

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLASTİK KALIP ÇELİKLERİNİN
KOROZYONA KARŞI KORUNMASINDA KUTU
BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİLERİ

Kübra ÖZTÜRK

Ocak, 2021
İZMİR

PLASTİK KALIP ÇELİKLERİNİN KOROZYONA KARŞI KORUNMASINDA KUTU BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİLERİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Kübra ÖZTÜRK

**Ocak, 2021
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

KÜBRA ÖZTÜRK, tarafından **DR. ÖĞR. ÜYESİ BAHADIR UYULGAN** yönetiminde hazırlanan “**PLASTİK KALIP ÇELİKLERİNİN KOROZYONA KARŞI KORUNMASINDA KUTU BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİLERİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Bahadır UYULGAN

Yönetici

Doç. Dr. Mustafa EROL

Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Onur ERTUĞRUL

Jüri Üyesi

Prof.Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasından başlayarak, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda engin bilgi birikimi ve tecrübelerini benden esirgemeyerek fikir, öneri, katkı ve yorumlarıyla çalışmamı bilimsel hedefler doğrultusunda şekillendirerek bana yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Bahadır Uyulgan’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında katkı ve yardımlarından dolayı Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği tüm akademik ve teknik bölüm personeline, lisansüstü eğitimim ve çalışmalarım sırasında benden desteğini esirgemeyen değerli arkadaşlarım ve meslektaşlarım Yük. Müh. Eda Erdem ve Yük. Müh. Irmak Su Ökten’e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma çalışmalarımın süresi boyunca, tez çalışmamın ortaya çıkmasında, numune desteğini her zaman sağlayarak çalışmama büyük katkıda bulunan Standard Profil Ege Otomotiv A.Ş firması ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek, açtıkları yolda sürekli ilerlemem için tüm çaba ve gayreti göstererek, bugünlere gelmemde en büyük katkıları sağlayan, her zaman yanımda olan sevgili aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Kübra ÖZTÜRK

PLASTİK KALIP ÇELİKLERİNİN KOROZYONA KARŞI KORUNMASINDA KUTU BORLAMA İŞLEMİNİN ETKİLERİ

ÖZ

Günümüzde; gelişen teknoloji ve artan üretim ihtiyacıyla birlikte seri üretim oldukça önemli bir hale gelmiştir. Kalıpla üretim yöntemi, başlıca seri üretim yöntemi olarak tercih edilmektedir. Kalıpların korozyon direncinin artırılması önem açısından ilk sırada yer almakta ve sanayide karşılaşılan problemlerin önemli bir kısmını oluşturmaktadır.

Sunulan bu tez çalışmasında, otomotiv sektöründe kullanılmakta olan plastik kalıp çelik numunelerinin (I1, R1, C1, N1) Standard Profil firması tarafından tarafımıza temin edilmiştir. Temin edilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Mevcut durumda kullanılan kalıpların yüzey pürüzlülük değerlerine uygun zımpara aralığının 240 grit SiC zımpara kâğıdı olduğu tespit edilmiştir. Karşılaştırmak amacıyla, korozyon direncine etkisini araştırmak üzere 1.etapta 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile numuneler zımparalanarak hazırlanmış ve her numunenin yüzey pürüzlülük değerleri 240 ve 1200 gritlik zımpara işlemlerinden sonra ölçülerek numuneler elektrokimyasal korozyon deneylerine tabii tutularak her iki durum için de Tafel eğrileri karşılaştırılmıştır.

Bu işlemlere paralel olarak kutu borlama işleminin korozyon davranışlarına olan etkisini incelemek amacıyla bu kalıp çeliklerinden görece olarak diğerlerine göre daha düşük maliyetli olan C1 çeliği ve bu çeliklere alternatif olarak sunulan DIN 1.2842 (90MnCrV8) kalıp çelik numunesine 850°C, 4 saat sürede Ekabor-2 tozu kullanılarak, kutu borlama işlemi uygulanmış, hem 240 gritlik SiC zımpara kağıdı ile hem de 1200 gritlik zımpara kağıdı ile zımparalanarak korozyon özellikleri ve korozyon hızları borlanmamış numuneler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Plastik kalıp çelikleri, korozyon, kutu borlama, yüzey pürüzlülüğü, sertlik

INFLUENCE OF PACK BORINIZING TREATMENT ON CORROSION PROTECTION OF PLASTIC MOLD STEELS

ABSTRACT

Nowadays, mass production has become very important with developing technology and increasing production needs. Mold production method is mainly preferred as mass production method. Increasing the corrosion resistance of these molds takes the first place in terms of importance and constitutes an important part of the problems encountered in the industry.

Plastic mold steel parts (I1, R1, C1, N1) used in the automotive industry were supplied by Standard Profil in this study. Supplied samples of surface roughness values were measured appropriate. Surface roughness value was determined by range of grind in accordance to surface quality of mould to sandpapered with SiC 240 grit in current situation. In first stage, samples were prepared sandpapering with 1200 grit to investigate effect of corrosion resistance. Next, their surface roughness values were measured after sandpapering with 240 and 120 grit. Then samples were exposed to electrochemical corrosion tests and Tafel curves were compared for two condition.

At the same time, C1 steel relatively low cost and mould steel samples 1.2842 (90MnCrV8) presented alternately were carried out pack boronizing were carried out to C1 steel relatively low cost and mould steel samples 1.2842 (90MnCrV8) with using Ekabor-2 powder at 850 °C for 4 hours to investigate pack boronizing effect on corrosion behavior. Also, corrosion behavior and speed of sandpapered samples with 240 grit and 1200 grit were compared with boronizing samples.

Keywords: Plastic mold steels, corrosion, pack boronizing, surface roughness, hardness

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ	xvii
BÖLÜM BİR - GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM ÜÇ - PLASTİK KALIP ÇELİKLERİ.....	9
3.1 Plastik Kalıp Çeliklerinin Özellikleri	9
3.2 Plastik Kalıp Çeliklerinin Sınıflandırılması	10
3.2.1 Yüzeysel Sertleşebilen Çelikler.....	11
3.2.2 Ön Sertleştirilmiş Çelikler.....	11
3.2.3 Çekirdeğe Kadar Sertleşebilen Çelikler	11
3.2.4 Nitrasyon Çelikleri	12
3.2.5 Korozyona Dayanımlı Çelikler	12
3.3 Plastik Kalıp Çeliklerinin Kullanım Alanları.....	12

BÖLÜM DÖRT - BORLAMA İŞLEMİ..... 15

4.1 Borlama İşlemi	15
4.2 Borlama Yöntemleri	16
4.2.1 Kutu Borlama Yöntemi	17
4.2.2 Sıvı Borlama Yöntemi.....	20
4.2.2.1 Elektrolizle Sıvı Borlama	21
4.2.2.2 Normal Sıvı Ortam (Daldırma) Yöntemi ile Borlama.....	21
4.2.3 Gaz Ortamda Borlama.....	21
4.2.3 Plazma Borlama	22
4.2.4 Pasta Borlama.....	22
4.3 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları	24
4.3.1 Borlama İşleminin Avantajları	24
4.3.2 Borlama İşleminin Dezavantajları.....	24
4.4 Bor Tabakası.....	25
4.5 Geçiş Bölgesi.....	26
4.6 Demir-Bor Denge Diyagramı	27
4.7 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması	28
4.8 Borür Tabakası Çeşitleri ve Bor Tabakası Kalınlığı	30
4.9 Alaşım Elementlerinin Borlama İşlemine Etkileri	31
4.10 Borlanmış Çeliklerin Korozyon Dayanımları	32
4.11 Borlama İşleminin Kullanım Alanları	33

BÖLÜM BEŞ - KOROZYON 35

5.1 Korozyonun Genel Tanımı	35
5.2 Korozyonun Elektrokimyasal İlkeleri	37
5.3 Korozyon Çeşitleri	39
5.3.1 Genel (Uniform) Korozyon	40
5.3.2 Galvanik Korozyon	41
5.3.3 Erozyonlu Korozyon	41
5.3.4 Aralık (Crevice) Korozyonu	41
5.3.5 Çukurcuk (Pitting) Korozyonu	42
5.3.6 Seçici (Dealloying) Korozyon	42
5.3.7 Taneler Arası (Intergranular) Korozyon	42
5.3.8 Gerilmeli Korozyon Çatlağı	43
5.3.9 Yorulmalı Korozyon (Fatigue Corrosion)	43
5.4 Korozyon Hızını Ölçme Yöntemleri	43
5.4.1 Kütle Kaybı Yöntemi	44
5.4.2 Elektrokimyasal Yöntemler	45
5.4.2.1 Tafel Ekstrapolasyonu	45
5.4.4.2 Polarizasyon Direnci Yöntemi	46
5.4.3 Akım Potansiyel Eğrilerini Elde Etme Yöntemleri	48
5.4.3.1 Potansiyostatik Yöntem	48
5.4.3.2 Potansiyodinamik Yöntem	48
5.4.3.3 Galvanostatik Yöntem	49
5.4.4.4 Galvanodinamik Yöntem	49
5.5 Korozyondan Korunma Yöntemleri	49
5.5.1 Malzeme Seçimi	49
5.5.2 Kaplama Yöntemleri	50
5.5.3 İnhibitör Kullanımı	50

5.5.4 Katodik Koruma	50
5.5.5 Tasarım.....	51
BÖLÜM ALTI - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	52
6.1 Çalışmanın Amacı	52
6.2 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar	53
6.3 Deney Numuneleri ve Spektral Analizleri	54
6.4 Numunelerin Korozyon Deneyine Hazırlanması	55
6.5 Elektrokimyasal Ölçümler.....	56
6.5.1 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi.....	57
6.5.2 Polarizasyon Direncinin Hesaplanması.....	58
6.6 Sertlik Testleri	59
6.7 Kutu Borlama İşlemi	59
6.8 Karakterizasyon İşlemleri.....	62
6.8.1 Optik Mikroskop ve Metal Mikroskop Analizleri.....	62
6.8.2 Numunelere Bağlı Tabaka Kalınlıkları ve Sertlik Değerleri.....	62
6.8.3 X-Işınları Difraksiyonu ve Kristal Yapı (XRD) Analiz Çalışmaları....	62
BÖLÜM YEDİ - SONUÇLAR.....	64
7.1 Optik Mikroskop/Metal Mikroskop Analizleri ve Sertlik Değerleri.....	64
7.2 Kutu Borlama İşlemi Sonuçları	77
7.2.1 XRD Sonuçları	77
7.2.2 Mikroyapı Sonuçları.....	78

7.2.3 Numunelere Bağlı Tabaka Kalınlık Ölçümleri	80
7.3 Elektrokimyasal Yöntemle Elde Edilen Test Sonuçları	83
BÖLÜM SEKİZ - GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	116
KAYNAKLAR.....	118



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 4.1 Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi	18
Şekil 4.2 Kutu borlama prosesinin şematik gösterimi	19
Şekil 4.3 Demir-bor denge diyagramı	28
Şekil 4.4 Demir borürlerin büyüme mekanizması.....	29
Şekil 4.5 Demir borürlerin büyüme mekanizması FeB ve Fe ₂ B tabakalarında, Demir-Bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi	30
Şekil 5.1 Çeliğin korozyon döngüsü	36
Şekil 5.2 Korozyon türleri	40
Şekil 5.3 Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile korozyon akımının (I _{kor}) bulunması ...	45
Şekil 5.4 Lineer polarizasyon direnci eğrisi	47
Şekil 6.1 Deney numunelerinin görünümü.....	55
Şekil 6.2 Lehimleme cihazı	56
Şekil 6.3 Üç elektrotlu korozyon düzeneği	57
Şekil 6.4 Tafel eğrisi	58
Şekil 6.5 Alümina seramik pota içerisinde Ekabor-2 ve Ekrit tozuyla kaplanan numune	60
Şekil 6.6 Kutu borlama işleminde kullanılan alümina kroze kapları	61
Şekil 6.7 Kutu borlama işleminde kullanılan fırın ve potaların fırın içinde konumu	61
Şekil 6.8 XRD cihazı.....	63
Şekil 7.1 1.2842 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış).....	64
Şekil 7.2 1.2842 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış).....	65
Şekil 7.3 1.2842 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış).....	65
Şekil 7.4 1.2842 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış).....	66

Şekil 7.5 R1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlamalı).....	67
Şekil 7.6 R1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış).....	67
Şekil 7.7 R1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış).....	68
Şekil 7.8 R1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış).....	68
Şekil 7.9 C1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış).....	69
Şekil 7.10 C1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış).....	70
Şekil 7.11 C1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)	70
Şekil 7.12 C1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)	71
Şekil 7.13 N1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)	72
Şekil 7.14 N1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)	73
Şekil 7.15 N1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)	73
Şekil 7.16 N1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)	74
Şekil 7.17 I1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)	75
Şekil 7.18 I1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)	75
Şekil 7.19 I1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)	76
Şekil 7.20 I1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)	76

Şekil 7.21 850 °C’ de 4 saat borlanmış C1 numunesinin X-ışınları difraksiyon paterni	77
Şekil 7.22 850 °C’de 4 saat borlanmış 1.2842 numunesinin X-ışınları difraksiyon paterni	78
Şekil 7.23 1.2842 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede optik mikroskopundan elde edilen iç yapı görüntüsü	79
Şekil 7.24 1.2842 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede metal mikroskopundan elde edilen iç yapı görüntüsü	79
Şekil 7.25 C1 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede optik mikroskopundan elde edilen iç yapı görüntüsü	80
Şekil 7.26 C1 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede metal mikroskopundan elde edilen iç yapı görüntüsü	80
Şekil 7.27 1.2842 çeliğinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen tabaka kalınlık değerleri	81
Şekil 7.28 C1 çeliğinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen tabaka kalınlık değerleri	82
Şekil 7.29 Tüm numunelerin korozyon hızlarının karşılaştırma grafiği	85
Şekil 7.30 I1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi...86	
Şekil 7.31 I1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi...87	
Şekil 7.32 I1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları	88
Şekil 7.33 R1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi..89	
Şekil 7.34 R1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi..90	

Şekil 7.35 R1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları.....	91
Şekil 7.36 C1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi...	92
Şekil 7.37 C1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi...	93
Şekil 7.38 C1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları.....	94
Şekil 7.39 N1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi...	95
Şekil 7.40 N1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi...	96
Şekil 7.41 N1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları	97
Şekil 7.42 1.2842 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	98
Şekil 7.43 1.2842 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	99
Şekil 7.44 1.2842 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 SiC zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları.....	100
Şekil 7.45 Tüm numunelerin 240 gritlik zımpara ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları.....	101
Şekil 7.46 Tüm numunelerin 1200 gritlik zımpara ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları	103

Şekil 7.47 C1 numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	104
Şekil 7.48 C1 numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	105
Şekil 7.49 C1 numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik ve 1200 zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	106
Şekil 7.50 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi.....	107
Şekil 7.51 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi.....	108
Şekil 7.52 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	109
Şekil 7.53 C1 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	110
Şekil 7.54 C1 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	111
Şekil 7.55 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	112
Şekil 7.56 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan	

sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi	114
--	-----



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1 Kalıp ekipmanları için önerilen çelik türleri	14
Tablo 4.1 Borlama yöntemleri karşılaştırma tablosu	23
Tablo 4.2 FeB ve Fe ₂ B fazlarının fiziksel özellikleri	26
Tablo 6.1 Numunelerin kimyasal içerikleri	54
Tablo 6.2 Ekabor-2 tozu kimyasal içeriği	60
Tablo 7.1 1.2842 çeliğinin mikrosertlik değerleri	66
Tablo 7.2 1.2842 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları	66
Tablo 7.3 R1 çeliğinin mikrosertlik değerleri	69
Tablo 7.4 R1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları	69
Tablo 7.5 C1 çeliğinin mikrosertlik değerleri	72
Tablo 7.6 C1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları	72
Tablo 7.7 N1 çeliğinin mikrosertlik değerleri	74
Tablo 7.8 N1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları	74
Tablo 7.9 I1 çeliğinin mikrosertlik değerleri	77
Tablo 7.10 I1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları	77
Tablo 7.11 Yüzeyden itibaren ölçülen sertlik değerleri	81
Tablo 7.12 1.2842 çeliğinin mikrosertlik değerleri	81
Tablo 7.13 C1 çeliğinin kutu borlama işlemi sonrasında yüzeyden itibaren ölçülen sertlik değerleri	82
Tablo 7.14 C1 çeliğinin mikrosertlik değerleri	82
Tablo 7.15 Kutu borlama işlemi uygulanmamış numunelerin 1 M %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon değerleri	84
Tablo 7.16 Kutu borlama işlemi uygulanmış numunelerin numunelerin 1 M %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon değerleri	84

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Günümüzde, teknolojinin hızla gelişmesi ve uluslararası rekabetle karşı karşıya olunması, işletmeleri verimliliğin yanı sıra üretimlerindeki kaliteyi de sürekli geliştirmek zorunda bırakmıştır. Teknolojinin günümüzde bu denli hızlı gelişmesi hem malzemeler hem de bu malzemelerin şekillendirilmesi ve işlenmesinde uygulanan yöntemler üzerinde beklentileri arttırmaktadır.

Plastik kalıp çelikleri çalışma koşullarında yüksek gerilmelere maruz kaldıklarından dolayı; korozyon, aşınma, eğme ve darbeye karşı mukavemet performanslarının yüksek olması beklenilmektedir. Endüstride kullanılan plastik kalıp çelikleri ile ilgili olarak yaşanan en temel ve etken problem, maliyet sorunları ve teknik sistem düzeninin aksaması da baz alındığı zaman korozyon faktörü olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstride, özellikle üretim esnasında devamlı olarak kullanılan çelik malzemeler, kullandıkları ve bulundukları ortamın şartlarına da bağlı olarak korozyondan etkilenmektedirler. Çalışma ortamının da yaratmış olduğu etki ile metalik malzemelerin, sahip oldukları karakteristik kimyasal yapıları ve mekanik özelliklerinde negatif etkiye sebep olan değişimler ortaya çıkmaktadır.

Plastik kalıp çelik malzemelerinin korozyon davranışlarının tespit edilmesinde en önemli kriter belirleyici olarak sahip oldukları, kendilerine özgü kimyasal kompozisyonları ve metalurjik yapısı en belirleyici etken faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstride, özellikle otomotiv sanayisinde kalıp çelikleri sürekli olarak üretim düzeninin içinde yer almaktadır. Planlama aşamasında, kalıp çelik malzeme seçimi yapılırken, en önemli seçim kriterlerinden biri de talaşlı imalat ile işlenen yüzeylerin kalite performansı ve kullanım/servis ömrüdür. Yüzey ne kadar kaliteli bir şekilde işlenirse malzemenin özellikleri de buna bağlı olarak gelişmekte ve uzun süreli kullanıma sunulmaktadır. Bahsedilen bu özelliklerin en başında da korozyon direnci yer almaktadır.

Korozyon hasarının sürekli olarak yaşandığı bir işletmede ortaya çıkan kayıplar uzun vadede kritik boyutlara gelerek sistemin düzenini aksatmaktadır. Malzeme, ekipman, enerji, zaman ve iş gücü kayıpları korozyon sorununun beraberinde getirdiği

aksaklıkların sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu problemlerin tekrarlı olarak yaşanmaması, ekonomik kayıpların minimum seviyeye düşmesi için kullanılan ekipman malzemelerinin bulunduğu çalışma şartlarını negatif etken seviyesine düşürerek, servis ömrünün ve yüzey kalitesini arttırmak amacıyla performans özelliklerini optimum seviyeye çıkarmak için yüzey sertleştirme işlemlerinden faydalanılır.

Bu tez çalışmasında, otomotiv sektöründe kullanılmakta olan plastik kalıp çelik numunelerinin (I1, R1, C1, N1) korozyon özelliklerini incelenmiştir. Deney numuneleri Standard Profil Ege Otomotiv A.Ş firması tarafından tarafımıza temin edilmiştir. Temin edilen numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Mevcut durumda kalıp çelik numuneleri için yüzey kalitesine uygun zımpara aralığı 240 grit SiC zımpara kâğıdı ile zımparalanarak, yüzey pürüzlülük değeri olarak belirlenmiş ve referans alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değerlerini karşılaştırmak amacıyla; ilk aşamada 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile numuneler zımparalanarak hazırlanmış ve her numunenin yüzey pürüzlülük değerleri 240 ve 1200 gritlik zımpara işlemlerinden sonra ölçülerek numuneler elektrokimyasal korozyon deneylerine tabii tutularak her iki durum için de Tafel eğrileri karşılaştırılmıştır.

Bu işlemlere paralel olarak sunulan, kutu borlama işleminin korozyon davranışlarına olan etkisini incelemek amacıyla bu kalıp çeliklerinden görece olarak diğerlerine göre daha düşük maliyetli olan C1 çeliği ve bu çeliklere alternatif olarak sunulan 1.2842 (90MnCrV8) kalıp çelik numunesine 850°C, 4 saat sürede Ekabor-2 tozu kullanılarak, kutu borlama işlemi uygulanmış, hem 240 gritlik SiC zımpara kâğıdı ile hem de 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanarak korozyon özellikleri ve korozyon hızları borlanmamış numuneler ile karşılaştırılmıştır.

BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Peng (2020), AISI 1018 ve 316L çelik numunelerine, üç farklı sıcaklıkta (850 °C, 900 °C ve 950 °C) ve üç farklı sürede (4, 6 ve 8 saat) kutu borlama işlemi uygulayarak, numunelerin sertlik, aşınma ve korozyona karşı dirençlerini karşılaştırmıştır. Yapmış olduğu bu çalışmada, her bir sıcaklık sonunda oluşan borür tabakasının kalınlığını, sertliğini, yüzey pürüzlülük değerlerini ve yüzeyde oluşan fazları XRD, optik mikroskobu ve SEM kullanarak incelemiştir. XRD analizi ile AISI 316L çelik numunesinin yüzeyinden elde edilen bor tabakasını incelediğinde, FeB ve Fe₂B, CrB ve Cr₂B NiB, Ni₂B ve Ni₃B' den oluştuğunu gözlemlemiştir. AISI 1018 çelik numunesinde ise FeB ve Fe₂B fazlarının, 850°C'de 4 saat borlama işlemi sonucunda oluştuğunu belirtmiştir. Çalışma sonucunda, AISI 1018 çeliklerinin borlama işlemi uygulanmış numunelerinde korozyon dirençleri hem doymuş KCl çözeltisinde hem de potasyum çözeltisi içinde borlama işlemi, borlama uygulanmamış numunelere göre daha düşük korozyon dirençlerine sahip olduğunu gözlemlemiştir. Bunun nedeni olarak ise kutu borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakasının sahip olduğu porozite miktarının artması ile ilgili olduğunu belirtmiştir (Peng, 2020).

Yakın zamanda yapılan bir diğer çalışmada, AISI 904L paslanmaz çelik numunesinin üç farklı sıcaklık (850°C, 900°C, 950°C) ve 4 saat sürede Ekabor-2 tozu kullanarak kutu borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sonucunda numunelerin korozyon davranışlarını irdelemişlerdir. Borlama işleminden sonra numunelerin yüzeylerinde oluşan fazları, XRD analizi ile belirlemişler ve bu fazların FeB, Fe₂B, Cr₂B, Ni₂B ve CrB₂ fazları olduğunu tespit etmişlerdir. Tabaka kalınlıklarının ise 10µm ile 25µm arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Numunelerin korozyon özelliklerini belirlemek için, tüm numuneleri borlama öncesi ve borlama sonrası olarak gruplandırarak tükürük çözeltisi içerisinde 1 saat bırakarak elektrokimyasal korozyon deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda ise Tafel eğrileri üzerinden korozyon davranışlarını tespit etmişlerdir. İşlem parametrelerine bağlı olarak her bir numuneye ait tespit ettikleri korozyon hızları sırasıyla; borlama işlemi uygulanmamış numunede 7,354 mpy, 850 °C'de 4 saat borlama işlemi sonucunda 10,22 mpy, 900°C' de 30,46 mpy, 950°C'de

ise 38,14 mpy'dir. Bu sonuçlar neticesinde, yapılan borlama işleminin sıcaklık derecesi arttıkça korozyon dayanımının düştüğünü buna paralel olarak korozyon hızının ise arttığını bildirmişlerdir (Mertgenç ve Kayalı, 2019).

Karacif ve diğer. (2019) az karbonlu çelik olan SAE 1020 çelik numunelerini kullanarak, bu numunelere 15 ppm, 20 ppm ve 100 ppm miktarlarında bor elementi eklemişler sonrasında ise asidik ve tuzlu ortamlarda korozyon dayanımlarını irdelenmişlerdir. Korozyon deneylerini 0,1 M H₂SO₄ ve 0,1 M NaCl çözeltisinde gerçekleştirmişlerdir. Elektrokimyasal test yöntemlerinden potansiyodinamik polarizasyon tekniği kullanarak numunelerin korozyon hızlarını ölçmüşlerdir. Analizleri sonucunda, az karbon içeren çeliklere düşük miktarlarda yapılan bor ilavesi (15 ppm) asidik ve tuzlu ortamda çelik numunelerin korozyon hızlarını arttırdığını ve buna bağlı olarak korozyon direncini de düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Bunun nedeni olarak ise çeliklere yapılan bor ilavesinin, ana yapıya sahip olan Fe ile eklenen bor elementinin birleşimiyle mikro galvanik çift meydana geldiğini, bor elementinin demire kıyasla ideal soy özellikleri göstermesinden dolayı katodik davranış sergileyerek, demirin anodik çözünmesine yol açtığını, bu durumun korozyon hızını arttırdığını belirtmişlerdir (Karacif, Çarboğa, ve Candemir, 2019).

Birden (2018), AISI 304L paslanmaz çelik numunesini, 950°C'de ve dört farklı sürede (2, 4, 6 ve 8 saat) kutu borlama işlemine tabii tutmuştur. Yapmış olduğu XRD ve SEM analizleri ile borlanan numunelerin borür tabakası, alaşım element miktarlarına bağlı olarak düz ve daha ince bir yapıda olduğunu tespit etmiştir. Her bir sıcaklık parametresinin artışı sonucunda yüzeyden ölçümünü gerçekleştirdiği bor tabaka kalınlık düzeyinin de arttığını belirtmiştir. İncelemeleri sonucunda borür tabaka kalınlığının 20 µm ile 50,6 µm arasında değiştiğini gözlemlemiştir. XRD analizleri sonucunda borür tabakasından elde ettiği fazların FeB, Fe₂B, CrB, MnB gibi inter-metalik fazlar olduğunu, Vickers sertlik testleri sonucunda borlama işleminin numunelerin sertlik değerlerini 382,3 HV_{0,1} değerinden 1515,1 HV_{0,1} değerine kadar çıkardığını gözlemlemiştir (Birden, 2018).

Topuz (2016), DIN 1.2842 (90MnCrV8) soğuk iş takım çeliği numunelerine üç farklı sıcaklık (850°C, 950°C, 1050°C) ve iki farklı sürede (1 ve 4 saat) Ekabor-1 tozu kullanarak kutu borlama işlemi uygulamıştır. Bu parametreler doğrultusunda farklı

sıcaklık ve farklı sürelerde oluşan borür tabaka kalınlıklarında zamana ve sıcaklığa bağlı olarak artış gösterdiğini belirlemiştir. Elde edilen borür tabaka kalınlıklarını ölçmüş, XRD analizi ile numune yüzeylerinde oluşan fazları tespit etmiştir. Elde ettiği XRD analizlerine göre, borlama işlemi ile DIN 1.2842 çeliğinin bor tabakasının iki farklı fazdan oluştuğunu, bu fazların FeB ve Fe₂B fazları olduğunu, aynı zamanda numunenin içerisinde bulunan yüksek oranda yer alan mangan elementinin etkisi sonucunda, FeB₄₉ fazının bulunduğunu tespit etmiştir. Bu çalışma sonucunda, kutu borlama işlemi için en önemli parametrenin sıcaklık faktörü olduğunu belirtmiştir. Bu durumun temel sebebi olarak ise sıcaklığın artışıyla birlikte termal genleşmede de bir artışın olduğunu, oluşan bor tabakalarına ait fazların ise daha rahat ayrılabilmesini gözlemlemiştir. Deneylerde farklı sıcaklık ve süre şartlarında uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda, kullanılan DIN 1.2842 soğuk iş takım çeliği için en uygun borlama parametresinin 850°C’de ve 4 saat sürede olduğunu tespit etmiştir. Bu sıcaklık ve sürede (850 °C, 4 saat) yüzeyden itibaren mesafeye göre sertlik değerlerini ölçmüştür. Bu sertlik değerleri ise sırasıyla 20 µm’de 2107 HV_{0,1}, 50 µm’de 1821 HV_{0,1}, 150 µm’de 227 HV_{0,1}, ve 280 µm 203 HV_{0,1}’dir. Bu sıcaklık değerinde ölçtüğü ortama tabaka kalınlık değeri 103,9 µm’dir (Topuz, 2016).

Başka bir araştırmada, soğuk iş takım çelik numunelerine Ekabor-2 tozu kullanarak iki farklı sıcaklık (850°C ve 950°C) ve 6 saat sürede kutu borlama işlemi uygulamışlardır. Bu borlama işlemi sonucunda, korozyon özelliklerini %4 HCl asit çözeltisinde bekleterek kütle kaybı yöntemi tekniği ile tespit etmişlerdir. Bor tabakasının sertlik değerini de borlama işleminden sonra ölçmüşlerdir. Borlama işleminden önce numunelerin Vickers sertlik değeri 428 HV_{0,05} olduğunu, borlama işleminden sonra ise çeliklerin sertlik değerlerinin 1806 ile 2342 HV_{0,05}’e kadar çıktığını gözlemlemişlerdir. Borlanmamış numuneler ile borlanmış numunelerin korozyon dayanımları karşılaştırıldığında, borlanmış numunelerin korozyon dirençlerinin borlanmamış numunelere göre 8 kat daha iyi olduğu sonucunu elde etmişlerdir (Erdoğan ve Güneş, 2015).

Topuz ve diğer. (2014) X45NiCrMo4 (DIN 1.2767) ve 90MnCrV8 (DIN 1.2842) üç farklı sıcaklık (850°C, 950 °C, 1050 °C) ve üç farklı sürede (1, 2 ve 4 saat) kutu borlama işlemi uygulayarak bu çelik numunelerinin kinetik davranışlarını

incelemişlerdir. Borlama işlemi sonucunda DIN 1.2767 çelik numunesi için hesapladıkları aktivasyon enerji değeri 156 kJ/mol, 1.2842 çelik numunesi için ise 179 kJ/mol'dur (Topuz, Yılmaz, ve Gündoğdu, 2014).

Turku ve diğer. (2014) termokimyasal borlama işlemine tabii tutulan düşük karbonlu çeliklerin, tek sıcaklık ve farklı sürelerde sertlik değerlerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. 1123 K sıcaklıkta ve 2, 4, 6 ve 8 saatlik sürelerde gerçekleşen borlama işlemi sonucunda, XRD ve Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) analizleri ile borlanan düşük karbonlu mikroalaşımlı çeliklerin borür tabakasında FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğunu gözlenmiştir. Yüzeyden itibaren ölçtükleri sertlik değerlerine bakıldığında bor atomunun etki etmediği yüzeylerde sertlik değerinin 150 HV olduğunu, borlama işlemi ile bu sertlik değerinin 1300 HV'lere kadar ulaştığını tespit etmişlerdir (Turku ve diğer., 2014).

Kabadayı (2013), DIN 1.4849 kalite çelik numunelerinin farklı sıcaklık ve farklı sürelerde oluşan bor tabakalarının sertlik değerlerinin nasıl değiştiğini incelemek için 850 °C, 950 °C ve 1050 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık ve beş farklı sürede (3, 6, 9, 12 ve 15 saat), bor kaynağı olarak ticari Ekabor-2 toz karışımını kullanarak katı borlama işlemi uygulamıştır. XRD analizleri sonucunda borür tabaka yapısında ise Fe₂B ile Fe₃B tabakalarının oluştuğunu gözlemlemiştir. Borlama işleminden sonra numunelerin yüzeylerinden elde ettiği sertlik değerinin ortalama ölçüsünü 1635 HV olduğunu ve oluşan bor tabaka yapısının iğnemsî bir yapıda oluştuğunu tespit etmiştir. Yapmış olduğu bu çalışma ile borür tabaka kalınlığının, borlama işleminin sıcaklık ve süresine bağlı olarak arttığını bildirmiştir (Kabadayı, 2013).

Campos ve diğer. (2006) AISI 304 çelik malzemeyi plazma pasta borlama yöntemi ile farklı sıcaklık (1173, 1223, 1273 K) ve farklı sürelerde (4 ve 6 saat) borlama işlemi uygulamışlardır. Borlama işlemi ile numunelerin korozyon dirençlerinin nasıl değiştiğini karşılaştırmışlardır. Numunelerin yüzeylerine 4 ve 5 mm bor pasta (macun) kalınlıkları uygulamışlardır. Borlanmış numunelerin korozyon dirençlerini, 0,1 M NaCl çözeltisi içerisinde, elektrokimyasal korozyon test yöntemlerinden açık devre (OC) ve lineer polarizasyon yöntemini (LP) kullanmışlardır. Borlama işlemine tabii tutulan numuneler ile borlama işlemi uygulanmayan numune arasındaki korozyon direnci karşılaştırmalarını yapmışlardır. Bor macunu kalınlık miktarının borlama işlemi

uygulanmış numunelerin korozyon dirençlerini etkilediğini gözlemlemişlerdir. 5 mm bor macunu ile borlama işlemi uygulanan numunelerin, işlem sıcaklığı ve süresi arttıkça korozyon dirençlerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Bu duruma karşılık olarak 4 mm bor macunu kullanılarak 4 saat sürede 1273 K sıcaklık değerinde en iyi korozyon direncine sahip olduğu sonucuna varmışlardır (Campos ve diğer., 2006).

Kariofillis ve diğer. (2006) yapmış oldukları çalışmada sıcak iş takım çeliği olan H13 çeliğinin, hazırlamış oldukları özel asit çözeltilerinde korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Özel asit çözeltisi olarak ise %5 HCl, %5 H₂SO₄ ve %30 H₃PO₄ çözeltilerini kullanmışlardır. Borlama işlemi olarak kutu borlama işlemi uygulamışlardır. Korozyon davranışlarını ise potansiyodinamik ve kütle kaybı yöntemleriyle tespit etmişlerdir. Numunelerin borlama işleminden sonra sertlik değerlerinin 1200 ve 1750 HV arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bor tabakasına ait ortalama kalınlık değerini 60 µm ölçmüşlerdir. Yapmış oldukları test sonuçlarında, H13 çeliği, borlanmış H13 çeliğine kıyasla HCl asit ortamında daha iyi bir korozyon direnci sergilediğini, buna karşılık ise borlanmış çelik numuneler daha kısa süreler için %5 H₂SO₄, %30 H₃PO₄ çözeltilerinde daha iyi bir korozyon direncine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Kariofillis, Kiourtsidis, ve Tsipas, 2006).

Özsoy ve diğer. (1993) yapmış olduğu çalışmada, borlama sonucunda ortaya çıkan bor tabakasının oluşumunda demir borürlerin çekirdeklenerek büyüyerek oluştuğunu, karbon miktarında artışa bağlı olarak ise dişli yapının düzleşmeye başladığını belirtmiş, bunu karşılık ise düşük ve orta karbonlu çeliklerde ise iğnemsî bir yapı meydana gelmekte olduğunu belirtmiştir (Özsoy ve Yaman, 1993).

Yapılan en eski araştırma çalışmalarında ise, krom artışının bor tabaka kalınlık değerine etki etmediğini fakat FeB fazının yapıda artış gösterdiğini buna karşılık Fe₂B fazının ise azaldığı tespit etmişlerdir. Analizleri sonucunda yüksek krom içeren çeliklerde bor tabaka yapısının düz bir formda oluştuğunu, dişli bir form elde etmek için ise optimum krom miktarının %4 Cr miktarında olması gerektiğini vurgulamışlardır (Uzun, 2002).

Matuschka (1980), Fe₂B ve FeB fazlarının Gibbs serbest enerji değerleri ölçmüştür. Fe₂B fazının sahip olduğu serbest enerji değerinin, FeB fazının serbest enerji

değerinden daha negatif bir değerde olduğunu, buna bağlı olarak bor tabakası içinde önce Fe_2B fazının daha sonra FeB fazının oluştuğunu tespit etmiştir (Matuschka, 1980). Buna benzer bir çalışma sonucunda ise, daha erken oluşan Fe_2B fazının ortamda bulunan bor ile reaksiyona girerek FeB fazını oluşturduğu vurgulanmıştır (Uzun, 2002).



BÖLÜM ÜÇ

PLASTİK KALIP ÇELİKLERİ

Günümüzde kalıpla üretim yöntemi, başlıca seri üretim yöntemi olarak endüstride tercih edilmektedir. Üretilen malzemeden istenilen özelliklere ve kullanım yerlerine göre kalıplar değişip plastik, çelik ve kompozit gibi sanayide çok geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Bu kalıp malzemeler vasıtasıyla, üretimi gerçekleştirilecek olan parçalara nihai şekiller verilmektedir. Takım çeliklerinin sahip oldukları performans özelliklerine ve içinde bulunacakları alanların biçimlerine bağlı olarak döküm, dövme, ekstrüzyon, enjeksiyon kalıp malzemelerinde kullanılan alaşım çelikleridir. Bununla birlikte çeşitli malzemelerin şekil alma ve kesilme proseslerinde de kullanılan mühendislik malzemeleridir (Alibey, 2010).

Takım çelikleri, endüstrinin hemen hemen her alanında farklı amaçlar için kullanılarak üretim zincirine büyük katkılar sağlamaktadırlar. Teknolojide gerçekleşen gelişmelerin etken bir sonucu olarak sektörlerin yer aldıkları pazarlarda rekabetin sürekli olarak güçlenmesiyle, bu kalıplardan beklenen özelliklerde her geçen gün artmaktadır. Bu özellikler kalıpların kullanım yerlerine ve amaçlarına göre değişiklik göstermekle beraber takım çeliklerinden en çok istenilen ve beklenen temel özellikler sırasıyla korozyona karşı yüksek direnç, aşınma ve sertliklerinin mukavim olması, iyi parlatılabilirlik seviyesinde ve işleme kabiliyetinin yüksek olması en başta gelen özellikler olarak yer bulmaktadır (Wen, 2009). Kalıp çeliklerinin istenilen bu performans özelliklerine karşılık vermesi, seçilecek olan kalıp malzemesinin alaşım elementlerine, temin edilen ısıtma işlem parametrelerine, üretim yöntemine ve kalıbın geometrik tasarımına bağlı olarak değişmektedir.

3.1 Plastik Kalıp Çeliklerinin Özellikleri

Plastik kalıp çelikleri, uygun kimyasal kompozisyonu sayesinde korozyona, aşınmaya ve basmaya karşı yüksek direnç özelliklerine sahip, parlatılabilirlik ve işlenebilirlik kabiliyetleri çok iyi olan, kimyasal kompozisyonlarında düşük ya da orta miktarda karbon elementini barındıran, karbonun bulunmasıyla birlikte silisyum, mangan, krom, nikel, molibden, vanadyum ve alüminyum gibi alaşım elementlerini de

yer vererek içinde bulunduran, optimal dengelenmesi sayesinde yüksek performans özelliklerine sahip olarak üretilen alaşımlı çelik malzemelerdir (Alibey, 2010).

Günümüzde kalıpla üretimin en çok gerçekliği sektörlerden biri olan plastik endüstrisinde kullanılan plastik kalıplarında, ihtiyaç ve taleplerin her geçen gün artmasıyla birlikte bu çeliklerden beklenen performans özellikleri de pazar trendine bağlı olarak artış göstermektedir. Talep edilen bu özelliklerin artmasında en temel kriter ise üretim esnasında kullanılan hammaddenin kullanım şartlarına ve kullanım yerine göre kalıp malzemesinin korozyon, aşınma ve yüksek basınç etkisinin altında kalarak birtakım hasarlara uğramasıdır. Bu kayıpların yaşanmaması, malzeme kullanım ömrünü optimum şekilde kullanmak için plastik kalıp çeliklerinden istenilen özellikler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir (Albaraz, 2010; Alibey, 2010):

- Yüksek korozyon direnci
- Yüksek aşınma direnci
- Düşük ısı genleşme
- Sertleştirme sırasında düşük boyutsal değişim
- İyi parlatılabilirlik
- Yüksek mukavemet
- Yüksek süneklik / yüksek tokluk
- Kolay işlenebilirlik

3.2 Plastik Kalıp Çeliklerinin Sınıflandırılması

Ürün geliştirme ve planlama çalışmalarında, malzeme tasarımı ve seçimi aşamasında kullanılacak olan çalışma koşulları da göz önüne alınarak plastik kalıp çelik malzemesinde seçime gidilir. Plastik kalıp çelikleri sahip oldukları performans özelliklerine, içerdikleri alaşım element miktarlarına, sertlik değerlerine, kullanım alanlarına, ısı işlem parametrelerine göre beş ana grupta toplanmaktadır: (Alibey, 2010):

- Yüzeysel Sertleşebilen Çelikler
- Ön Sertleştirilmiş Çelikler
- Çekirdeğe Kadar Sertleşebilen Çelikler

- Nitrasyon Çelikleri
- Korozyona Dayanımlı Çelikler

3.2.1 Yüzeysel Sertleşebilen Çelikler

Sementasyon çeliklerinde olduğu gibi, yüzeysel sertleşebilen çeliklerinde yüzey özelliklerinin iyileştirilerek kullanılması için sertlik değerleri arttırılmaktadır. Bu plastik çelik grubunun sertlik değerlerinin artması için bir takım sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır. Bu çelikler, belirlenen ortam ve işlem şartlarında, örneğin; havada, yağda ve tuz banyosunda su verilme işlemine maruz bırakılarak sertlik değerlerinin yükselmesi sağlanmaktadır. Bu sayede yüzeyi sert ve çekirdeği tok bir yapıda, aşınma direnci yüksek bir çelik elde edilmektedir. Endüstride, özellikle çok yoğun ve uzun süreli kullanılan kalıp malzemelerinin aşınma dayanımının daha dirençli olması amacıyla bu kalıp malzemeleri tercih edilmektedir (Alibey, 2010).

3.2.2 Ön Sertleştirilmiş Çelikler

Bu çelik grubunu diğer çelik türlerine kıyasla ön plana çıkmasını sağlayan en temel özelliklerinden biri kullanımının zahmetsiz olmasıdır. Bu özelliğini çok iyi parlatılabilmesi takip etmektedir. Ön sertleştirilmiş çelikler, kalın ölçü pay aralık değerleri yüksek olduğu durumlarda bile çekirdeğin sahip olduğu sertlik değerini yitirmeden kullanılabilir. Bu gruba ait en önde gelen çelikler ise DIN 1.2311, DIN 1.2312 ve DIN 1.2378'dir (Alibey, 2010).

3.2.3 Çekirdeğe Kadar Sertleşebilen Çelikler

Kullanım şartlarına göre, plastik kalıbının kullanıldığı ortamda, kalıbın üzerinde büyük basınç değerlerinde bir kuvvet varsa, çekirdeğe kadar sertleşebilen çelikler kullanılmaktadır. Bu çeliklerin tercih edilmesinin temel nedeni, sahip oldukları sertlik yüzey ile sınırlı kalmamakla birlikte çekirdeği de içermesinden dolayıdır. Bununla birlikte parlatılabilme özellikleri çok iyidir. Bu gruba ait en çok talep gören çelik ise 1.2764 plastik kalıp çeliğidir (Alibey, 2010).

3.2.4 Nitrasyon Çelikleri

Plastik enjeksiyon mekanizmalarında, aşınma direncinin yüksek olmasından dolayı vida ve silindir ekipmanlarında tercih çelik türleridir. Bu gruba ait çelikler 1.8850, 1.2891 ve 1.2307 çelikleridir (Alibey, 2010).

3.2.5 Korozyona Dayanımlı Çelikler

Plastik kalıp çeliklerinden beklenen en önemli performans özelliklerinin başında, korozyona karşı sahip olmaları gereken yüksek korozyon direnci özelliği gelmektedir. Kimyasal çalışma koşulları da göz önünde bulundurulduğunda, plastik kalıp çeliğinin çalışma ortamında, örneğin plastik üretiminde, seri üretimi gerçekleşecek olan PVC malzemeler çelik kalıp malzemesi ile temasta bulunduğunda PVC malzeme, çelik üzerinde asit özelliği göstermektedir. Bu durumun ortaya çıkardığı sonuç olarak, çelik malzemesinin yüzeyinde oksit oluşumu meydana gelmektedir. Oksit oluşumu çelik malzeme yüzeyinin bozunmasına neden olmaktadır. Oksit oluşumunun hızlanmasıyla, malzemenin sahip olduğu fiziksel, kimyasal özellikleri zamanla olumsuz etkilenmeye başlayarak, kullanılamaz duruma gelmektedir (Alibey, 2010).

Plastik kalıp çeliklerinin kullanıldığı diğer ortam koşulları da korozyon oluşumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu ortam koşulları, örneğin; malzeme üzerindeki mekanik yüklerin etkisi, rutubet ve artık gerilmeler olabilir, bu koşullar korozyonun ortaya çıkmasında büyük rol oynamaktadır. Korozyon sorununu en düşük seviyeye indirmek için, negatif ortam şartlarında dahi yüksek korozyon direnci özelliği gösteren bu çelik grubunu geliştirerek sunmuşlardır. Bu grupta yer alan çelikler %12-13 oranında krom miktarına sahiptirler. Bu gruba ait en önemli çeliklerden biri ise 1.2083 çeliğidir (Alibey, 2010).

3.3 Plastik Kalıp Çeliklerinin Kullanım Alanları

Plastik kalıp çelikleri sahip oldukları özelliklere göre endüstride farklı alanlarda kullanılmaktadırlar. Plastik kalıp çelik türlerinin en sık olarak kullanılan çeşitleri ve kullanım alanlarından aşağıda bahsedilmiştir (Albaraz, 2010; Alibey, 2010).

DIN 1.2738: Bu gruba ait elikler, 30-33 HRC sertlik değerleri arasında bulunmaktadır. Plastik enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplarında DIN 1.2378 elikleri sıklıkla kullanılmaktadır (Alibey, 2010).

DIN 1.2311: Döküm kalıplarında, plastik kalıplarında, makine bağlantı ekipmanlarında DIN 1.2311 eliği tercih edilmektedir. 1.2378' e göre parlatılaştırılabilme kabiliyeti düşüktür. Yüzeyinden çekirdeğe doğru sertlik değeri azalmaktadır (Alibey, 2010).

DIN 1.2312: İşleme kabiliyeti yüksek bir plastik kalıp çeliğidir. Yüksek sertliklerin gerektiği şartlarda nitrasyon işlemi uygulanarak kullanılmaktadır. DIN 1.2312 eliğinin sertlik aralığı 30-33 HRC'dir (Alibey, 2010).

DIN 1.2316: Korozyon dayanımı yüksek olduğundan dolayı, korozyonun yoğun olarak yaşanabileceği ortam şartlarında öncelikli olarak tercih edilmektedir. Herhangi bir yüzey sertleştirme işlemi gerektirmeden kalıplarda kullanılabilir (Alibey, 2010).

DIN 1.2767: %4 Nikel bulundurmasına dayanarak sertliğe karşı yüksek mukavim özelliği gösteren plastik kalıp çeliği türüdür (Alibey, 2010).

DIN 1.8850: Aşınma direncinin yüksek olmasından dolayı vida ve silindirlerinde kullanılan nitrasyon çeliğidir (Alibey, 2010).

DIN 1.2083: Çok iyi korozyon direncine, yüksek sertliğe ve iyi bir parlatılabilme özelliğine sahip olan bu elik PVC üretim hatlarında tercih edilmektedir. Aynı zamanda medikal sanayisinde de kullanım alanı bulmaktadır (Alibey, 2010).

Tablo 3.1 Kalıp ekipmanları için önerilen elik türleri (Alibey, 2010)

Kalıp Ekipmanları	Kullanılan elik Malzemeler
Vida	1.2307, 1.2379, 1.8550
Silindir	1.2344, 1.2307, 1.8550
Kafalar	1.2344, 1.2307,1.8550
İtici Plaka	1.1730
Tutucu Plaka	1.2312
Kalıp Hamili	1.1730, 1.2312
Baskı Plakası	1.2379, 1.2842
İtici Pimler	1.2344

BÖLÜM DÖRT

BORLAMA İŞLEMİ

4.1 Borlama İşlemi

Borlama işleminin tarihsel geçmişine bakıldığında zaman borlama ilk defa, Moisson tarafından 1895 senesinde yapılan çalışmalarla dikkat çekmeye başlamıştır. Moisson, bor atomlarını çeliklerin yüzeylerine difüzyon metoduyla yüzey sertleştirme işlemine tabii tutmuş, bu işlem sonucunda çeliklerin borlanabileceği iddiasını ortaya koymuştur. Daha sonraları, deneysel çalışmalarını çeliklerin borlanabilme işlemleri ile sürdürerek borlama prosesinin temellerini atmıştır (Habashi, 1997). Çeliklerin borlanmaları üzerine yapılan inceleme ve araştırma çalışmaları özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonraki süreçte gelişmeye başlamıştır. Günümüze kadar teknolojik gelişim süreçleriyle birlikte metal malzemelere güçlü ve yüksek performans özellikleri kazandırmasından dolayı borlama işlemi endüstride sıklıkla tercih edilen yüzey sertleştirme ve iyileştirme mekanizma basamaklarından birini oluşturmaktadır.

Borlama işlemi, bor atomlarının yüksek sıcaklık değerlerinde ısı enerjisinin yüksek etkisiyle, sertleştirme işlemine tabii tutulacak olan metal iş parçasının yüzeyine difüze olmasıyla birlikte asıl metal parçanın yüzeylerinde bulunan atomlarla borür tabakası meydana getirerek, malzemenin performans özelliklerini özellikle korozyon, aşınma, ve sertliklerini iyileştirme amacı baz alınarak, yüzey reaksiyonlarıyla ve difüzyon kontrolü ile gerçekleşen bir termokimyasal işlemdir (Fichtl, 1981; Küçük Kurt, 2015).

Borlama prosesi temel olarak metal malzeme yüzeyini yüksek performans özelliklerine getirerek, malzemenin öncesinde sahip olduğu hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerini iyileştirme prensibiyle yapılmaktadır. Borlama prosesi, belirlenen bir sıcaklık aralığında, minimum 840°C, maksimum 1050°C sıcaklık parametrelerinde, malzemeyi bir ya da en fazla on saat boyunca, belirlenen bu sıcaklık değerlerine maruz bırakılmasıyla gerçekleşmektedir. Prosesin işleyiş temeli, bor atomlarının metal yüzeyinde yayılmasını gerçekleştirilerek, borlama işlemi uygulanan metalin sahip olduğu atomları ile bir araya gelerek bor tabakası oluşumuna dayanmaktadır (Karaman, 2003; Turku ve diğer., 2014). Borlamada kullanılacak olan bor ortamının fiziksel hali katı, sıvı veya gaz ortamlarından biri olabilir. Bu işlem

süresince uygulanacak metot, borlama işlemine tabii tutulacak malzemenin kimyasal kompozisyonuna, borlama işlemi uygulanacak olan malzemenin cinsine, uygulama süresine ve uygulama sıcaklık parametreleri borlama işleminde elde edilen tabakayı etkileyen fonksiyon kriterleri olarak belirlenmektedir (Dilektaşlı, 2014; Ünlü ve Yılmaz, 2006).

Borlama prosesi, bor atomlarının işlem uygulanacak parça yüzeyinde termokimyasal metotlarla, difüzyon temelli parametreler doğrultusunda, bor tabakası elde edilmesiyle tamamlanan bir süreçten oluşmaktadır. Bu oluşan bor tabakası, demir esaslı malzemelerde, malzemenin yüksek oksidasyon ve korozyon direncini iyileştirerek, aynı zamanda aşınma ve sertliğe karşı büyük oranlarda direnç kazandırmaktadır (Ünlü ve Yılmaz, 2006).

4.2 Borlama Yöntemleri

Gelişen teknolojiyle birlikte son zamanlarda borlama tekniklerinde gelişmeler ivme olarak artmakta, istenilen performans özelliklerini borlama teknikleriyle malzemelere kazandırılması sağlanılmaktadır (Ünlü ve Yılmaz, 2006). Borlama işlemi temel olarak, bor atomunun küçük değerlerde bir element olmasına paralel olarak, işlem için optimal sıcaklık seviyelerine çıkılarak, bor atomlarının metal yüzeye yayınmasının sağlanması ile temel metal atomlarıyla beraber malzeme yüzeyinde, yüksek sertlik değerinde seramik tabakası yani bor tabakası oluşturması işlemidir (Fichtl, 1981).

Borlama prosesi gerçekleşmeden önce, yüzeyinin işleme hazırlık aşaması titizlikle yapılmalıdır. İşlemden önce malzeme yüzeyinin çok iyi bir şekilde temizlenmiş olması gerekmektedir. Borlama işlemi, 840 °C ve 1050 °C sıcaklık aralığında 1-10 saat sürede katı, sıvı, gaz, pasta(macun), plazma gibi çeşitli ortam kaynaklarında, bor sağlayıcı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Dilektaşlı, 2014; Güneş ve Taktak, 2012).

Borlama işleminin gerçekleşebilmesi için borlama ortamında bor kaynağı ve bor destekleyici bileşikler kullanılmaktadır. Kullanılan bu bileşikler katı, sıvı ve gaz fiziksel durumunda olabilmektedir. Kullanılacak olan borlama prosesine bağlı olarak, bor kaynağı B_4C , $NA_2B_4O_7$, H_2B_6 , aktivatör olarak K_BF_4 dolgu veya deoksidanlardan meydana gelmektedir (Dilektaşlı, 2014; Güneş ve Taktak, 2012).

Borlama yöntemlerinde kullanılan yöntemler şu şekildedir:

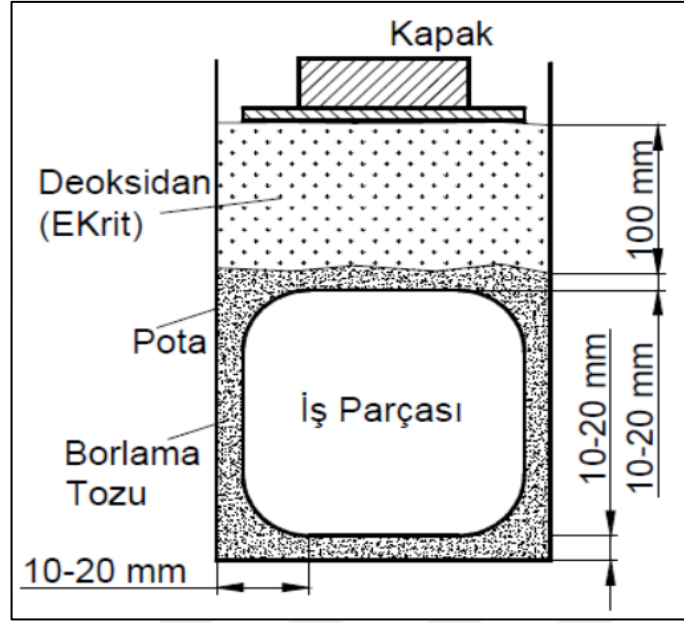
- Kutu borlama yöntemi
- Sıvı borlama yöntemi
- Gaz ortamda borlama
- Plazma borlama işlemi
- Pasta borlama yöntemi

4.2.1 Kutu Borlama Yöntemi

Kutu borlama işlemi, borlama prosesinin temelinde yer alan bor tabakasının elde edilmesi için, bor atomlarını iş parçası yüzeyinde yüksek sıcaklık etkisiyle, difüzyona uğratma işlemidir. Borlama uygulama süresi boyunca gerçekleşen ısıtma olayları malzemenin yapısı üzerinde faz dönüşümüne, dolayısıyla kimyasal özelliklerinin değişimine sebep olmaktadır (Davis, 2002; Er ve Par, 2004; Fichtl, 1981). Kutu borlama işlemi Şekil 4.1’de verildiği gibi bir düzenek sisteminden oluşur. Proses işlem süreci üç adımdan oluşmaktadır:

- Kutulama
- Isıtma
- Temizleme

Kutu borlama işleminde, kaplanacak olan malzeme yüzeyinin, borlama işleminden önce çok iyi temizlenmesi gerekmektedir. Numune yüzeyi üzerinde, yağ tabakası gibi numunenin hazırlanma aşamasından kalan yüzey kirliliklerinden arındırılması gerekmektedir. Numune yüzeyinde oksit tabakası (pas) varsa, ince gritli bir zımpara kâğıdı ile zımparalanarak yüzeyden uzaklaştırılmalıdır. Numune yüzey kalitesi bor tabaka kalınlığını etkilediğinden dolayı bu işlemlerin çok iyi bir şekilde yapılarak borlama işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

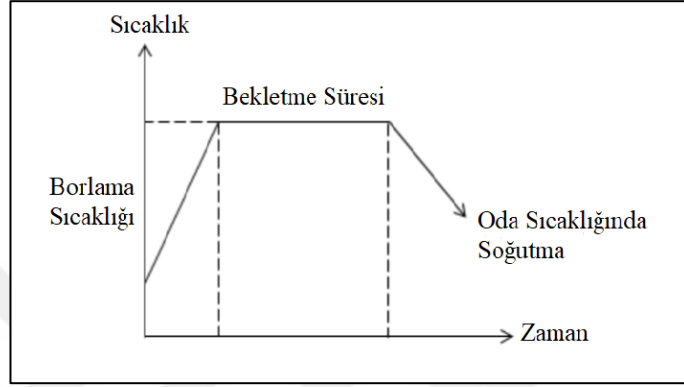


Şekil 4.1 Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi (Uluköy, 2006)

Şekil 4.1’de kutu borlama prosesinin numune hazırlık aşamasına ait şematik kurulum verilmiştir. Kutu borlama işleminde, bor kaynağı olarak toz karışımlar kullanılmaktadır. Seçilecek olan bor kaynağı karışımı, kutu borlama işlemi için hazırlanmış sıcaklığa karşı yüksek direnç gösteren bir kutu içine, numune yerleştirilmeden önce, kutunun tabanından 10-20 mm yüksekliğinde olacak şekilde eklenir. Daha sonra numune sızdırmaz kutu içerisine, önceden eklenmiş bor kaynağı tozu üzerine yerleştirilir. Yerleştirilen numunenin çevresi 10-20 mm kalınlıkta bor kaynağı tozunun tekrar eklenmesiyle tüm yüzeyleri bu tozla kaplanması sağlanır. Son olarak bor kaynağının numuneye yapışmasını engellemek amacıyla seçilecek olan bir deoksidant malzeme eklenerek kutunun kapağı sıkı bir şekilde kapatılır (Üçkardeşler, 2013).

Kutu borlama işlemi, önceden belirlenmiş ve ayarlanmış atmosfer kontrollü bir ısıtıl işlem fırını içerisinde gerçekleşir. Belirlenen borlama sıcaklığına kadar malzeme bu fırın içerisinde ısıtılarak, bu sıcaklıkta bir süre bekletilmesi sağlanır. Şekil 4.2’de gösterildiği üzere, kutu borlama işlemi için en önemli işlem parametreleri sıcaklık ve zamandan oluşmaktadır. Borlama sıcaklığı ve süresi, metal alt malzemenin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Kutu borlama işlemi için seçilen sıcaklık değer aralığı genellikle 800°C-1000°C’dir (Üçkardeşler, 2013; Uluköy, 2006). Borlama işlem

sıcaklık değeri numune 1 ile 10 saat bekletilerek kutu borlama işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra kutu fırında ortam sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılır ve ortam sıcaklık değeri geldiğinde kutu fırından çıkartılır. Oksijenin, borlama işlemi süresi boyunca olumsuz etkilerinden kaçınmak için kutu borlama işlemi Ar, N₂, H₂ veya Ar-N₂-H₂ karışımı gibi koruyucu gaz atmosferi altında gerçekleşmelidir (Davis, 2002; Uluköy, 2006).



Şekil 4.2 Kutu borlama prosesinin şematik gösterimi

Ticari olarak temin edilebilen kutu borlama işlemi için bor kaynakları aşağıda özellikleri ile sınıflandırılmıştır:

- **Ekabor 1:** Toz olarak temin edilir. Maksimum bor tabakasına ulaşmak için tercih edilir. Yüzey pürüzlülük değerleri bakımından, yüksek yüzey kalitesine ulaşmak için kullanılır. Genellikle demir esaslı malzemelerde kullanılır (Gülsün, 2016).
- **Ekabor 2:** Granül yapıda temin edilir. Bu toz kullanımıyla birlikte yüksek yüzey pürüzlülüğü sonuçları elde edilir. Düşük karbonlu çelik alaşımlarında tercih edilir (Gülsün, 2016).
- **Ekabor 3:** Granül yapıda temin edilir. Ekabor 2 tozuna göre yüzey pürüzlülüğü çok daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Kullanım alanları olarak yüksek alaşımları çelik malzemelerde tercih edilir (Gülsün, 2016).
- **Ekabor HM:** Çok sert metallerin borlama prosesleri aşamasında bor kaynağı olarak kullanılmaktadır (Gülsün, 2016).

- **Ekabor Pasta:** Macun şeklinde temin edilir ve metalik malzemelerin borlama proseslerinde kullanılır (Gülsün, 2016).

Kutu borlama yönteminin diğer işlemlere kıyasla birçok üstün avantajları bulunmaktadır (Er ve Par, 2004; Uluköy, 2006). Bunlar:

- Kutu borlama prosesinin hazırlanma aşaması diğer tekniklere göre daha kolaydır.
- Kutu borlama işleminden sonra numune yüzeyleri daha pürüzsüz ve homojendir.
- Bor kaynağı bileşenleri işlem sırasında kolay bir şekilde değiştirilebilmektedir.
- Prosesin kurulumu kolaydır, diğer tekniklere göre daha ekonomiktir.
- İşlem sonrasında numune yüzeyinin temizliği basittir.

4.2.2 Sıvı Borlama Yöntemi

Bor verici ortam kaynağının fiziksel hali bu yöntemde sıvıdır. Sıvı ortamda borlama işlemine tabii tutulacak olan iş parçası, 900°C'nin üzerindeki sıcaklık değerlerinde 2-6 saat tutularak gerçekleştirilir (Gülsün, 2016; Yapar, 2003). Sıvı ortamda gerçekleşecek borlama işlemi elektrolitik ve elektroliz ile sıvı borlama olarak iki gruba ayrılabilir.

Sıvı borlama işlemi sürecinde, işlem parçası bor ortamında yüzdürüldüğünde ve bor banyo ortamından ayrıldığında termal şok etkisine karşı dayanıma sahip olmalıdır; aksi takdirde deformasyon ve çatlama ile sonuçlanabilir (Barut, Yavuz, ve Kayalı, 2014; Gülsün, 2016). İşlemden sonra iş parçası üzerinde yoğun bir şekilde çözünen tuzun yüzeyden ayrıştırılması gereklidir ancak bu durumda yüksek miktarlarda maliyet ve ek işlemler getirmektedir. Sıvı borlama işlemi ekonomik olarak negatif bir etkiye sahiptir çünkü kullanılan ekipmanlar düzenli olarak değiştirilmek zorundadır (Yapar, 2003).

4.2.2.1 Elektrolizle Sıvı Borlama

Elektrolizle sıvı borlama işlemi, 1962 yılında, H. Ornig ve O. Schaaber tarafından keşfedilmiştir. Demir bazlı malzemelerde ergitilmiş boraks tuzdan bir bor banyosu hazırlanarak, yüksek sıcaklıklarda borlama işlemi gerçekleştirilir. Elektrolitin temel bileşenleri boraks ve borik asittir. Elektrolizle borlama prosesinde temel olarak bor banyosunda kullanılmak üzere iki farklı elektrolit türü geliştirilmiştir. Bunlar; halojen temelli bileşikler (KBF_4) ve bor oksitli bileşiklerdir (B_2O_3 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) (Yapar, 2003). Elektrolizle borlama işleminde, grafit çubuk anot görevinde, elektrolit iş parçası da katot olarak polarizesi sağlanır. Elektrolizle borlama prosesinin temel çalışma fonksiyonları sıcaklık, akım yoğunluğu ve zaman parametrelerinden oluşmaktadır (Uluköy, 2006).

4.2.2.2 Normal Sıvı Ortam (Daldırma) Yöntemi ile Borlama

Demir esaslı malzemelerin, 900-950°C sıcaklık aralıklarında ergimiş boraks banyosu içerisine daldırılması işlemidir. Elektrolitik borlama ile en iyi bor tabakasının meydana gelerek oluşması için %55 boraks, %40-50 ferrobora ve %4-5 ferro alüminyum barındıran banyolar tercih edilmektedir. Sistemin kurulumu için yüksek maliyetlere ihtiyaç duyulmaz. Bu yöntemin olumsuz yönleri ise, kompleks geometrili parçalarda uygulanamamaktadır ve işlemden sonra iş parçasının temizliğinin yapılması çok güçtür (Gülsün, 2016).

4.2.3 Gaz Ortamda Borlama

Gaz ortamında borlama işlemi, borlama işlemi için gereken ortam koşullarının gaz fazı halinde gerçekleşmesi işlemidir. Gaz ortamda borlama işleminin gerçekleşmesi için gereken esas bileşenler halojenürler, dibora ve organik bor kaynaklarıdır. Gazlı borlama işlemi, argon ve hidrojen gazları aracılığıyla, dış ortamdan izolesi sağlanmış, paslanmaz çelik bir tavlama kutusu içerisinde bor-triklorür gibi bir bor kaynağının gaz fazına getirilerek, bir eşanjör yardımıyla iş parçası üzerine sıkılmasıyla gerçekleşmektedir (Gülsün, 2016; Yapar, 2003).

4.2.3 Plazma Borlama

Bor sağlayıcı olarak BCl_3 , B_2H_6 , BF_3 kullanılarak, 800°C - 1000°C sıcaklık aralığında, düşük basınç oranlarından faydalanılarak (10^{-2} Pa) düşük basınç ortamında oluşturulmuş plazma içerisinde gerçekleştirilen borlama tekniklerinden biridir (Ünlü ve Yılmaz, 2006). Akım yoğunluk değeri ile sıcaklık, gaz konsantrasyon miktarları, kompozisyon oranları, basınç aralıkları kontrol edilmektedir. Diğer borlama proseslerine göre enerjiden yüksek oranda kazanç sağladığı için son yıllarda ön plana çıkmaktadır (Uluköy, 2006; Ünlü ve Yılmaz, 2006).

4.2.4 Pasta Borlama

Pasta borlama prosesinde, uygulama işlemi hazırlanan borlayıcı çözelti, borlama işlemi uygulanacak olan malzemenin yüzeyine püskürtme veya spreyleme yolu olmak üzere iki şekilde uygulanabilir. Bu işlemin ardından, numuneye kurutma işlemi uygulanır ve genellikle 1 ya da 2 mm kalınlık oranında tabaka kalınlığı elde edilmesi ile tamamlanır. Pasta borlama işleminden sonra iş parçası, indüksiyonla sertleştirme yöntemiyle 900°C - 950°C sıcaklıklarda ya da önceden ısıtılmış 850°C - 1000°C ısıtıl işlem fırınında dışarı ile teması kesilecek şekilde kapatılarak borlama işlemi için belirlenen sıcaklık değerine kadar fırında ısıtılmaya tabii tutulur. Yaklaşık 900°C 'de, 5 saat sürede borlama işlemi tamamlandıktan sonra iş parçası fırından alınır ve soğumaya bırakılır. Soğutma işlemi de tamamlandıktan sonra iş parçasının yüzeyi temizlenir ve borlama işlemi tamamlanmış olur (Yapar, 2003).

Bu tez çalışmasında diğer yöntemlere göre daha üstün özellikleri bulunan kutu borlama yöntemi tercih edilmiştir. Tablo 4.1'de karşılaştırılmalı olarak kutu borlamanın diğer borlama yöntemlerine göre üstün özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Borlama yöntemleri karşılaştırma tablosu (Uluköy, 2006; Ünlü ve Yılmaz, 2006)

Kutu Borlama	Sıvı Borlama	Pasta Borlama	Gaz Borlama	Plazma Borlama
AVANTAJLARI				
Sistem ve ekipmanlar ekonomiktir.	Uygulama aşaması ekonomiktir.	Bölümsel olarak borlama işlemi gerçekleştirilebilir.	Bor atomları iş parçası yüzeyine daha çok yayılım sağlamaktadır.	Yüksek enerji verimliliği elde edilmektedir.
Özel teknik gerektirmez.	Yüksek uzmanlık kabiliyeti gerektirmez.	Uygulama süresi uzun değildir.	Yüksek sıcaklıklarda uygulama yöntemi basittir.	Düşük işlem sıcaklık değerlerinde ve minimum çarpılma sunmaktadır.
İşlem basittir.				
Bor tozları değiştirilebilir.				
Kutu Borlama	Sıvı Borlama	Pasta Borlama	Gaz Borlama	Plazma Borlama
DEZAVANTAJLARI				
Yüzeyde bulunan bor bileşimi homojen olmayabilir	Büyük boyutlu ve kompleks geometrili parçalara uygulanamaz.	Yüzey temizliği güçtür.	Ekipmanların temini yüksek maliyet gerektirmektedir.	BCl_3 ve B_2H_6 gazlarının kullanılması nedeniyle gazlar zehirli gaz salınımı yapmaktadır.
	Kurulum tesisatı pahalıdır.		İşlem sonucunda zehirli gazların salınımı meydana gelir.	Kullanılan gazlar pahalıdır.
	Bor banyosunda 850°C 'den daha düşük sıcaklıklarda işlem gerçekleşmez.		Patlama tehlikesi büyüktür.	Gazlar patlayıcıdır.

4.3 Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

4.3.1 Borlama İşleminin Avantajları

- Borlama işlemi sayesinde çeliklerin yüzeyinde geliştirilen bor tabakası çeliklere yüksek sertlik ve yüksek ergime sıcaklığı sağlamaktadır. Çeliklerin sahip oldukları sertlik değerleri normal sertlik değerlerinden, 1450 – 5000 HV sertlik aralıklarına kadar çıkmaktadır (Barut ve diğer., 2014).
- Düşük sürtünme katsayısı, yüksek aşınma direnci ve yüksek sertlik derecesi gibi iyi özelliklere sahip olması nedeniyle kalıp üretiminde temel malzemenin işlenmesi sırasında kolaylık sağlaması, düşük maliyete sahip olması ve borlama işlemi öncesi özelliklerine göre borlama işleminden sonra sağladığı yüksek mekanik ve kimyasal özellikleri nedeniyle makine imalatlarında ve otomotiv sektöründe yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir (Gülsün, 2016; Uluköy, 2006).
- Borlama işlemi sayesinde korozyonun etkili olduğu ortam koşullarında yer alan borlanmış çelikler, yorulma dayanımlarını arttırarak servis kullanım ömürlerini normalden daha uzun sürede tutmaktadırlar (Barut ve diğer., 2014).
- Bor tabakası, kritik sıcaklık değerlerinde bile (550°C-600°C) sahip olduğu sertlik direncini yitirmemektir (Güneş ve Taktak, 2012).
- Borlama işlemi birçok metal ve alaşımlarda uygulanabilmektedir.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemeler, çelik ve dökme demir gibi alaşımlara ek olarak demir dışı metal ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir.
- Borlama işlemi yağlayıcı kullanıma gereksinimi azaltarak, sürtünme katsayısını minimum seviyelere düşürmektedir (Barut ve diğer., 2014).

4.3.2 Borlama İşleminin Dezavantajları

- Borlama işlemi süreci değişken değildir, yoğun emek ve özel uygulama teknikleri, özel ekipmanlar gerektirmektedir (Yapar, 2003).
- Borlama işlemi proseslerinden sonra genellikle borlanmış parçalar bir ısıtma işlemine maruz bırakılırlar. Uygulanan bu ısıtma işlem çeşitleri genellikle sementasyon veya temperleme ısıtma işlem yöntemlerinden biridir. Bu ısıtma işlemler

uygulanırken, borlanmış kaplama yüzeyinin özelliklerinin korunması için inert atmosfer veya vakum ortamı sağlanmalıdır (Köseli, 2010; Yapar, 2003).

- Teorik olarak, borlama işlem sıcaklığı arttıkça tabaka kalınlığı da artmaktadır. Borlama işlemine tabi tutulmuş tabakanın kalınlığı arttıkça, yüzeyde porozite oluşumu hızlanmaktadır.
- Artan porozite miktarına bağlı olarak oluşan bor tabakası gevrek bir yapıda olmaktadır (Peng, 2020; Yapar, 2003).
- Borlama işleminden sonra yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde artmaktadır, yüzey pürüzlülüğünün artması korozyon direncini de düşürmektedir.
- Borlama işlem tekniklerinin kontrol altında tutulması genellikle zordur ve laboratuvar koşullarında, elle çalıştırmayı gerektirmektedir. Otomasyonun olmaması en büyük zorlukları arasındadır.
- Borlama işlemi sonrasında oluşan atık ürünler doğaya karşı zararlıdır (Yapar, 2003).

4.4 Bor Tabakası

Demir esaslı malzemelerde borlama prosesleri sonucunda, borlama işlem süreçlerine de bağlı olarak; malzeme kompozisyonu, sıcaklık değerleri, süre gibi etkenleri de göz önünde bulundurulduğunda, malzemenin yüzeylerinde oluşan bor tabakasının morfolojileri de değişiklik göstermektedir (Karataş, 2016). Bu değişiklik iki şekilde olabilir; Fe_2B fazının baskın olduğu, testere dişi morfolojisine yakın benzerlik gösteren bir yapı veya yüksek alaşım elementlerinin baskın olduğu çeliklerde sıklıkla karşılaşılan düz bir yapı şeklinde ortaya çıkabilir (Özsoy ve Yaman, 1993; Fichtl, 1981; Karataş, 2016).

Difüzyon yönüne de bağlı olarak, borür tabakasının tek fazlı, testere dişi yapısına benzerlik gösteren Fe_2B fazının borlama sonunda oluşum göstermesi, çift faz sistemli FeB ve Fe_2B yapısının oluşumundan daha çok tercih edilmektedir. Bu durumun nedeni ise, %16,23 bor içeriği ile borca daha zengin olan FeB (ortorombik) fazı, %8,83 bor içeren Fe_2B tetragonal fazına göre daha kırılğan bir yapıdadır (Campos ve Rodríguez, 2015; Dilektaşlı, 2014; Karataş, 2016; Uzun, 2002). Bu fazların oluşum esnasında birbirlerine yapmış oldukları basma ve çekme gerilmelerinden dolayı iki faz arasında

çatlaklar oluşmakta ve bunun sonucunda ortaya mekanik zorlamalar nedeniyle zamanla malzeme yüzeyinden uzaklaşmaya, ayrılmaya ve kopmalara neden olmaktadır (Dilektaşlı, 2014; Martini, Palombarini, ve Carbucicchio, 2004). Aynı zamanda, iki faz önemli ölçüde farklı termal genleşme katsayılarına sahip oldukları için çift fazlı bor tabakasının ara yüzeyinde çatlaklar meydana getirmektedir. Oluşan bu çatlaklar, herhangi bir mekanik yük uygulandığında malzeme yüzeyinde pullanmaya ve dökülmeye sebep olmaktadır (Dilektaşlı, 2014; Martini ve diğer., 2004; Uzun, 2002). Tablo 4.2’de FeB ve Fe₂B fazlarının genel özellikleri verilmektedir.

Tablo 4.2 FeB ve Fe₂B fazlarının fiziksel özellikleri (Dilektaşlı, 2014)

Özellik	Fe ₂ B	FeB
Ergime noktası (°C)	1390	1550
Genleşme katsayısı (1000°C), (K ⁻¹)	8,6x10 ⁻⁶	10-16x10 ⁻⁶
İletkenlik katsayısı (1000°C, W/cm°C)	0,1-0,3	0,1-0,2
Özdirenç (20°C), μ.ohm.cm	~38	~80
Küri Sıcaklığı	742	325
Teorik yoğunluk, gr/cm ³	7,43	6,75
Kristal sistemi	Tetragonal Hacim Merkezli	Ortorombik
Kafes parametreleri	a=5,075 b=4,249	a=4,053 b=5,496 c=2,946

4.5 Geçiş Bölgesi

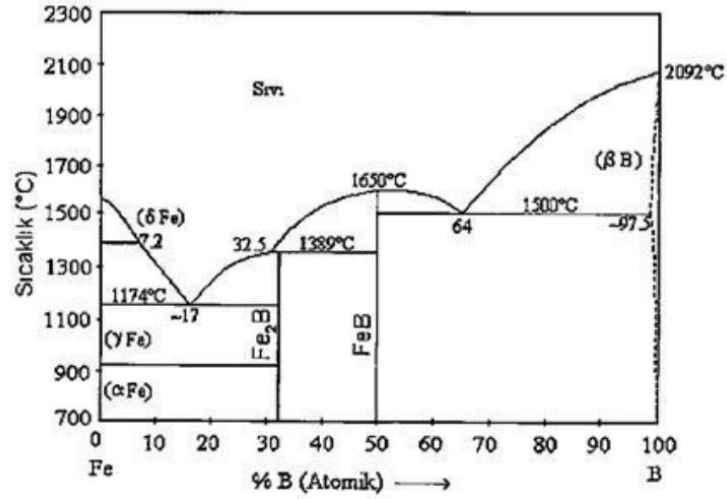
Geçiş bölgesi literatürde, borlama işlemi uygulanmış bir malzemenin oluşan borür tabakası ile malzeme arasında kalan bölge olarak ifade edilmektedir (Aysal, 2011; Campos ve Rodríguez, 2015; Dilektaşlı, 2014; Uzun, 2002). Karbon, borür tabakası içinde çözünememesinden dolayı bor difüzesi sırasında yüzeyden iç kısımlara yayılmaya başlamaktadır. Bu sebepten dolayı, borlanmış malzemelerin geçiş bölgeleri

karbon miktarı bakımından zengin olmaktadır. Karbon bakımından zengin olan bölgelerde ana malzeme yapısına göre daha fazla perlit yapısı oluştuğu savunulmaktadır (Dilektaşlı, 2014).

Geçiş bölgesinin kalınlığı konusunda literatürde farklı çalışmalar bulunmaktadır ve genel olarak geçiş bölgesi kalınlığı oluşan borür tabakası kalınlığının 3 ya da 4 katı olarak oluştuğunu tespit etmişlerdir. Aynı zamanda literatür taramasında, Aysal (2011) yapmış olduğu bir araştırma sonucunda geçiş bölgesinin sahip olduğu tane boyutu büyüklüğü ve esas malzemenin tane boyutu büyüklüğü baz alındığında daha yüksek bir değerde olduğunu gözlemlemiş bu duruma yol açan esas neden olarak bor atomlarının geçiş bölgesinin tanelerinin üzerinde etken olduğunu tespit etmiştir (Aysal, 2011).

4.6 Demir-Bor Denge Diyagramı

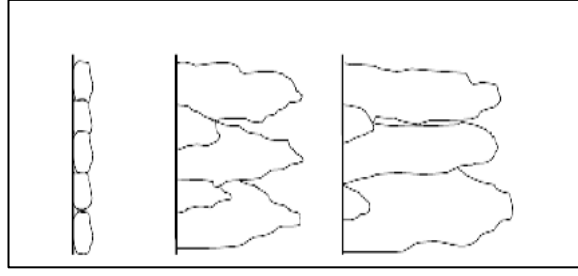
Hume-Rothery kuralları baz alındığında, Fe alaşım sistemlerinde, alaşım elementleri için atom çap boyutları ile ara yer veya yer alan element olarak eriyebileceği ifade edilmektedir. FeB sistemi için en önemli kriter atomik boyut faktörüdür. Bor elementinin atom çapı, demir elementinin atom çapından %27 daha küçük olduğundan dolayı katı eriyik oluşturabilmektedir (Dilektaşlı, 2014; Kutucu, 2013). Şekil 4.3’de verilen Fe-B denge diyagramı incelendiğinde, 1394°C’de, %7,20 B konsantrasyonunda γ -Fe’ den γ -sıvıya dönüşüm gerçekleştiren bir metatektik reaksiyon yer alırken, 911°C’ de ise γ -Fe+Fe₂B’den α Fe₂B’e dönüşen bir reaksiyon meydana gelmektedir (Dilektaşlı, 2014; Kutucu, 2013; Uzun, 2002). Diyagram üzerinde, 1174°C’ de %17 B konsantrasyonunda α -Fe ile Fe₂B arasında ötektik reaksiyon, %33,3 B konsantrasyonunda Fe₂B intermetalik bileşiğinin olduğu gözlemlenmektedir (Aysal, 2011; Dilektaşlı, 2014; Kutucu, 2013). Araştırılan birçok makalede ortaya çıkan sonuçlara göre, Fe₂B fazına ait ergime sıcaklık aralığı 1389 °C ile 1410 °C arasında değiştiği, buna karşılık FeB fazının ergime sıcaklık aralığı ise 1540 °C ile 1675 °C aralığında olduğu belirtilmiştir (Aysal, 2011; Dilektaşlı, 2014; Kutucu, 2013; Uzun, 2002).



Şekil 4.3 Demir-bor denge diyagramı (Karataş, 2016)

4.7 Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması

Demir borürler, termal ve elektrik iletkenliği gibi özellikleri içinde barındıran bunlara ek olarak yüksek sertlik özelliği gibi mekanik özellikleri de sunan tipik seramiklere has özellikler gösteren bileşiklerdir (Karataş, 2016). Demir borürler, işlem proseslerine de bağlı olarak tek fazlı ya da çift fazlı şekilde oluşmaktadırlar. Borür tabakasının oluşmaya başladığı bölgeler genellikle, tane sınırları, dislokasyonlar, yüzey pürüzlülükleri, çizikler, çatlaklar ve atom boşlukları gibi mikro hataların yer aldığı kısımlarda Fe_2B çekirdekleri oluşmaya ve gelişmeye başlamaktadır (Dilektaşlı, 2014). Bazı çalışmalarda, demir bor reaktifliğinin düşük bulunduğu bölgelerde oluşan çekirdeklenmeler rastgele şeklinde oluşmakta olduğu gözlemlenmiştir (Dilektaşlı, 2014; Karataş, 2016). Şekil 4.4'te demir borürlerin büyüme mekanizma şekli verilmiştir. Ortam şartlarına da bağlı olarak, bor konsantrasyonunun daha yüksek olduğu durumlarda malzeme yüzeyinde daha az reaktif alanlarında ortaya çıkarak tabaka elde edilmektedir (Dilektaşlı, 2014; Karataş, 2016).



Şekil 4.4 Demir borürlerin büyüme mekanizması (Karataş, 2016)

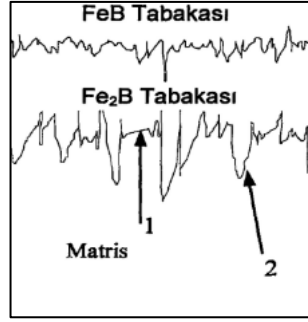
Fe₂B fazına ait büyüme mekanizması iki şekilde ortaya çıkmaktadır:

- Difüzyon kanallı büyüme mekanizması
- Uçtan büyüme mekanizması

Difüzyon Kanallı Büyüme Mekanizması: Ortogonal prizma, bor atomlarının difüzyona daha kolay uğramasını sağlayacak en yüksek ara bölmeye sahiptir ve Fe₂B kristal sisteminde, [001] doğrultusu boyunca bor atomları için bir difüzyon kanalı meydana getirmektedir (Dilektaşlı, 2014; Martini ve diğer., 2004). FeB kristallerinin oluşum mekanizması, bor atomlarının bor tabakasından yüzeyine dik yönde itilmesi sonucunda, Fe₂B kristalleri kolonsal biçimde içeriye yönelenerek büyüme göstermeye başlamaktadırlar (Dilektaşlı, 2014; Martini ve diğer., 2004).

Uçtan Büyüme Mekanizması: Temel malzemenin sahip olduğu kompozisyona ve proses faktörlerine de göz önünde bulundurulduğunda ilk aşamada oluşan Fe₂B çekirdekleri iğnemsî bir geometri biçiminde gelişerek büyüme gösterir ve bor eğimine paralel yönelme gösterir, bu sayede Fe₂B çekirdeğinin uç kısımlarında oluşan yüksek gerilme kısımları ve kafes distorsiyonları tabakanın eş eksenli büyümesine yol açmaktadır (Başman, 2010; Dilektaşlı, 2014; Martini ve diğer., 2004).

Şekil 4.5'te verilen demir-borürlerin büyümesine ait görselde, 1 ile belirtilen sütun biçimliliği 2 ile ifade edilen bölgeden daha yüksektir.



Şekil 4.5 Demir borürlerin büyüme mekanizması FeB ve Fe₂B tabakalarında, Demir-Bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi (Karataş, 2016)

4.8 Borür Tabakası Çeşitleri ve Bor Tabakası Kalınlığı

Bor kaynaklarının, borlama prosesi için verimli olduklarını anlama noktasında metalografik tekniklere başvurulmaktadır. Zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra bir numuneden kesit alındığı zaman, FeB ve Fe₂B fazları rahatlıkla fark edilebilmektedir. Bu kesit incelendiği zaman borür tabaka kalınlığı, mikroyapı kusurları ve tabaka çeşidi tespit edilebilmektedir.

Daha önceden de bahsedildiği gibi, borür tabaka yapısı borlama prosesinin uygulandığı yöntem ve malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Tabaka çeşitlerine de bağlı olarak, işlem prosesleri de göz önünde bulundurulduğunda tabaka özelliğinin düz bir formda ya da dişli bir bor yapısı elde edildiği ayrımı yapılabilmektedir.

Bor tabakasının kazanmış olduğu kalınlık oranı tespit edilirken kullanılan malzemenin formlarına da bağlı olarak malzemedan beklenen kalınlık aralığı çeşitlilik göstermektedir. Yüksek alaşımlı çeliklerde genellikle tercih edilen kalınlık aralığı 15-20 µm'dir ve bu belirtilen bu aralık değerlerinden uzaklaşılması istenilmeyen bir durumdur (Kabadayı, 2013). Özellikle çift faz içeren tabaka sistemlerinde (Fe₂B+FeB), belirtilen bu faz miktarları yapıda artış göstermesiyle kırılganlık sorununu meydana getireceğinden ve dolayısıyla kırılganlık miktarı da orantılı olarak artacağı için tabakanın yüksek kalınlık değerlerinde olmaması gerekmektedir (Dilektaşlı, 2014; Kabadayı, 2013; Kutucu, 2013; Uzun, 2002). Alaşım elementlerinin kompozisyon miktarları değişim göstermeye başladıkça, malzeme

içerisinde gerçekleşen difüzyon mekanizmalarının oluşumu da güçlük çekmeye başlamaktadır (Dilektaşlı, 2014; Kabadayı, 2013; Kutucu, 2013).

4.9 Alaşım Elementlerinin Borlama İşlemine Etkileri

Alaşım elementleri, çelik malzemelerin borlama proseslerinde borür tabakası ve geçiş bölgelerinin kristal morfolojisi, konsantrasyon miktarı, tabaka ve geçiş bölgelerinin kalınlıklarının büyümesinde ve mekanik özellikleri üzerinde önemli bir faktördür (Dilektaşlı, 2014; Kabadayı, 2013; Kutucu, 2013). Borlama işlemi ile elde edilen borür yapısının morfolojisi matris içerisinde yer alan alaşım elementlerinin konsantrasyonuna bağlı olarak değişimler sergilemektedir (Dilektaşlı, 2014; Kabadayı, 2013; Uzun, 2002).

Karbon, demir borürler içerisinde homojen dağılım sergileyemediklerinden dolayı ana matristen içeri doğru yayılım göstermeye başlamaktadır ve bu durumun bir sonucu olarak bor tabakasının alt bölgelerinde Fe_3C , Cr_3C , Fe_6C_3 faz biçimleri olarak toplandığı bu bölgede, geçiş kısmını olumsuz anlamda değiştirerek sert bir tabaka oluşumunda etken bir faktör olmaktadır (Uzun, 2002). Karbon miktarındaki yükselmeler nedeniyle ortaya çıkan bu sorun, yüzeye ideal oranlarda su verme işlemi uygulanarak, yüksek sertlik değerlerine çıkan tabaka yapısından daha yumuşak özellikte bulunan tarafa doğru istikrarlı bir yönelim sağlamaya başlar (Uzun, 2002). Yapıda bulunan karbon miktarına bağlı olarak dişli yapı giderek düzleşmeye başlamaktadır. Düşük ve orta karbona sahip çelik malzemelerde ise karbon konsantrasyonda ki artış ile iğne şeklinde bir morfoloji ortaya çıkmaktadır (Uzun, 2002).

Krom, çelik malzemeler içerisinde hem derinliğe hem de morfolojiye etki etmesi ile bilinmektedir. Literatür taramasında, bu konu üzerine çalışanlar, krom elementinin bor tabakasında yayılım gösterdiğinde kalınlık miktarının oranını düşürmeye yönelik bir etkisi olduğundan bahsetmektedirler (Başman, 2010; Martini ve diğer., 2004; Yapar, 2003). Yüksek krom alaşım miktarına sahip çelik malzemelerde ise borlama işlemine takiben oluşan tabakası düz form şeklinde meydana gelmektedir. Bunun sebebi olarak; alaşım elementinin bor tabakasında yer alan demir atomlarının konumlarına yerleşmesine bağlı olarak düz formda oluştuğu açıklanmaktadır. Kromun

sahip olduğu atom numarası değeri, demirinkine kıyasla daha düşük oranda bulunmasından dolayı, ana malzeme ile karşılaştırıldığında daha yüksek miktarlarda bor tabakasında çözünme eğilimi içerisinde ve yüzey kısımlarına itilerek difüze olmaktadır (Yapar, 2003). Bor tabakasının göstermiş olduğu sertlik değeri krom kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir, yapıda yer alan Cr miktarı arttıkça bor tabakasının sertliği de artış göstermektedir. Nikel ise kromun sergilemiş olduğu bu etkilerin tam tersi olarak, geçiş kısımlarında yayılım sağlamaktadır. Nikelin tabaka kalınlık miktarına olan etkisi krom ile kıyaslandığında daha düşük seviyededir. Nikel miktarının artışıyla Fe₂B'nin sertlik değeri de azalma olmaktadır. Mangan, krom ile benzer özellik göstererek, yüzey kısımlarında yayılım göstermektedir. Manganın ise borür tabaka kalınlığının sertlik üzerinde negatif etkisi bulunmaktadır ayrıca mangan miktarının yapıda artışına bağlı olarak tabaka yapısı düz bir form haline gelmektedir (Uzun, 2002; Yapar, 2003).

Diğer alaşım elementlerine bakıldığında, etkileri yine krom ile benzerlik gösteren molibden, titanyum, tungsten, vanadyum elementleri de tabaka kalınlık oranını düşürmektedirler. Tabaka ile geçiş kısımlarında konum sağlayarak, yapının sahip olduğu mekanik performanslarına pozitif etki göstererek iyileştirmektedirler. Bu alaşım elementlerinin yapıda bulunması, yapı formunu iğne şeklinden düz bir geometri formuna dönüştürmektedirler. Titanyumun etkisi ise tanelerin büyümesinde, geçiş bölgesine konumlanarak büyümenin gerçekleşmesinin önüne geçmektir (Başman, 2010; Uzun, 2002; Yapar, 2003).

4.10 Borlanmış Çeliklerin Korozyon Dayanımları

Bu tez çalışmasının konusunu da oluşturan korozyon olayı, ortamın kimyasal ve elektrokimyasal etkilerinden dolayı ortaya çıkarak malzeme kaybına neden olmaktadır. Korozyona karşı alınabilecek önlemlerden biri de kaplama çalışmalarıdır. Bu çalışmada da kutu borlama işlemi seçilen çelik numunelerine uygulanarak, korozyon direncine etkileri irdelenmiştir.

Borlama işlemi, düşük alaşımlı çelik malzemelerin asitlere ve sıvı halde bulunan çinkonun korozyona karşı direncine katkı sağlayarak korozyon dirençlerini önemli oranda iyileştirme sağlamaktadır. Östenitli çelik malzemelerde, borlama işlemi pozitif

bir etki göstererek güçlü asitlerle temasında yüksek oranlarda direnç kazandırmaktadır (Er ve Par, 2004; Yapar, 2003). Takım çeliklerinin ise tuz ve sodanın sudaki çözeltilerinde sergilemiş oldukları korozyon direnci, borlama işlemi ile pozitif anlamda gelişme göstermektedir (Karaman, 2003).

Demir esaslı malzemelerin borlanması ile korozyon direnci atmosferik korozyon durumunun olduğu ortamlarda minimum seviyelerde olmasına karşın, birçok asit ve sıvı metallere karşı büyük korozyon direnci kazanımı sağlamaktadır (Kabadayı, 2013). Yüksek krom içeren çeliklerde ise borlama prosesi, korozyona karşı direnç sağlayan koruyucu film tabakası olan krom oksit oluşumun önüne geçerek, krom borür tabakasının oluşumuna yol açmaktadır. Bu bakımdan, yüksek alaşımlı çelik malzemelerin borlama işlemi, bu çeliklere yüksek korozyon direnci kazanımının sağlanmasını mümkün kılmamaktadır (Başman, 2010; Kabadayı, 2013; Uzun, 2002).

Az karbonlu çelik malzemelere çok düşük miktarlarda eklenen bor ilavesi hem asidik ortamda hem de tuzlu ortamda çelik malzemenin korozyon dayanımına negatif bir etken olarak, korozyon hızını arttırmaktadır (Karacif ve diğer., 2019). Lu ve arkadaşları ise yapmış oldukları çalışmada, düşük miktarlarda bor elementi içeren yüksek kromlu dökme demir malzemelerde erozyonlu korozyon dayanımına etkilerini inceleyerek, korozyon davranışları incelemişler, bu çalışmanın sonucunda bor ilavesi ile korozyon direncinin düştüğünü bildirmişler ve ilave edilen bor ile yapıda meydana gelen karbür oluşumunun hızlı bir biçimde arttığını, serbest krom miktarının azaldığını ve demir esaslı metallerde kromun metal yüzeyinde oluşturduğu pasifleşmenin ise azaldığını gözlemlemişlerdir (Lu ve diğer., 2017).

4.11 Borlama İşleminin Kullanım Alanları

Dünyada, günümüz sanayisinde ülkeler arasında kullanılan teknoloji hamlelerinin sürekli gelişmesiyle birlikte borlama teknikleri de sürekli gelişmekte, buna paralel olarak endüstrinin her alanında kullanım alanları da artmaktadır. Bu alanlar:

- Plastik sanayisinde, mineral takviyeli plastik granüllerin yükleme ekipmanları için kontrol plakaları ve bentleri, dövme kalıp malzemelerinde bulunan basma ve sürme matris sistemlerinde kullanılan takım çelikleri (Yapar, 2003),

- Demir-elik endüstrisinde, haddehanelerde kullanılan merdanelerde, (105WCr6, X210XrQ12, X165CrVMo121) (Yapar, 2003),
- Yüksek performans özelliklerine sahip tekerleklerin imalatında ve önemli motorlarda sürme, sonsuz vida, helesel dişli sistemlerinde (Yapar, 2003),
- Sıcak dövme işlemlerinde kullanılan alt ve üst kalıp malzemelerinde,
- Demir dışı malzemelerin döküm besleyici ekipmanlarında (AISI H11) (Yapar, 2003),
- Seramik tuğla ve ekipmanların kalıba alınması işleminde kullanılan kalıplarında (AISI 4140 eliğı) (Yapar, 2003),
- Vida ve silindirik dişliler, konik dişlilerde borlama işleminin kullanımı görölmektedir (AISI 4317 eliğı) (Yapar, 2003).

BÖLÜM BEŞ

KOROZYON

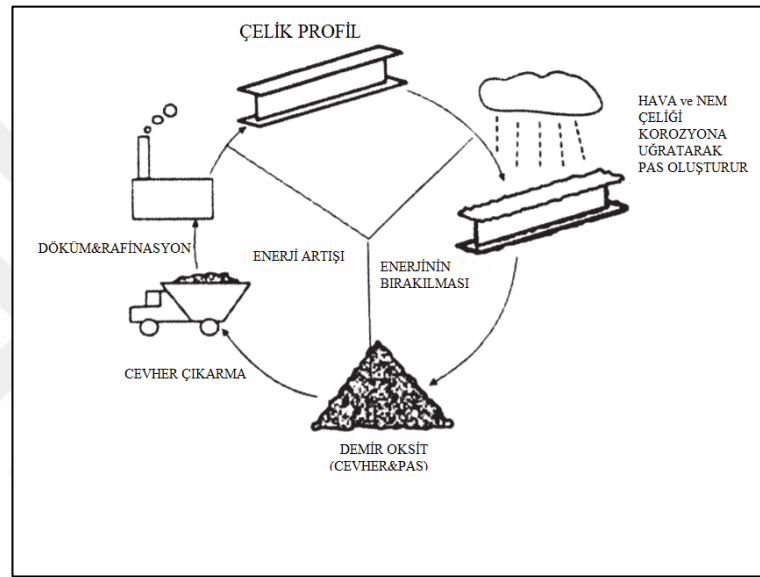
5.1 Korozyonun Genel Tanımı

Günümüz endüstrisinde, hemen hemen her alanda kullanım alanına sahip olan çelik malzemeler için meydana gelebilecek en temel problemlerden biri korozyon sorunudur. Korozyon kelimesinin kökü, Latince’de “corrode” kelimesine dayanmaktadır. “Corrode” anlam olarak “parçaları ayırmak, aşındırmak, bozmak” anlamında korozyon kelimesinin anlamı dilimize türetilmiştir (İşdaş, 2010). Korozyonun genel olarak tanımı, metal ve metal alaşımlarının yer aldıkları, kullanıldıkları ortam ile bulundukları çevre arasında kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonu sonucu yüzeylerin bozunmasıyla beraberinde getirdikleri, fiziksel ve kimyasal olarak malzeme özelliklerinin bozulmasıyla gerçekleşen bir süreç olarak tanımlanmaktadır (Ahmad, 2016).

Korozyon, bir malzemenin kaydedilebilir oranda değişiklikler meydana getirip çevresi ile kimyasal reaksiyona girerek malzemedeki ortaya çıkardığı hasarlar bütünüdür. Korozyonun ortaya çıkmasında en önemli faktör ve korozyon davranışını belirlemedeki en temel kriterlerden biri, malzemenin içinde bulunduğu veya temas halinde olduğu ortam etkisidir. Bir malzemenin, maruz kaldığı ortam şartları belirlenmediği sürece korozyon davranışları tanımlanması mümkün olmamaktadır. Ortam, malzeme ile etkileşim durumunda olan bütün çevresel faktörleri içermektedir. Bu çevresel faktörleri belirleyen birincil faktörler: (a) fiziksel durum: katı, sıvı, gaz; (b) kimyasal bileşim: bileşen ve konsantrasyonlar; (c) sıcaklık. Bu faktörlerin yanında önemli bazı faktörlerde etken olabilmektedir. Bunlar; bir çözeltinin hızı, malzeme üzerindeki mekanik yüklerin etkisi ve artık gerilmelerdir (Fontana, 1947).

Metal ve alaşımları tabiatta yer alan çeşitli bileşikler ile bir araya gelip, uzun çaba gerektiren prosesler sonucunda yararlı malzemeler haline dönüşümleri gerçekleştirilir. Korozyon olayında ise metal ve alaşımları, termodinamiğin ikinci temel yasasına göre kararsız halde bulunurlar dolayısı ile doğada bulundukları oksit, sülfür gibi kararlı bileşik hallerine dönüşme eğiliminde bulunmak isterler. Bu dönüşüm sonunda serbest enerjileri en düşük haldedir (Fontana, 1947; İşdaş, 2010; Yalçın ve Koç, 2014). Bu

düşük enerji seviyesi pas olarak tanımlanmakta ve bu dönüşüm, korozyon sürecini ortaya çıkartmaktadır (İşdaş, 2010). Şekil 5.1’de çelik malzemeler için yaygın bir korozyon süreci gösterilmektedir. Bu çevrimde; cevherden çeşitli rafine süreçleri sonucunda çelik haline getirilirken kullanılan enerji, çelik metalinin oksijen ile tepkimesi sonucunda Fe_2O_3 oluşturarak çeliği korozyona uğratarak dolayısıyla bu enerjiyi geri vererek düşük enerji seviyesine geçme eğilimi göstermektedir. Burada kullanılan enerji çok yüksek ise metal de enerjiye bağlı olarak aktif ve korozyon direnci de düşük olmaktadır (Fontana, 1947).



Şekil 5.1 Çeliğin korozyon döngüsü (Davis, 2000)

Korozyon günlük hayatımızı hem doğrudan hem de dolaylı bir şekilde etkilemektedir. Günlük hayatımızda kullanmış olduğumuz malzemelerin büyük bir çoğunluğu, örneğin, arabaların gövde panelleri, dış mekanlarda kullanılan mobilyalar, metal malzemeler, beyaz eşyalar, su ısıtıcıları, kömür ızgaraları, köprüler, ulaşımda kullanılan araçlar korozyona uğramaktadırlar. Bir malzemeyi üretmek için ihtiyaç duyulan ekipmanlar, enerji, emek ve teknik kabiliyetten başlayarak ürün geliştirme ve üretimi sırasında farklı korozyon maliyetleri meydana gelmektedir (Davis, 2000).

Korozyon, endüstrinin hemen hemen her alanında karşılaşılan en önemli problem zincirlerinden birini oluşturmaktadır. Üretim esnasında, karşılaşılabilecek korozyon

problemi, aşağıda belirtilen sorunları meydana getirmektedir, bu sorunlar sırasıyla şu şekildedir (Davis, 2000; Maaß, 2011):

- Korozyon hasarına maruz kalmış ekipmanların değiştirilmesi,
- Korozyona neden olabilecek korozyon hasarına karşı önlem almak için gerçekleştirilen aşırı tasarımlar; aşırı kalın malzeme tasarımları ya da maliyeti yüksek ürün seçimleri,
- Önleyici bakım, kaplama, boyama tekniklerinin uygulanması,
- Korozyon hasarları nedeniyle kullanılan cihazların kapatılması ve iş aksamaları,
- İşletmenin durması nedeniyle ortaya çıkan maddi kayıplar,
- Korozyona uğramış malzemenin yerine kullanılacak malzeme için harcanan emek ve verimlilik kaybı,
- Korozyonun meydana geldiği ekipmanla birlikte yanında bulunan diğer ekipmanlarında hasara uğraması, kullanılamaması,
- Korozyona uğramış malzemenin yanıcı olması halinde, patlama ve yangın riskinin ortaya çıkması,
- Metal ve alaşımlarının tekrar üretilmesi için kullanılacak olan yakıtlarda dahil olmak üzere doğal kaynakların tüketilmesi, çevre kirliliği gibi sorunlara yol açmaktadır.

5.2 Korozyonun Elektrokimyasal İlkeleri

Korozyon; genel olarak metal veya alaşımlarının içinde bulundukları ortam ile elektrokimyasal tepkimeleri neticesinde metal ve alaşımlarının içinde bulundukları bazı elementlerini kaybederek, metalik durumlarından metalik olmayan bir duruma geçmeleri sonucunda, metalik özelliklerini kaybederek bozunma süreçleridir (Fontana, 1947). Korozyon sürecinin başladığı bir ortamda doğal olarak bir elektrokimyasal reaksiyonda yer almaktadır. Korozyon olayının gerçekleşebilmesi elektrokimyasal reaksiyonlar, elektrot adı verilen metal bir yüzeyde yer alarak oluşan homojen veya homojen olmayan tepkimeler şeklinde meydana gelir. İçinde bulunarak yer aldıkları iyonik iletken sıvı ortama ise “elektrolit” adı verilmektedir (Ahmad, 2016; Fontana, 1947).

Korozyona uğrayan metalin yapısından kaynaklanan veya elektrolitte yer alan çeşitli farklılıklar sebebiyle potansiyel fark durumu ortaya çıkmaktadır. Korozyon hücresi içinde yer alan çalışma elektrodunun yüzeyinde kimyasal reaksiyonların oluşumu sonucunda, yüzeyin bazı kısımları anot, bazı kısımları ise katot adını almaktadır (Maaß, 2011). Anot bölge korozyona maruz kalan kısım yani; metal yüzeyinde yükseltgenme tepkimelerinin gerçekleştiği bölgedir. Katot bölge; anot bölgesinde çözeltiye geçen elektronların metal içerisinden elektronlarının katot bölgesine geçmesiyle, korozyonun sürekliliğin sağlanması için metal yüzeyde kimyasal indirgenme tepkimelerinin yer aldığı bölgedir (Fontana, 1947; Popov, 2015).

Anot bölge metal kaybının yaşandığı kısımdır. Korozyon; anot kısmında yürüyerek gerçekleşmektedir. Anodik yüzeyde; metal yükseltgenerek çözeltiye elektron vermektedir. Anodik tepkimeye ait kimyasal reaksiyon şu şekildedir (Habashi, 1997; Yalçın ve Koç, 2014):



Katodik bölgede anodik reaksiyon sonucunda kazandığı elektronları biriktirerek, bu bölgede harcanmaktadırlar. Katodik tepkimeye ait kimyasal reaksiyon ise şu şekildedir (Fontana, 1947):

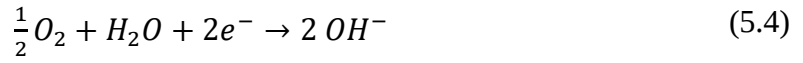


Korozyon sürecinde; metalin yer aldığı çevre koşullarına da bağlı olarak farklı indirgenme tepkimeleri de ortaya çıkmaktadır. Bu tepkimeler bütünü, elektrolitlerin içinde bulundukları doğal elektrolitlerde meydana gelen korozyon olayları olarak iki ayrı kısımdan oluşabilmektedir. Bunlar asidik bir ortam şartlarında meydana gelerek oluşum gösteren katot reaksiyonu ve nötral çözünmüş O₂'nin bulunduğu bir ortam şartlarında yer alarak ortaya çıkan katot tepkimesidir (Ahmad, 2016; Fontana, 1947; Yalçın ve Koç, 2014). Bunlara bağlı oluşan kimyasal reaksiyonlar aşağıda belirtilmiştir.

1. Asidik ortam şartlarında gerçekleşen katot reaksiyonu, $[H^+]$ iyonunu indirgenerek meydana gelmektedir (Ahmad, 2016; Fontana, 1947).



2. Nötral ve çözünmüş oksijenin bulunduğu bir çevre şartında, oksijenin indirgenme reaksiyonu, suda çözünme göstererek elektron alması sonucu hidroksil iyonuna indirgenmesiyle sonuçlanmaktadır (Ahmad, 2016; Fontana, 1947).

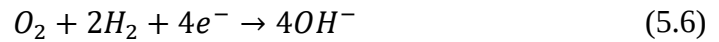


Yukarıda belirtilen elektrokimyasal korozyon reaksiyonları tüm korozyon sorunlarının yorumlanması için kullanılabilir. Buna bağlı olarak, atmosferik koşullara bağlı olarak, açık bir ortam şartında demire ait elektrokimyasal reaksiyon mekanizmaları aşağıdaki basamaklarda belirtilmiştir (Ahmad, 2016; Fontana, 1947; Yalçın ve Koç, 2014):

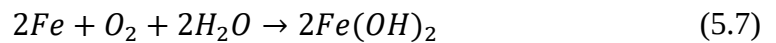
Anot Reaksiyonu:



Katot reaksiyonu:



Toplam Reaksiyon:

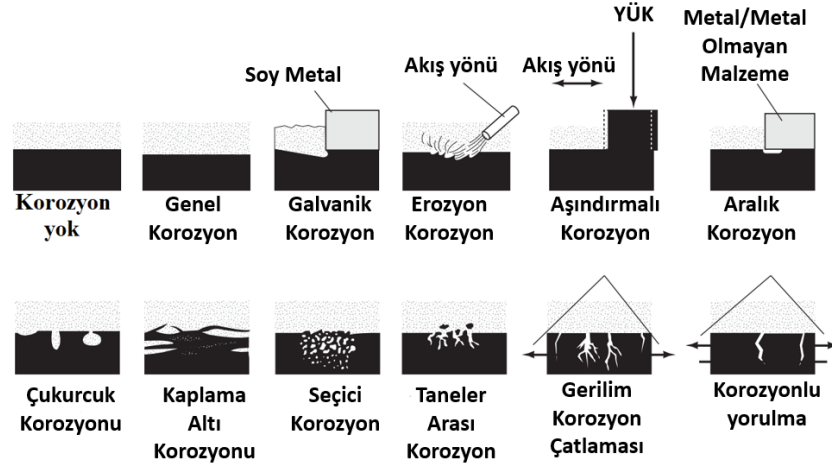


5.3 Korozyon Çeşitleri

Birbirinden farklı özellikler gösteren metaller, sürekli olarak temas halinde bulundukları ortam şartları ve belirtilen bu ortamların belirleyici parametrelerine göre çeşitli etkenlerinde baskı göstermesiyle farklı hallerde korozyona maruz

kalmaktadırlar. Şekil 5.2’de yaygın olarak meydana gelen farklı şekillerde ortaya çıkan korozyon türleri gösterilmiştir. Bu korozyon çeşitlerini dokuz başlık adı altında aşağıda sınıflandırılarak belirtilmiştir (Davis, 2000; Kuruvila ve diğer., 2018; Yalçın ve Koç, 2014). Bunlar:

- Genel (Uniform) Korozyon
- Galvanik Korozyon
- Erozyonlu Korozyonu
- Aralık (Crevice) Korozyonu
- Çukurcuk (Pitting) Korozyonu
- Seçici (Dealloying) Korozyon
- Taneler Arası (Intergranular) Korozyon
- Gerilmeli Korozyon Çatlaması (Stress Corrosion Cracking)
- Yorulmalı Korozyon (Fatigue Corrosion)



Şekil 5.2 Korozyon türleri (Davis, 2000)

5.3.1 Genel (Uniform) Korozyon

Genel korozyon, tanımlanmış korozyon formları içinde en yaygın olarak karşılaşılanıdır. Bir metalin ya da iş parçasının açıkta kalan hemen hemen sahip olduğu tüm yüzeyinin her alanında kimyasal ve elektrokimyasal tepkimenin homojen bir biçimde ilerleme kaydederek, metal yüzeyin her bölgesinde dengeli aşınmasıyla

sonuçlanan korozyon çeşitlerinden biridir. Genel korozyon sonucu metal yüzey zamanla sürekli olarak yüzeyden kayıplar vererek incelmeye devam eder ve kullanılamaz durumuna gelir. Genel korozyon durumuna karşı alınabilecek en iyi önlemler; boyama ile kaplama sağlanması, inhibitör ve katodik koruma uygulamaları yapılarak bu durumda ortaya çıkan korozyon hızı yavaşlatılabilir (Hinds, 2015; Kuruvila ve diğer., 2018; Yalçın ve Koç, 2014).

5.3.2 Galvanik Korozyon

Galvanik bir hücrede korozyonun hızını belirlemede en önemli seçim kriteri anot ve katot arasındaki potansiyel farktır. Oluşan bu potansiyel fark sonucu, sahip olduğu elektrod potansiyel değeri diğerine kıyasla daha elektronegatif olan metal parça anot olarak çok hızlı bir şekilde korozyona maruz kalmaktadır. Katot olan taraf ise bu durumun aksine daha yavaş ve düşük miktarlarda korozyona uğramaktadır. Elektrik akımı birbirlerinden farklı olarak ortaya çıkan bu tür korozyon çeşidine “galvanik korozyon” adı verilmektedir (Ahmad, 2016; Fontana, 1947).

5.3.3 Erozyonlu Korozyon

Metalik malzemelerin veya iş parçalarının gösterdikleri erozyon-korozyon hali, metal bir malzemenin katı partiküller, sıvı ya da her ikisinin bir araya gelmesiyle ortaya çıkardığı mekanik aşınma durumu, zamanla yüzey oksidasyonu oluşumuna yol açarak, korozyon sürecinin başlamasına neden olmaktadır. Zamanla ise malzeme yüzeyinin bozunması hızlanarak, mekanik aşınma ve korozyon ortamının da etkisiyle ortaya çıkardığı bu durum erozyonlu korozyonu meydana getirmektedir. Bu süreç diğer korozyon türlerinden farklı olarak tamamen mekanik olarak gerçekleşmektedir (Ahmad, 2016; Neville ve Hodgkiess, 1997).

5.3.4 Aralık (Crevice) Korozyonu

Aralık korozyonu, durağan çözeltilerin bulunduğu çatlak kısımlarında, aralıklar içinde, yarık alanlarda oluşan korozyon tipidir. Bu korozyon çeşidi genellikle dar alanlarda yer alan durgun çözeltiler ile yüzeylerde meydana gelmektedir (Ojo ve Kutelu, 2013; Yalçın ve Koç, 2014).

5.3.5 Çukurcuk (Pitting) Korozyonu

Metal yüzeyinde küçük bölgelerde çukurcuklar, tepecikler oluşturarak, ortaya çıkan korozyon türüne çukurcuk korozyonu adı verilmektedir (Obeyesekere, 2017). Çukur korozyonu, metal yüzeyinde yer alan, herhangi bir bölgede oluşum göstererek ortaya çıkan anodik reaksiyon ile oluşur. Çukurcukların çapları küçük veya büyük noktalar biçiminde meydana gelebilir, oluşum gösteren bu çukurcuk bölgelerinin yer aldıkları konumları birbirlerinden çok uzak veya çok yakın bölgeler olabilir (Kuruve ve diğ., 2018; Obeyesekere, 2017; Yalçın ve Koç, 2014).

Çukur korozyonu genel korozyon türleri arasında, en tehlikeli ve güvenli olmayan korozyon türlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Çukurları metal yüzeyi üzerinde tespit etmesi, çukurcukların üzerlerindeki boşlukların korozyon ürünleriyle kapanması bununla birlikte çukurların miktarı ve derinlik oranları zamanla değişmesi nedeniyle çok güçtür (Kaftan, 2006).

5.3.6 Seçici (Dealloying) Korozyon

Alaşımların seçici korozyonunun ortaya çıkmasındaki en önemli etkenlerden biri, korozyon direnci için önemli olan alaşım elementlerinin yerel konsantrasyon farklılıkları sonucu korozyona maruz kalarak ayrılması, bu ayrılma sonucunda ortaya çıkan korozyon olayına seçici korozyon denilmektedir (Elyiğit, 2011).

5.3.7 Taneler Arası (Intergranular) Korozyon

Korozyonun, metalurjik olarak en çok etkilendiği türlerinden biri taneler arası korozyon şeklidir. Metal atomları, kristal yapıları içinde homojen bir şekilde dağılım göstermektedirler. Taneler arası korozyon; metal malzemelerin tane sınırları çizgi hatları boyunca gözlenir. Bu tip korozyon, metalin tane sınırları boyunca veya tane sınırlarına bitişik bölgelerinde oluşmaktadır (Fontana, 1947; Şen, 2010).

Bilindiği üzere; demir ve çelik kristal yapısı kübik kafes sistemi şeklinde östenit paslanmaz çelikler ise yüzey merkezli kübik kafes sistemine sahiptirler. Ergiyik metalin katılaşması esnasında veya ısıtılma işlemi sırasında, taneler arası korozyonun sıklıkla oluştuğu gözlemlenmektedir (Fontana, 1947). Ergiyik metal,

soğuması esnasında birbirine bitişik çok sayıda kristal halinde katılaşmaktadır ve bu taneler, tane sınır çizgileri şeklinde bir hat oluşturarak birbirlerinden ayrılmaktadır. Tane sınırları bölgelerinin aralarında yer alan dar bölgelerin kristal yapısı homojen durumda bulunmaz, bu bölgeler korozyonun en çok yerleştiği ve metalin korozyona karşı direncinin en düşük olduğu bölge olarak bulunmaktadır (Fontana, 1947; Maaß, 2011; Şen, 2010; Yalçın ve Koç, 2014)

5.3.8 Gerilmeli Korozyon Çatlağı

Gerilmeli korozyon; bir metal iş parçası üzerinde aynı anda iki etken parametrenin bir araya gelmesi sonucu; yani hem mekanik gerilmelerin etkisi altında olması hem de korozif ortam etkisine maruz kalmasıyla, bu iki durumun ortaya çıkardığı kombinasyon sonucunda meydana gelmektedir (Şen, 2010). Bu korozyon türünde, korozyonun ortaya çıkmasında en etkili neden ortaya çıkan streten kaynaklı olmaktadır ve taneler arasında veya üstü bir formda oluşum gösterebilmektedir.

5.3.9 Yorulmalı Korozyon (Fatigue Corrosion)

Korozif bir ortama maruz kalan bir metal, gerilmelere de maruz kaldığında zamanla çekme ve basınç gerilmelerin periyodik streslerin sürekli değişmesi sonucu yorulmaya başlar. Gerilmelerin de etkisiyle metal zamanla normal değerlerin altındaki gerilmelerin de etkisiyle yapıda çatlaklar meydana getirmektedir. Yorulma ve korozyon ortamının da etkisiyle ortaya çıkan korozyon durumuna yorulmalı korozyon durumu denmektedir ve stres korozyonuna bağlı bir korozyon çeşididir. Düşük alaşımlı çeliklerin korozyon yorgunluğu, metal parçaya kaplama gerçekleştirilmediği sürece, düşük karbonlu bir çeliğin sahip olduğu korozyon yorgunluk değerinden daha düşük seviyede olmaktadır. Buna paralel olarak, düşük alaşımlı çeliklerin yorulmalı korozyona karşı dayanımları da düşük seviyelerde olmaktadır (Yalçın ve Koç, 2014).

5.4 Korozyon Hızını Ölçme Yöntemleri

Metallerin korozyona uğramasının tanımı iletken bir ortamda yüzeyinden malzeme kaybının meydana gelerek hasara uğraması demektir. Genel olarak korozyon, bir metal malzemenin birim zamanda iletken bir ortamında etkisiyle çözünmesine bağlı olarak

gerçekleşen süreç olarak tanımlanmaktadır. Bu çözünme oranının miktarının az ya da daha çok olması, bulunduğu ortam şartlarına göre değişmektedir (Yanardağ, 2011).

Korozyon hızını belirlemek için önceleri kütle kaybı teknikleri ile korozyon hızları tespit edilirken bu yöntemin hızlı bir şekilde gerçekleşmemesi diğer yöntemleri daha üstün kılmaya başlamıştır. Günümüzde bu yöntem geleneksel bir yöntem olup, elektrokimyasal tekniklerinde zamanla gelişimiyle birlikte metallerin korozyon hızlarının tespiti daha hızlı ve basit yöntemlerle saptanabilmektedir.

5.4.1 Kütle Kaybı Yöntemi

Korozyon hızının tespiti için tercih edilen bu yöntem geleneksel bir yöntem olup korozyon hızının saptanabilmesinde kullanılan en kolay yöntemdir. Korozyon hızı saptanırken, çözünmenin homojen olması ve korozyon sırasında ortaya çıkan ürünlerin hepsinin çözünmesi veya en iyi çözeltinin seçilmesiyle o çözelti içerisinde çözünerek, numune yüzeyinden ayrışması gerekmektedir. Korozyon akım değeri, Faraday yasaları baz alınarak aşağıda belirtilen eşitlikle saptanabilmektedir (Fontana, 1947; Usman, Victoria, ve Okoro, 2016).

$$I_{kor} = \frac{\Delta m \cdot n \cdot F}{M \cdot S \cdot \Delta t} \quad (5.8)$$

Δm =Kütle Kaybı

N =korozyona uğrayan metalin numuneye geçme değeri

F =Faraday sabiti

Δt =Zaman aralığı

M =Metalin mol kütlesi

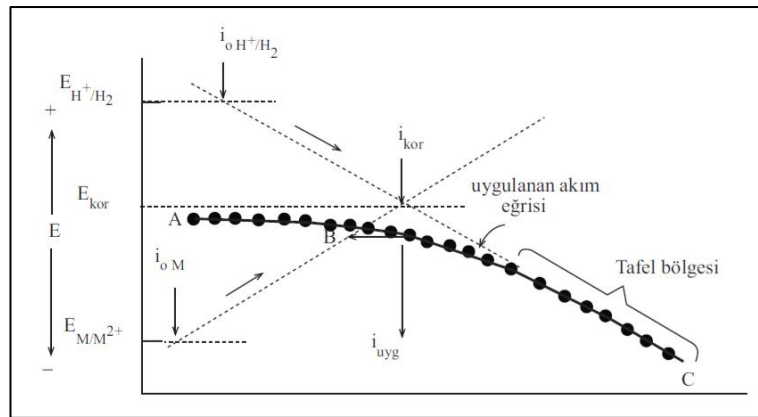
S =Yüzey alanı

Kütle kaybı yöntemleri korozyon hızını belirlemek için hem çok uzun süre gerektirmektedir hem de her zaman doğru sonuçlar vermemektedir. Bu sebepten dolayı günümüzde, korozyon hızlarının hesap analizleri yapılırken, elektrokimyasal yöntemlerle akım-potansiyel eğrilerinin incelenmesi daha çok ön plana çıkmaktadır.

5.4.2 Elektrokimyasal Yöntemler

5.4.2.1 Tafel Ekstrapolasyonu

Elektrokimyasal korozyon hızlarının belirlenme teknikleri, geleneksel yöntemler ile kıyaslandığında daha doğru sonuçlar alınmasını sağlamaktadır. Bu yöntemlerin en başında yer alan Tafel ekstrapolasyon yöntemlerine korozyon hızlarının analizinde sıklıkla başvurulmaktadır. Bu yöntem ile korozyon hızının tespiti yapılırken, anodik ve katodik polarizasyon ölçümleri yapılarak, elde edilen Tafel verileri ile korozyon hızın saptanması ve korozyon özelliklerinin belirlenmesi mümkün olmaktadır. Tafel eğrilerinin bir çıktısı olarak iki tane polarizasyon eğrisi elde edilmektedir. Bu eğriler; anodik ve katodik polarizasyon eğrileridir. Korozyon hızının tespiti için grafik üzerinde bu eğriler referans alınır. Tafel bölgelerinin ekstrapole edilmesi sağlanarak, yani bu bölgeden bir eğim çizgisi paralel olacak şekilde çizilerek, anodik bölge ile kesişmesi sağlanır (Çeğil ve Şen, 2014). Bu iki bölgenin kesişmesiyle elde edilen yatay bileşen değeri, korozyon akım miktarını (i_{kor}), düşey bileşen değeri ise korozyon potansiyelini (E_{kor}) vermektedir. Tafel polarizasyon eğrisi Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile korozyon akımının (i_{kor}) bulunması (Öz, 2011)

Tafel ekstrapolasyon eğrisinden de görüleceği üzere bu eğri logaritmiktir. Akım değeri arttıkça eğrinin lineerliği de buna bağlı olarak artış göstermektedir. Korozyon potansiyelinin 50 mV' den yüksek olduğu durumlarda grafik daha lineerleşmeye başlamakta, bu bölgeye de grafik üzerinden de görülebileceği üzere Tafel bölgesi adı verilmektedir (Çoban, 2006). Tafel eğrisinden edilen Tafel sabit değerleri olan β_a ve β_c , anodik ve katodik kolun eğimleri, mV/decade ve polarizasyon direnci (Ω/cm^2) hesaplanmaktadır (Çeçil ve Şen, 2014).

Anodik ve katodik reaksiyonların, Tafel sabit değerleri olan anodik ve katodik kolun eğimleri biliniyorsa, Stern-Geary denklemlerinden korozyon hızı tespiti yapılabilir.

$$i_{kor} = B \frac{\Delta I}{\Delta E} \quad (5.9)$$

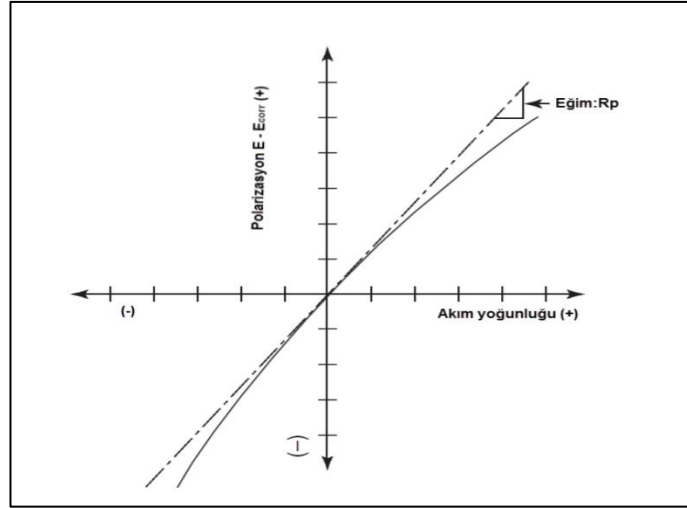
$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \quad (5.10)$$

β_a = Anodik kolun eğimi (mV/decade)

β_c =Katodik kolun eğimi (mV/decade)

5.4.4.2 Polarizasyon Direnci Yöntemi

Eğer Tafel eğrileri biliniyorsa, korozyon akım değerleri polarizasyon direnci değeri ile hesaplaması yapılabilmektedir. Bu teknik yardımıyla, metalin sahip olduğu açık devre veya korozyon potansiyeli değerinden ± 10 mV daha uzak değer aralıkları referans alınarak, gerçekleştirilen akım yoğunluğu elektrot potansiyelinin doğrusal bir fonksiyon sonucu olarak elde edilmektedir (Pala, 2013).



Şekil 5.4 Lineer polarizasyon direnci eğrisi (Pala, 2013)

Bu eğriden polarizasyon direnci aşağıda verilen eşitlik aracılığıyla ölçülmektedir (Fontana, 1947; Pala, 2013; Yalçın ve Koç, 2014).

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{\beta a \cdot Bc}{2,303 \cdot i_{kor} \cdot (\beta a + \beta c)} \quad (5.11)$$

Bu eşitlikte ΔE potansiyeldeki değişimi, Δi elde edilen polarizasyon akımı göstermektedir. Polarizasyon direnci, R_p , korozyon potansiyeli eğiminin tersi alınarak hesaplaması yapılmaktadır (Popov, 2015).

Butler Volmer eşitliğine göre elektrodun polarizasyonu boyunca, anot ve katot polarizasyon değerleri hücreden geçen akıma bağlı olarak artış göstermektedir. Butler Volmer denklemi, elektrotların sahip oldukları kinetik değerlerinin elde edilmesinde referans olarak kullanılmaktadır (Gemici, 2019). Bu denklem aracılığıyla, elektroda uygulanan dış akım yoğunluk değeri ile elektrotta meydana gelen (η) aktivasyon miktarının çok yüksek gerilimi arasındaki ilişkiyi irdelemek mümkün olmaktadır (Gemici, 2019; Popov, 2015).

$$i = I_{kor} \left(e^{2,303 \frac{\eta}{ba}} - e^{2,303 \frac{\eta}{bc}} \right) \quad (5.12)$$

$$(\eta) = E - E_{kor}$$

(η) değerinin küçük olduğu değerlerde, potansiyeller korozyon potansiyeline eşittir. Bu eşitlik (Gemici, 2019; Popov, 2015):

$$i_{kor} = 2,303 \frac{b_a \cdot b_c}{b_a + b_c} \left(\frac{1}{R_p} \right) \quad (5.13)$$

5.4.3 Akım Potansiyel Eğrilerini Elde Etme Yöntemleri

Akım-potansiyel arasındaki ilişkiyi irdelemek için çeşitli tekniklere başvurulmaktadır. Bu teknikler, elektrokimyasal uyarı ile uyarılması sağlanan elektrodun sahip olduğu reaksiyonunu kaydeden tekniklerdir. Elektroda uyarı verildiği zaman, elektrot korozyon potansiyelinden daha uzak bir değere doğru hareket etmeye başlayarak polarize gerçekleşmeye başlar. Bu ölçümler potansiyostat adı verilen ölçüm cihazlarıyla uygulanmaktadır, çalışma elektrodu ve referans elektrot arasında elde edilmek istenen potansiyel değerini, çalışma elektrodu ile referans elektrot arasına uygulanan akım sayesinde sağlanmaktadır (Pala, 2013). Polarizasyon eğrilerini elde etmek için uygulanan tekniklerden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

5.4.3.1 Potansiyostatik Yöntem

Bu yöntem yardımı ile elektrot potansiyelinin kontrolü sağlanarak, korozyon davranışları incelenecek olan çalışma elektrodunun potansiyeli ayarlanarak akımın yönü ve miktarı ölçülerek, polarizasyon eğrileri elde edilir ve bu sayede korozyon akım değerleri de elde edilebilmektedir (Pala, 2013; Tuna, 2013).

5.4.3.2 Potansiyodinamik Yöntem

Bu yöntem ile potansiyel değişiminin hızına bağlı olarak, potansiyeli denetleyerek potansiyele bağlı akım şiddet değeri ölçülmektedir (Pala, 2013). Bu yöntem sadece korozyon hızı hakkında değil, korozyon mekanizması ile ilgili de bilgi vermektedir (Tuna, 2013).

5.4.3.3 Galvanostatik Yöntem

Akım değeri sabit tutularak, korozyon özellikleri irdelenecek olan çalışma parçası devreye bağlanır, R direnci değiştirilerek belirli bir akım uygulanarak potansiyel değişimin incelendiği tekniktir (Tuna, 2013).

5.4.4.4 Galvanodinamik Yöntem

Elektrot akımı sabit hızda değişerek, potansiyel tepkisinin sürekli olarak kaydedildiği tekniktir (Pala, 2013).

5.5 Korozyondan Korunma Yöntemleri

Metallerde ve alaşımlarda korozyonu engellemek veya yavaşlatarak minimum seviyeye indirmek için, malzemelerin korozyona karşı direnç kazanması için geliştirilen çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Bu yöntemler aşağıda belirtilmiştir (Davis, 2000).

- Malzeme seçimi
- Kaplama Yöntemleri
- İnhibitör Kullanımı
- Katodik Koruma
- Tasarım

5.5.1 Malzeme Seçimi

Birçok metal ve alaşımlarının her biri kendilerine ait kimyasal ve mekanik özelliklere sahiptirler. Malzemelerin korozyona karşı yüksek dirençli bir şekilde kullanabilmeleri için en uygun malzeme seçiminin yapılması oldukça önemlidir. Malzeme seçimi aşamasında malzemenin kullanım koşullarının belirlenmesi gerekmektedir. Öncelikle malzemenin kullanacağı yerdeki amacı, yer aldığı çevrenin coğrafi şartları, kullanılacak olan ortam şartlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri, çalışma sıcaklığı, basıncı, malzemenin üretim aşamasında temas edebileceği karşı malzemeler, ara malzemeler, yan ürünler tespit edilmesi gerekmektedir (Elyiğit, 2011). Bunların yanında, birbirleri ile çalıştırılacak olan malzemelerin kendi aralarında ortaya çıkan galvanik potansiyel farkları da belirlenmesi gerekmektedir (Çoban,

2006). Sonuç olarak, malzemenin içinde bulunduğu çevre de göz önünde bulundurularak, çalışma şartlarına göre kapsamlı bir araştırma sonucunda malzeme seçimi yapılmalıdır.

5.5.2 Kaplama Yöntemleri

Korozyona karşı malzemelerin daha dirençli ve mukavim olmaları için uygulanabilecek yöntemlerden biri de malzemelerin yüzeylerinin koruyucu kaplama teknikleriyle kaplanmasıdır. Metal yüzeyleri organik ve inorganik yöntemlerle, atmosfer koşullarından etkilenmeksizin en yoğun ortamlı kimyasal işlemlere kadar kapsamlı bir şekilde, uzun servis ömür elde edecek şekilde tesislerin malzemelerin koroziif ortama karşı direnç sağlamalarını geliştirmek için tercih edilen en yaygın yöntemlerden biridir (Kaftan, 2006).

5.5.3 İnhibitör Kullanımı

Malzemelere korozyon direncini yükseltmek için koroziif bir ortama ilave edilen maddelere “inhibitör” denilmektedir. İnhibitörlerin organik ya da inorganik olarak kullanımı sağlanmaktadır. Düşük derişim miktarlarında, inhibitörler aracılığıyla metal malzemenin yüzeyinde, korozyon hızının önüne geçilerek yavaşlamasını sağlayan bir koruyucu tabaka meydana getirerek, korozyon direncini arttırmaktadır (Öz, 2011).

5.5.4 Katodik Koruma

Katodik koruma, elektriksel etkileşim içinde olan bir metalin koroziif hasar kaybına uğrayan bölgesi ile aktif bir metalin birleştirilmesiyle oluşan bir yöntemdir (Pala, 2013). Metal malzemelerde katodik koruma; elektrokimyasal korozyon ilkesine esaslarını baz almaktadır. Bu ilkeye göre; anot bölgesinde, yükseltgenme tepkileri meydana gelmekte, aynı zamanda katotta ise indirgenme tepkimeleri oluşmaktadır. Katodik koruma da bu ilke doğrultusunda hareket edildiğinde; metalin yüzeyinde korozyon kayıplarının yaşandığı, yükseltgenme tepkimelerinin meydana gelmesi neticesinde anot kısımların katot şekline getirtilerek o bölgelerin korozyon dayanımını artırılması amacıyla, yaşanabilecek korozyon hızı sorununun önüne geçilmesi sağlanmaktadır (Çoban, 2006).

5.5.5 Tasarım

Malzemenin korozyon hasarını minimum seviyede tutmak için malzemenin kullanım alan şartları da göz önünde bulundurularak optimum tasarımın seçilmesi gerekmektedir. Uygun malzeme seçimi için, en önemli kriterlerin başında, devamlı olarak birbirleriyle temas halinde çalışacak malzemeler için elektromotif seri değerleri baz alınmalıdır. Birbiri ile temas halinde olarak çalışan iş parçaları için, bu seride yer alan değerleri, birbirinden uzak olan elementler seçilmemelidir (Yanardağ, 2011).



BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında, korozyon ortamlarında gerçekleşmesi olası sorunları ortadan kaldırmak amacıyla, plastik enjeksiyon kalıplarında mevcut durumda kullanılmakta olan QT (su verilmiş, temperlenmiş) olarak temin edilmiş çelik numunelerin (I1, R1, C1, N1) yerine temin ve talaşlı imalat maliyeti daha ucuz çeliklerin kullanılabilirliği korozyon direnci açısından incelenecektir. Mevcut durumda kullanılan çeliklerin içinden düşük maliyetli olan C1 çeliği ve bu plastik kalıp çeliklerine alternatif olarak seçilen 1.2842 (90MnCrV8) çeliğinin borlama yöntemlerinden biri olan kutu borlama yöntemi ile özelliklerinin iyileştirilmesi planlanmıştır.

Bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, Standard Profil Ege Otomotiv A.Ş firması tarafından temin edilen çelik numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Mevcut durumda kalıp çelik numuneleri için yüzey kalitesine uygun zımpara aralığı 240 grit SiC zımpara kâğıdı ile zımparalanarak, yüzey pürüzlülük değeri olarak belirlenmiş ve referans alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değerlerini karşılaştırmak amacıyla; ilk aşamada 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile numuneler zımparalanarak hazırlanmış ve her numunenin yüzey pürüzlülük değerleri 240 ve 1200 gritlik zımpara işlemlerinden sonra ölçülerek numuneler elektrokimyasal korozyon deneylerine tabii tutularak her iki durum için de Tafel eğrileri karşılaştırılmıştır.

Alternatif olarak seçilen 1.2842 çeliğine de uygulanan kutu borlama işleminin ardından yapılan korozyon deneyinden sonra sonuçlar yüzey pürüzlülük değerlerine göre karşılaştırılmış ve korozyon direnci en uygun olan plastik kalıp çeliği firmaya öneri olarak sunulmuştur.

6.2 Deneylerde Kullanılan Malzemeler ve Cihazlar

SiC zımpara: Metalografik numune hazırlama işlemlerinde zımpara aşamasında kullanılmıştır.

Alümina pasta: 3 µm elmas pasta parlatma işlemlerinde kullanılmıştır.

Çuha: Parlatma işlemlerinde kullanılmıştır.

Çalışma elektrodları: I1, R1, N1, C1 ve 1.2842 çelik numuneleri çalışma elektrodları olarak kullanılmıştır.

Epoksi kalıp: Numunelerin korozyon deneylerinde kalıba alınma aşamalarında kullanılmıştır.

Bakır tel: Numunelerin korozyon deneylerinde iletkenliklerini sağlayabilmek için lehimleme işleminde kullanılmıştır.

Lehimleme cihazı / Pace MBT301 TD-100A ve SX-100: Numunelerin bakır tel ile lehimlemesinin gerçekleştiği cihaz.

Hassas terazi / AND GR-200: NaCl çözeltisinin hazırlanması için 0,0001 g hassasiyetle NaCl'yi ölçmek için kullanılmıştır.

Elektrolit / %3,5 NaCl çözeltisi: Korozyon deneyinin gerçekleştiği çözelti.

Referans elektrot: Hg/HgCl kullanılmıştır.

Yardımcı elektrot: Grafit çubuk kullanılmıştır.

Cam kap: Üçlü elektrot sisteminin gerçekleştiği deney hücresi.

Alümina pota: Kutu borlama işlemi için numunelerin yerleştiği pota.

Bor kaynağı/Ekabor-2 tozu: Kutu borlama işleminde bor sağlayıcı olarak kullanılmıştır.

Deoksidant / Ekrit tozu: Oksijen tutucu olarak kullanılmıştır.

Micro Vickers sertlik cihazı / SHIMADZU HVM: Mikro sertlik deneylerinde sertlik ölçümlerinde kullanılmıştır.

Metalografik numune hazırlama cihazları / Presi Mecapol P230 ve Metkon Forcipol 1V: Metalografik kesit hazırlama işlemlerinden zımparalama ve parlatma adımlarının gerçekleştirilmesi için kullanılmıştır.

Potansiyostat cihazı / Gamry 600/3000 Potansiyostat Galvanostat ZRA: Tafel ekstrapolasyon deneyinin gerçekleştiği cihaz.

Potansiyostat kullanımı için bilgisayar yazılımı / Gamry Framework: Tafel eğrisinin çıktısını bu yazılım aracılığı ile alınabilmektedir.

Kutu fırın/Protherm: Kutu borlama işleminin gerçekleşmesi için kullanılmıştır.

Metal mikroskobu / Olympus GX 51 metal mikroskobu: Numunelerin iç yapı incelemelerinde kullanılmıştır.

X-Işınları Difraktometresi (XRD) / Cu X Işın Tüplü Rigaku D/Max2200/PC: Borlama sonrasında yapıda oluşan yeni fazların tespitleri için kullanılmıştır.

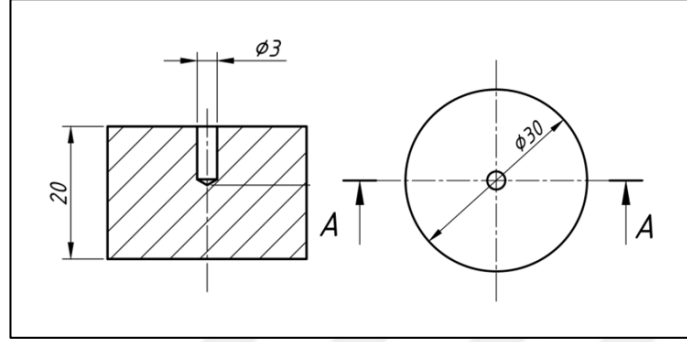
6.3 Deney Numuneleri ve Spektral Analizleri

Bu tez çalışmasında Standard Profil Ege Otomotiv firmasının enjeksiyon kalıplarında kullanmış olduğu ticari patentli dört farklı plastik kalıp çeliği numunesi kullanılmıştır. Kullanılan bu numuneler R1, C1, N1, I1 olarak kodlanmıştır. Bu numunelere ait kimyasal bileşimleri tespit etmek için numunelerin spektral analiz ölçümleri Standard Profil Ege Otomotiv A.Ş firması tarafından yapılmıştır. Numunelere ait spektral analiz değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Numunelerin kimyasal içerikleri

Numuneler	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Cu	V
I1	0,37	0,3	1,4	2,0	1,0	0,2	<0,010	-	-
R1	0,05	0,4	1,2	12,6	-	-	0,12	-	-
C1	0,05	-	1,3	12,5	-	-	0,15	3,0	-
N1	0,1	0,3	2,5	3,0	1,0	0,3	-	-	-
1.2842	0,90	0,25	2,00	0,35	-	-	-	-	0,10

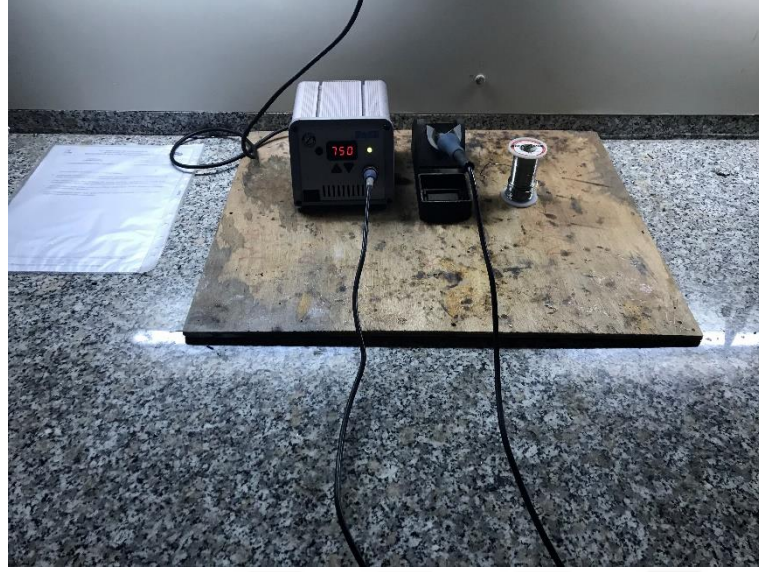
Deneyel çalışmalar için hazırlanan numunelere ait teknik çizim görüntüsü Şekil 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Deney numunelerinin görünümü

6.4 Numunelerin Korozyon Deneyine Hazırlanması

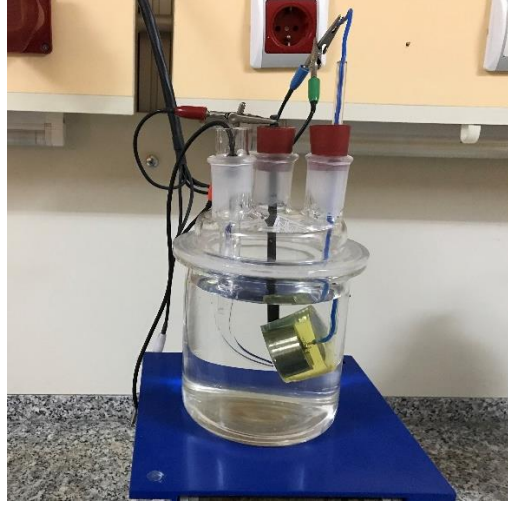
İ1, R1, N1, C1 ve 1.2842 çelik numuneleri korozyon deneyinde kullanılmak üzere Ø30x20 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerden C1 ve 1.2842 çeliği kutu borlama işlemi öncesinde de korozyon hızları karşılaştırılmak üzere korozyon deneyine tabii tutulmuştur. Korozyon deneyi iki aşamada uygulanmıştır. İlk önce tüm numuneler firmanın kendi şartlarında kullanmış olduğu numunelerin talaşlı imalat sonrası kullanmış oldukları yüzey kalitesinin, yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlük işlemleri sonucunda belirlenen değer aralığına göre uygun zımpara 240 grit SiC zımpara kâğıdı olarak belirlenmiş ve bu değerde zımparalanmıştır. 2.aşamada tüm numuneler 80, 240, 400, 800 ve 1200 grit SiC zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. Deney numunelerinin (çalışma elektrodu) iletkenliğini sağlayabilmek için numunelerin arka yüzeyine açılmış olan Ø30 mm çapındaki deliğe 1,5 mm çapında 300 mm uzunluğunda bakır tel ile lehimleme işlemi yapılarak numunelerin sadece elektrolit ile temasta olan yüzeyleri açıkta olacak şekilde epoksi kalıp ile kalıba alınmıştır.



Şekil 6.2 Lehimleme cihazı (Kişisel arşiv, 2020)

6.5 Elektrokimyasal Ölçümler

Korozyon davranışlarının tespiti için, elektrokimyasal deneyler üç elektrot tekniği kullanılarak cam hücresi içinde gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmalarının tümünde 1 M %3,5 NaCl çözelti içinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma elektrodu olarak I1, R1, N1, C1, 1.2842 çelikleri, referans elektrot olarak Hg/HgCl ve yardımcı elektrot olarak grafit çubuk kullanılmıştır. Elektrokimyasal testler Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Korozyon Laboratuvarı'nda bulunan Gamry 600/3000 Potansiyostat Galvanostat ZRA cihazında “ASTM G102 Elektrokimyasal ölçümlerle korozyon hızı hesaplaması” standardına göre yapılmıştır. Deneyler iki kere tekrarlanarak yapılmıştır. Dengeye ulaşan sistem açık devre potansiyelinin 25 V altından 25 V üstüne kadar 0,5 V/h tarama hızı ile Tafel ekstrapolasyonuna tabii tutulmuştur.



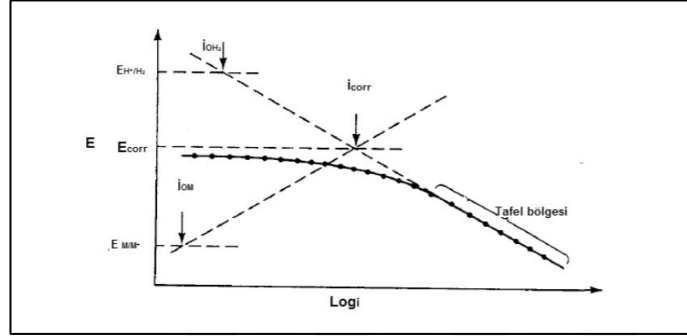
Şekil 6.3 Üç elektrotlu korozyon düzeneği (Kişisel arşiv, 2020)

6.5.1 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi

Tafel ekstrapolasyon deneylerinin hepsi 1M %3,5 NaCl çözeltisi içinde Gamry Framework yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma elektrodu olarak I1, R1, N1, C1, 1.2842 çelikleri, referans elektrot olarak Hg/HgCl ve yardımcı elektrot olarak grafit çubuk kullanılmıştır. Tafel deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Korozyon Laboratuvarı'nda bulunan Gamry 600/3000 Potansiyostat Galvanostat ZRA cihazında Gamry Framework yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Sonuçlar “ASTM G102 Elektrokimyasal ölçümlerle korozyon hızı hesaplaması” standardı baz alınarak yapılmıştır.

Bilindiği üzere, birçok korozyon olayı elektrokimyasal ortam şartlarında oluşur ve tepkimeler malzemenin yüzeyinde meydana gelmektedir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi, korozyon hızlarının tespit edilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır bu tez çalışmasında numunelere ait korozyon hızlarının belirlenmesi için bu yöntem seçilmiştir ve numunelere ait açık devre potansiyelleri (mV), Ekor, korozyon potansiyelleri (mV), korozyon direnci i_{kor} , β_a ve β_c , anodik ve katodik kolun eğimleri mV/decade, korozyon hızı, polarizasyon direnci (Ω/cm^2) hesaplanmıştır.

Korozyon ölçüm cihazı aracılığıyla çizilen Tafel eğrisi, Gamry Framework yazılımı aracılığıyla anodik ve katodik kollarından paralel eğriler çizilerek korozyon akım yoğunluğu (i_{kor}) ve korozyon parametrelerine ait diğer ölçüm değerlerinin tespit edilmesi sağlanır. Tafel eğrisi Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 Tafel eğrisi (Öz, 2011)

6.5.2 Polarizasyon Direncinin Hesaplanması

Tafel ekstrapolasyon deneylerinden sonra Tafel deneyinin çıktısı olan Tafel grafikleri, anodik veya katodik yönde çizilen yarı logaritmik akım-potansiyel eğrileridir. Bu eğrilerin çizgisel kısımları geriye doğru ekstrapole edildiği zaman Şekil 6.4'de gösterildiği gibi korozyon potansiyelleri kesişir ve kesişen bu noktalarda korozyon hızıyla ilgili olan korozyon potansiyelinin (E_{kor}) ve bu değere karşılık gelen korozyon akımının (i_{kor}) doğrudan bir ölçüsünü vermektedir (Fontana, 1947; Yalçın ve Koç, 2014). Eşitlik 6.1 ve 6.2'de polarizasyon direncinin hesaplanmasında kullanılan denklemler verilmiştir. Elde ettiğimiz Tafel eğrilerinden sonra korozyon potansiyelinden başlayarak anodik veya katodik yönde çizilen Tafel grafiklerinden elde edilen Tafel sabit değerleri olan β_a ve β_c , anodik ve katodik kolun eğimleri mV/decade belirlendikten sonra polarizasyon direnci (Ω/cm^2) hesabı bu yöntemle yapılmıştır.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303 \cdot i_{kor} \cdot (\beta_a + \beta_c)} \quad (6.1)$$

β_a = Anodik kolun eğimi (mV/decade)

β_c =Katodik kolun eğimi (mV/decade)

I_{kor} =korozyon akım yoğunluğu ($\mu A/cm^2$)

6.6 Sertlik Testleri

Sertlik testleri, malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesi konusunda paralel bir ilişki bulunması nedeniyle, numuneyi az hasara maruz bırakarak, uygulaması basit olan en genel testtir. Sertlik testlerinin amacı; malzemelerin çizilme, aşınma, delinme ve kesilme gibi durumlarda malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği dirençtir (Filho ve diğer., 2010). Endüstriden tedarik edilen kalıp çeliği malzemelerine, sertlik testinden önce gerekli zımpara işlemleri uygulanmıştır. Zımpara işlemi sırasıyla 240, 400, 800, 1200 SiC gritlik zımpara kağıtları ile uygulanmıştır. Zımparalama işlemine takiben tüm numuneler 3 μm elmas pasta ile çuhada parlatma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numuneler etanol ile yüzeyleri temizlenerek filtre kâğıt ile kurutulmuştur. Numunelerin sertlik ölçümleri Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarı bünyesinde bulunan Mikro Vickers SHIMADZU HVM marka mikro sertlik ölçme cihazında 1 HV yük altında 10 saniye bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Her deney malzemesi için 5 sertlik ölçümü yapılmıştır ve yapılan bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak, kaydedilmiştir. Sertlik deneyleri “ASTM E92-72 Metalik Malzemelerin Vickers Sertliği için Standart Test Yöntemi” standardına göre uygulanmıştır.

6.7 Kutu Borlama İşlemi

Bu tez çalışmasında borlama işlemi olarak kutu borlama işlemi seçilmiştir. Borlama ısıtıl işlemi katı ortamda gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi uygulanacak numuneler C1 VE 1.2842 çeliğidir. Alümina seramik potalar içine numuneler yerleştirilmiştir ve kutu fırın içinde borlama işlemine tabii tutulmuştur.

Bor sağlayıcı olarak Vezneli A.Ş firması tarafından temini gerçekleştirilen “Ekabor-2” adlı bor tozu kullanılmıştır. Bu bor tozuna ait tane büyüklük boyutları ise 75-106 μm aralığındadır. Ekabor 2 tozunun kimyasal içeriği aşağıda verilmiştir. Numuneler alümina seramik pota içerisine, tabandan 20 mm yüksekliğinde Ekabor-2 tozu doldurulduktan sonra yerleştirilmiş, tekrardan numune üzerine ve etrafını

kaplayacak 20 mm yüksekliğinde Ekabor-2 tozu ile kaplanmıştır. Daha sonra numunelerin en üst kısmına, Ekabor-2 tozunun üzerine Vezneli A.Ş tarafından “Ekrit (Deoksidan)” tozu kaplanarak kaplanıp, alümina seramik potanın kapağı kapatılmıştır. Ekrit tozu saf demir ve oksit tutucu bileşiklerden oluşmaktadır. Daha sonra numuneler 850 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca kutu borlama işlemine tabii tutulmuştur ve daha sonra fırının içinde soğumaya bırakılmıştır.

Tablo 6.2 Ekabor-2 tozu kimyasal içeriği

Bor Sağlayıcı Kaynak	Kimyasal İçeriği
Ekabor-2 Tozu	B ₄ C – SiC – KBF ₄



Şekil 6.5 Alümina seramik pota içerisinde Ekabor-2 ve Ekrit tozuyla kaplanan numune (Kişisel arşiv, 2020)

Numunelerin alümina kroze kutu içinde, üzerinde Ekrit tozu ile kaplanmış şeklinde gösterimi Şekil 6.5’te gösterilmiştir. Alümina kroze kalıplar ise Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Kutu borlama işleminde kullanılan alümina kroze kapları (Kişisel arşiv, 2020)

Kutu borlama işleminde kullanılan fırın ve numunelerin fırın içinde konumları ise Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Kutu borlama işleminde kullanılan fırın ve numunelerin konumları (Kişisel arşiv, 2020)

6.8 Karakterizasyon İşlemleri

6.8.1 Optik Mikroskop ve Metal Mikroskop Analizleri

I1, R1, N1, C1 ve 1.2842 çelik numuneleri karşılaştırmak üzere iç yapı görüntülerinin alınması için numune hazırlama proseslerine takiben 80, 240, 400, 800 ve 1200 SiC zımpara kağıtları ile zımparalanarak zımpara işlemleri ve 3 µm elmas pasta ile çuhada parlatma işlemi uygulanarak dağlama işlemine hazırlanmıştır. Dağlama işlemi %2 Nital çözeltisinde 15 saniye boyunca daldırılarak dağlama işlemine tabii tutulmuşlardır, daha sonra numunelerin dağlama miktarları %3 Nital oranına çıkartılarak dağlama süreleri uzun tutularak tekrardan iç yapı görüntüsü alınmıştır. I1, R1, C1, N1 ve 1.2842 çeliklerinin iç yapı görüntüleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan 50X Olympus GX 51 model metal mikroskobu ve Nikon ECLIPSE ME 600 marka optik mikroskop ile 50X objektif büyütme değerinde alınmıştır.

6.8.2 Numunelere Bağlı Tabaka Kalınlıkları ve Sertlik Değerleri

Kutu borlama işleminin ardından C1 ve 1.2842 çelik numunelerinin bor tabaka kalınlıklarını ölçmek için, numuneler kesitten kesilerek, 80, 240, 400, 800 ve 1200 SiC zımpara kağıtları ile zımparalanarak zımpara işlemleri ve 3 µm elmas pasta ile çuhada parlatma işlemi uygulanarak dağlama işlemine hazırlanmıştır. Numunelerin tabaka kalınlıkları Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarı'nda bulunan 50X Olympus GX 51 model metal mikroskobu ve Nikon ECLIPSE ME 600 marka optik mikroskop ile 50X objektif büyütme değerinde alınmıştır. 1.2842 ve C1 çelik numunelerinin 850°C'de 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda, sertlik ölçme işlemleri yüzeyden itibaren matrise kadar, HV_{0,025} yük altında belirli mesafelerde yapılmıştır.

6.8.3 X-Işınları Difraksiyonu ve Kristal Yapı (XRD) Analiz Çalışmaları

Borlama işleminin ardından C1 ve 2842 çelik numunelerinin yapısında oluşan yeni fazların tespitleri için Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümün'de bulunan Rigaku Marka X ışınları difraktometresi (XRD) cihazı

kullanılarak $\lambda=1,79021 \text{ \AA}$ ışın demeti ve 2θ (15-90°) açıları kullanılmıştır. Faz tayinlerinin tespitinde kullanılan XRD cihazı Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 XRD cihazı (Kişisel arşiv, 2020)

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

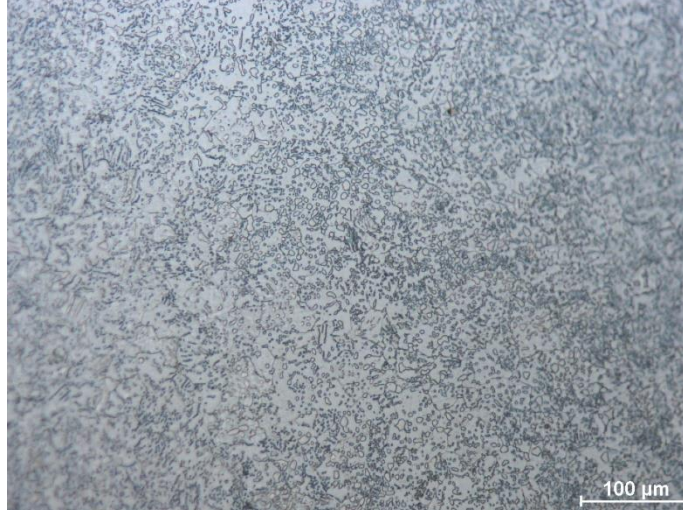
7.1 Optik Mikroskop/Metal Mikroskop Analizleri ve Sertlik Değerleri

I1, R1, N1, C1 ve 1.2842 çelik numuneleri karşılaştırmak üzere iç yapı görüntülerinin alınması için numune hazırlama proseslerine takiben 80, 240, 400, 800 ve 1200 SiC zımpara kağıtları ile zımparalanarak zımpara işlemleri ve 3 µm elmas pasta ile çuhada parlatma işlemi uygulanarak dağlama işlemine hazırlanmıştır. Dağlama işlemleri öncelikle %2 Nital çözeltisinde 30 saniye boyunca daldırılarak dağlama işlemine tabii tutulmuşlardır. Daha sonra I1 ve N1 çelik numunelerinin dağlama solüsyon miktarları aynı tutularak dağlama süresi arttırılarak (1 dakika) tekrar dağlama işlemi uygulanmıştır. C1 ve R1 çelikleri ise dağlama miktarları %2'den %3'e arttırılarak dağlama süresi ise 2 dakika tutulmuştur. Numunelere ait optik ve metal mikroskobu görüntüleri aşağıda verilmiştir.

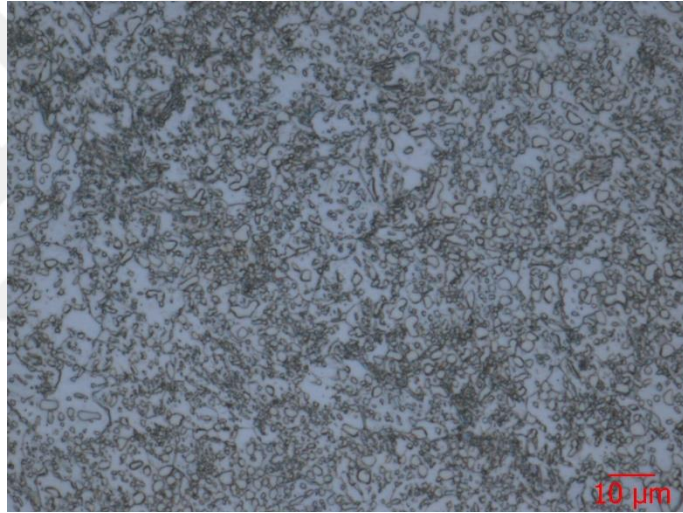
Her numuneye ait sertlik değerleri ve kimyasal kompozisyonları mikro yapı görüntüleriyle birlikte verilmiştir. Tüm numunelere ait sertlik değerleri 219,83-398 HV₁ aralığında değişmektedir.



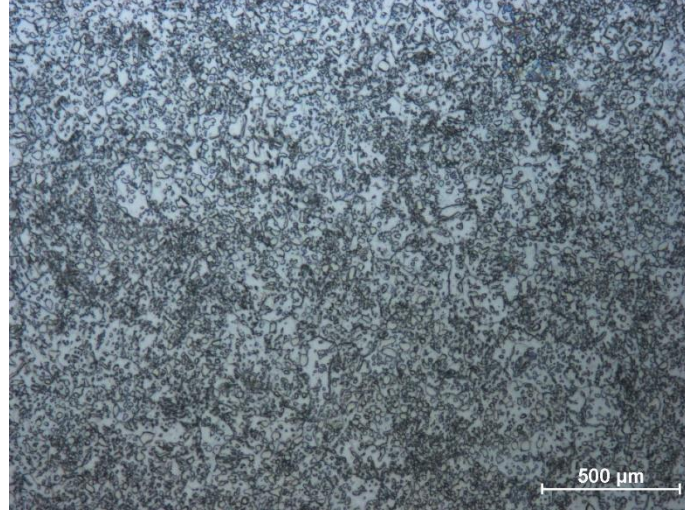
Şekil 7.1 1.2842 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.2 1.2842 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.3 1.2842 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)



Şekil 7.4 1.2842 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)

1.2842 çeliği orta alaşımlı soğuk iş takım çeliğidir. Şekil 7.1’de 1.2842 (90MnCrV8) çeliğine ait hafif dağlanmış görüntüsü verilmiştir. 1.2842 çeliğinin yapısında perlit ve sementitlerin (Fe_3C) içerdiği gözlemlenmiştir. Perlitler hem lamel hem de küresel formda bulunmaktadır. Sementitler matriste homojen olarak dağılmıştır. 1.2842 çeliğine ait mikrosertlik değerleri ve kimyasal kompozisyon oranları Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’de verilmiştir. 1.2842 çeliğine ait ortalama mikrosertlik değeri ise 219,83 HV_1 , 14 HRC’ dir.

Tablo 7.1 1.2842 çeliğinin mikrosertlik değerleri

Numune	HV_1	HRC
1.2842	219,83	14,96

Tablo 7.2 1.2842 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları

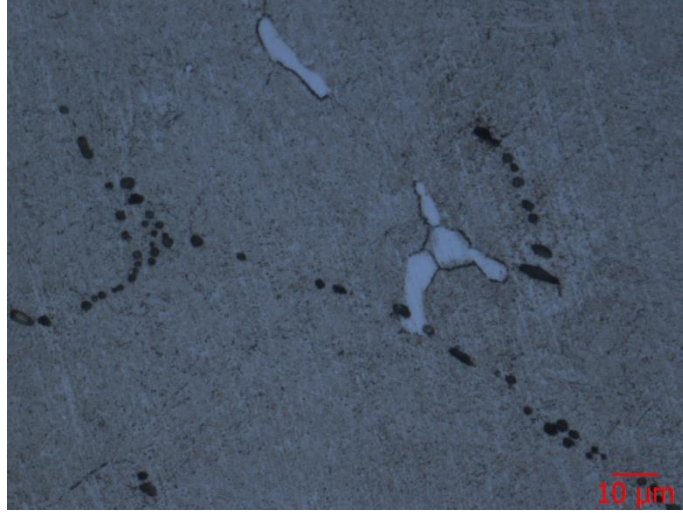
Numune	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Cu	V
1.2842	0,90	0,25	2,00	0,35	-	-	-	-	0,10



Şekil 7.5 R1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.6 R1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.7 R1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)



Şekil 7.8 R1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6’da %2 Nital çözeltisinde 30 saniye bekletilerek elde edilen iç yapı görüntüsü verilmiştir. Hafif dağlanmış yapı incelendiği zaman, küresel birbirini takip eden bir faz gözlemlenmiştir. Yapı içerisinde homojen olmayan bir dağılıma sahiptir. R1 çeliğinin yapısında, dağlayıcıdan etkilenmeyen beyaz bölgeler görülmüştür. Yoğun dağlanmış yapı, hafif dağlanmış yapıda görülen beyaz matris yapısının dağlama süresi ve miktarı artırıldığında elde edilmiştir. Beyaz bölgeler Nital çözeltisinden daha az etkilenen bölgelerdir. Hafif dağlamada tek bir faz mevcutken, dağlama miktarı ve süresi artırılarak elde edilen iç yapı görüntüsünde de gözlemlendiği gibi, yoğun dağlanmış yapıda homojen dağılım göstermeyen farklı faz yapıları

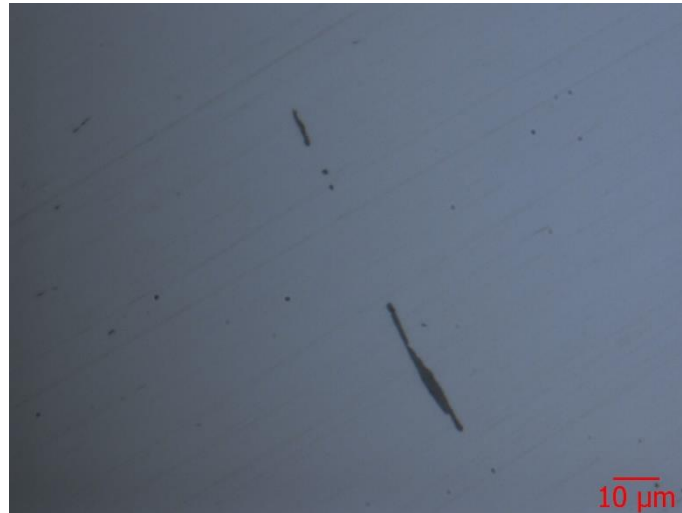
mevcuttur. Matris fazını elde etmek için daşlama süresi ve miktarı arttırılmıştır. Yapının çok az miktarda bile Nital çözeltisinden etkilendiği gözlemlenmiştir. Yoğun daşlanmış yapıda gözlenen beyaz olan bölgeler yapıda bulunan %12,6 Cr' dan dolayı oluşan yapıdır. R1 çeliğine ait mikrosertlik değerleri ve kimyasal kompozisyon oranları Tablo 7.3 ve Tablo 7.4'te verilmiştir. R1 çeliğine ait ortalama mikro sertlik değeri ise 308 HV₁, 32 HRC'dir.

Tablo 7.3 R1 çeliğinin mikrosertlik değerleri

Numune	HV ₁	HRC
R1	308	32

Tablo 7.4 R1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları

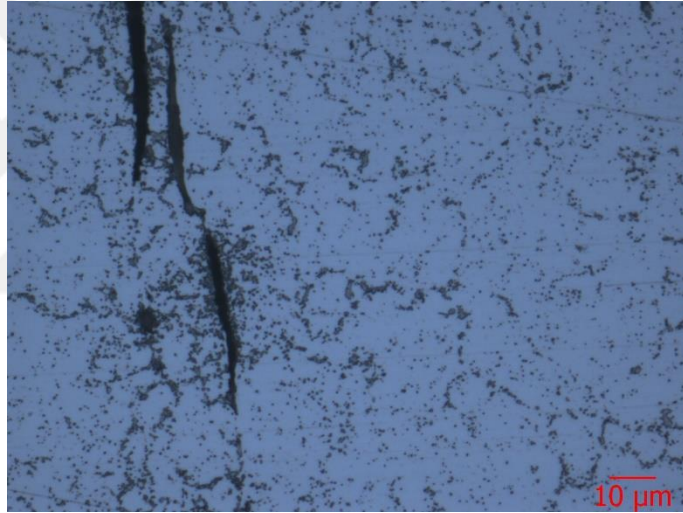
Numune	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Cu	V
R1	0,05	0,4	1,2	12,6	-	-	0,12	-	-



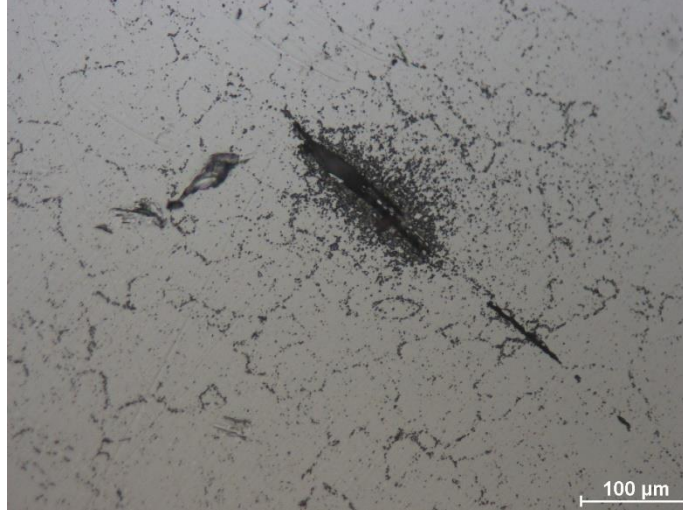
Şekil 7.9 C1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif daşlanmış)



Şekil 7.10 C1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.11 C1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)



Şekil 7.12 C1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)

Şekil 7.9’da görülen hafif dağlanmış yapıda C1 çeliğinin %2 Nital çözeltisinde 30 saniye bekletilerek elde edilen iç yapı görüntüsü verilmiştir. Bu hafif dağlanmış yapıda homojen olmayan ince, uzun çökelmiş bir yapı gözlemlenmiştir. C1 çeliği %12,5 Cr oranına sahiptir. Ana yapıyı elde etmek için dağlama miktarı ve süresi arttırılmıştır, bu yoğun dağlama görüntüleri Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de gösterilmiştir. Matris yapı içinde dağlanan bölgelerin, homojen olmayan ağ yapısı şeklinde süreksiz bir yapı olduğu görülmüştür. Nital çözeltisinden etkilenen bölgelerin yine kromca fakir bölgeler olduğu düşünülmektedir. Dağlama oranı arttıkça, yoğun dağlanan R1 çeliğinde olduğu gibi fazlar yapıda daha koyu bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Dağlayıcıdan fazla etkilenen bu bölgelerin alaşımın toplam korozyon direncini düşürebileceği öngörülmektedir. Ana matris fazı incelendiğinde ise, yapının Nital çözeltisinden daha az etkilendiği gözlemlenmiştir. Tane sınırlarında birikme gözlemlenmiştir. Numunenin dağlanmasından sonra iki görüntüde yapının dallanarak oluştuğu görülmektedir. Dağlamaya karşı dirençli olan bölgelerde Cr oranı göreceli olarak daha yüksek olduğu düşünülmektedir. C1 çeliğine ait sertlik değerleri ve kimyasal kompozisyon oranları Tablo 7.5 ve Tablo 7.6’da verilmiştir. C1 Çeliğinin ortalama sertlikleri 315 HV₁ ve 33 HRC’dir.

Tablo 7.5 C1 çeliğinin mikrosertlik değerleri

Numune	HV ₁	HRC
C1	315	33

Tablo 7.6 C1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları

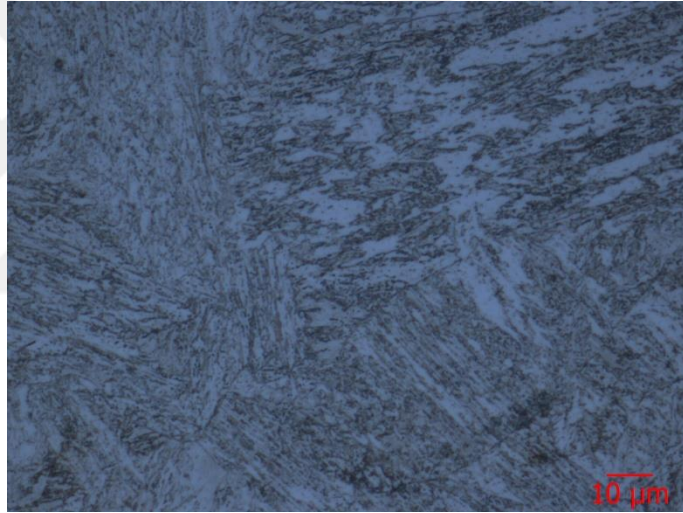
Numune	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Cu	V
C1	0,05	-	1,3	12,5	-	-	0,15	3,0	-



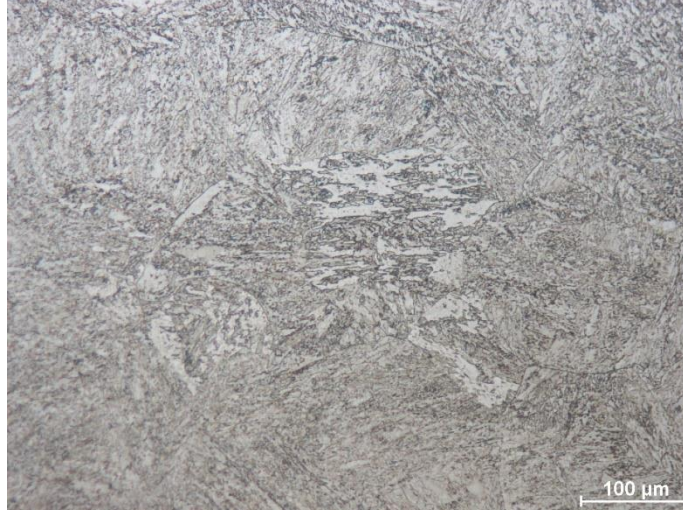
Şekil 7.13 N1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.14 N1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.15 N1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)



Şekil 7.16 N1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)

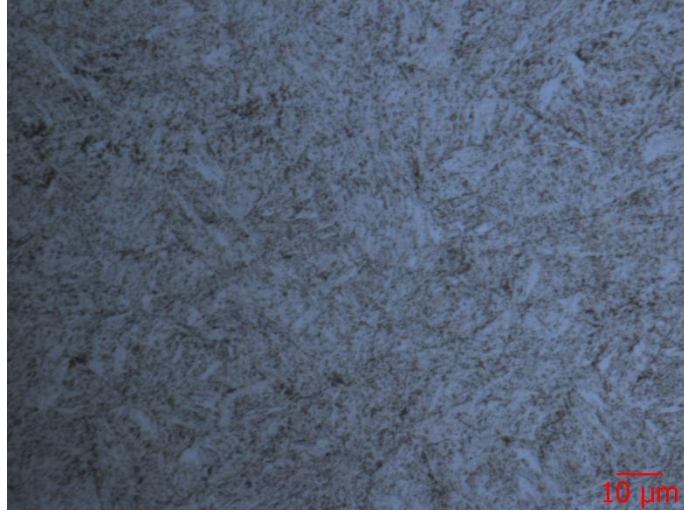
Şekil 7.13 ve Şekil 7.14’te N1 çelik numunesinin %2 Nital çözeltisinde 30 saniye bekletilerek elde edilen iç yapı görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.15 ve Şekil 7.16’da ise yoğun dağlanmış şeklinin görüntüsü verilmiştir. Dağlama süresindeki farklılık ile matris fazı elde edilmiştir. N1 çeliğinin mikroyapısının Widmanstatten ferrit fazlarına yakın bir yapı ve ferrit+sementit kümelerinden oluştuğu düşünülmektedir. N1 çeliğine ait sertlik değerleri ve kimyasal kompozisyon oranları Tablo 7.7 ve Tablo 7.8’de verilmiştir. N1 Çeliğinin ortalama sertlikleri 394 HV₁ ve 41 HRC’dir.

Tablo 7.7 N1 çeliğinin mikrosertlik değerleri

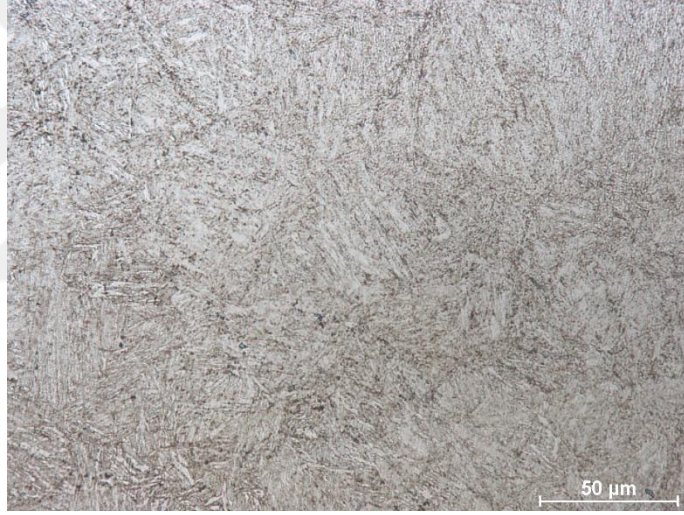
Numune	HV ₁	HRC
N1	394	41

Tablo 7.8 N1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları

Numune	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Cu	V
N1	0,1	0,3	2,5	3,0	1,0	0,3	-	-	-



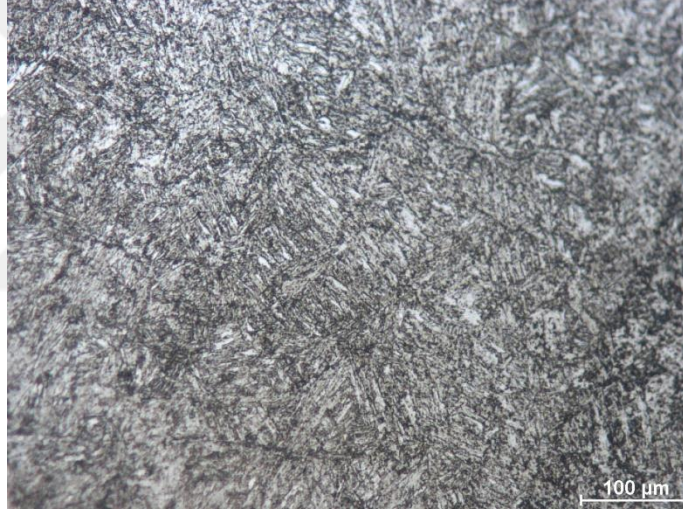
Şekil 7.17 I1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.18 I1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Hafif dağlanmış)



Şekil 7.19 I1 çeliğinin 50X objektif metal mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)



Şekil 7.20 I1 çeliğinin 50X objektif optik mikroskopta alınan görüntüsü (Yoğun dağlanmış)

Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de I1 çelik numunesinin %2 Nital çözeltisinde 30 saniye bekletilerek elde edilen iç yapı görüntüsü verilmiştir. Çelikler, temperlenmiş ve su verilerek (quenchind and tempering, QT) temin edildiğinden dolayı Şekil 7.17’de I1 çeliğinin 1 dakika boyunca yoğun dağlanmış görüntüsünden yapının martenzit yapı olduğu gözlemlenmiştir. I1 çeliğinin mikroyapısı ile N1 çeliğinin iç yapısı benzerlik göstermektedir. N1 yapısında rastlanan Widmanstatten ferrit fazları I1 iç yapısında da mevcuttur. Ferrit+sementit kümeleri mevcuttur. I1 çeliğine ait sertlik değerleri ve kimyasal kompozisyon oranları Tablo 7.9 ve Tablo 7.10’da verilmiştir. I1 Çeliğinin ortalama sertlikleri 383 HV₁ ve 39 HRC’ dir.

Tablo 7.9 I1 çeliğinin mikrosertlik değerleri

Numune	HV ₁	HRC
I1	383	39

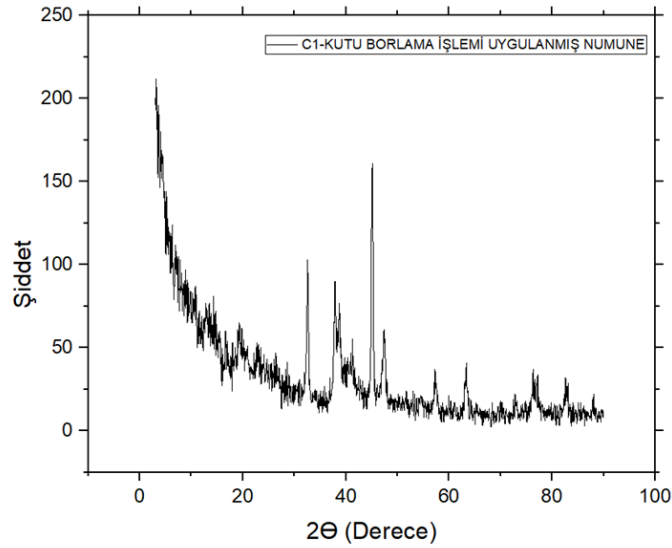
Tablo 7.10 I1 çeliğinin kimyasal kompozisyon oranları

Numune	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	Cu	V
I1	0,37	0,3	1,4	2,0	1,0	0,2	<0,010	-	-

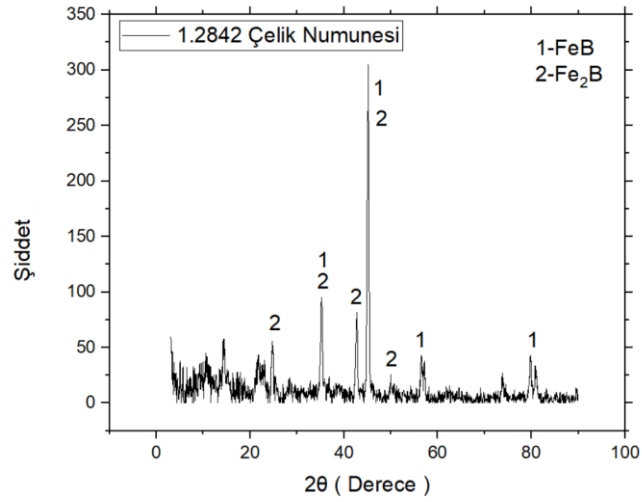
7.2 Kutu Borlama İşlemi Sonuçları

7.2.1 XRD Sonuçları

C1 ve 1.2842 çelik numunelerinin, 850°C sıcaklıkta 4 saat sürede kutu borlama işlemine tabii tutulduktan sonra numunelerin yüzeylerinde oluşan borür tabakalarına ait fazlar, X-ışınları difraktometresi kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 7.21 ve Şekil 7.22’de C1 ve 1.2842 çelik numunelerinin XRD paternleri verilmiştir.



Şekil 7.21 850 °C’de 4 saat borlanmış C1 numunesinin X-ışınları difraksiyon paterni



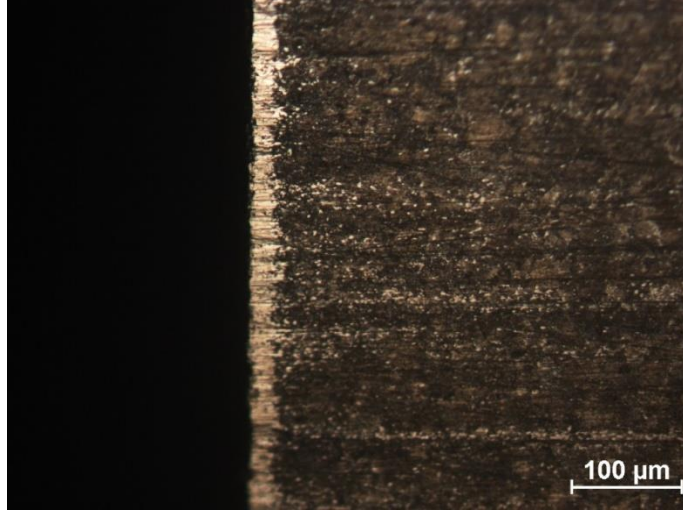
Şekil 7.22 850 °C’de 4 saat borlanmış 1.2842 numunesinin X-ışınları difraksiyon paterni

XRD paternleri incelendiği zaman, borür tabakasının MB ve M_2B (M= Metal; Fe) gibi borürlerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekillerin XRD desenleri incelendiğinde, borlanmış numunelerin borür tabakaları bölgelerinde Fe_2B ve FeB fazları olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar ve sonuçları göz önüne alındığında, XRD paternlerinin sonuçlarından almış olduğumuz verilerin, literatür ile benzerlikler gösterdiğini ve uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Çelik numunelerinden elde edilen bor tabakalarının iki farklı fazdan oluştuğu, bu fazların ağırlıklı olarak FeB ve Fe_2B fazları olduğu gözlemlenmiştir. İki farklı çelik numunesinin kimyasal kompozisyonları birbirinden farklı olduğu için elde edilen XRD paternlerinin de bu etkiye bağlı olarak farklı olduğu ortaya konmuştur.

7.2.2 Mikroyapı Sonuçları

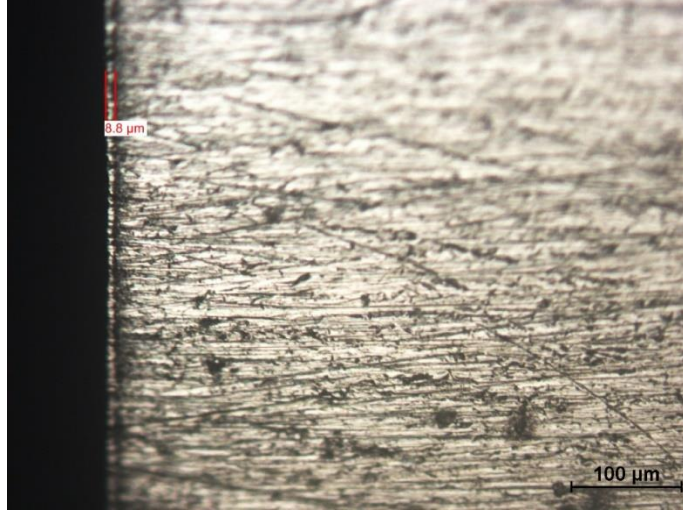
C1 ve 1.2842 çelik numunelerinin 850°C sıcaklıkta, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucu elde edilen bor tabakasına ait optik ve metal mikroskoplarından alınan mikro yapı görüntüleri aşağıda verilmiştir.



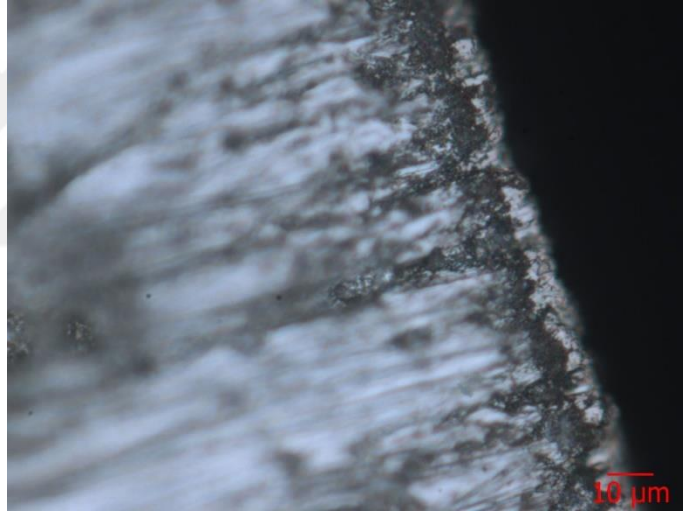
Şekil 7.23 1.2842 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede optik mikroskobundan elde edilen iç yapı görüntüsü



Şekil 7.24 1.2842 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede metal mikroskobundan elde edilen iç yapı görüntüsü



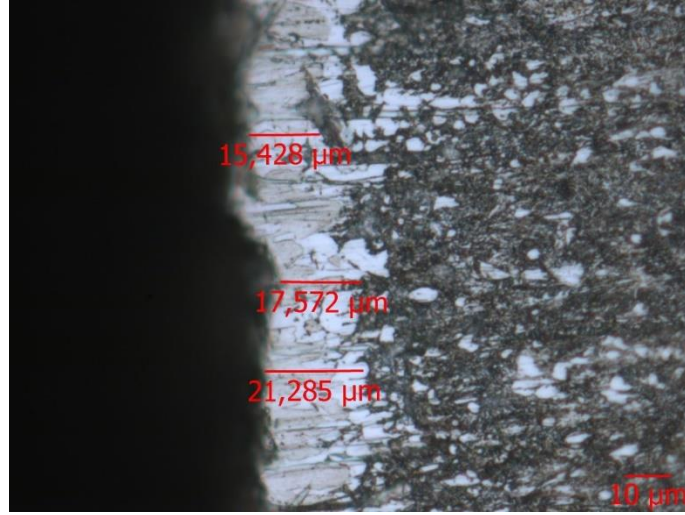
Şekil 7.25 C1 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede optik mikroskobundan elde edilen iç yapı görüntüsü



Şekil 7.26 C1 çeliğinin 850°C, 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakasının 50X objektif büyütmede metal mikroskobundan elde edilen iç yapı görüntüsü

7.2.3 Numunelere Bağlı Tabaka Kalınlık Ölçümleri

1.2842 ve C1 çelik numunelerinin 850°C’de 4 saat sürede uygulanan kutu borlama işlemi sonucunda, sertlik ölçme işlemleri yüzeyden itibaren matrise kadar, belirli mesafelerde yapılmıştır.



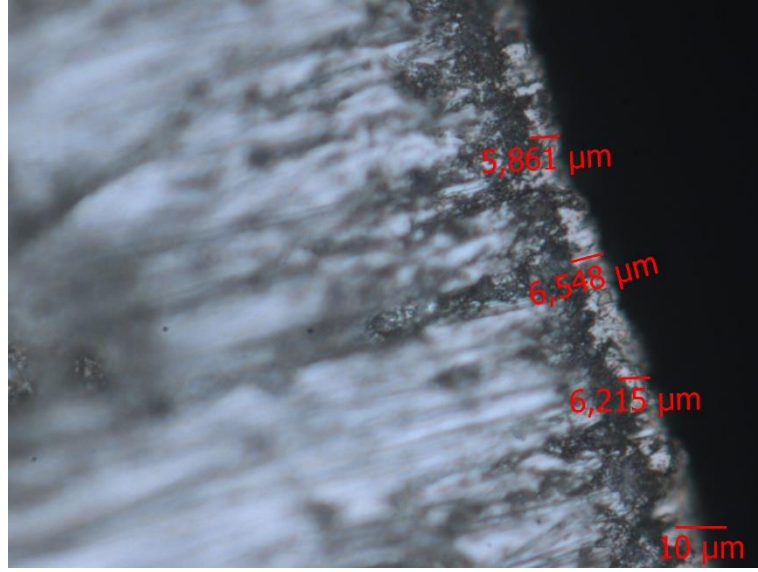
Şekil 7.27 1.2842 çeliğinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen tabaka kalınlık değerleri

Tablo 7.11 Yüzeyden itibaren ölçülen sertlik değerleri

Uzaklık (µm)	HV _{0,025}
4,3	1799
10,28	1384
27,33	310
53,52	295
70,95	301

Tablo 7.12 1.2842 çeliğinin mikrosertlik değerleri

Numune	HV ₁
1.2842	219,83



Şekil 7.28 C1 çeliğinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen tabaka kalınlık değerleri

Tablo 7.13 C1 çeliğinin kutu borlama işlemi sonrasında yüzeyden itibaren ölçülen sertlik değerleri

Uzaklık (μm)	HV _{0,025}
24,41	281
36,03	153

Tablo 7.14 C1 çeliğinin mikrosertlik değerleri

Numune	HV ₁
C1	315

Yukarıda verilen Şekil 7.27 incelendiğinde, 1.2842 çeliğinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi sonucunda tabaka kalınlık değeri 15,428 μm ile 21,285 μm aralığında değişmektedir. Şekil 7.28’de C1 çeliğinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi sonucunda elde edilen bor tabakası kalınlık değer aralığı ise 5,861 μm ile 6,548 μm değişmektedir. Her iki çelikte de en yüksek sertlik değerleri yüzeye en yakın yer olan ve borca en zengin bölge olan yerde edilmiştir. Yüzeyden itibaren mesafe artmaya

başladıkça, sertlik değeri de düşmeye başlamaktadır. 1.2842 çeliğinin 4,3 μm mesafede 1799 HV_{0,025} sertlik değerine sahipken, yüzeyden uzaklaşmaya başladıkça sertlik değerinde de azalmalar elde edilmiştir. C1 çelik numunesinde de iki ayrı uzaklıkta ölçüm alınabilmiştir ve sertlik değeri 24,41 μm 'de 281 HV_{0,025} iken 36,03 μm 'de sertlik değeri 153 HV_{0,025} olmuştur.

7.3 Elektrokimyasal Yöntemle Elde Edilen Test Sonuçları

II, R1, C1, N1 ve 1.2842 çelik numuneleri 1.aşamada 240 grit SiC zımpara kağıtları ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme işleminin ardından Tafel polarizasyon yöntemi ile Tafel sabitleri belirlenerek, ilk gruba ait korozyon özellikleri hesaplanmıştır. İlk gruba ait korozyon özellikleri Tablo 7.15'te gösterilmiştir. Numunelerin Tafel eğrileri sırasıyla aşağıda karşılaştırmaları olarak verilmiştir. Elektrokimyasal test sonucunda edilen Tafel eğrilerinden, polarizasyon direnci (R_p), korozyon akımı (I_{kor}), korozyon hızı değerleri tespit edilmiştir. Korozyon akımının yüzey alanına bölünmesiyle korozyon akım yoğunluğu (i_{kor}) bulunmuştur. Kutu borlama işleminden sonra alınan korozyon özellikleri Tablo 7.16'da gösterilmiştir.

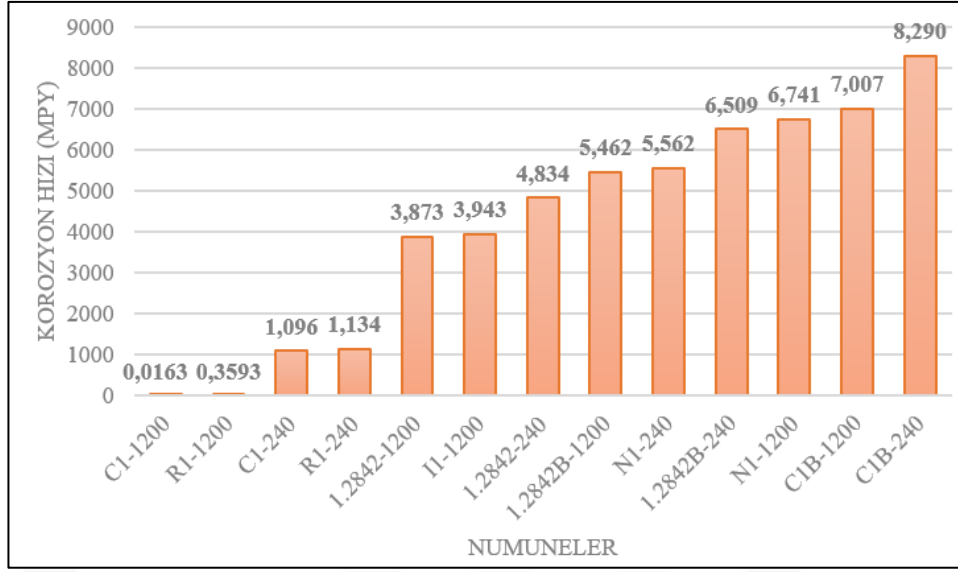
1.aşamada 240 grit zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunelere ait korozyon akım yoğunluk değerleri 2,35 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ile 15,43 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ aralığında değişmektedir. Korozyon hızları ise 1,10 ile 7,20 mpy aralığında değişmektedir. Polarizasyon dirençleri ise $4,04 \times 10^{-5}$ ile $23,61 \times 10^{-3} \Omega/\text{cm}^2$ aralığında değişmektedir. Bu eğrilerden elde edilen Ekor değerinin sıfıra yakınlığı malzemenin korozyona direncinin yüksek olduğunun göstergesidir. Korozyon akımı değerinin düşmesi korozyon direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Polarizasyon direnci (R_p) ile korozyon hızı arasında ters orantı bulunmaktadır. R_p değerinin artışına bağlı olarak malzemenin korozyon direncinin yüksek kabul edildiği birçok çalışmada görülmektedir. 2.aşamada ise 850°C 4 saat kutu borlama işleminden sonra incelenen korozyon özellikleri Tablo 7.16'da verilmiştir. Korozyon akım yoğunluk değerleri 11,81 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ile 17,84 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ aralığında değişmektedir. Korozyon sonuçları ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile karşılaştırılarak, her numune için açıklamalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.15 Kutu borlama işlemi uygulanmamış numunelerin 1 M %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon değerleri

Numuneler	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	Ekor (mV)	ikor ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Rp (Ω/cm^2)	Korozyon Hızı (mpy)
I1-240 Zımpara	0,107	0,001465	-446	15,43	0,000040463	7,2049
I1-1200 Zımpara	0,0757	0,5917	-585	8,45	0,003450693	3,9433
R1-240 Zımpara	0,089	0,1961	-335	2,43	0,010938827	1,134
R1-1200 Zımpara	0,0761	0,1285	-323	0,77	0,026736493	0,35933
C1-240 Zımpara	0,3633	0,1972	-323	2,35	0,0236166	1,0966
C1-1200 Zımpara	0,0892	0,0976	-185	0,035	0,58	0,01633
N1-240 Zımpara	0,1044	1,080	-550	12,03	0,003436513	5,562
N1-1200 Zımpara	0,0722	2,057	-515	14,58	0,0020758147	6,741
1.2842-240 Zımpara	0,0694	0,9232	-579	10,36	0,002705658	4,834
1.2842-1200 Zımpara	0,0787	0,7341	-534	8,3	0,003715389	3,873

Tablo 7.16 Kutu borlama işlemi uygulanmış numunelerin numunelerin 1 M %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon değerleri

Numuneler	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	Ekor (mV)	ikor ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Rp (Ω/cm^2)	Korozyon Hızı (mpy)
C1B-240 Zımpara	0,09903	0,06363	-522	17,84	0,024348068	8,29
C1B-1200 Zımpara	0,1032	0,0772	-515	15,15	0,003810903	7,007
1.2842B-240 Zımpara	0,1442	0,8636	-734	14,07	0,05379089	6,509
1.2842B-1200 Zımpara	0,1023	0,4437	-577	11,81	0,003055745	5,462



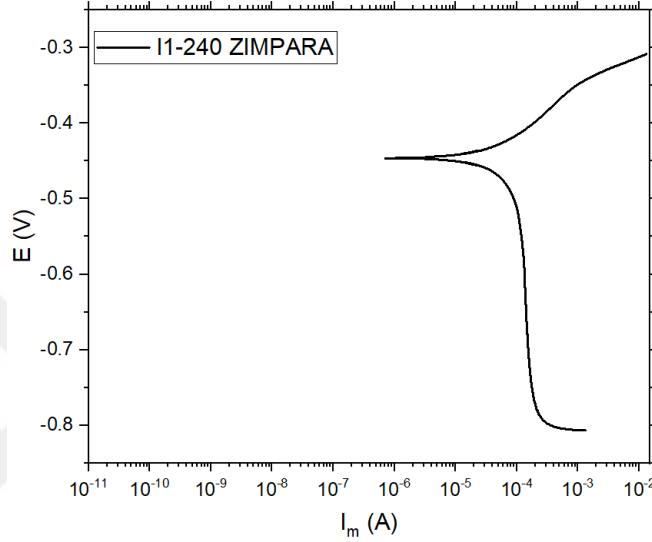
Şekil 7.29 Tüm numunelerin korozyon hızlarının karşılaştırma grafiği

Şekil 7.29’da tüm numunelerin korozyon hızları sütun grafiği şeklinde karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere korozyon hızı en yüksek olan numune 8,290 mpy değeri ile 840°C 4 saat kutu borlama işlemine tabi tutulan C1-240 gritlik zımpara uygulanan numunesinden elde edilmiştir. Bu duruma karşılık olarak ise C1 numunesinin kutu borlama işlemi uygulanmadan önce 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanmış numunesinden 0,016 mpy değeri ile en düşük korozyon hızı değeri elde edilmiştir.

İki numunenin borlama öncesi ve borlama sonrası yüzey pürüzlülük değerleri karşılaştırıldığında ise C1 numunesinin kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik zımpara kâğıdı uygulandıktan sonra elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Ra 1,196 μm ile 1,166 μm , Rz 4,566 μm ile 5,654 aralığında değişirken, borlama işleminden önce 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki yüzey pürüzlülük değerleri ise Ra 0,036 ile 0,05; Rz değerleri ise 0,29 ile 0,214 aralığında değişmektedir. Kutu borlama işleminden sonra numunenin yüzey pürüzlülüğü artarak korozyon hızını da arttırmıştır.

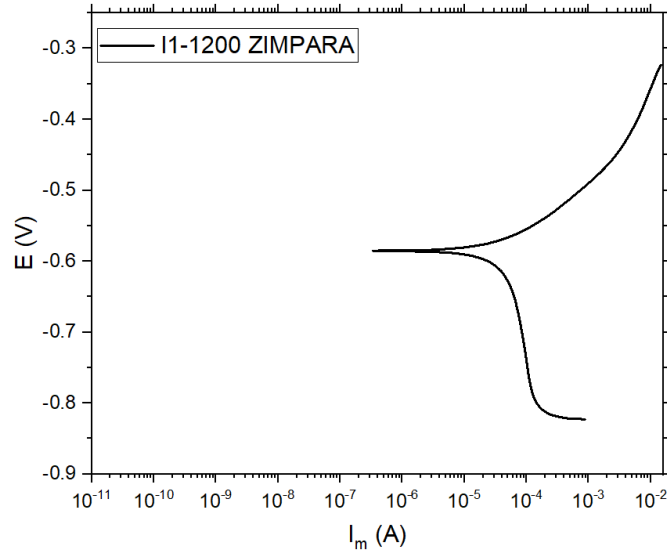
Borlama işlemi uygulanmış numunelerin korozyon direnci bor tabakasında bulunan porozitelere bağlı olarak değişmektedir, bor tabakasının içeriğinde bulunan bu tabakalar korozyon direncini önemli bir ölçüde düşürmüştür. Aynı zamanda C1

çeliğinin içeriğinde bulunan %12,5 Cr oranı ise daha önce kaynak araştırması kısmında bahsedildiği gibi, bor ilavesi ile karbür oluşumu hızlı bir şekilde artarak serbest bulunan krom miktarının azalmasına yol açmış olabilir bu durumda kromun yüzeyde oluşturduğu pasifleşme kabiliyetini düşürmeye yol açarak korozyon direncini düşürmüştür.



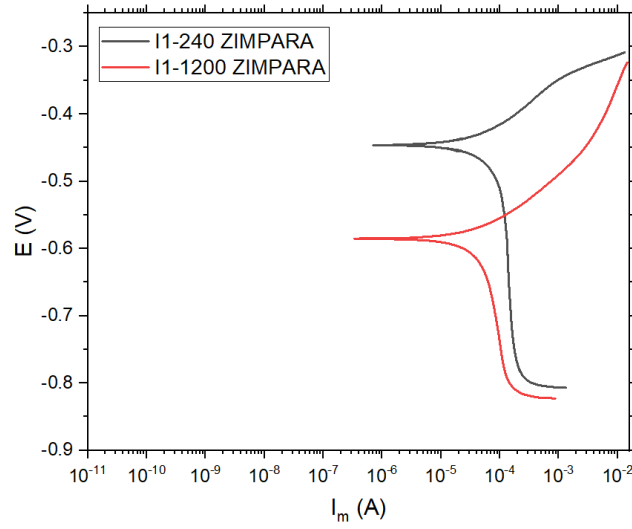
Şekil 7.30 I1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.30'da I1 çelik numunesinin 240 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. I1-240 grit zımpara uygulanan numunede, -0,80V ile -0,45V potansiyel aralığında katodik polarizasyon gerçekleşmiştir. Numune -0,45V'dan itibaren daha pozitif potansiyel değerlerde anodik polarizasyon gerçekleşerek metal çözünmeye başlamıştır. Aktif Cl⁻ iyonları etken olduğu için anodik bölgede pasifleşme durumuna rastlanılmamıştır. Sürekli olarak artan potansiyel değerleri etkisiyle beraber numune korozyona uğramaya devam etmiştir. Bu numuneye ait akım yoğunluk değeri 15,43 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir.



Şekil 7.31 I1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

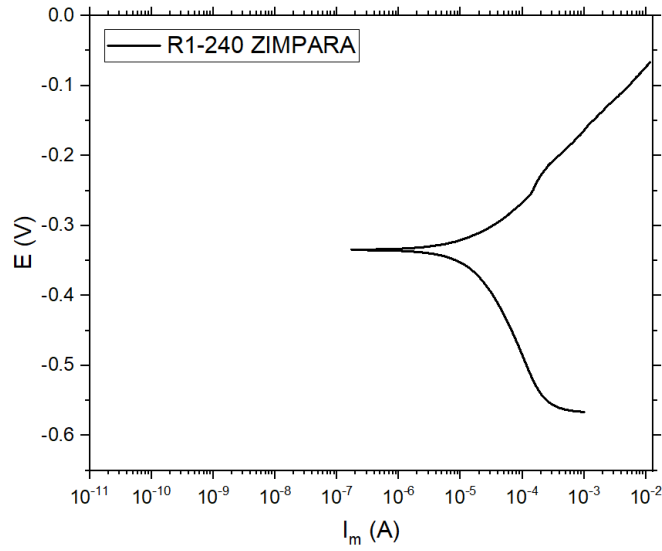
Şekil 7.31’de I1 çelik numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon aralığı -0,81V ile -0,58V’dur. Bu bölgede katodik olarak gerçekleşen tepkime oksijenin indirgenmesi olarak görülmüştür. Numune -0,58 V’dan itibaren anodik polarizasyon sonucu çözünmeye başlamıştır. Potansiyel değerin düzenli olarak artış göstermesine paralel olarak numune sürekli olarak korozyona uğramaya devam etmektedir bu nedenle pasifleşme bölgesinin oluşmadığı grafik üzerinde gözlenmemiştir. Bu numuneye ait akım yoğunluk değeri $8,45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’dir.



Şekil 7.32 I1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları

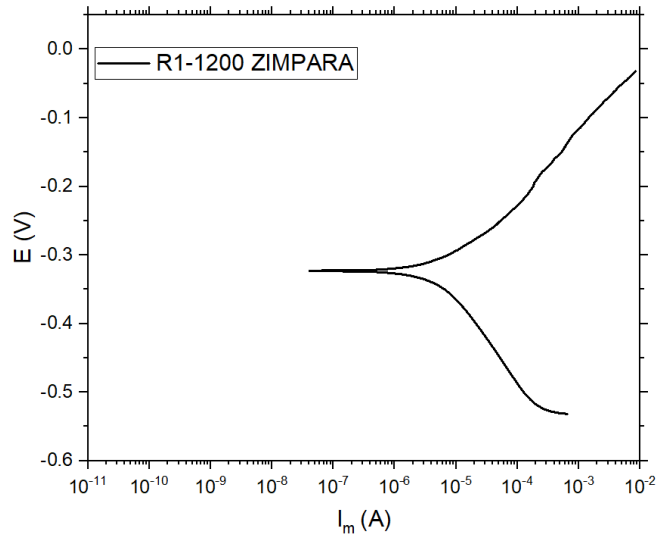
Şekil 7.32’de I1-240 zımpara ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. Bu grafik değerlerine göre, I1-240 numunesinin anodik polarizasyon aralığı -0,45V’dan başlayarak numune korozyona uğramaya başlarken I1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise anodik polarizasyon aralığı -0,58V’dan itibaren başlamaktadır. İki numunede sürekli olarak korozyona uğramaktadır ve pasifleşme gözlenmemiştir.

Tablo 7.15’te verilen değerler göz önüne alındığında, I1-240 numunesine ait korozyon hızı değeri 7,204 mpy iken I1-1200 numunesinin korozyon hızı değeri 3,943 mpy’dir. Burada gözlenen farklılık, 240 grit zımpara kağıdının tane boyutu 45µm, 1200 grit zımpara kâğıdının ise tane boyutu 3µm’dir. Numuneler uygulanan bu zımpara değerlerinden sonra 240 zımparadan sonra numune yüzeyinden ölçülen Ra 0,49 µm ile 0,44 µm Rz yüzey pürüzlülük değerleri 2,31 µm ile 1,69 µm aralığında değişmektedir. 1200 grit zımpara kağıdında ise Ra değer aralığı 0,08 µm ile 0,07 µm aralığında, Rz ise 0,216 µm ile 0,23 µm aralığında değişmektedir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri 1200 gritlik zımpara kağıdında daha düşüktür. Korozyon hızları ve yüzey pürüzlülük değerleri göz önüne alındığında, yüzey pürüzlülük değeri düştükçe korozyon hızı da düşmektedir.



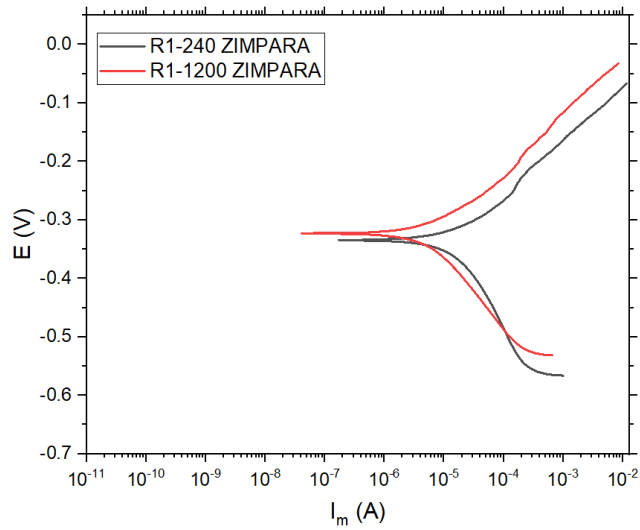
Şekil 7.33 R1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.33'te R1 çelik numunesinin 240 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Verilen bu eğriye göre, numune dengeye ulaştıktan sonra, katodik polarizasyon -0,56V ile -0,33V aralığında gerçekleşmiştir. Katodik potansiyel aralığında gerçekleşen katodik tepkime oksijenin indirgenme reaksiyonudur. Oksijen elektron alarak hidroksil iyonu haline dönüşmesi şeklinde tepkime gerçekleşmektedir. -0,33V'dan itibaren anodik potansiyele doğru geçiş yapılmıştır. Çelik numune olan R1 numunesi, -0,33V'dan itibaren potansiyelin artmasıyla birlikte anodik polarizasyonla birlikte çözünmektedir. -0,33V ile -0,21V değerleri arasında anodik çözünme devam etmektedir. -0,21V değerinden sonra metal yüzeyde Cr elementlerinin varlığı ile oksijen yüzeye difüze olması engellenerek, demirin oksidasyonunu önleyerek yüzeyde Cr_2O_3 bir film oluşturmaya başlamıştır. Tablo 7.15'te de verildiği gibi, eğriden alınabilecek denge halindeki akım yoğunluğu ise $2,43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir.



Şekil 7.34 R1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.34'te R1 çelik numunesinin 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon -0,52V ile -0,32V potansiyel aralığındadır. Daha sonra R1 numunesi -0,32V'dan -0,15V değerine kadar anodik polarizasyon sonucu çözünmektedir. -0,15V değerinden itibaren, kimyasal içerikte bulunan Cr elementlerin varlığı ile koruyucu bir tabaka oluşarak pasif bölge oluştuğu görülmektedir. Denge halindeki akım yoğunluk değeri $0,77 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir.

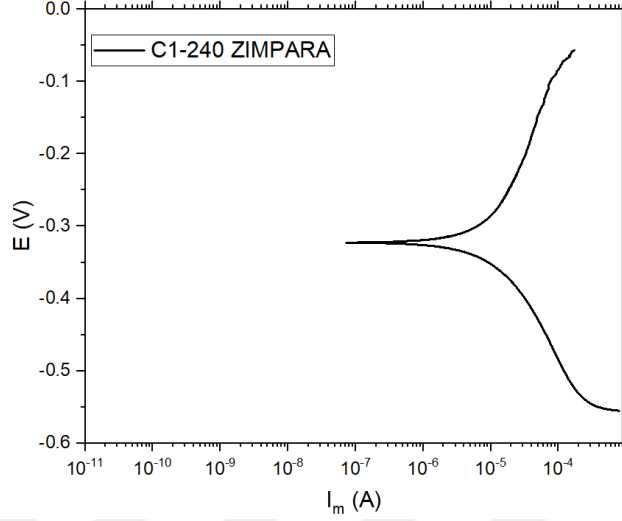


Şekil 7.35 R1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları

Şekil 7.35'te R1-240 zımpara ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. Bu grafik değerlerine göre, R1-240 numunesinin anodik polarizasyon aralığı -0,33V'dan başlayarak numune korozyona uğramaya başlarken R1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise anodik polarizasyon aralığı -0,32V'dan itibaren başlamaktadır. Katodik potansiyel aralığında gerçekleşen katodik tepkime oksijenin indirgenme reaksiyonudur. Nötr çözeltinin de varlığıyla oksijen, elektron alarak hidroksil iyonu haline dönüşmesi şeklinde tepkime gerçekleşmektedir. Tablo 7.15'te verilen değerler göz önüne alındığında, R1-240 numunesine ait korozyon akım yoğunluk değeri $2,43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise $1,134 \text{ mpy}$ iken R1-1200 numunesinin korozyon akım yoğunluğu $0,77 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise $0,35933 \text{ mpy}$ 'dir.

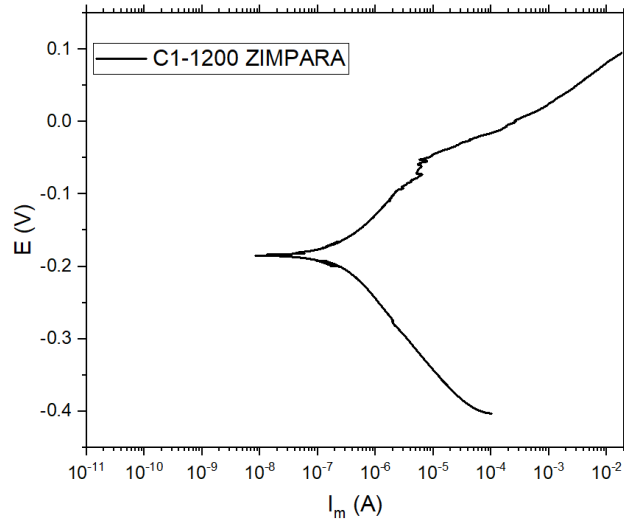
Zımpara kağıtlarının aşındırıcı tane boyutları farklılık değerleri göz önüne alındığı zaman numuneler uygulanan bu zımpara değerlerinden sonra 240 zımparadan sonra numune yüzeyinden ölçülen R_a $0,42 \mu\text{m}$ ile $0,58 \mu\text{m}$, R_z yüzey pürüzlülük değerleri $2,03 \mu\text{m}$ ile $3,64 \mu\text{m}$ aralığında değişmektedir. 1200 grit zımpara kâğıdından alınan yüzey pürüzlülük sonuçları ise R_a değer aralığı $0,04 \mu\text{m}$ ile $0,03 \mu\text{m}$, R_z ise $0,30 \mu\text{m}$ ve $0,318 \mu\text{m}$ aralığında değişmektedir. Numunenin kimyasal içeriği göz önüne alındığı

zaman içeriğinde bulunan %12,6 Cr oranı bulunduğundan, Cr koruyucu bir pasif film oluşturarak geliştirilmiş pasivasyon kabiliyetine yol açmıştır.



Şekil 7.36 C1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

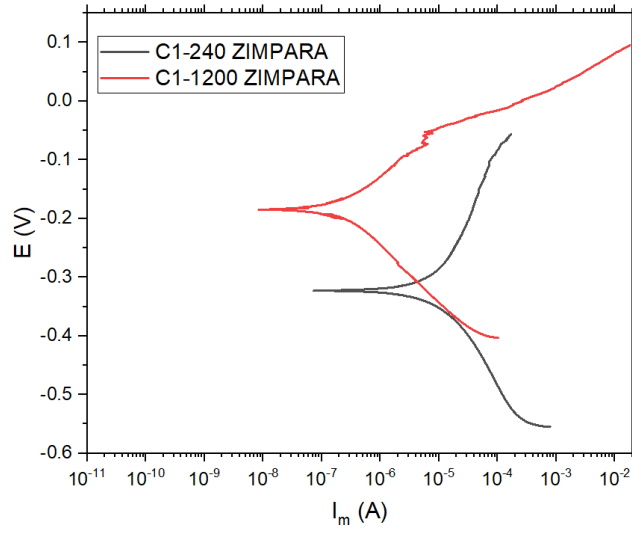
Şekil 7.36'da C1 çelik numunesinin 240 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. C1 numunesinin katodik polarizasyon aralığı -0,54V ile -0,32V aralığındadır. -0,32V değerinden itibaren anodik polarizasyon başlayarak numune korozyona uğramaya başlamaktadır. -0,32V'dan itibaren anodik polarizasyon başlayarak -0,14V aralığına kadar oksit oluşumu başlamıştır. -0,14V'a kadar oksit oluşumu tamamlanmıştır. -0,14V değerinde pasifleşme bölgesi başlamıştır ve -0,05V değerine kadar devam etmiştir. Denge halindeki korozyon akım yoğunluk değeri ise $2,35 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.37 C1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.37’de C1 çelik numunesinin 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon aralığı -0,39V ile -0,18V aralığındadır. Burada gerçekleşen katodik tepkime nötr bir çözelti olmasından dolayı oksijenin indirgenme reaksiyonudur. Denge halindeki korozyon akım yoğunluk değeri, $0,035 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür.

-0,18V ile -0,08V aralığında numune çözünmeye başlamıştır ve anodik polarizasyon başlamıştır. -0,08V değerinde numune pasifleşmeye başlayarak pasifleşme -0,04V aralığına kadar devam etmiştir. Tam pasifleşme gözlenmeden transpasif bölgeye geçilmiştir. Numune buradan itibaren tekrardan çözünmeye başlamıştır. Kimyasal içeriğinde bulunan krom elementinin varlığı sayesinde Cr koruyucu bir pasif film oluşturarak korozyon hızını yavaşlatmaktadır.

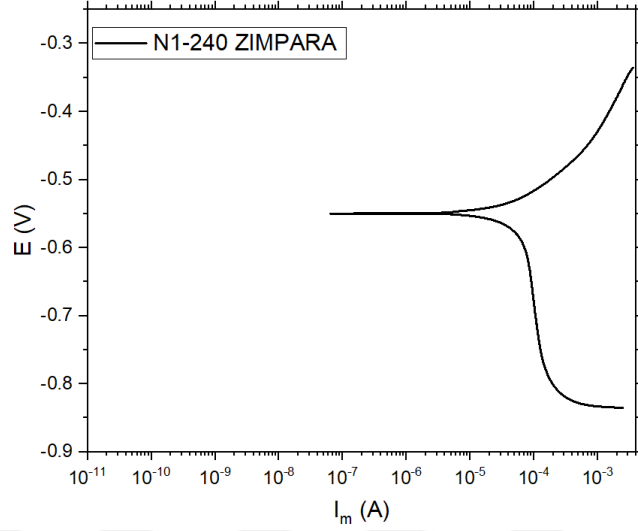


Şekil 7.38 C1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları

Şekil 7.38’de C1-240 zımpara ve C1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. 240 gritlik zımpara kağıdında zımparalandıktan sonra elde edilen akım yoğunluk değerleri Tablo 7.15’te verilmiştir. C1-240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait akım yoğunluk değeri $2,35 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 1,0966 mpy’dir. C1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise akım yoğunluk değeri $0,035 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise 0,01633 mpy’dir. Bu değerler incelendiğinde, korozyon akım yoğunluğunun artışı ile korozyon hızı da artmaktadır. Verilen bu değerler göz önüne alındığı zaman korozyon akımının artışı, malzemenin korozyon hızının artması, korozyon dayanımının da azalması anlamındadır. 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait korozyon hızı 1200 gritlik zımpara kağıdında zımparalanan numunenin korozyon hızından daha yüksektir.

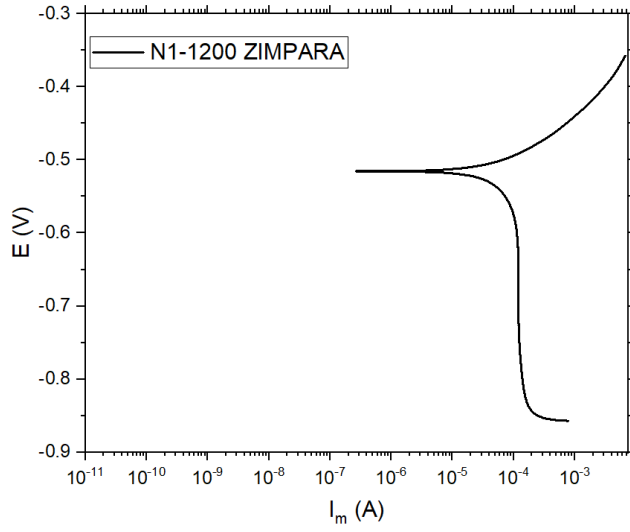
Burada göz önüne alınması gereken husus, SiC aşındırıcı partikülleri 240 gritlik zımpara kağıdında $45 \mu\text{m}$ olduğundan dolayı aşındırıcı partikülleri yüzeyin pürüzlülüğünü etkilemiştir. Yapmış olduğumuz yüzey pürüzlülük değerlerine göre C1 numunesinin 240 zımparadan alınan Ra değer aralığı $0,52 \mu\text{m}$ ile $0,86 \mu\text{m}$, Rz değer

aralığı 3,02 μm ile 4,85 μm ile değişirken, 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra bu değer Ra 0,036 ile 0,05; Rz değerleri ise 0,29 ile 0,214 aralığında değişmektedir. Yüzey pürüzlülüğündeki artış ile korozyon hızının arasında paralel bir artış olduğu gözlemlenmiştir.



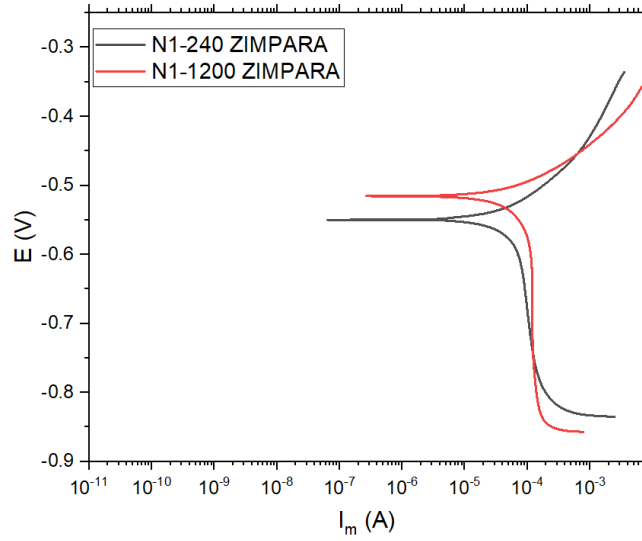
Şekil 7.39 N1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.39'da N1 çelik numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon, -0,81V ile -0,54V aralığında gerçekleşmiştir. Bu bölgede nötr çözelti içerisinde yer aldığından dolayı oksijenin indirgenme reaksiyonu gerçekleşmiştir. N1 numunesi, -0,54V değerinden itibaren anodik polarizasyon sonucu çözünmeye başlamıştır. Numune pasifleşme sergilemeden artan potansiyel değerle birlikte çözünmeye devam etmiştir. Korozyon akım yoğunluk değeri $12,03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir.



Şekil 7.40 N1 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

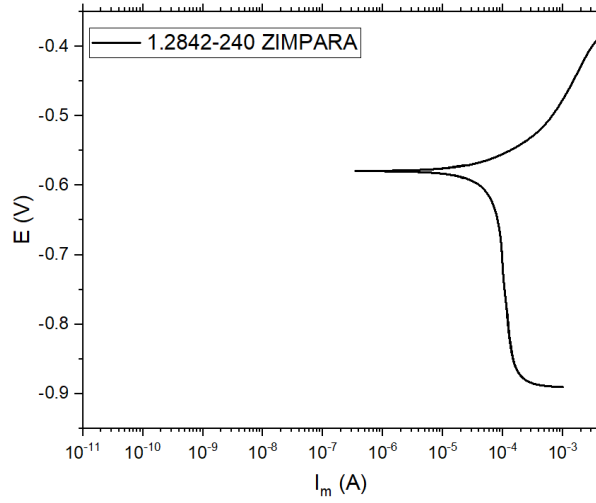
Şekil 7.40'ta N1 çelik numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon -0,85V ile -0,51V aralığında tamamlanmıştır. -0,51V değerinden itibaren numune anodik polarizasyon göstererek çözünmeye başlamıştır. Korozyon potansiyelinden sonra anodik akım yoğunluğu artarak aktif bölgeyi oluşturmaya başlar. Daha sonra, potansiyelin pozitif yönde artması, demir iyonlarına oksidasyonuna karşılık gelen anodik akımın artışını hızlandırmış, buna bağlı olarak potansiyelin artmasına yol açarak, pasif bir tabaka (Fe(OH)_2 , Fe_3O_4 , Fe_2O_3) oluşumu olabileceği şeklinde yorumlanmıştır. N1 çeliğinin korozyon akım yoğunluk değeri $14,58 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dir.



Şekil 7.41 N1 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılmaları

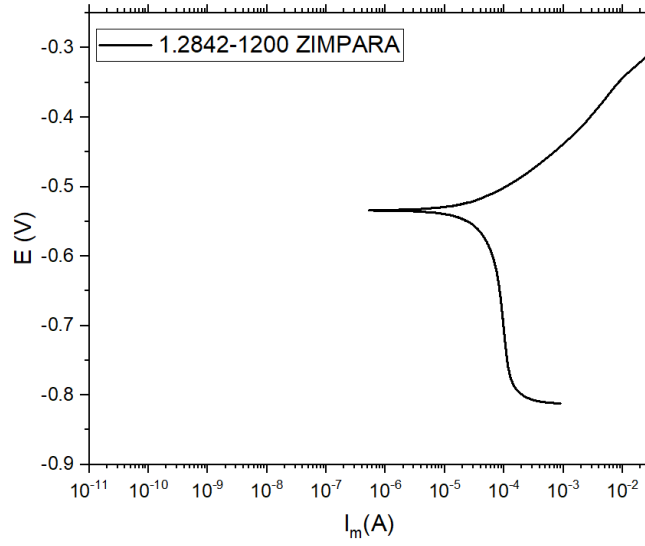
Şekil 7.41’de N1-240 zımpara ve N1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. 240 gritlik zımpara kâğıdında zımparalandıktan sonra elde edilen akım yoğunluk değerleri Tablo 7.15’te verilmiştir. N1-240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede anodik polarizasyonu -0,54V’dan itibaren başlayarak sürekli artış göstermektedir. Buna karşılık N1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede anodik polarizasyonu -0,51V’dan başlamaktadır ve artan potansiyel değeri ile sürekli artış göstermektedir. Tablo 7.15’te verilen değerler göz önüne alındığı zaman, 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait korozyon akım yoğunluk değeri $12,03 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 5,562 mpy ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunenin akım yoğunluk değeri ise $14,58 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise 6,741 mpy’dir.

Yüzey pürüzlülük değerleri ise N1-240 zımparada zımparalandıktan sonra elde edilen değer aralığı Ra 0,56 μm ile 0,87 μm aralığında, Rz ise 2,66 μm ile 4,76 μm değişirken, 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki yüzey pürüzlülük değer aralığı ise Ra 0,06 ile 0,04, Rz ise 0,32 ile 0,354 aralığında değişmektedir.



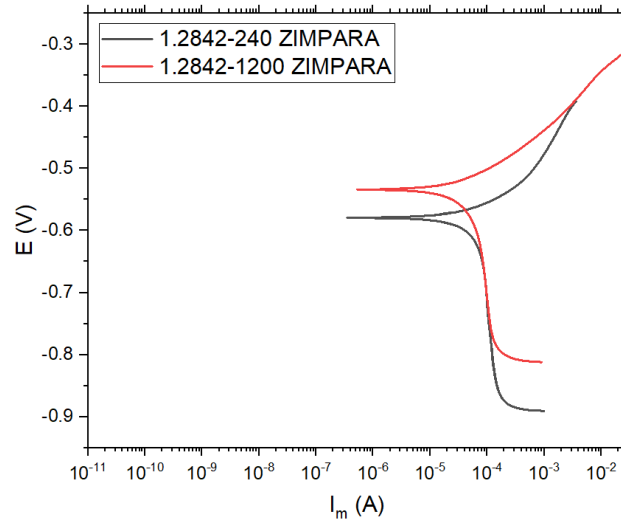
Şekil 7.42 1.2842 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.42’de 1.2842 çelik numunesine alternatif olarak seçilen 1.2842 çelik numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Tafel sabit değerleri Tablo 7.15’te gösterilmiştir. Numunenin katodik polarizasyon aralığı -0,88V ile -0,57V aralığındadır. Daha sonra numune -0,57V değerinden itibaren anodik polarizasyonu başlatarak çözünmesi gerçekleşmiştir. Pasifleşme olmadan numune -0,40V değerine kadar anodik polarizasyonunu tamamlayarak çözünmeye devam etmiştir. 1.2842 çeliğinin denge halinde ölçülen akım yoğunluk değeri $10,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’dir.



Şekil 7.43 1.2842 numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.43'te alternatif olarak seçilen 1.2842 çelik numunesinin 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon -0,81V ile -0,53V potansiyel aralığındadır. Oksijen bu bölgede indirgenmiştir. Daha sonra numune -0,53V'dan itibaren -0,33V değerine kadar anodik polarizasyon sonucu çözünmektedir. Denge halinde ölçülen akım yoğunluk değeri $8,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'dür.

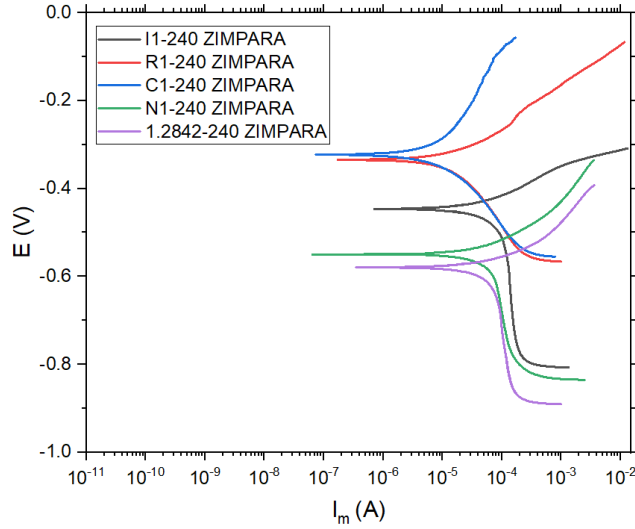


Şekil 7.44 1.2842 numunesinin 240 gritlik zımpara kâğıdı ve 1200 SiC zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırmaları

Şekil 7.44'te 1.2842-240 zımpara ve 1.2842-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. 1.2842-240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait akım yoğunluk değeri $10,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı $4,834 \text{ mpy}$ 'dir. 1.2842-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise akım yoğunluk değeri $8,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise $3,873 \text{ mpy}$ 'dir. Bu grafik değerlerine göre, 1.2842-240 numunesinin anodik polarizasyon aralığı $-0,57\text{V}$ 'dan başlayarak numune korozyona uğramaya başlarken 1.2842-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise anodik polarizasyon aralığı $-0,53\text{V}$ 'dan itibaren başlamaktadır. Katodik potansiyel aralığında gerçekleşen katodik tepkime oksijenin indirgenme reaksiyonudur. Oksijen elektron olarak hidroksil iyonu haline dönüşmesi şeklinde tepkime gerçekleşmektedir.

240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait korozyon hızı 1200 gritlik zımpara kâğıdından zımparalanan numunenin korozyon hızından daha yüksektir. Zımpara kağıtlarının aşındırıcı tane boyutları farklılık değerleri göz önüne alındığı zaman numuneler uygulanan bu zımpara değerlerinden sonra 240 zımparadan sonra numune yüzeyinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri $R_a 0,16 \mu\text{m}$ ile $0,13 \mu\text{m}$, R_z

değerleri ise 0,812 μm ile 0,84 μm aralığında değişmektedir. 1200 grit zımpara kâğıdında ise R_a 0,06 μm ile 0,084 μm , R_z değer aralığı ise 0,388 μm ile 0,432 μm aralığında değişmektedir.



Şekil 7.45 Tüm numunelerin 240 gritlik zımpara ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılması

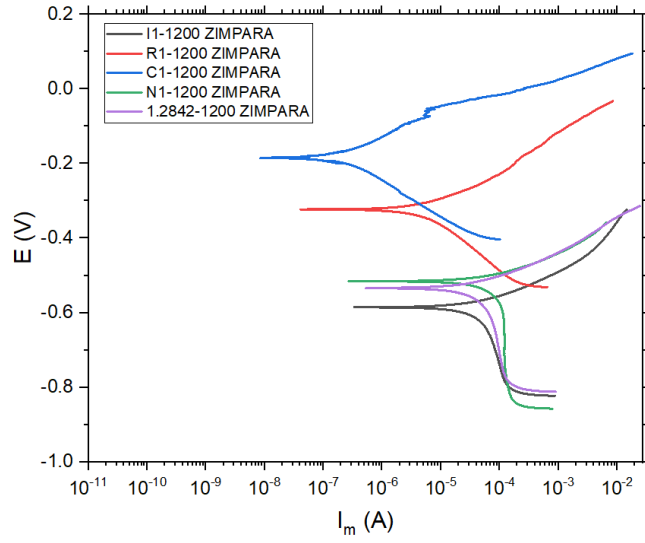
Yukarıda verilen şekil 7.45'te tüm numunelere ait verilen 1.etapta uygulanan 240 gritlik SiC zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki 1M %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 1 saat bekletildikten sonraki Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte gösterilmiştir. Bu grafiğe göre numunelerden I1, N1 ve 1.2842 çelik numuneleri pasifleşme bölgeleri göstermeden çözünme gerçekleştirmişlerdir. I1 numunesinin anodik polarizasyon değeri -0,45V'dan başlayarak tam çözünme gerçekleştirmiştir. N1 numunesinde ise anodik polarizasyon değer aralığı -0,54V ile -0,33V'dur. 1.2842 çelik numunesi ise 0,57V ile -0,40V aralığında anodik polarizasyonunu tamamlayarak korozyonu gerçekleştirmiştir. Bu çelik numunelerin korozyon akım yoğunlukları sırasıyla; 15,43 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 12,03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 10,36 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, korozyon hızları sırasıyla 7,20 mpy, 5,61 mpy ve 4,834 mpy'dir.

Verilen bu değerler göz önüne alındığı zaman korozyon akımının artışı, malzemenin korozyon hızının artması, korozyon dayanımının azalması anlamındadır. Bu numunelerde potansiyelin pozitif yönde sürekli artışıyla birlikte demir iyonlarına oksidasyonuna karşılık gelen anodik akımın artmasına neden olduğundan dolayı

potansiyeli artırarak pasif bir film ($\text{Fe}(\text{OH})_2$, Fe_3O_4 ve / veya Fe_2O_3) oluşmuştur. R1 ve C1 çelik numuneleri ise Şekil 7.45'te de görüldüğü üzere bazı bölgelerde pasifleşme göstermiştir. R1, -0,33V'dan itibaren potansiyelin artmasıyla birlikte anodik polarizasyonla birlikte çözünmektedir. -0,33V ile -0,21V değerleri arasında anodik çözünme devam etmektedir C1 numunesi -0,32V'dan itibaren anodik polarizasyon başlayarak -0,14V aralığına kadar oksit oluşumu başlamıştır. -0,14V değerine kadar oksit oluşumu tamamlanmıştır. -0,14V değerinde pasifleşme bölgesi başlamıştır.

R1 ve C1 numunelerinin korozyon akım yoğunluk değerleri ise; $2,43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $2,35 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon hızları ise 1,134 mpy ve 1,0966'dır. R1 ve C1 çelik numunelerinin diğer numunelere kıyasla içerdikleri yüksek Cr oranıyla (%12,6 ve %12,5) korozyon hızı diğer numunelere göre daha düşüktür. Bunun nedeni, malzeme yüzeyinde bulunan zengin pasif oksit film (Cr_2O_3) oluşumu nedeniyle, oksitlenmeye karşı yüksek bir direnç göstermektedirler. Krom, oksijenin yüzeye daha fazla yayılmasını önleyerek ve alaşım matrisi içinde yer alan demirin oksidasyonunu önleyerek, yüzey üzerinde çözünmeyen bir tabaka oluşturmaktadır.

R1 numunesinin Ra ortalama $0,50 \mu\text{m}$ değeri ve C1 numunesinin Ra ortalama $0,69 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülük oranları diğer numunelerle kıyaslandığında daha düşüktür. Numuneler arasında yüzey pürüzlülük değeri düştükçe numunelerin korozyon hızlarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

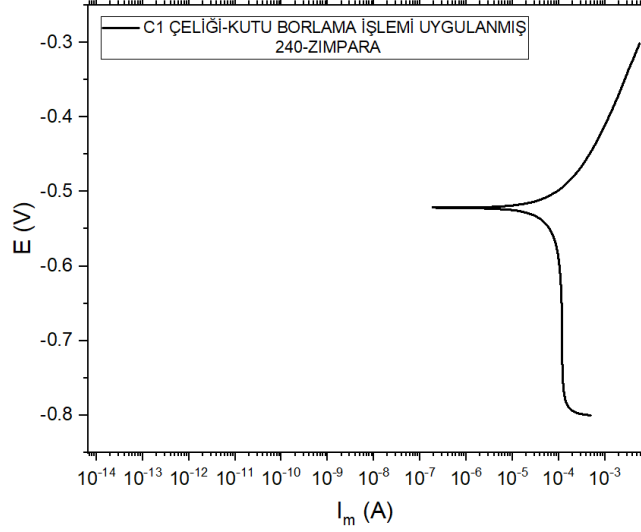


Şekil 7.46 Tüm numunelerin 1200 gritlik zımpara ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrilerinin karşılaştırılması

Yukarıda verilen şekil 7.46’da tüm numunelere ait verilen 1.etapta uygulanan 1200 gritlik SiC zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki 1M %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 1 saat bekletildikten sonraki Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte gösterilmiştir. Bu grafiğe göre numunelerden I1, N1 ve 1.2842 çelik numuneleri pasifleşme bölgeleri göstermeden çözünme gerçekleştirmişlerdir. I1 numunesinin anodik polarizasyon değeri -0,58V’dan başlayarak tam çözünme gerçekleştirmiştir. N1 numunesinde ise anodik polarizasyon değer aralığı -0,51V ile -0,35V’dur. 1.2842 çelik numunesi ise -0,53V ile -0,33V aralığında anodik polarizasyonunu tamamlayarak korozyonu gerçekleştirmiştir.

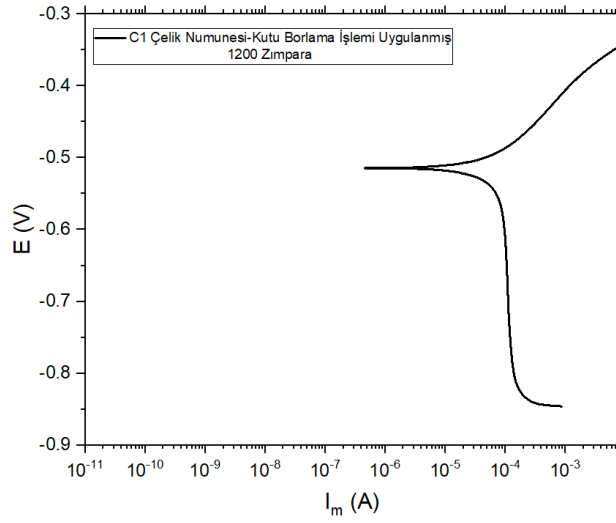
Bu çelik numunelerin korozyon akım yoğunluk değerleri $8,45 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, $14,58 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $8,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, korozyon hızları ise sırasıyla 3,9433 mpy, 6,741 mpy ve 3,9433 mpy’dir. R1 ve C1 çelik numuneleri ise Şekil 7.38’de görüldüğü üzere bazı bölgelerde pasifleşme göstermiştir. R1, -0,33V’dan itibaren potansiyelin artmasıyla birlikte anodik polarizasyonla birlikte çözünmektedir. -0,32V ile -0,15V değerleri arasında anodik çözünme devam etmektedir C1 numunesi -0,18V’ dan itibaren anodik polarizasyon başlayarak -0,04V aralığına kadar oksit oluşumu başlamıştır. R1 ve C1 numunelerinin bu grupta korozyon akım yoğunlukları $0,77 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve $0,035 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, korozyon hızları ise sırasıyla 0,35933 mpy ve 0,01633 mpy olarak bu grupta düşük

korozyon hızlarına sahip olarak en iyi korozyon direnci özelliklerini göstermektedirler.



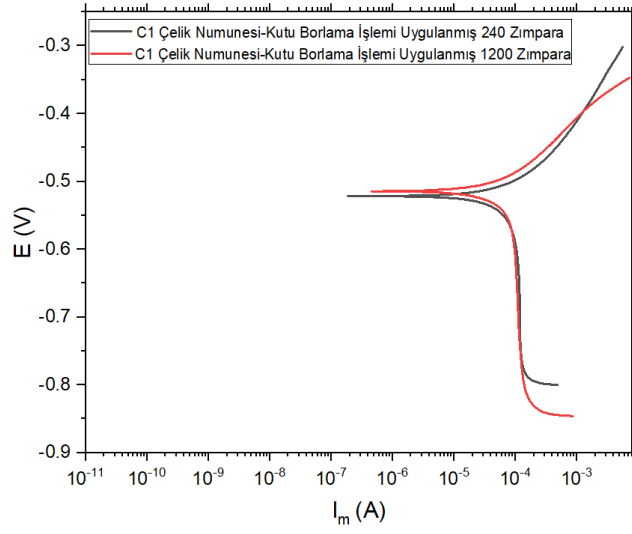
Şekil 7.47 C1 numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.47’de C1 çelik numunesinin, 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 240 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon aralığı -0,79V ile -0,52V değerleri arasındadır. Katodik olarak gerçekleşen tepkime bu bölgede de nötr çözeltinin içinde gerçekleştiğinden dolayı oksijenin indirgenme reaksiyonudur. Numune, -0,52V’dan itibaren anodik olarak çözünmeye başlamıştır. -0,52V ile -0,31V değerleri arasında anodik çözünme artan potansiyel değer ile hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Denge halinde akım yoğunluk değeri 17,84 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’dir.



Şekil 7.48 C1 numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.48’de C1 çelik numunesinin, 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon aralığı -0,82V ile -0,51V değerleri arasındadır. Katodik olarak gerçekleşen tepkime bu bölgede de nötr çözeltinin içinde gerçekleştiğinden dolayı oksijenin indirgenme reaksiyonudur. Korozyon potansiyelinin de devreye girmesiyle birlikte daha sonra anodik akım yoğunluğu artarak aktif bölgeyi oluşturmaya başlayarak numune, -0,51V’den itibaren anodik olarak çözünmeye başlamıştır. -0,51V ile -0,39V değerleri arasında anodik çözünmeye başlamıştır. Pasifleşme gerçekleşmeden numune -0,35V değerine kadar anodik polarizasyonunu tamamlayarak çözünmeye devam etmiştir. Denge halindeki akım yoğunluk değeri 15,15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’dir.

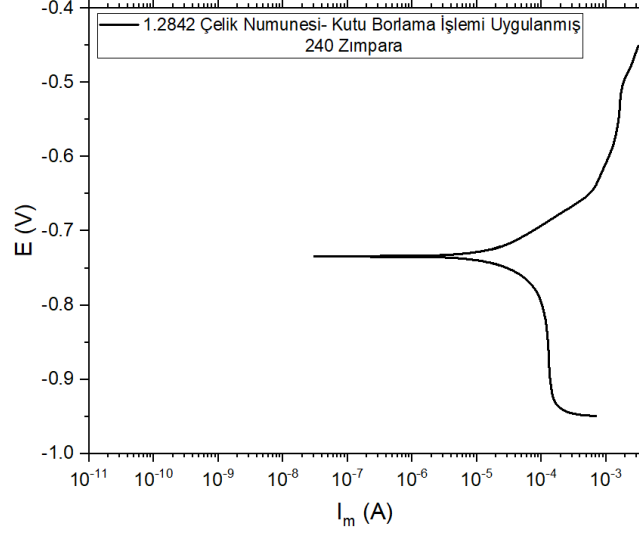


Şekil 7.49 C1 numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik ve 1200 zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.49'da C1 çelik numunesinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 240 ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. C1-240 numunesinin anodik polarizasyon aralığı -0,52V'dan başlayarak numune korozyona uğramaya başlarken C1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise anodik polarizasyon aralığı -0,51V'dan itibaren başlamaktadır. İki numunede sürekli olarak korozyona uğramaktadır ve pasifleşme gözlenmemiştir. C1-240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait akım yoğunluk değeri 17,84 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 8,29 mpy'dir. C1-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise akım yoğunluk değeri 15,15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise 7,007 mpy'dir. Korozyon akım değerleri göz önüne alındığı zaman korozyon akımının artışı ile korozyon hızının da artışı arasında anlamlı bir benzerlik olduğu gözlemlenmektedir.

240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait yüzey pürüzlülük değeri Ra 1,196 μm ile 1,166 μm , Rz 4,566 μm ile 5,654 μm aralığında değişirken, 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait yüzey pürüzlülük değerleri aralığı ise Ra 0,556 μm ile 0,960 μm , Rz 2,374 μm ile 3,636 μm aralığında

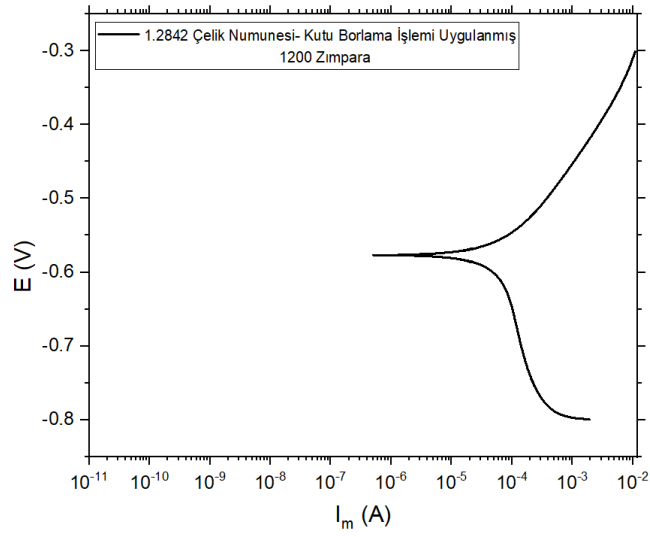
değişmektedir. Korozyon hızları ve yüzey pürüzlülük değerleri göz önüne alındığında, yüzey pürüzlülük değeri arttıkça korozyon hızı da artmaktadır.



Şekil 7.50 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

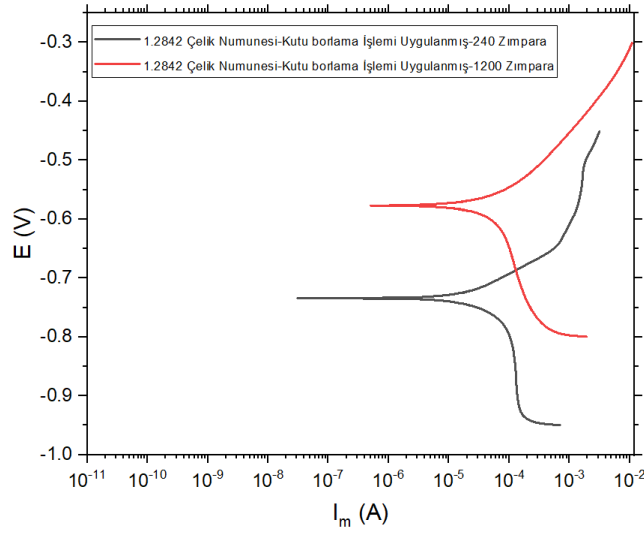
Şekil 7.50’de 1.2842 çelik numunesinin, 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 240 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. -0,94V ile -0,73V potansiyel aralığı katodik polarizasyon gerçekleşmiştir ve katodik tepkime oksijenin indirgenmesidir.

-0,73V ile -0,64V aralığında elektrot anodik olarak çözünme gerçekleştirmektedir. -0,64V’den itibaren oksit oluşumu başlamıştır. -0,64V’den -0,49V aralığında ise akım yoğunluğu azalarak pasifleşme gözlemlenmiştir. -0,49V’den itibaren pasifleşme bozularak transpasif bölgeye geçiş gerçekleşmiştir. Akım yoğunluk değeri 14,07 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’dir.



Şekil 7.51 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.51’de 1.2842 çelik numunesinin, 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1 M %3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki Tafel eğrisi verilmiştir. Katodik polarizasyon aralığı -0,79V ile -0,57V’dur. Oksijenin indirgenmesi katodik tepkime olarak gerçekleşmiştir. Numune, -0,57V’dan itibaren anodik polarizasyon sonucu çözünmeye başlamaktadır. Numune pasifleşmeye eğilim göstermeyerek, potansiyel değerin devamlı olarak artmasıyla birlikte çözünmeye devam etmiştir. Denge halinde akım yoğunluk değeri ise 11,81 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ’dir.

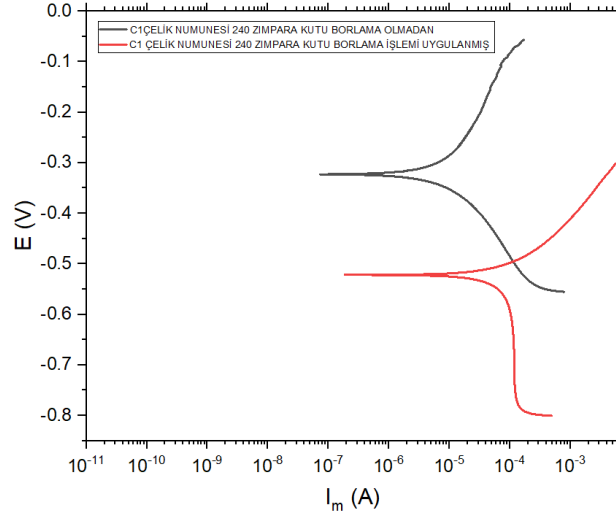


Şekil 7.52 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işleminden sonra 240 gritlik ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Şekil 7.52’de 1.2842 çelik numunesinin 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 240 ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte verilmiştir. 1.2842 çelik numunesinin anodik polarizasyon aralığı -0,73V’dan başlayarak numune korozyona uğramaya başlarken, 1.2842-1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise anodik polarizasyon aralığı -0,57V’dan itibaren başlamaktadır. 240 gritlik zımpara ile zımparalanan numune pasifleşme bölgesi göstermektedir. -0,64V’ dan -0,49V’a kadar ise akım yoğunluğu azalarak pasifleşme gözlemlenmiştir.

-0,49V’dan itibaren pasifleşme bozularak transpasif bölgeye geçiş gerçekleşmiştir. 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numune ise pasifleşme göstermeden, potansiyel değerin sürekli artmasıyla birlikte numune çözünmeye devam etmiştir. 240 gritlik zımparalanan numuneye ait akım yoğunluk değeri 14,07 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 6,509 mpy’dir. 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait akım yoğunluk değeri 11,81 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise 5,462 mpy’dir. 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait yüzey pürüzlülük değeri Ra 1,360 μm ile 1,664 μm , Rz 6,242 μm ile 8,114 μm aralığında değişirken, 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneye ait yüzey pürüzlülük değerleri aralığı ise Ra 0,234 μm ile

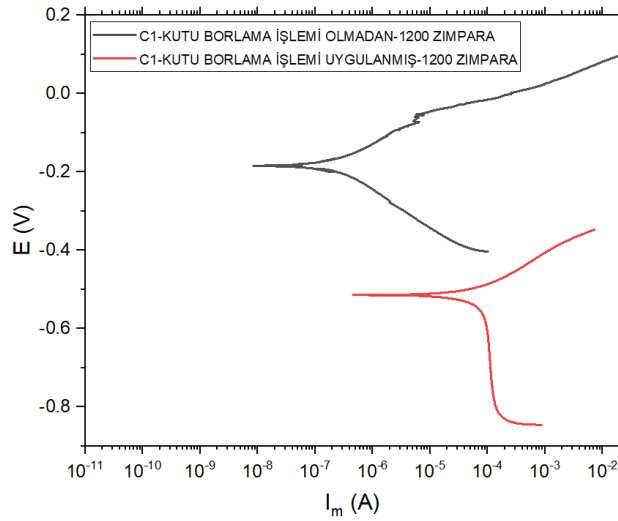
0,532 μm , Rz 0,954 μm ile 2,552 μm aralığında değişmektedir. Borlama işlemi yüzey pürüzlülük oranlarındaki artışa sebep olmuştur bu durum da korozyon dayanımının azalmasıyla sonuçlanmıştır.



Şekil 7.53 C1 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Yukarıda verilen şekil 7.53'te C1 çelik numunelerinin kutu borlama işlemi uygulanmadan 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan ve 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 240 gritlik SiC zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki 1M %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 1 saat bekletildikten sonraki Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte gösterilmiştir. Verilen grafik incelendiği zaman, C1 çelik numunesi (borlama olmadan) 0,32V değerinden itibaren anodik polarizasyon başlayarak numune korozyona uğramaya başlamaktadır. -0,14V değerinde pasifleşme bölgesi başlamıştır ve -0,05V değerine kadar devam etmiştir. C1- borlama işlemi uygulanan çelik numunede ise -0,52V'dan itibaren anodik olarak çözünmeye başlamıştır. -0,52V ile -0,31V değerleri arasında anodik çözünme artan potansiyel değer ile artış göstermiştir ve pasifleşme gözükmemiştir. C1 çelik numunesi (borlama olmadan) korozyon akım yoğunluk değeri 2,35 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 1,0966 mpy'dir. C1-borlama işlemi uygulanan çelik numunede ise 17,34 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise 8,29 mpy'dir.

Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiği zaman C1 çelik numunesinin (borlama olmadan) Ra 0,52 μm ile 0,86 μm , Rz 3,02 μm ve 4,85 μm 'dir. C1 çelik numunesi kutu borlama işlemi uygulandıktan sonra yüzey pürüzlülük değerleri ise Ra 1,196 μm ile 1,166 μm , Rz 4,566 μm ile 5,654 μm aralığında değişmektedir. Yüzey pürüzlülük değeri borlama işlemi ile artış göstermiş bununla birlikte korozyon hızında da artış gözükmemektedir.

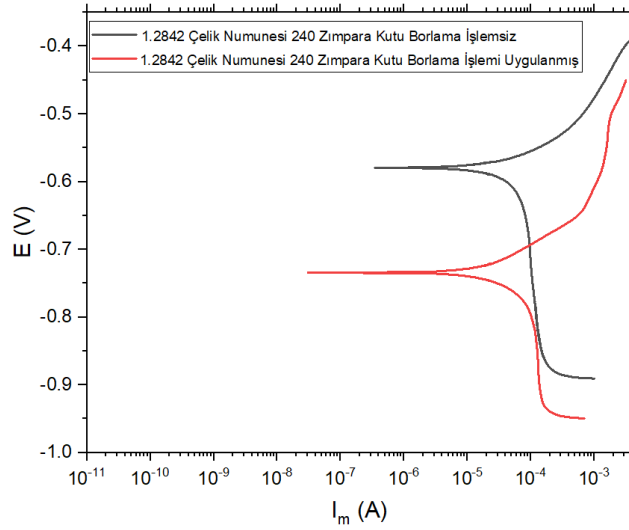


Şekil 7.54 C1 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Yukarıda verilen şekil 7.54'te C1 çelik numunelerinin kutu borlama işlemi uygulanmadan 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan ve 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki 1M %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 1 saat bekletildikten sonraki Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte gösterilmiştir. -0,18V ile -0,08V aralığında numune çözünmeye başlamıştır ve anodik polarizasyon başlamıştır. -0,08V değerinde numune pasifleşmeye başlayarak pasifleşme -0,04V aralığına kadar devam etmiştir. Tam pasifleşme gözlenmeden transpasif bölgeye geçilmiştir ve C1 çeliğinin kimyasal kompozisyonu Cr koruyucu bir pasif film oluşturarak korozyon hızını yavaşlatmaktadır. C1 (borlama olmadan) 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan numunede ise akım yoğunluk değeri 0,035 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise 0,01633 mpy'dir. C1 kutu borlama işlemi uygulanmış ve 1200 gritlik zımpara kâğıdı

ile zımparalanan numunede ise akım yoğunluk değeri $15,15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise $7,007 \text{ mpy}$ 'dir. Korozyon akım değerleri göz önüne alındığı zaman korozyon akımının artışı ile korozyon hızının da arttığı gözlenmiştir.

Yüzey pürüzlülük değerleri göz önüne alındığında, C1 çelik numunesi (borlama olmadan) 1200 grit zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri $R_a 0,036 \mu\text{m}$, $R_z 0,29 \mu\text{m}$, C1 çelik numunesi kutu borlama işlemi uygulanan numunede yüzey pürüzlülük değer aralığı $R_a 0,556 \mu\text{m}$, $R_z 2,374 \mu\text{m}$ ile $3,636 \mu\text{m}$ aralığında değişmektedir.

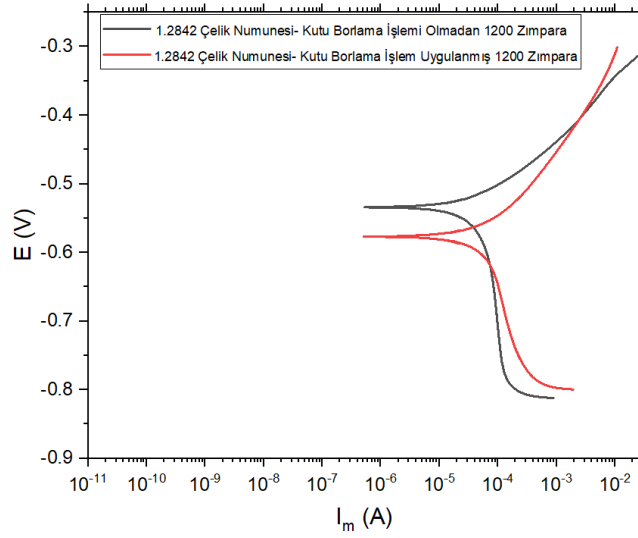


Şekil 7.55 1.2842 çelik numunesinin 850°C , 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra $1\text{M } \%3,5 \text{ NaCl}$ çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Yukarıda verilen şekil 7.55'te 1.2842 çelik numunelerinin kutu borlama işlemi uygulanmadan 240 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan ve 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 240 gritlik SiC zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki $1\text{M } \%3,5 \text{ NaCl}$ çözeltisi içerisinde 1 saat bekletildikten sonraki Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte gösterilmiştir. Verilen grafik incelendiği zaman, 1.2842 çelik numunesi (borlama olmadan) $-0,57\text{V}$ değerinden itibaren anodik polarizasyonu başlayarak çözünmesi gerçekleşmiştir. Pasifleşme olmadan numune $-0,40\text{V}$ değerine kadar anodik polarizasyonunu tamamlayarak çözülmeye devam etmiştir.

Kutu borlama işlemi uygulanmış numunede ise -0,64V'dan itibaren anodik olarak çözünme gerçekleştirmektedir. Daha sonra ise, -0,64V'dan -0,49V aralığında ise akım yoğunluğu azalarak pasifleşme gözlemlenmiştir. 1.2842 çelik numunesinin (borlama olmadan) korozyon akım yoğunluk değeri $10,36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 4,834 mpy'dir. 1.2842 çelik numunesinin ise $14,07 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 6,509 mpy'dir. İki numuneye ait yüzey pürüzlülük değerleri göz önüne alındığı zaman ise 1.2842-240 gritlik zımpara kâğıdı ile (borlama olmadan) zımparalanan numunenin yüzey pürüzlülük değerleri R_a 0,16 μm 0,13 μm , R_z 0,81 μm 0,84 μm aralığında değişirken, 1.2842-240 gritlik zımpara kâğıdı ile kutu borlama işleminden sonra zımparalanan numuneye ait yüzey pürüzlülük değerleri ise R_a 1,360 μm ile 1,664 μm , R_z 6,242 μm ile 8,114 μm 'dir. Yüzey pürüzlülük değeri borlama işlemi ile artış göstermiş bununla birlikte korozyon hızında da artış gözükmemektedir. Yüzey pürüzlülük değeri arttıkça korozyona dayanımı da düşmüştür.

Borlama işlemi ile %3,5 NaCl çözeltisinde yer alan çelik numunesinin korozyona eğilimi artış göstermiştir. Bunun nedeni literatürde araştırıldığı zaman, borlanmış çeliklerin içerisinde yer alan bor elementinin karakteristik olarak demir elementine göre soy eğiliminin ideal değerde olmasından ötürü demir anodik davranış göstererek çözünme gerçekleştirmesindendir. Çeliğe borlama işlemi ile borun yapıya difüze olmasıyla beraber matris yapısında yer alan demir ile bir araya gelerek mikrogalvanik çift meydana getirerek ideal soy özelliklerine sahip olan bor elementinin katodik davranış sergilemiş olabileceği buna karşılık demirin ise anodik olarak çözünmesi gerçekleşerek korozyon hızının giderek arttığı düşünülmektedir (Karacif, Çarboğa, ve Candemir, 2019).



Şekil 7.56 1.2842 çelik numunesinin 850°C, 4 saat sürede kutu borlama işlemin öncesi ve sonrasında 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra 1M %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen Tafel eğrisi

Yukarıda verilen şekil 7.56’da 1.2842 çelik numunelerinin kutu borlama işlemi uygulanmadan 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalanan ve 850°C 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanmasının ardından 1200 gritlik zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonraki 1M %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 1 saat bekletildikten sonraki Tafel eğrileri karşılaştırmalı olarak aynı grafikte gösterilmiştir. 1.2842 çelik numunesi (borlama olmadan) -0,53V’den itibaren -0,33V değerine kadar anodik polarizasyon sonucu çözünmektedir. 1.2842 çelik numunesi kutu borlama işlemi -0,57’den itibaren anodik polarizasyon sonucu çözünmeye başlamaktadır. Numunede pasifleşme sergilemeden, potansiyel değer düzenli olarak artışına paralel olarak numune bozunmaya devam etmiştir.

1.2842 çelik numunesi (borlama olmadan) korozyon akım yoğunluk değeri 8,3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı 3,873 mpy’dir. 1.2842 kutu borlama işlemi uygulandıktan sonra 1200 zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra çelik numunede ise 11,81 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ve korozyon hızı ise 5,462 mpy’dir. Yüzey pürüzlülük değerleri göz önüne alındığında, 1.2842 çelik numunesi (borlama olmadan) Ra 0,06 μm ile 0,084 μm , Rz 0,388 μm ile 0,432 μm aralığında değişmektedir, 1.2842 çelik numunesi kutu borlama

işlemi uygulanan numunede yüzey pürüzlülük değerleri Ra 0,234 μm ile 0,532 μm , Rz 0,954 μm ile 2,552 μm aralığındadır.



BÖLÜM SEKİZ

GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Sunulan bu tez çalışmasında, otomotiv sektöründe kullanılmakta olan plastik kalıp çelik numunelerinin (I1, R1, C1, N1) Standard Profil Ege Otomotiv firması tarafından tarafımıza temin edilen talaşlı imalat sonrasında yüzey kalitesinin yüzey pürüzlülük değerleri ile korozyon hızları arasındaki bağlantı incelenmiş ve firmaya öneri olarak kullandıkları plastik kalıp çeliklerinin korozyon direncinin daha iyi olması için yüzey kalitesi daha iyi bir hale getirilerek, korozyon hızları tespit edilmiştir.

Bu çeliklere alternatif olarak sunulan firmanın kullanmış olduğu kalıp çeliklerinden C1 numunesi ile 1.2842 çelik numunelerine 850 °C, 4 saat sürede kutu borlama işlemi uygulanarak kutu borlama işleminin korozyon davranışlarının etkileri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda çıkan sonuçlar aşağıda özetlenmiş olarak verilmiştir:

- I1, R1, C1, N1 ve 1.2842 çelik numunelerinin kutu borlama öncesi yüzey pürüzlülük değerleri ve korozyon hızları arasındaki ilişki 240 grit SiC zımpara kâğıdı ve 1200 grit SiC zımpara kâğıdı ile zımparalandıktan sonra elde edilen verilerle karşılaştırıldığı zaman, korozyon direnci en yüksek olan numunenin 0,035 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluk değeri ve 0,01633 mpy korozyon hızı değeri ile C1-1200 numunesinin diğer numunelere göre en iyi korozyon özelliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- C1 numunesi için 240 zımpara ile elde edilen Ra ortalaması 0,69 μm değerinde iken 1200 zımpara ile elde edilen Ra ortalaması 0,041 değerine düştüğünde korozyon akım yoğunluğu 2,35 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerinden 0,035 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ değerine iyileşmiştir.
- Korozyon direnci en düşük olan numune 15,43 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ akım yoğunluk değeri ve 7,2049 mpy değeri ile I1-240 zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneden elde edilmiştir.
- 850°C sıcaklıkta 4 saat sürede kutu borlama işlemine tabii tutulan C1 ve 1.2842 çelik numuneleri arasında korozyon davranışı en iyi olan çelik numune 11,81 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon akım yoğunluk değeri ve 5,462 mpy korozyon hızı ile 1.2842 1200 zımpara kâğıdı ile zımparalanan numuneden elde edilmiştir.

- Kutu borlama işlemi ile numunelerin korozyon direncinin düştüğü tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak ise kutu borlama öncesi elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri daha düşük değerlerde değişirken kutu borlama işlemi sonrasında yüzey pürüzlülük değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bor tabakasının içeriğinde bulunan porozitelere bağlı olarak da bu tabakalar korozyon direncini önemli bir ölçüde düşürmüştür. Aynı zamanda C1 çeliğinin içeriğinde bulunan %12,5 Cr oranı ise, bor ilavesi ile karbür oluşumu hızlı bir şekilde artarak serbest bulunan krom miktarının azalmasına yol açmış olabileceğine bu durumda kromun yüzeyde oluşturduğu pasifleşme kabiliyetini düşürmeye yol açarak korozyon direncini düşürmüş olduğu sonucuna varılmıştır.
- Kutu borlama işlemi sonucunda, her iki çelikte de en yüksek sertlik değerleri yüzeye en yakın yer olan ve borca en zengin bölge olan yerde edilmiştir. Yüzeyden itibaren mesafe artmaya başladıkça, sertlik değeri de düşmeye başlamaktadır. 1.2842 çeliğinin 4,3 μm mesafede 1799 HV_{0,025} sertlik değerine sahipken, yüzeyden uzaklaşmaya başladıkça sertlik değerinde de azalmalar elde edilmiştir. C1 çelik numunesinde de iki ayrı uzaklıkta ölçüm alınabilmektedir ve sertlik değeri 24,41 μm 'de 281 HV_{0,025} iken 36,03 μm 'de sertlik değeri 153 HV_{0,025} olmuştur.
- İlk durumdaki sertlik ölçümü C1 numunesi için 315 HV₁, borlama işlemi sonrası yüzeye en yakın değerde sertlik değeri 281 HV_{0,025} bulunmuştur. İki sertlik birbirinden farklı yüklerde ölçülse de kutu borlama işlemi sonrasında sertlik de düşüş gözlemlenmiştir. 1.2842 çeliği için ilk durumda sertlik ölçümü 219,83 HV₁, borlama işleminden sonra yüzeye en yakın sertlik değeri 1799 HV_{0,025} ölçülmüştür.
- XRD analizleri sonucu borlama tabakası bölgesinde FeB ve Fe₂B fazları tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, Z. (2016). *Principles of corrosion engineering and corrosion control*. (4th ed.). Burlington: Butterworth-Heinemann.
- ASM International Handbook Committee. (2003). *ASM handbook vol 13A corrosion: fundamentals, testing, and protection*. Materials Park: ASM International.
- Albaraz, Z. (2010). *Isıl işlem parametrelerinin ve kimyasal kompozisyonun sıcak iş takım çeliklerinin mekanik özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Alibey, İ. (2010). *Kalıp malzemelerinin uygulama alanlarına göre sınıflandırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Aysal, Z. (2011). *Farklı bor kaynağı kullanılarak soğuk şekillendirme sacının borlama özelliğine etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Bursa.
- Barut, N., Yavuz D., ve Kayalı, Y. (2014). Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin difüzyon ve adhezyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 14(1), 1-8.
- Başman, G. (2010). *AISI 316 L tipi paslanmaz çeliğin termokimyasal difüzyon yöntemi ile borlanması, borlama banyosu bileşenlerinin borür tabakası özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Birden, A. (2018). *Savunma sanayiinde kullanılabilen AISI 304L paslanmaz çeliğinin katı borlama ile üretimi ve karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale.
- Campos, I. ve Rodríguez, G. (2014). Boriding to improve the mechanical properties and corrosion resistance of steels. E.J. Mittemeijer, (Ed.), *Thermochemical Surface Engineering of Steels* (658-673). Cambridge: Woodhead Publishing.

- Campos, I., Palomar, M., Amador, A., Ganem, R., ve Martinez, J. (2006). Evaluation of the corrosion resistance of iron boride coatings obtained by paste boriding process. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 2438-2442.
- Chandler, H. (1999). *Hardness Testing* (2nd Ed.). Materials Park: ASM International.
- Çeğil, Ö. ve Şaduman, Ş. (2014). TiN kaplı AISI D2 çeliğinin korozyon davranışı. *Afyon Kocatepe Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14, 285-289.
- Çoban, K. (2006). *Ketonik bazlı reçinelerle paslanmaz çelik ve bakırın korozyonunun önlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Davis, J. R. (2002). *Surface Hardening of Steels*. Ohio: ASM International.
- Davis, J.R. (2000). The effects and economic impact of corrosion. In *The corrosion: Understanding the basics*. (1-20). Materials Park: ASM International.
- Dilektaşlı, E. (2014). *Bazı alaşımlı çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışına borlama işleminin etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Elyiğit, A. (2011). *Bor kaplamalı betonarme çeliğinin korozyona etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Er, Ü. ve Par, B. (2004). Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 çeliklerinin abrazif aşınma dayanımlarının incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Osmangazi University*, 17(1), 1-12.
- Fichtl, W. (1981). Boronizing and its practical applications. *Materials and Design*, 2(6), 276–286.
- Filho, P. P. R., Cavalcante, T.S., Albuquerque, V. H., ve Tavares J. M. (2010). Brinell and Vickers hardness measurement using image processing and analysis techniques. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(1), 88-94.

- Fontana, M. G. (1950). *Corrosion Engineering*. (3th ed.). New York: McGrawHill.
- Gemici, S. (2019). *Tek hücreli erimiş karbonat yakıt hücresi (ekyh) için matriks geliştirilmesi ve sistem tasarımı*. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Gülsün, K. (2016). *Yüzey borlanmış ve farklı matriks yapılı küresel grafitli dökme demirin aşınma özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir.
- Güneş, I. ve Ş, Taktak. (2012). Surface characterization of pack and plasma paste boronized of 21NiCrMo2 steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27(1), 99-108.
- Habashi, F. (1997). *Handbook of extractive metallurgy volume 3*. New York: Wiley VCH.
- Hinds, G. (2015). Beginners guide to corrosion. *National Physical Laboratory (NPL) of the National Corrosion Service*, 1-10.
- İşdaş, O. (2010). Elektrokimyasal korozyon ilkeleri. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası*, 45-48.
- Kabadayı, E. (2013). *Yüksek krom ve nikelli dökme çeliklerin mekanik ve korozyon özelliklerine yaşlandırma ve borlama ısıtılmasının etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Kaftan, M.A. (2006). *Çelik yapılarda korozyon oluşumu ve korozyondan korunma yöntemlerinin maliyet açısından karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Karacif, K., Çarboğa, C., ve Candemir, D. (2019). Düşük oranlarda bor içeren az karbonlu çeliklerin asidik ve tuzlu ortamlarda korozyon özelliklerinin incelenmesi. *Journal Of Boron*, 4(1), 39-45.
- Karaman, Y. (2003). *Endüstriyel borlama ve tekstil endüstrisinde bir uygulama*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

- Karataş, S. (2016). *FeB toz boyutunun Aısı 4140 çeliğinin borlama parametrelerine etkisinin araştırılması*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Kariofillis, G. K., Kiourtsidis, G.E., ve Tsipas, D.N. (2006). Corrosion behavior of borided AISI H13 hot work steel. *Surface and Coatings Technology*, 201(1), 19-24.
- Köseli, B. (2010). *Bor içerikli elektrotlarla düşük karbonlu çelik yüzeylerinin kaplanması ve aşınma direncinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Kuruvila, R., Kumaran, S., Khan, M.A, ve Uthayakumar, M. (2018). A brief review on the erosion-corrosion behavior of engineering materials. *Corrosion Reviews*, 36(5), 435–47.
- Kutucu, Y.K. (2013). *Yüksek alaşimli çeliklerin borlanması sonucunda oluşan ısıl artık gerilmelerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Küçük Kurt, M. (2015). *Borlanmış AISI M35 ve AISI M42 çeliklerinin karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Lu, H., Li, T., Cui, J., Li, Q., ve Li, D.Y. (2017). Improvement in erosion-corrosion resistance of high-chromium cast irons by trace boron. *Wear*, 376 (377), 578-286.
- Maaß, P. (2011). Corrosion and Corrosion Protection. In *The handbook of Hot-Dip Galvanization* (1–19). New York: Wiley VCH.
- Matuschka, A.G. (1980). *Boronizing*. München: Carl Hanser Verlag.
- Martini, C., Palombarini, G., ve Carbucicchio, M. (2004). Mechanism of thermochemical growth of iron borides on iron. *Journal of Materials Science*, 39(3), 933–937.
- Mertgenç, E. ve Kayali, Y. (2019). Borlanmış AISI 904 L paslanmaz çeliğin elektrokimyasal korozyon özelliklerinin incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 247-251.

- Michalak, M. ve Bytomski, G. (2017). Solid solutions - a hume-rothery condition in the context of the set-theoretic notion of binary relation. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 17(61), 301-306.
- Neville, A. ve Hodgkiess, T. (1997). Study of effect of liquid corrosivity in liquid-solid impingement on cast iron and austenitic stainless steel. *British Corrosion Journal*, 32(3), 197–205.
- Obeyesekere, N. U. (2017). Pitting corrosion. A.M. El-Sherik, (Ed.), *The trends in oil and gas corrosion research and technologies: Production and transmission* (215-248). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Öz, G. S. (2011). 304 L çeliğinin bazik ortamdaki elektrokimyasal özelliklerine bazı bor bileşiklerinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Özsoy, A. ve Yaman, Y.M. (1993). The effect of thermocycling liquid boronizing on the thickness of the boride layer and the transition zone. *Pergamon*, 29(2), 231-36.
- Pala, B. (2013). Tip-304 paslanmaz çeliklerin iletken polimer kaplamalar ile korozyona karşı korunması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Peng, C. (2020). *The effect of boronizing on hardness, wear and corrosion properties of AISI 1018 and AISI 316L steels*. Yüksek Lisans Tezi, Saskatchewan Üniversitesi, Saskatoon.
- Popov, B. N. (2015). Basics of corrosion measurements. In *The corrosion Engineering*, 181–237, Columbia: Elsevier.
- Ojo, S. S ve Kutelu, B.J. (2013). Effect of heat treatments on corrosion of welded low-carbon steel in acid and salt environments. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1(3), 95-100.
- Şen, M. (2010). AISI 304 tipi östenitik paslanmaz çeliklerde soğuk şekillendirme miktarının korozyon üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- Topuz, P. (2016). DIN 1.2842 çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri. *Bor Dergisi*, 1(1), 15-19.
- Topuz, P., Tuna, A., ve Aydın, Ö. (2019). Kinetic investigation of boronized 34CrAlNi7 nitriding steel. *International Journal of Engineering and Natural Sciences*, 2, 17–22.
- Tuna, N. (2013). *Çinko ve nikel kaplanmış düşük karbonlu çelik plaka ve vidaların korozyon davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Turku, N., Doğan, Ş., Uçar, N., ve Çalık, A. (2014). Borlama süresinin düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerin sertlik değerleri üzerine etkisi. *SDU Journal of Science*, 9(2), 147–151.
- Uluköy, A. ve Can, Ç. A. (2006). Çeliklerin Borlanması. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 189-198.
- Usman, A. D., Adams F. V., ve Okoro L. N. (2016). Weight loss corrosion study of some metals in acid medium. *Journal of Advances in Chemistry*, 11(2), 3434-3440
- Uzun, H. A. (2002). *Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Üçkardeşler, A. (2013). *Çelik dökümlerde borlama ısı işleminin abrasif aşınma direnci üzerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Ünlü, B. S. ve Yılmaz, S. S. (2006). Bor ve borlamanın kullanım alanları. *Mühendis ve Makine*, 47(552), 48–54.
- Wen, D. C. (2009). Plasma nitriding of plastic mold steel to increase wear and corrosion properties. *Surface and Coatings Technology*, 204(4), 511-519.
- Yalçın, H. ve Koç, T. (1998). *Mühendisler için korozyon*. Ankara: TMMOB Kimya Mühendisleri Odası Yayını.
- Yanardağ, T. (2011). *Çinko ve çinko alaşımların korozyonunun inorganik ve organik*

maddelerle önlenmesi. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.

Yapar, U. (2003). *Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*

