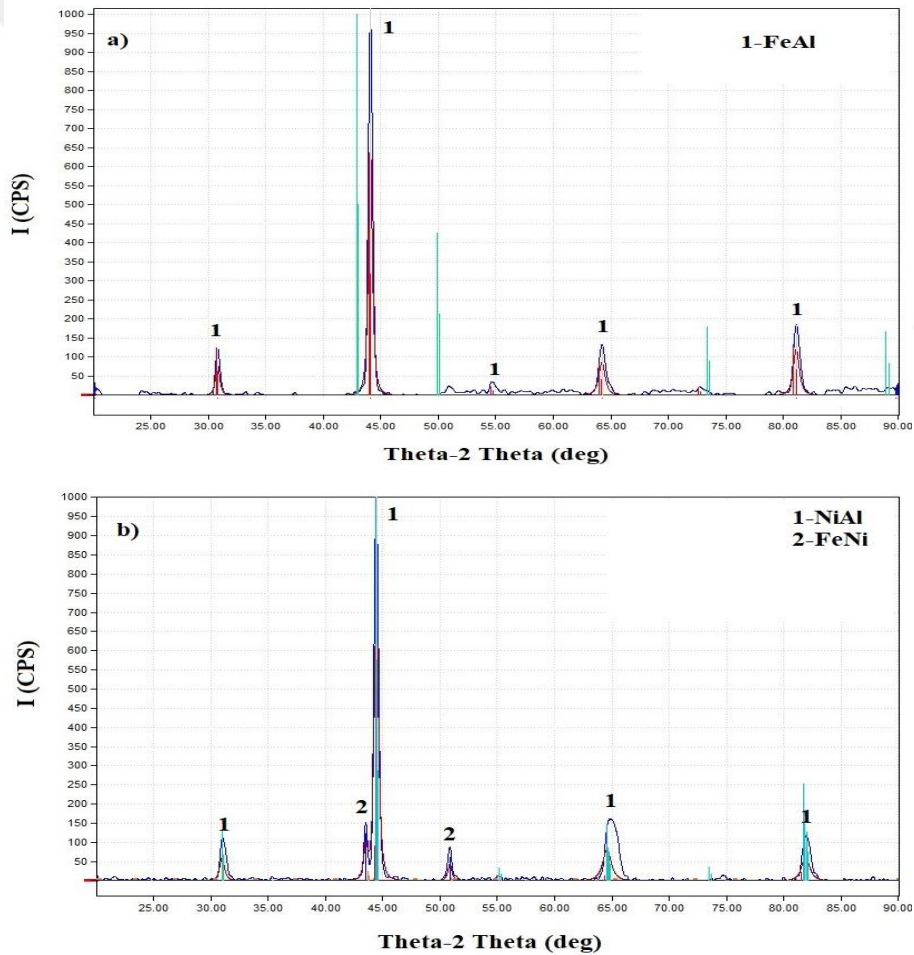
Şekil 4.2 AISI 316L paslanmaz çeliğin üzerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların SEM resimleri.

AISI 316L paslanmaz çeliğinin, FeNi ile alaşımlandırılmasıyla birbiri içerisinde yeterince iyi çözünürlük aralığı olan (%8 civarında) Fe ve Ni’nin katılma sırasında

Ni'ce zengin faz oluşturmasının sonucu olarak ve Al'un ferrit yapıcı etkisi ile östenit ferrit dengesinin sağlanır. Oluşan denge FeNi yapısının azalması ile sonuçlanan bu davranışın etkisi segregasyon veya dendritik ayrışmadır. Kristalografik oluşumlarda bunu desteklemektedir (Fukumoto vd. 2000). Arayüzeylerin çizgisel formunu koruduğu ve çok küçük bir geçiş bölgesi oluştuğu görülmektedir (şekil 4.2b).

4.2. X-Işınları Analizi

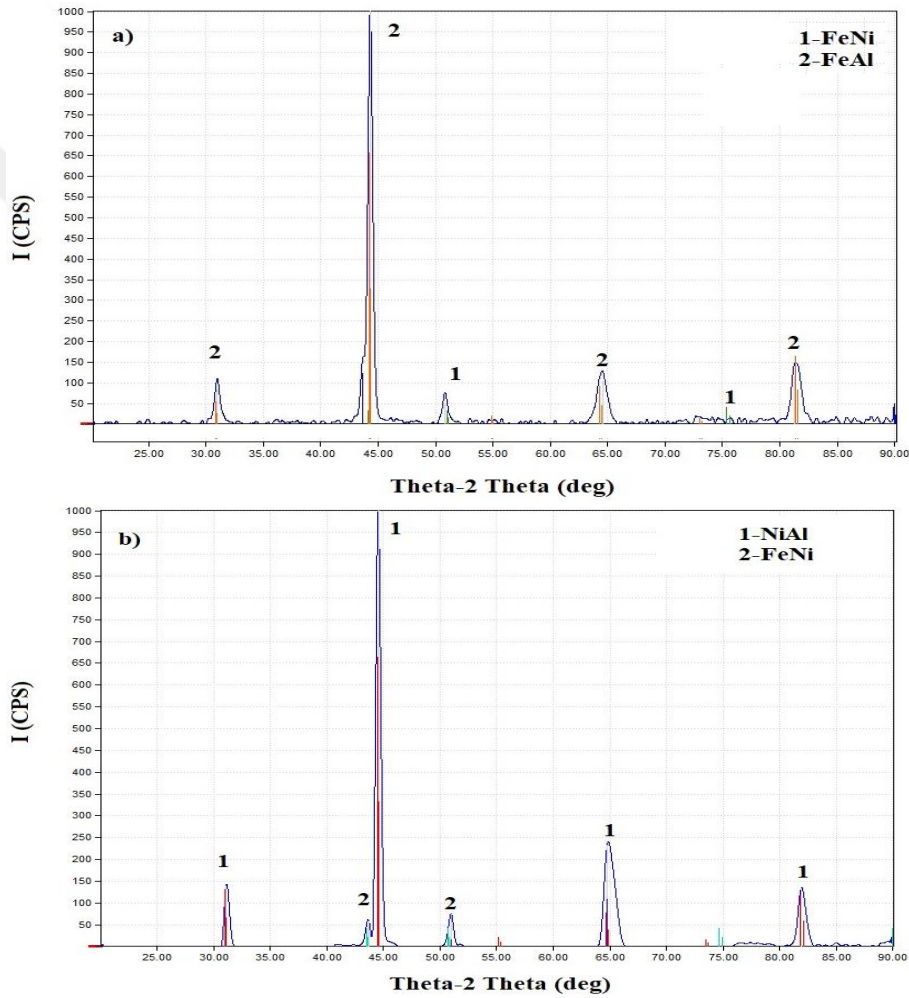
AISI 304 ve AISI 316 L paslanmaz çeliklerin üzerine yapılan FeAl ve NiAl kaplamaların XRD analiz sonuçları şekil 4.3 ve şekil 4.4'de verilmiştir.



şekil 4.3 AISI 304 paslanmaz çeliğin zerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların XRD analizleri.

FeAl ile yapılan kaplamaların XRD analizinde (şekil 4.3a) FeAl intermetalik ile

beraber, Fe hacim merkezli kübik (HMK) yapısında ortaya çıkmaktadır. Bu tür bir oluşum iyi bir karışımda ortaya çıkabilmektedir. Altlık malzemenin yüksek miktarda Cr içermesi ve kaplama bölgesinin Cr eşdeğerinin yüksek olması nedeniyle, ferritik yapıya sahip olduğu düşünüldüğünde, yapıda Ferrit yani HMK yapısının ortaya çıkması beklenmelidir. NiAl ile yapılan kaplamada ise, Ni miktarının artması ile beraber, kaplamadaki Ni miktarı artmakta ve altlık malzemeden geldiği düşünülen Fe ile Ni birleşmesi sonucu FeNi fazının ortaya çıktığı düşünülmektedir (Şekil 4.3b).



Şekil 4.4 AISI 316L paslanmaz çeliğin üzerine ESD yöntemi ile a) FeAl, b) NiAl intermetalik kaplamaların XRD analizleri.

FeNi fazı YMK kafes yapısına sahip olduğu için 45 theta açısında (111) düzlem pikini, 55 theta açısında ise (200) pikini ve 75 theta açısında ise (220) pikini vermektedir. Benzer şekilde, FeAl pikleri ise, süperyapı olduğu için normal HMK piklerine ilave

olarak 30 theta açısı civarında pik vermektedir. Süperyapı veya intermetalik yapılardaki bu yapılarda, tercihli yönlenme olması kafes noktası işgali nedeniyle, rastgele kafes işgali veya dağılımı durumunda üretilemeyen pikler, bu tür tercihli yapılarda rahatlıkla üretilmektedir. Sürekli olarak Al tarafından işgal edilen HMK yapısındaki FeAl kafesinin hacim atomu, köşelerde bulunan Fe atomlarının lorent çarpım katsayısı ve yapısal faktör çarpan değerlerinin değişmesi bu tür ilave piklerin ortaya çıktığı bilinmektedir.

AISI 316 L paslanmaz çeliğinin östenitik olması sebebiyle, YMK yapısının oluşumu daha kolay olmaktadır. FeNi yapısı YMK kafes yapısında olduğu için tahminen AISI 316 paslanmaz çeliğin kafes piklerinin aynısını vermektedir. FeNi yapısı, paslanmaz çelikte bulunan Ni'in demir içerisinde çözünmesi ile elde edilmiş katı çözeltiye denk gelen yapıdır. (Şekil 4.4) Gerek AISI 304 paslanmaz çeliği ve gerekse AISI 316 L paslanmaz çeliği altlık kullanılarak kaplama yapılması sonucunda, ergime ve akabinde ortaya çıkan yapıların birbiri ile çok büyük benzerlik taşıdığı, AISI 304 paslanmaz çeliğinin üzerine yapılan FeAl kaplamanın alttaki FeNi yapısının ortaya çıkmasına engel olduğu görülmektedir (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).

4.3. Sertlik ve Tabaka Kalınlıkları Analizi

İşlem görmemiş AISI 316L paslanmaz çeliğine ait sertlik değeri ve kaplamasız AISI 304 paslanmaz çeliğine ait sertlik değerleri yanında NiAl ve FeAl kaplamalı çeliklerin sertlik değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Tabaka Kalınlığı ve Sertlik Değerleri.

Numuneler	Sertlik (HV _{0.1})	Tabaka Kalınlığı (μm)	Numuneler	Sertlik (HV _{0.1})	Tabaka Kalınlığı (μm)
İşlemsiz AISI 316 L SS	195	-	İşlemsiz AISI 304 SS	200	-
FeAl Kaplı AISI 316 L SS	554	26	FeAl Kaplı AISI 304 SS	543	23
NiAl Kaplı AISI 316 L SS	482	29	NiAl Kaplı AISI 304 SS	475	29

Altlık malzemelerin yüksek miktarda Ni içermesi nedeniyle ve dolayısıyla östenitik yapıda olması nedeniyle sertlik değerleri düşüktür. Her iki serideki sertlik farklılıkları Ni miktarının değişiminden kaynaklanmaktadır. FeAl ve NiAl gibi B2 yapısındaki

sistemlerde sertlik değerleri oldukça iyi bir şekilde araştırılmıştır (Shu vd. 2001). Yüksek sıcaklıklardan yapılan hızlı soğutmalarda ısıl latis boşluklarının ortaya çıktığı bilinmektedir.

Isıl latis boşlukları intermetalik harici malzemelerde de rahatlıkla çıkmakla beraber yoğunlukları intermetaliklere göre daha fazla olup etkisi daha az olmaktadır. Bunun sebebi, ısıl latis boşluklarının boşluk değişim prensibine dayalı olmasıdır. Atomlar rahatlıkla ısıl etki altında yerdeğiştirmek için yeterince itici kuvvete ısı vasıtasıyla ulaşırken, intermetalik malzemelerde bu etki, atomların belirli pozisyonları işgal etmesi nedeniyle ve akabinde, daha düşük serbest enerji değerine ulaşması nedeniyle daha zordur.

Ancak, boşluklar oluşuktan sonra daha sert değişimler beklenir. Bu etki, NiAl sistemlerde daha az iken, FeAl sistemlerde, boşluk miktarına daha duyarlı olduğu için sertlik değerleri daha yüksek çıkmaktadır. Isıl işlem görmüş FeAl nin fırında soğutulması dahi boşluk miktarının korumasına ve devamında hem elektriksel direncin ve hem de matris sertliğinin artmasına sebep olmaktadır (Kong ve Munroe 1993, Fu ve Zou 1996, Shu vd. 2001). Buna karşılık NiAl boşluk hatalarının her ikisini göstermesi açısından daha farklıdır.

4.4. Elektrokimyasal Korozyon Sonuçları

Kaplanmış ve kaplanmamış AISI 304 paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme süresi sonucunda Tafel ve Lineer polarizasyon yöntemi ile elde edilen korozyon karakteristikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 paslanmaz çeliklerin %3,5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri.

%3, 5 NaCl çözeltide	Ecorr. (mV)	Icorr. ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Rp (k Ω)	Korozyon Hızı (mpy)	% Inhibisyon
İşlemsiz AISI 304 SS	-582	6,640	2,842	2553×10^{-3}	-
FeAl Kaplı AISI 304 SS	-432	3,740	3,744	2185×10^{-3}	44
NiAl Kaplı AISI 304 SS	-267	0,648	181,9	$180,2 \times 10^{-3}$	90

Çizelge 4.2 incelendiğinde ESD ile FeAl ve NiAl kaplanmış numuneler %3,5 NaCl ortamında 1 saat bekletme süresi sonrasında polarizasyon akım yoğunluk (i_{corr}) değerleri azalmıştır. Polarizasyon akım yoğunluğu değerleri kaplanmamış durumda $6.640 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ iken, FeAl kaplanmış AISI 304 paslanmaz çelikte $3,740 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, NiAl kaplanmış AISI 304 paslanmaz çelikte ise $0,648$ 'e $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ kadar düşmüştür. Kapanmamış AISI 304 paslanmaz çelik numune %3,5 NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme süresinde E_{corr} Değer -582 mV gibi daha negatif iken FeAl ve NiAl kaplı örneklerde E_{corr} değerleri daha pozitif potansiyellere kaymıştır. Bu pozitif potansiyel kayması, çeliğin çözünerek oksit oluşturduğu ve oluşan oksit tabakasının yüzeyde pasif bir film oluşturarak E_{corr} değerlerini pozitif yöne kaydırıldığını düşündürmektedir (Kayali 2011). Kaplamasız AISI 304 paslanmaz çeliğin E_{corr} değerinin bu kadar negatif yönde yüksek olması, korozyon hızı değerlerinin yüksek olmasıyla uyumludur. NaCl ortamı nötr bir ortam olduğundan, nötr ortamlarda anodik reaksiyon metal iyonunun yükseltgenmesi;



Katodik reaksiyonlar ise;

- Nötr ve alkali ortamlarda ise, suyun indirgenmesi,



- Ya da oksijen indirgenmesi;



şeklinde gerçekleşir.

Meydana gelen OH^- iyonları yüzeyde mevcut olan metallerle, oksit ve hidroksitleri oluşturarak metalin yüzeyini kaplar ve korozyon direncinin artmasına sebep olur (Üneri 1998, Kayali 2011).

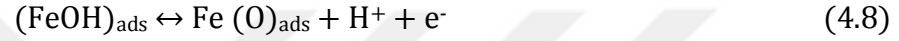
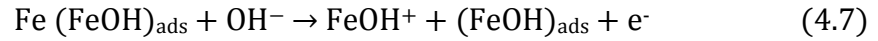
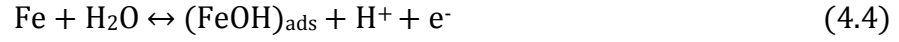
Ayrıca FeAl kaplanmış numunelerin korozyon hızı değerlerinin yüksek olması, korozyon dirençlerinin düşük olmasının en önemli sebeplerinden birinin tabaka boyunca

oluşan fazların termal gerilme farklılıklarından oluşan mikro ve makro çatlaklardır (Campos vd. 2006). Ayrıca Al'ün standart potansiyeli (-1,706 V) olduğundan daha çabuk iyonlaşmakta ve NaCl ortamında çözünür $AlCl_3$ tuzları oluşturarak kaplama yüzeyinde çukur korozyonunun artmasına neden olmaktadır. Kaplamada bulunan çatlaklar ve gözenekler bunun oluşumunu desteklemektedir. Ni, Al ve Fe'e göre daha soy potansiyel değerine sahiptir. Bu nedenle NiAl kaplamaların korozyon hızları daha düşüktür. ESD ile kaplanmış FeAl ve NiAl kaplamaların polarizasyon dirençleri (R_p) kaplama kalitesinin artmasıyla artmakta ve i_{corr} değerleriyle uyumludur (Frangini ve Masci 2004). Şekil 4.1'de görüldüğü gibi FeAl intermetalik kaplamalarda çatlaklar net olarak görünmektedir. AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyine yapılan kaplamalarda en iyi korozyon direncinin ve en az korozyon hızının gösterdiği NiAl intermetalik kaplamalarda, kaplama tabakasında mikro ve makro çatlakların olmadığı Şekil 4.1b'de net olarak görülmektedir. İşlemsiz AISI 304 paslanmaz çeliğin korozyon direnci, alümina oluşturan malzemelerden yaklaşık 60 kat daha düşüktür. FeAl intermetalik kaplamalarda % inhibisyon değerleri %44 oranındadır. Bu değer NiAl intermetalik kaplamalarda %90'dır.

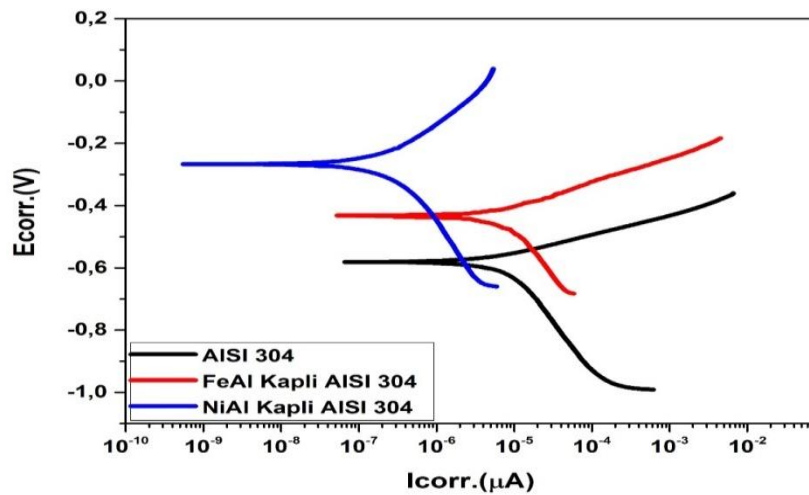
Kaplanmış ve kaplanmamış AISI 304 paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme süresi sonucunda elde edilen Tafel eğrileri Şekil 4.5'de verilmiştir. Kaplamasız ve kaplamalı Tafel eğrilerinin benzer yapıda olduğu, aynı mekanizmayı gösterdiği söylenebilir.

Demirin çözünme mekanizması dört farklı şekilde olur. Bunlar sırasıyla potansiyel ve elektrolit bileşimine bağlı olan, ilgili reaksiyonların doğası ve kinetiği tarafından belirlenen aktif, pasif, transpasif ve parlaklık durumlarıdır. Yüzey yapısı ve morfolojisini, tutunma ve basamak atomları, kenarlardaki atomlar, dislokasyonlar, tane sınırları, köşeler veya aşındırma piramitleri ve çözünmenin farklı şekillerde başlayabildiği oluklar gibi metal yüzeyindeki belirli bölgeleri belirler. Ayrıca farklı mekanizmalara göre yüzey yapısı ve morfolojisi, çözeltiye daldırmadan önceki metalin gördüğü işlemlere de oldukça bağlıdır. Kristalografik, metalurjik, kimyasal veya mekanik işlemlerle metalin yüzey yapısı ve morfolojisi kontrol edilebilir. Aşağıda görüleceği gibi, bu iki etki birbirini, korozyon sürecinin mekanizmasını ve kinetiğini

etkiler (Bockris vd. 1961). Nötr çözeltide Fe'in katalitik olmayan çözünme mekanizması literatürde aşağıdaki şekilde verilmiştir (Cabrales vd. 2014).



Cl^- varlığı demir türleri ile zayıf kompleksler yapabilir. Bu mekanizmalardaki ara ürünler FeOH_{ads} , Cl^- 'le reaksiyona girerek FeOHCl^- kompleksini oluşturur ve bu yavaş basamaktır. Çözeltiden gelen Cl^- iyonlarından oluşan kompleksde en önemli özellik yüzeyde adsorbe komşu Cl^- iyonları ile reaksiyona girmemesidir. Bu nedenle, Cl^- iyonlarının güçlü adsorpsiyonu, onun inhibe edici (bloke edici) etkisinden ve zayıf kompleks oluşturma yeteneğinden sorumludur (Vukovic 1996).



Şekil 4.5 %3,5 NaCl çözeltisinde, ESD yöntemi ile FeAl ve NiAl kaplanmış AISI 304 paslanmaz çeliğin Tafel eğrileri.

Kaplanmış ve kaplanmamış AISI 316L paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde bir

saat bekletme süresi sonucunda Tafel ve Lineer polarizasyon yöntemi ile elde edilen korozyon karakteristikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 incelendiğinde AISI 316L paslanmaz çeliğin, ESD ile FeAl ve NiAl kaplanmış numuneler %3,5 NaCl ortamında bir saat bekletme süresi sonrasında polarizasyon akım yoğunluk (I_{corr}) değerleri azalmıştır. AISI 316L paslanmaz çelik üzerine ESD yöntemi ile yapılan NiAl kaplamaların hatasız (çatlaksız ve süreklilik arz eden kaplama) kaplamalarda anodik akımlarla tamamen pasif bir davranış göstermesiyle korozyon dirençleri çok yüksek değerlerde çıkmıştır (Frangini ve Masci 2004).

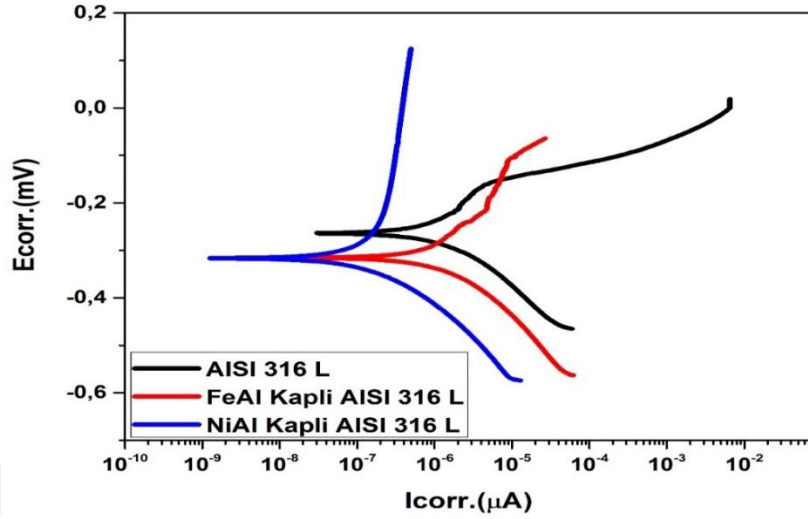
Çizelge 4.3 Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 316L paslanmaz çeliklerin %3,5 NaCl ortamında elde edilen korozyon karakteristikleri.

% 3, 5 NaCl çözeltide	Ecorr. (mV)	Icorr. ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Rp ($k\Omega$)	Korozyon Hızı (mpy)	% Inhibisyon
İşlemsiz AISI 316 L SS	-264	2,669	19,24	1392×10^{-3}	-
FeAl Kaplı AISI 316 L SS	-316	1,630	22,56	$950,4 \times 10^{-3}$	39
NiAl Kaplı AISI 316 L SS	-317	0,242	240,2	$245,6 \times 10^{-3}$	91

Polarizasyon akım yoğunluğu değerleri kaplanmamış durumda $2.669 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ iken, FeAl kaplanmış AISI 316L paslanmaz çelikte $1,630 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, NiAl kaplanmış AISI 316 L paslanmaz çelikte ise $0,242 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’ye kadar düşmüştür. Bu değişme korozyon dirençleri ve korozyon hızı değerleri ile uyumludur. Alümina oluşturan kaplamaların korozyon direnci, işlemsiz AISI 316L paslanmaz çeliğin korozyon direncinden en az 2 en fazla 10 kat daha yüksektir. % inhibisyon değerleri FeAl intermetalik kaplamalarda %39 iken, NiAl intermetalik kaplamalarda bu oran %91’dir. Kaplamalı örneklerde E_{corr} değerleri daha negatif potansiyellere kaymıştır. Kaplamasız ve kaplamalı AISI 316L paslanmaz çeliğinin i_{corr} değerleri, AISI 304 paslanmaz çelik için olanlardan daha küçüktür. Aynı şekilde Rp değerleride daha yüksektir bunun AISI 316L paslanmaz çelikde bulunan Mo ve daha yüksek Ni içeriği nedeniyle olduğu düşünülmektedir. AISI 316L paslanmaz çeliğin kaplamasız ve kaplı örnekler korozyona karşı daha dayanıklı bir yapı sergilemiştir.

Kaplanmış ve kaplanmamış AISI 316L paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde bir

saat bekletme süresi sonucunda Tafel polarizasyon yöntemi ile elde edilen Tafel eğrileri Şekil 4.6’de verilmiştir.

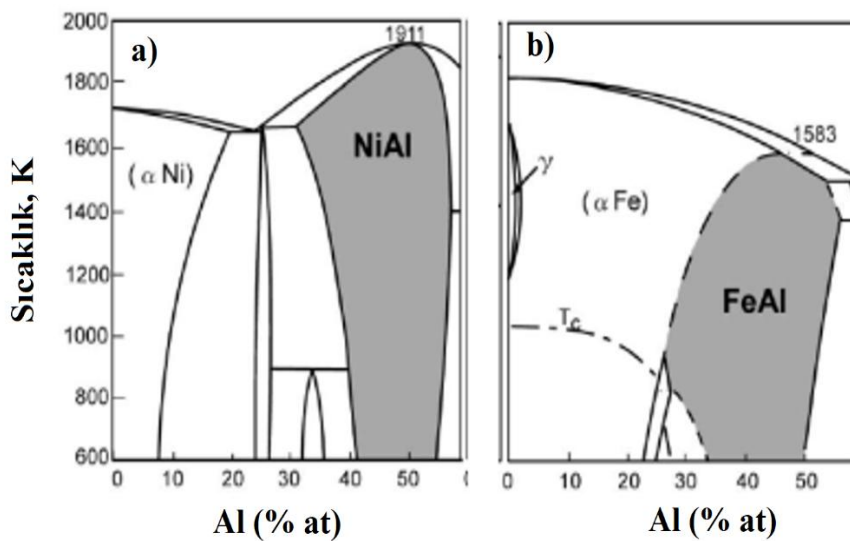


Şekil 4.6 %3,5 NaCl çözeltisinde, ESD yöntemi ile FeAl ve NiAl kaplanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin Tafel eğrileri.

Şekil 4.6’da kaplamasız 316 Tafel eğrisinin anodik dalında olan kırılma, çelik yüzeyinde oluşan pasif tabakanın bozulduğunu ve çeliğin tekrar korozyona uğradığını göstermektedir. FeAl ve NiAl kaplı Tafel eğrilerinde böyle bir kırılma noktası olmaması, korozyon dirençlerinin daha iyi olduğunu göstermektedir ve pasiflik devam etmektedir. Oda sıcaklığındaki sulu çözeltilere karşı korozyon direnci, yapısal bütünlüklerinden ödün vermeden demir alüminidlerin uygulanabilmektedir. Alüminyumun Pourbaix diyagramı, potansiyel ve pH’nın bir fonksiyonu olarak farklı türlerin termodinamik kararlılığı hakkında bilgi sağlar. Oda sıcaklıklarında ve neredeyse nötr ve serbest çözeltelerde alüminyum, koruyucu bir çözünmeyen oksit/hidroksit filmi sağlar. Bununla birlikte, pasiflik aralığı sıcaklığa, ikincil fazların ve/veya çökeltilerin varlığına (yığın malzemede ve/veya oksit tabakasında) ve çözeltide alüminyum ile çözünür kompleksler veya çözünmeyen tuzlar oluşturabilen maddelerin varlığına göre değişir. Bu yüzden pasif film içindeki Al’un dikkate değer bir şekilde zenginleştirilmesi Fe-Al intermetaliklerinin pasifleştirilmesi için faydalı bir rol oynadığı için korozyon dirençleri artmıştır (Vargel 2004, McCafferty 2010, Zamanzade vd. 2014, Zamanzade vd. 2016).

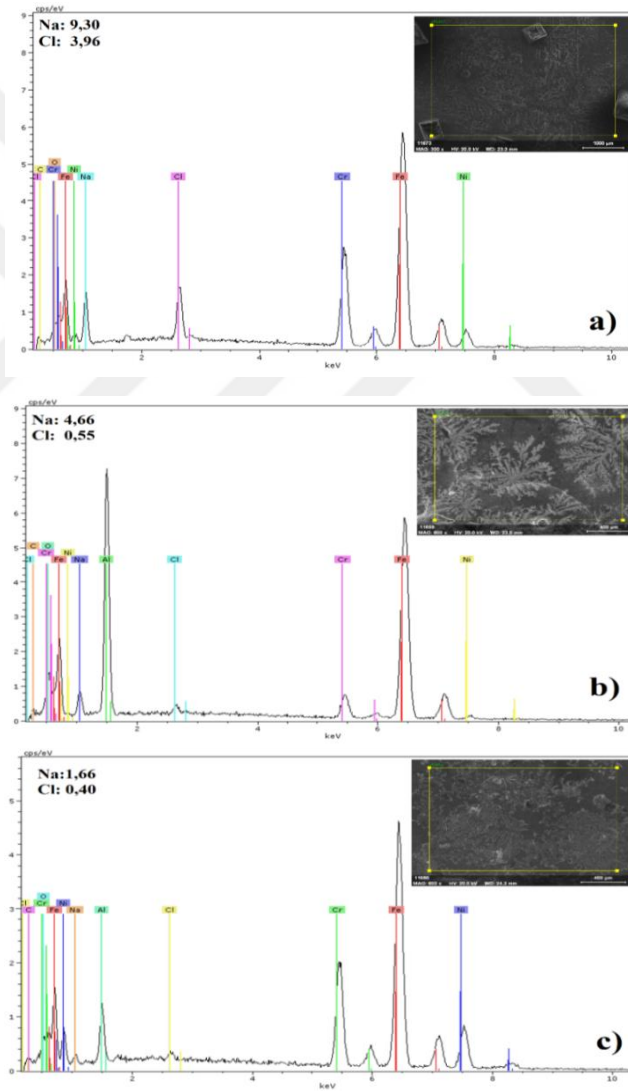
4.5. Elektrokimyasal Korozyon Sonrası SEM-EDX Analizleri

Rastgele yönlendirilmiş dokusuz kübik polikristaller (Al derişimi) için yaklaşık 45°'lik bir yanlış yönlendirme açısında küçük ve geniş bir tepe var gibi görünmektedir (Kaneno vd 2005). Tamamen yeniden kristalize edilmiş bir mikro yapıya sahip üç tür bileşğin tane sınırı karakter dağılımları birbirine benzerdi ve yüksek frekanslı sınırlar (yani düşük açılı sınırlar) ile karakterize edilir. Ni-50Al'deki yeniden kristalize edilmiş tanelerin çekirdeklenme bölgeleri, Fe-48Al'dekilerden açıkça farklıdır. İri tane boyutuna sahip Fe-48Al durumunda, deformasyon davranışı homojen değildir ve yüzeyde tane sınırlarına yakın yerlerde büyük stres konsantrasyonu meydana gelir. Sonuç olarak, tercihen tane sınırlarında yeni taneler oluşur. Ni-50Al durumunda, yeniden kristalize edilmiş taneler, tercihen ağır şekilde bozulmuş tanelerde ve/veya deformasyon bantlarında oluşturulmuştur (Kaneno vd.2006). Nokta kusurlarının intermetalik bileşiklerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği iyi bilinmektedir. Özellikle, B2 sıralı yapıya sahip FeAl ve NiAl'un, yüksek sıcaklıklardan soğutma sırasında yüksek bir termal boşluk konsantrasyonunu koruduğu ve sertlikte önemli artışlara yol açtığı doğrulanmıştır. FeAl'un yüksek sıcaklıkta önemli sertleşmeye yol açan birçok termal boşluğa sahip olduğu iyi bilinmektedir. Yüksek sıcaklıktan yavaş söndürme sırasında veya söndürme sonrası tavlama sırasında, bu tür boşluklar çukurlarda yok olur ve bu da dislokasyon oluşumuna neden olur (Morris vd.1998).

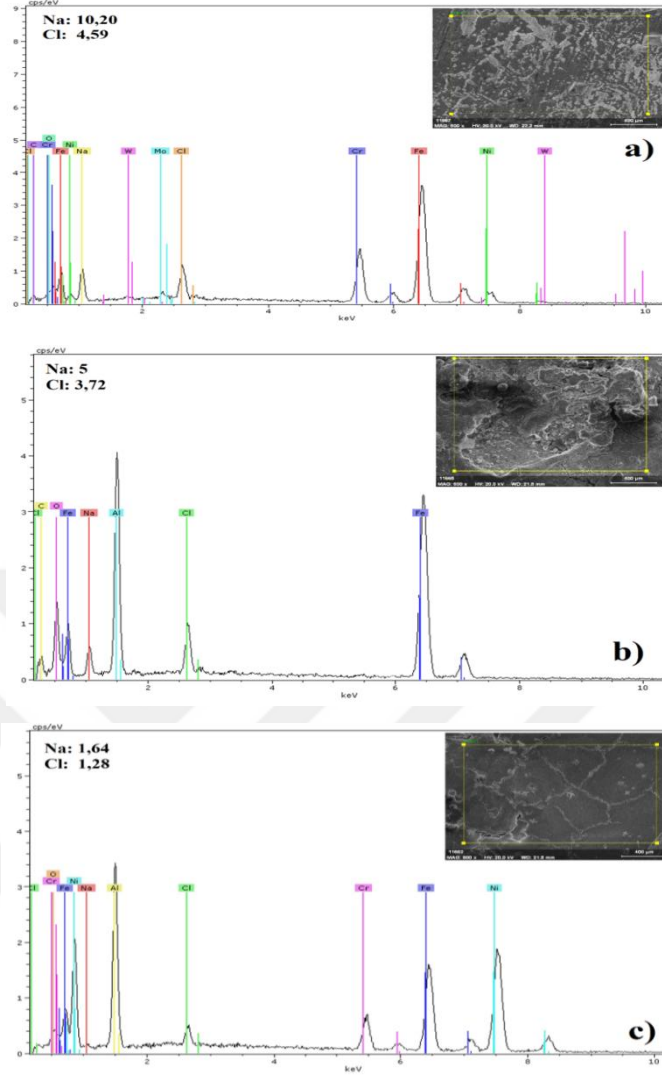


Şekil 4.7 a) Ni-Al, b) Fe-Al faz diyagramları.

Şekil 4.7, Massalski (1990) ve diğerleri tarafından önerilen ikili Ni-Al ve Fe-Al sistemlerinin denge faz diyagramlarını göstermektedir. B2 tipi NiAl ve FeAl fazlarının ortak bir özelliği, Ni bakımından zengin ve stokiometrik olarak sırasıyla 19.2, 28.5 ve 26.7'ye % Al'a kadar geniş bir bileşim aralığına sahip olmalarıdır (Massalski vd. 1990, Nakamura vd. 2002). Fe-Al faz diyagramı, düzensiz HMK yapısıyla FeAl fazı ve Şekil 4,7'de gösterilen kesikli çizgiler boyunca düzenli-düzensiz geçişlerle B2 yapısı ile FeAl fazı ve olarak ayrılmıştır. Geçiş sıcaklığı Al içeriğinin artmasıyla önemli derecede artar (Nakamura vd.2002).



Şekil 4.8 ESD yöntemi ile a) Kaplamasız, b) FeAl ve c) NiAl intermetalik kaplanmış AISI 304 paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon deneyleri sonrası SEM-EDX analizleri.



Şekil 4.9 ESD yöntemi ile a) Kaplamasız, b) FeAl ve c) NiAl intermetalik kaplanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon deneyleri sonrası SEM-EDX analizleri.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 incelendiğinde çözeltide bulunan Na^+ ve Cl^- iyonları metal yüzeyine absorbe olduğu görülmektedir. Korozyon hızları ile yüzeye absorbe olan Na^+ ve Cl^- iyonlarının oranları doğru orantılıdır. En iyi korozyon direncine sahip olan ESD yöntemiyle NiAl kaplanmış olan her iki metalde de Na^+ ve Cl^- iyonları kendi içlerinde kıyaslandığında en az oranlara sahiptir. NiAl intermetalik kaplamalarda yüzey absorbe olan Na^+ ve Cl^- oranları AISI 304 paslanmaz çelikte Na: 1.66 ve Cl: 0.40 iken AISI 316L paslanmaz çelikte Na: 1.64 ve Cl: 1.28 dir. Oysa kaplanmamış olan AISI 304 paslanmaz çelikte Na: 9.30 ve Cl: 3.96, AISI 316L paslanmaz çelikte Na: 10.20 ve Cl: 4.59'dur.

Şekil 4.8a’da kaplanmamış AIS 304 paslanmaz çelikte yüzeyde bileşimden gelen Cr (16,09 wt%) ve Ni (6,57 wt%) olmasına rağmen, altlık korozyona uğramıştır. En çok Na ve Cl^- (wt%) değerleri daha fazla Cl^- ’ün yüzeyde olması korozyonun artmasına ve Fe ile $FeCl_3$ çözünür tuzları oluşturarak korozyonun artmasına neden olmuştur.

Şekil 4.8b’de FeAl intermetalik kaplı AISI 304 paslanmaz çelik yapısında Al’dan yüzeyde kaynaklanan dendritik yapılar oluşmuştur. Yüzeyde oksijen kaplamasız örneğe göre artmıştır, bununla birlikte Al miktarı artmış, Cr ve Nikel azalmıştır. Yüzeyde bulunan Al ve oksijen Al_2O_3 oluşturarak FeAl kaplı yüzeyin pasif bir film ile kaplamıştır. AISI 304 paslanmaz çelik için elde edilen elektrokimyasal E_{corr} değerleride bunu doğrulamaktadır (Çizelge 4.2). Çünkü kaplamalı örneklerde E_{corr} değerleri daha pozitif potansiyellere doğru kaymıştır.

Şekil 4.8c’de NiAl kaplı AISI 304 paslanmaz çelik dendritik yapıya benzer ama daha farklı bir yapı sunmaktadır. Yüzeyde Ni, Cr oldukça yüksek miktarda bulunmakta, ayrıca Al’da bulunmaktadır. Yüzeyde bulunan Al ve Ni oksitler oluşturarak yüzeyin korozyona daha dirençli olmasını sağlamıştır. Yüzeyde bulunan Cr sertliği arttırdığı için altlık daha az korozyona uğramıştır. Ayrıca Cr’da Cr_2O_3 oluşturarak yüzeydeki filmin pasifleşmesine katkıda bulunmuştur.

Şekil 4.9a korozyon testi sonrası AISI 316L paslanmaz çeliğin’in bileşiminde bulunan bütün elementler yüzeyde mevcuttur. Cr, Fe ve Na yüzeyde en çok bulunan elementlerdir. Yüzey korozyona uğramakta birlikte korozyon hızı kaplamasız AISI 304 paslanmaz çelikten (Tablo 4.3) daha düşüktür. Bunun nedeni AISI 316L paslanmaz çeliği oluşturan Cr, Ni, Mo elementleridir.

Şekil 4.9b’de FeAl kaplı AISI 316L paslanmaz çelik korozyona uğramış ve yüzeyde kaplama çatlakları bulunmaktadır. Yüzeyde bulunan Al ve Fe oksijenle birleşerek oksitler oluşturmuş olabilirler. Oluşan çatlaklarda Cl^- iyonu kaplama içine difüzlenererek çukur korozyonuna neden olabilir. Ama yüzeyde oluşan koruyucu oksitler bu etkiyi azaltmaktadır.

Şekil 4.9c’de NiAl kaplı AISI 316L paslanmaz çelikte kaplama düzgün olmasına rağmen bölgeler oluşmuş ve her bölgenin etrafı tamamen çatlakla çevrilmiştir. Oluşan bu mikroçatlaklar Al ve Ni’in oluşturduğu oksitler ile kapanarak korozyon kısmen de olsa engellenmiştir. Ayrıca yüzeyde büyük bir çatlakda bulunmaktadır. Çelik kaplama altı korozyonuna uğramıştır.

Pasivasyonun gerçekleşmesi için, film tabakası yapışkan, gözeneksiz, kimyasal olarak inert olmalıdır. Kaplama üzerinde koruyucu bir film tabakası varsa, altlık malzeme ciddi zarar görmez korozyon veya çukurlaşma olmaz, ancak oluşan film tabakası kusurlar içeriyorsa veya süreksiz ise altlık malzeme korozyona uğrayacaktır. Çukurlaşma, metalin kusurlarda çözünmesi ve çıplak metal maruz kaldığında yüzey filmi içindeki kusurlar elektrolitteki agresif anyonlara bağlıdır. Çukurlaşmaya neden olan, anyonlar Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- , I^- , vb. ilk önce metal yüzeyine adsorbe olurlar. Daha sonra bu anyonlarla, metal yüzeyinde bulunan kusurlarda metalin aktif çözünmesi başlatırlar. Fazlardan birinin farklı kimyasal bileşime veya mikroyapıya sahip olduğu ikinci fazların varlığı veya mikro hücrelerin oluşumu, bu fazlardan biri katot, diğeri ise aktif anot görevi görecektir. Bu, aktif anot gibi davranan fazlardan birinin tercihli çözünmesine neden olacak ve alaşım içinde tercihli, lokalize çözünmeye neden olacaktır. Al içeren alaşımlar, koruyucu bir Al_2O_3 , alümina tabakası oluşturarak korozyona karşı korunur (Gonzalez-Rodriguez vd. 2007).

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kaplama tabakası ve matris arasının düz bir morfolojide ve süreklidir.
- Her iki çelik için de kaplanma tabakasında FeAl ve NiAl fazları elde edilmiştir. FeNi'de oluşmuştur.
- AISI 316L paslanmaz çeliğin ESD ile FeAl kaplama kalınlığı 26 μm iken NiAl ile bu kalınlık 29 μm 'dır.
- AISI 316L paslanmaz çelikten yüzey sertliği 195 $\text{HV}_{0,1}$ iken FeAl kaplama ile 554 $\text{HV}_{0,1}$, NiAl kaplama ile 482 $\text{HV}_{0,1}$ sertliği elde edilmiştir.
- AISI 304 paslanmaz çelikte yüzey sertliği 200 $\text{HV}_{0,1}$ iken FeAl kaplanmış AISI 304'de 543 $\text{HV}_{0,1}$, NiAl kaplanmış AISI 304 paslanmaz çelikte 475 $\text{HV}_{0,1}$ elde edilmiştir.
- AISI 304 paslanmaz çeliğin ESD yöntemi ile FeAl kaplama kalınlığı 23 μm iken NiAl kaplama kalınlığı 29 μm 'dir.
- ESD yöntemi ile kaplanmış her iki çeliğin korozyon direnci kaplama ile artmıştır. En iyi korozyon direnci AISI 316 L Paslanmaz çelik yüzeyine NiAl kaplanmış numunede (240,2 $\text{k}\Omega$) elde edilirken, en kötü korozyon direnci işlemsiz AISI 304 paslanmaz çelikte (2,842 $\text{k}\Omega$) elde edilmiştir.
- AISI 304 ve AISI 316 L paslanmaz çeliklerin yüzeylerine ESD yöntemiyle FeAl ve NiAl kaplamalar ile sertlik değerlerinin en az 2 kat artmıştır.
- AISI 304 ve AISI 316L paslanmaz çeliklerin %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon sonrasında Na^+ ve Cl^- iyonların metal yüzeyinde absorbe olarak korozyon direncini değiştirmiştir. Metal yüzeyine absorbe olan Na^+ ve Cl^- iyonlarının miktarlarının artması ile korozyon direnci düşmüştür.
- Her iki çelik içinde absorbe olan Na^+ ve Cl^- oranları NiAl kaplama yapılan kaplamalardan elde edilmiştir.

5.2 Öneriler

- ESD yöntemi ile kaplanmış FeAl ve NiAl intermetalikler farklı ısıt işlemlerin kaplama tabakasına etkisi araştırılabilir.
- FeAl ve NiAl intermetalik kaplanmış paslanmaz çeliklerin farklı ortamlarda korozyon dirençleri incelenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Aran A Temel M A, 2003, Paslanmaz Çelik Yası Mamuller, Sarıtaş Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., 165s, İstanbul.
- Aran A, 2003, Paslanmaz Çelik Üretimi Kullanımı Standartları, 3. Baskı, Sarıtaş Teknik Yayınları, No:1, 113s, İstanbul.
- ASM Handbook, 1992, Alloy Phase Diagrams, 3, 44p, Materials Park Ohio.
- Aldemir Ü, 2000, Paslanmaz Çeliklerin Türkiye'de Tercihli Alanlarına göre, Optimum Kullanım Önerilerinin Hazırlanması, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1-21, 65s, Bursa.
- Başargan A, 2010, Bakırın Elektrosark Mikroalaşımlandırma Yöntemi ile Gümüşle Kaplanması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 37s, Gebze.
- Bockris J O M, Drazic D, Despic A R, 1961, The Electrode Kinetics of The Deposition and Dissolution of Iron, Electrochimica Acta, 4, 325-361.
- Brown E A, Sheldon G L, Bayoumi A E, 1990, A Parametric Study of Improving Tool Life by Elektrosark Deposition, Wear, 138, 137-151.
- Bülbül Ş, 2009, Yüksek Alaşımli Çeliklerin %10 H₂SO₄ ve % 10 HCl Çözeltileri İçerisindeki Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Karabük.
- Cabrales N M, Martinez F M, 2014, Impedance Spectra of Anodic Dissolution of Iron in Distillery Vinasse, Electrochimica Acta, 140, 529-534.
- Campos I, Palomar M, Amador A, Ganem R, Martinez J, 2006, Evaluation of The Corrosion Resistance of İron Boride Coatings Obtained By Paste Boriding Process Surface & Coatings Technology, 201, 2438-2442.
- Cohron J W, Lin Y, Zee R H, George E P, 1998, Room-Temperature Mechanical Behavior of FeAl: Effects of Stoichiometry, Environment and Boron Addition, Metals and Ceramics Division, 6245-6256.

- Çolak E, 2010, İyon Nitrülenmiş AISI 5140 Çeliğinin Korozyon Davranışının İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 49s, Erzurum.
- Doruk İ, 2005, Gıda Sanayisinde Kullanılan Paslanmaz Çelikler ve Bu Çeliklere Uygulanan Kaynak Yöntemleri, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 119s, Denizli.
- Ebhota, W S, Jen T C, 2018, Intermetallics Formation and Their Effect on Mechanical Properties of Al-Si-X Alloys, Intermetallic Compounds-Formation and Applications, 226s, USA.
- Erdoğan M, 2000, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri-Cilt 1, Nobel Yayın Dağıtım, 169s, Ankara.
- Eren H, 2005, Ferritik Paslanmaz Çeliğin Korozyon Davranışına Karbür Yapıcı Alaşım Elementlerinin Etkilerinin İncelenmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 193s, Elazığ.
- Ergin N, 2007, Fe-Al İntermetalik Malzemelerin Basınç Destekli Hacim Yanma Sentezi ile Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 117s, Sakarya.
- Evcin A, 2006, Kaplama Teknikleri Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, 12s, Sakarya.
- Frangini S, Masci A, 2004, Intermetallic FeAl Based Coatings Deposited By The Elektrosark Technique: Corrosion Behavior İn Molten (LiqK) Carbonate, Surface and Coatings Technology, 184, 31-39.
- Fukumoto S, Kurz W, 1999, Solidification Phase and Microstructure Selection Mapsfor Fe-Cr-Ni Alloys, ISIJ Int., 39, 1270-1279.
- Fukumoto S, Okane T, Umeda T, Kurz W, 2000, Crystallographic Relationships Between Ferrite and Austenite During Unidirectional Solidification of Fe-Cr-Ni Alloys, ISIJ Int., 40, 677-684.
- Fu C L, Zou J, 1996, Site Preference of Ternary Alloying Additions in FeAl and NiAl By First-Principles Calculations, Acta. Mater, 44, 1471-1478.

- Horie S, Shinozaki K, Yamamoto M, North T H, Gerlich A, 2010, Effect of Microstructure on Liquation Cracking During AZ91 Friction Stir Spot Welding, *Sci Technol Weld Join*, 15, 671-675.
- Gedevanışvılı S, Deevi S C, 2002, Processing of Iron Aluminides by Pressureless Sintering Through Fe+Al Elemental Route, *Materials Science and Engineering*, 325, 163-176.
- Grapke H J, 1999, Oxidation of NiAl and FeAl, *Intermetallics*, 7, 1153-1158.
- Gonz'alez-Rodriguez J G, Colin J C, Serna S, Campillo B, Albarran J L, 2007, Effect of Macroalloying With Cu on The Corrosion Resistance of Rapidly Solidified NiAl Intermetallic in 0.5M H₂SO₄, *Materials Science and Engineering*, 448, 158–164.
- Günay M, Meral T, Korkmaz M, 2018, AISI 420 Martenzitik Paslanmaz Çeliğin Delinebilirliğinin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4, 223-229.
- Gürlek Z K, 2009, Asidik ve Bazik Akımsız Nikel Kaplamaların Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 88s, Ankara.
- Jordon J L, Deevi S C, 2003, Vacancy Formation and effects in FeAl. *Intermetallics*, 11, 507-528.
- Johnson R N, Sheldon G L, 1986, Advances in The Electrospark Deposition Coating Process, *J.Vac.Sci. Technology*, 4, 2740-2746.
- Johnson R N, 2002, Electrospark Deposition: Principles and Applications. 45th Annual Technical Conference, 87-92.
- Kaneno Y, Yamaguchi T, Takasugi T, 2005, Hot Rolling Workability, Texture and Grain Boundary Character Distribution of B2-Type FeAl, NiAl and CoTi Intermetallic compounds, *Journal of Materials Science*, 40, 733-740.
- Kaluç E, Tülbentçi K, 1998, Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, *Kocaeli Üniversitesi Kaynak Teknolojisi, Eğitim ve Uygulama Merkezi*, 170-178, Kocaeli.

- Kaluç E, 1988, Ferritik-Ostenitik Paslanmaz Çelik Çiftinin Nokta Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Çekme-Makaslama Mukavemetine ve Tanelerarası Korozyona Karşı Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 4-19, İstanbul.
- Kaneno Y, Yamaguchi T, Takasugi T, 2006, Texture Evolution During Hot-Rolling and Recrystallization in B2-Type FeAl, NiAl and CoTi Intermetallic Compounds, J Mater Sci, 41, 6871–6880.
- Kayali Y, 2011, Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 219s, Afyonkarahisar.
- Kayır Y Z, Baççıl E G, Türkiye Paslanmaz Çelik Üretmeli Mi?. 14.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Ekim 2008, 1-12, İstanbul.
- Kocabekir B, 2006, IsıGirdisi ve Kaynak Atmosferinin 316L Paslanmaz Çeliklerin Direnç Kaynak Birleştirmelerine Etkisi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 130s, Karabük.
- Kong C H, Munroe P R, 1993, Theeffect of Cooling Rate and Heat Treatment on Hardness Across the FeAl-NiAl Pseudo Binary, Scripta Metallurgica et Materialia, 28, 1241-1244.
- Korkmaz K, 2008, Elektrosark Biriktirme Yöntemiyle Mikro Alaşımlı Çeliklerin Tungsten Karbürle Kaplanması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Doktora Tezi, 145s, Kocaeli.
- Lensjak A, Tusek J, 2002, Processes and Properties of Deposits İn Electrosark Deposition, Science and Technology of Wlding and Joining, 7, 391-396.
- Lilly A C, Deevi S C, Gibbs Z P, 1998, Electrical Properties of Iron Aluminides, Materials Science and Engineering, 258, 42-49.
- Lippold J C, Kotecki D J, 2005, Welding Metallurgy And Weldability of Stainless Steels, A John Wiley Sons. Inc.Publication, 88-135.

- Liu C T, George E P, Maziasz P J, Schneibel J H, 1998, Recent Advances in B₂ Iron Aluminide Alloys: Deformation Fracture and Alloy Design. Materials Science and Engineering, 258, 84-98.
- Martinez M, Viguier B, Maugis P, Lacaze J, 2006, Relation Between Composition, Microstructure and Oxidation in Iron Aluminides, Intermetallics, 14, 1214-1220.
- Massalski, T B, Okamoto H, Subramanian P R, Kacprzak L 1990, Binary Alloy Phase Diagrams, ASM International, Materials Park, 3, 3589p, Ohio.
- McCafferty E, 2010, Thermodynamics of Corrosion: Pourbaix Diagrams, In Introduction to Corrosion Science, Springer, Berlin, Germany, 95–117.
- Metals Handbook ASM, 1990, Metals Park, Ohio 10th Edition, 2, 647-780.
- Mısırlıoğlu E, 2006, Çeliklerin Elektrosparck Mikroalaşımlandırma Yöntemiyle Kaplanması, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 47s, Gebze.
- Morris D G, Munoz-Morris M A, Chao J, 2004, Development of High Creep Resistant Iron Aluminide, Intermetallics, 821-826.
- Morris M A, George O, Morris D G, 1998, Vacancies, Vacancy Aggregates and Hardening in FeAl, Materials Science and Engineering, 258, 99-107.
- Nakamura R, Takasawa K, Yamazaki Y, Iijima Y, 2002, Single-Phase Interdiffusion In The B₂ Type Intermetallic Compounds NiAl, CoAl and FeAl, Intermetallics, 10, 195–204.
- Newson T, 2002, Stainless Steels - Applications, Grades and Human Exposure, Avestapolarit Oyj. Abp, 52s.
- Odabaş C, 2004, Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri, 1-81, Askaynak-İstanbul.
- Osmanoğlu T, 2012, AISI Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyon Etkileri İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 107s, İstanbul.

- Önal E, 1997, Paslanmaz Çeliklerin Kaynağında Schaeffler, De Long ve WRC 92 Diyagramlarının İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 122s, Kocaeli.
- Özdemir Ö, 2004, Ni-Al İntermetalik Malzemeler, Metalurji Mühendisleri Odası Yayın Organı, 137, 57-63.
- Özdemir Ö, 2007, İntermetalik Bileşikler Dersnotu, Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü. 25s, Sakarya.
- Perez N, 2004, Electrochemistry and Corrosion Science. Kluwer Academic Publishers, Boston, 189-246, USA.
- Reynolds J L, Holdren R L, & Brown L E, 2003, Electro-SparkDeposition. Advanced MaterialsandProcesses, 161, 35-37.
- Roberge P R, 1999, Handbook of Corrosion Engineering, 1-4, Newyork; McGraw-Hill.
- Sarıtaş Ç, 2012, Paslanmaz Çeliklerin İç Yapı ve Türleri, 19-23, İstanbul.
- Shu X L, Hu W Y, Xiao H N, Deng H Q, Zhang B W, 2001, Vacancies and Antisites in B2 FeAl and D03 Fe₃Al with a Modified Analytic Eam Model, Science Technology, 17, 601–604.
- Silman G I, 2012, Compilative Fe–Ni Phase Diagram With Author’s Correction, Met Sci, Heat Treat, 54, 105–112.
- Soncu M, 2008, G-X10 CrNiMoNb 18-10 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Asidik Çözeltilerdeki Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 132s, Kocaeli.
- Syed M, 2010, The Process Fundamentals and Process Parameters of Electro-Spark Deposition, Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Tang S K, Nguyen T C, Zhou Y, 2010, Materials Transfer in Electro-Spark Deposition of TiCp/Ni Metal-Matrix Composite Coating On Cu Substrate. Welding Research, 89, 172-180.
- Tekaslan Ö, Gerger N, Şeker U, 2008, AISI Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüklerinin Araştırılması, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10, 3-12.

- Töre C, 2007, Mekanik Tasarımda Çelik ve Özellikleri, Makine Mühendisleri Odası, 332s, Ankara.
- Türkyılmazoğlu A, 2006, Dublex, Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 158s, Sakarya.
- Uysal M, 2006, CrN, TiN, Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Korozyon Özellikleri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 115s, Ankara.
- Üneri S, 1984 Korozyon İnhibitörlerinin Prensipleri ve Pratiği, Sagem, 121s, Ankara.
- Üneri S, 1998, Korozyonun Temel İlkeleri, Sagem, 1-28, Ankara.
- Yalçın H, Koç T, 1998, Mühendisler İçin Korozyon, TMMOB Kimya Mühendisleri Odası, 321s, Ankara.
- Yamada A, Umeda T, Kimura Y, 1990, Calculation of Liquidus and Solidus of Iron-Rich Corner of Fe-Cr-Ni System, Tetsu-to-Hagane, 76, 2137-2143.
- Yavuzer B, 2019, Mekanik Alaşımlama ile Üretilen AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklere Alaşım Elementlerinin Etkisi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 129s, Karabük.
- Yılmaz M S, 2012, Saf Titanyum Malzeme Yüzeyinde Titanyum Alüminyum İntermetalik Tabakasının Oluşturulması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 129s, İstanbul.
- Vargel C, 2004, Corrosion of Aluminium; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 81-109.
- Vukovic M, 1996, Anodic in Dissolution of Armco Iron In 0.5 M H₂SO₄ In The Presence of Adsorbed Chloride İons, Hydrometallurgy, 42, 387-398.
- Zamanzade M, Barnoush A, Motz C, 2016, A Review on The Properties of Iron Aluminide Intermetallics, Crystals, 6, 10.
- Zamanzade M, Vehoff H, Barnoush A, 2014, Cr Effect on Hydrogen Embrittlement of Fe₃Al-Based Iron Aluminide Intermetallics: Surface or Bulk Effect, Acta Materialia, 69, 210-223.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://bircelik.com/tr/kategori/304-1-4301-> 20.11.2021
- 2- <https://bircelik.com/tr/kategori/316l-1-4404-> 20.11.2021
- 3- <https://web.karabuk.edu.tr/AliGungor/NiAl%20Web%20Sayfas%C4%B1.pdf-> 21.11.2021
- 4- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Structure_FeAl_B2.svg- 21.11.2021

