

168533

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK MALZEMELERİN AŞINMA ve KOROZYON  
DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN ÇEŞİTLİ KİMYASAL  
KAPLAMALARIN İNCELENMESİ

End.Müh. Erdal YÜKSEL

168533

F.B.E. Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında  
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN

Prof. Dr. Eskan ALIHA

Prof. Dr. Cemalettin Yaman

Yaman

İSTANBUL, 2005

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇELİK MALZEMELER.....	4
2.1 Çelik Malzemeler.....	4
2.2 Demir-Sementit (Fe-Fe <sub>3</sub> C) Faz Diyagramı.....	5
2.2.1 Demir-Sementit Denge Diyagramındaki Fazlar.....	6
2.2.2 Demir-Sementit Sistemindeki Faz Dönüşümleri.....	8
2.2.3 Çeliklerde Soğuma Sırasında Oluşan İç Yapılar.....	8
2.2.4 Demir-Sementit Faz Diyagramı ile İlgili Bazı Uygulamalar.....	10
2.3 Demir Eşlik Elementlerinin Çeliğin Özelliklerine Etkisi.....	10
2.3.1 Karbonun Etkisi.....	11
2.3.2 Kükürdün Etkisi.....	11
2.3.3 Manganın Etkisi.....	12
2.3.4 Fosforun Etkisi.....	12
2.3.5 Silisyumun Etkisi.....	12
2.3.6 Azotun Etkisi.....	13
2.4 Alaşım Elementlerinin Çeliğin Özelliklerine Etkisi.....	13
2.4.1 Nikelin Etkisi.....	13
2.4.2 Kromun Etkisi.....	13
2.4.3 Molibdenin Etkisi.....	14
2.4.4 Vanadyumun Etkisi.....	14
2.4.5 Wolframın Etkisi.....	14
2.4.6 Kobaltın Etkisi.....	14
2.4.7 Alüminyumun Etkisi.....	14
2.4.8 Borun Etkisi.....	15
2.4.9 Bakırın Etkisi.....	15
2.4.10 Kurşunun Etkisi.....	15
2.4.11 Tantalyumun Etkisi.....	15
2.4.12 Titanyumun Etkisi.....	15
2.5 Çeliklerin Sınıflandırılması.....	15
2.5.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması.....	16
2.5.1.1 Düşük Karbonlu Çelikler.....	16
2.5.1.2 Orta Karbonlu Çelikler.....	16
2.5.1.3 Yüksek Karbonlu Çelikler.....	16
2.5.1.4 Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri.....	16
2.5.2 Çeliklerin Alaşım Elementi Miktarına Göre Sınıflandırılması.....	17

2.5.3	Çeliklerin Kullanım Alanına Göre Sınıflandırılması.....	17
2.5.3.1	Konstrüksiyon Çelikleri.....	17
2.5.3.2	Yay Çelikleri.....	18
2.5.3.3	Otomat Çelikleri.....	18
2.5.3.4	Karbon Çelikleri.....	18
2.5.3.5	Sementasyon Çelikleri.....	18
2.5.3.6	İslah Çelikleri.....	18
2.5.3.7	Rulman Çelikleri.....	18
2.5.3.8	Takım Çelikleri.....	19
2.5.3.9	Mikro Alaşımli Çelikler.....	19
2.5.3.10	Paslanmaz Çelikler.....	19
2.5.3.11	Borlu Çelikler.....	19
2.6	Çeliklerin Türk Standartlarına Göre Gösterimi.....	19
2.6.1	Mekanik Özellikleri Esas Alınan Çelikler.....	20
2.6.2	Kimyasal Bileşimi Esas Alınan Çelikler.....	20
2.6.2.1	Alaşimsız Çelikler.....	20
2.6.2.2	Alaşımli Çelikler.....	20
2.6.2.2.1	Az Alaşımli Çelikler.....	20
2.6.2.2.2	Yüksek Alaşımli Çelikler.....	21
3.	ÇELİK MALZEMELERİN AŞINMASI.....	22
3.1	Çelik Malzemelerin Aşınması.....	22
3.2	Aşınma Hasarları.....	22
3.3	Aşınma Türleri.....	23
3.3.1	Adhesiv Aşınma.....	24
3.3.2	Abrasiv Aşınma.....	29
3.3.3	Oyuklanma ve Kalkma.....	32
3.3.4	Mekanik Korozyon Aşınması.....	33
3.4	Aşınma Miktarını Belirleme Metodları.....	34
3.4.1	Ağırlık Farkı Metodu.....	35
3.4.2	Kalınlık Farkı Metodu.....	38
3.4.3	İz Değişimi Metodu.....	38
3.4.4	Radyoizotop Metodu.....	38
4.	ÇELİK MALZEMELERİN KOROZYONU.....	39
4.1	Çelik Malzemelerin Korozyonu.....	39
4.2	Korozyon Çeşitleri.....	42
4.2.1	Homojen Dağılımlı Korozyon.....	42
4.2.2	Galvanik Korozyon.....	42
4.2.3	Çukurcuk (oyuklu) Korozyonu.....	45
4.2.4	Aralık Korozyonu.....	46
4.2.5	Seçici Korozyon.....	47
4.2.6	Tane Sınırları Korozyonu.....	47
4.2.7	Gerilimli Korozyon.....	48
4.2.8	Kazımalı Korozyon.....	49
4.2.9	Yorulma Korozyonu.....	49
4.2.10	Kurtçuk (Filiform) Korozyon.....	50
4.2.11	Yüksek Sıcaklık Korozyonu.....	50
4.2.12	Hidrojen Gevrekliği.....	51

4.3	Korozyondan Korunma Metodları.....	52
4.3.1	Malzeme Seçimi.....	52
4.3.2	Dizayn ve Üretim.....	53
4.3.3	Koruyucu Kaplama.....	53
4.3.4	Ortamın Değiştirilmesi.....	53
5.	<b>ÇELİKLERİN KAPLANMASINDA KULLANILAN KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....</b>	<b>55</b>
5.1	Mekanik Kaplama.....	55
5.2	Elektrolitik ve Daldırma Yöntemiyle Kaplama.....	55
5.3	Püskürtme Yöntemi.....	57
6.	<b>ÇELİKLERİN AŞINMA VE KOROZYON DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN UYGULANAN KİMYASAL KAPLAMALAR..</b>	<b>58</b>
6.1	Çelik Yüzeylerin Kaplamaya Hazırlanması.....	58
6.2	Çeliklere Uygulanan Kimyasal Kaplamalar.....	58
6.2.1	Çinko Kaplama.....	59
6.2.2	Çinko Fosfat Kaplama.....	59
6.2.3	Mangan Fosfat Kaplama.....	60
6.2.4	Kadmiyum Kaplama.....	61
6.2.5	Akımsız Nikel Kaplama.....	62
6.2.6	Sert Krom Kaplama.....	63
7.	<b>DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>65</b>
7.1	Malzeme.....	65
7.1.1	Numune Hazırlanması.....	65
7.2	Uygulanan Kimyasal Kaplamalar.....	66
7.2.1	Çinko Kaplama.....	66
7.2.2	Çinko Fosfat Kaplama .....	67
7.2.3	Mangan Fosfat Kaplama.....	68
7.2.4	Kadmiyum Kaplama.....	69
7.2.5	Akımsız Nikel Kaplama.....	69
7.2.6	Sert Krom Kaplama.....	70
7.2.7	Akımsız Nikel Üzerine Sert Krom Kaplama.....	71
7.3	Kimyasal Kaplanmış Numunelerin Test Edilmesi.....	73
7.3.1	Kaplama Kalınlığının Ölçülmesi.....	73
7.3.2	Adhezyon (Yapışma) Testi.....	75
7.3.3	Tuz Testi.....	77
7.3.4	Mikro Sertlik Ölçme.....	81
7.3.5	Aşınma Testi.....	82
8.	<b>İRDELEME.....</b>	<b>85</b>
8.1	Kaplama Kalınlığı Ölçme Sonuçlarının İrdelenmesi.....	85
8.2	Adhezyon Testi Sonuçlarının İrdelenmesi.....	85
8.3	Tuz Testi Sonuçlarının İrdelenmesi.....	86
8.4	Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçlarının İrdelenmesi.....	87
8.5	Aşınma Testi Sonuçlarının İrdelenmesi.....	87

8.6	Makroyapısal İrdeleme.....	89
8.7	Mikroyapısal İrdeleme.....	94
9.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	96
	KAYNAKLAR.....	97
	ÖZGEÇMİŞ.....	100



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Saf demirin soğuma eğrisi.....4
Şekil 2.2	Demir (Fe) - sementit (Fe <sub>3</sub> C) denge diyagramı.....5
Şekil 2.3	Fe-Fe <sub>3</sub> C faz diyagramının çeliklere ait kısmında bulunan fazlar ile bazı fazların yapılarının şematik gösterimi.....6
Şekil 2.4	(a) Ostenit, (b) ferrit ve (c) perlitin metalografik yapıları ile (d) perlitin elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüsü.....8
Şekil 2.5	Fe-Fe <sub>3</sub> C denge diyagramının çeliklere ait kısmı ve soğuma sırasında oluşan iç yapılar.....9
Şekil 2.6	% 0,5C ve %1,2C içeren çeliklerin demir - sementit faz diyagramında gösterimi.....10
Şekil 2.7	Karbonun çeliğin özelliklerine etkisi.....11
Şekil 3.1	Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi.....23
Şekil 3.2	Adhesiv aşınmasının oluşması.....25
Şekil 3.3	Adhesiv aşınma çeşitleri.....25
Şekil 3.4	Adhesiv aşınmanın zamanla gelişmesi.....26
Şekil 3.5	Kazıma etkisiyle kaynaklanan toplam ağırlık kaybında, toplam yer değiştirme miktarının etkisi.....34
Şekil 3.6	Yağlamalı veya yağlamasız adhesiv aşınma deney yöntemleri.....35
Şekil 3.7	Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler.....36
Şekil 4.1	St37-2 çeliğin galvanik korozyon mikro yapısı.....43
Şekil 4.2	Galvanik seri.....44
Şekil 4.3	C22 çeliğin çukurcuk (oyuklu) korozyonu mikro yapısı .....45
Şekil 4.4	Düşük alaşımlı 79MnVS3 çeliğin aralık korozyonu mikro yapısı.....46
Şekil 4.5	St37-2 çeliğin Gerilmeli korozyon mikro yapısı.....48
Şekil 4.6	Alaşımlı 100Cr6 çeliğin kazımalı korozyon makro yapısı.....49
Şekil 4.7	St37-2 çeliğin yorulma korozyonu mikro yapısı.....50
Şekil 4.8	Düşük alaşımlı 44MnSiVS5 çeliğin kurtçuk korozyonu mikro yapısı.....50
Şekil 4.9	C55 çeliğin yüksek sıcaklık korozyonu mikro yapısı .....51
Şekil 4.10	Düşük alaşımlı 27MnSiVS6 çeliğin hidrojen gevrekliği makro yapısı.....51
Şekil 7.1	St 44-2 çeliğinin makro yapısı.....66
Şekil 7.2	Çinko kaplanmış numunenin makro yapısı.....67
Şekil 7.3	Çinko fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı.....68
Şekil 7.4	Mangan fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı.....68
Şekil 7.5	Kadmiyum kaplanmış numunenin makro yapısı.....69
Şekil 7.6	Akımsız nikel kaplanmış numunenin makro yapısı.....70
Şekil 7.7	Sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı.....71
Şekil 7.8	Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı.....72
Şekil 7.9	Minitest 4100 kaplama kalınlığı ölçme cihazı.....74
Şekil 7.10	Screnck trebel bükme cihazı.....75
Şekil 7.11	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin bükme testi sonrası makro yapıları..76
Şekil 7.12	Heraeus-votch korozyon test cihazı.....77
Şekil 7.13	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin tuz testi sonrası makro yapıları.....78
Şekil 7.14	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin tuz testi sonrası mikro yapıları.....79
Şekil 7.15	HVM-2000 shimadzu mikrosertlik test cihazı.....81
Şekil 7.16	Model 5150 aşındırıcı cihaz.....82

Şekil 7.17	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma testi sonrası makro yapıları.....	83
Şekil 8.1	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin kaplama kalınlıkları.....	85
Şekil 8.2	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin korozyon hızları.....	86
Şekil 8.3	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin sertlik değerleri.....	87
Şekil 8.4	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma hızları.....	88
Şekil 8.5	Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma ve korozyon hızları.....	89
Şekil 8.6	Kaplanmamış numunenin makro yapısı.....	89
Şekil 8.7	Çinko kaplanmış numunenin makro yapısı.....	90
Şekil 8.8	Çinko fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı.....	90
Şekil 8.9	Mangan fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı.....	91
Şekil 8.10	Kadmiyum kaplanmış numunenin makro yapısı.....	91
Şekil 8.11	Sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı.....	92
Şekil 8.12	Kaplanmamış numunenin aşınma testi sonrası makro yapısı.....	92
Şekil 8.13	Kadmiyum kaplanmış numunenin makro yapısı.....	93
Şekil 8.14	Sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı.....	93
Şekil 8.15	Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı.....	94
Şekil 8.16	Kaplanmamış numunenin tuz testi sonrası makro yapısı.....	95
Şekil 8.17	Mangan fosfat kaplama uygulanan numunenin tuz testi sonrası mikro yapısı.....	95
Şekil 8.18	Sert krom kaplama uygulanan numunenin tuz testi sonrası mikro yapısı.....	95

## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Çeliklerin alaşım elementi miktarına göre sınıflandırılması.....	17
Çizelge 2.2 Az alaşımli çeliklerin Türk Standartlarına göre gösteriminde kullanılan katsayılar.....	21
Çizelge 3.1 Metallerin adhesyonunu etkileyen faktörler.....	29
Çizelge 3.2 Çeşitli çelik malzemelerde Abrasiv aşınma proseslerinin içerdiği tipik aşınma hızları.....	31
Çizelge 4.1 Farklı metallerle eşleme sonucu demirin korozyon hızında değişmeler.....	44
Çizelge 4.2 Havadaki nem miktarına göre emaye kaplı çelik levhaların kaplama altı korozyonundan etkilenmeleri.....	47
Çizelge 7.1 St 44-2 çeliğin kimyasal bileşimi.....	65
Çizelge 7.2 St 44-2 çeliğin mekanik özellikleri.....	65
Çizelge 7.3 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin kaplama kalınlıkları.....	75
Çizelge 7.4 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin korozyon hızları.....	81
Çizelge 7.5 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin sertlik değerleri.....	82
Çizelge 7.6 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma hızları.....	84

## ÖNSÖZ

Çelik malzemelerin aşınma ve korozyon dayanımını arttırmak için çeşitli kimyasal kaplamaların incelenmesi konulu tezimde yardımlarına başvurduğum değerli hocam Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN'a , katkılarından dolayı değerli büyüğüm Kim. Müh. Yakup ÖZBEK' e, hertürlü anlayış ve desteğinden ötürü değerli büyüğüm ve müdürüm End. Müh. Mahmut HABİBOĞLU' na teşekkür ederim.



## ÖZET

Endüstrinin temel yapı malzemesini oluşturan çelik, en bol ve aynı zamanda en ucuz olan metaldir. Ne var ki, çelik çoğu ortamda korozyona ve aşınmaya dayanıksız bir metaldir. Korozyon ve aşınma sonucu metalin henüz tümü kaybedilmeden ilgili ekipman görevini yapamaz hale gelir. Bu nedenle korozyon ve aşınma zararları daima kaybolan metal maliyetinin çok üzerindedir. Bunlar arasında mineral kaynakları ve işçilik gibi en önemli ulusal kaynakların yok olması da söz konusudur. Bu açıdan bakıldığında korozyon ve aşınma endüstrinin verimini azaltan, ekonomik kalkınmayı engelleyen ve milli gelirden önemli kayıplara neden olan ekonomik bir olay olarak nitelendirilebilir.

Bu çalışmada St 44-2 çeliğin, korozyon ve aşınma davranışı farklı kimyasal kaplamalar uygulanarak incelenmiş, yapılan çevresel ve mekanik testler ile meydana gelen değişiklikler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Aşınma dayanımı ve korozyon direnci düşük olan St 44-2 çeliğine uygulanan sert krom kaplamanın aşınma dayanımını, akımsız nikel kaplamanın ise korozyon direncini arttırdığı görülmüştür. Diğer kaplamaların, maliyetine katlanılabilir bir iyileşme sağlamadığı gözlemlenmiştir. Akımsız nikel kaplama üzerine, sert krom kaplama uygulandığında ise, St 44-2 çeliğinin hem aşınmaya hem de korozyona karşı dayanıklı hale geldiği, her iki kaplamanın avantajlı yönlerinin bir araya getirilebildiği tespit edilmiştir

## **ABSTRACT**

Steel is the most commonly and widely used material in the world; therefore it is the low-priced and easily acquired raw material. However, it shows poor resistance to abrasion and corrosion in different environmental conditions. As a result of abrasion and corrosion; equipments become out of order, unusable. This situation paves the way for the loss of natural mineral and labor resources. Abrasion and corrosion shall be characterized as an economic fact due to decrease the industrial productivity and economic growth.

In this study; behaviour of St 44-2 steel which was exposed to abrasion and corrosion conditions had been examined, and then the most appropriate chemical coating type was researched in order to increase the resistance of the material. After various applications; the effect of chemical coating on abrasion and corrosion features of steel was observed and compared with each other by environmental and mechanical tests.

As a result of these tests on different types of coated St 44-2 steel; hard chrome coating and electroless nickel coating showed behaviour of high abrasion and corrosion resistance respectively. Outside of these two kinds of coatings were determined that they weren't economic in order to obtain high abrasion and corrosion resistance. Moreover; application of hard chrome coating on electroless nickel coating showed both high abrasion resistance and high corrosion resistance.

## 1. GİRİŞ

Demir ve çelik, metal malzeme kullanımında büyük yer tutar. Çelik en bol ve aynı zamanda en ucuz olan metaldir. Ancak, demir bütün ortamlarda korozyona dayanıksız bir metaldir. Korozyon ve aşınma sonucu ekipman görevini yapamaz hale gelir. Bu nedenle korozyon ve aşınma zararlarının oluşturduğu maliyet çok yüksektir. Bununla birlikte mineral kaynakları ve işçilik gibi en önemli ulusal kaynakların yok olması da söz konusudur. Bu açıdan bakıldığında korozyon ve aşınma, endüstrinin verimini azaltan, ekonomik kalkınmayı engelleyen ve milli gelirden önemli kayıplara neden olan ekonomik bir olay olarak nitelendirilebilir.

Bazı gelişmiş ülkelerde korozyon ve aşınma kayıplarını belirlemek üzere geniş kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu konuda bir çalışma 1979 yılında İngiltere' de yapılmış ve yıllık korozyon ve aşınma kayıplarının GSMH' in %3.5' i olduğu belirlenmiştir. Bu kaybın %23' ünün önlenabilir nitelikte olduğu ortaya çıkmıştır.

Ülkemizde yapılan benzer bir çalışmada yıllık korozyon ve aşınma kayıplarının GSMH' in %4.5-5 arasında olduğu ve bunun yaklaşık yarısının önlenabilir nitelikte olduğu bulunmuştur. Korozyon ve aşınma kayıplarının ekonomik değerinin belirlenmesinde karşılaşılan en büyük güçlük korozyon ve aşınma kaybının tam olarak ne olduğunun tanımlanamamasından kaynaklanmaktadır. Örneğin petrol ürünü taşıyan bir boru hattı korozyon sonucu delinirse, meydana gelen maddi kayıplar şunlar olabilir; olayın belirlenmesine kadar geçen süre içerisinde petrol kaybı, delinen borunun maliyeti, eski borunun sökülüp yerine yenisinin takılması için harcanan işçilik ve işletme eksikliğinden doğan zarardır. Bunlar görünen ve kolayca ölçülebilen zararlardır.

Görünmeyen korozyon ve aşınma kayıpları;

- İşletme eksikliği
- Ürün kaybı
- Ürün kirlenmesi
- Aşırı önlemler

şeklinde sıralanabilir.

İşletme eksikliği;

Bir tesiste korozyona ve ya aşınmaya uğramış bir parçanın sökülerek yerine yenisinin konulması, işletmenin belli bir süre kesilmesini gerektirir. İşletme kesikliğinden doğan

zararlar, çoğu zaman korozyona veya aşınmaya uğrayan parçanın maliyetinden ve işçilik masraflarının toplamından çok daha büyüktür. Örneğin bir enerji üretim santralinde korozyon sonucu meydana gelen bir arıza nedeniyle santralin bir bölümünün servis dışı kalması ve elektrik üretiminin durması hesaplanamayacak derecede ekonomik kayıplara neden olur.

#### Ürün kaybı;

Bir yeraltı tankının veya boru hattının korozyon nedeniyle delinmiş olduğunu düşünelim. Kaçak yeri belirleninceye kadar geçen süre içinde akışkan kaybı meydana gelir. Çevreye kaçan akışkanın yanıcı, patlayıcı veya toksik bir madde olması halinde, ekonomik kayıplar yanında çevre kirlenmesi ve sağlık açısından da zehirlenmeler söz konusu olabilir. Örneğin akaryakıt istasyonlarında bulunan yeraltı benzin tanklarında korozyon sonucu meydana gelen deliklerden kaçan benzin birçok patlamalara neden olmuştur.

#### Ürün kirlenmesi;

Özellikle, gıda, ilaç ve tekstil sanayiinde, çelik kapların korozyonu sonucu oluşan pas ürüne karışarak onun kirlenmesine ve kullanılmaz hale gelmesine neden olur. Demir ve çelik söz konusu olduğunda korozyon ve aşınma ürünlerinin zararı yalnız kirlenme şeklinde olduğu halde, toksik özellik içeren diğer metaller için daha da önemlidir. Yakın zamana kadar içme suyu tesisatlarında kurşun borular kullanılırdı. Günümüzde korozyon sonucu suya karışan kurşun bileşiklerinin insan sağlığı için son derece zararlı olduğu belirlenmiş ve kurşun boruların bu amaçla kullanılması yasaklanmıştır. Kurşun kirlenmesi ile ilgili olarak tarihi bir örnek verilmektedir. Romalılar kurşundan yapılmış su ve şarap kapları kullanmışlardır. Kurşunun korozyon sonucu çözünerek insan sağlığı için uzun sürede toksit etki yapacağı o tarihte elbetteki bilinmemekteydi. Bazı tarihçiler büyük roma imparatorluğunun çökmesinde bu kurşun zehirlenmesi olayının etkili olduğunu ileri sürmüşlerdir.

#### Aşırı önlemler;

Makinaların tasarımı sırasında muhtemel korozyon ve aşınma kayıpları gözönüne alınarak, malzeme kalınlıklarına korozyon ve aşınma payı ilave edilmektedir. Burada önemli olan sözkonusu ortamdaki korozyon ve aşınma hızının önceden sağlıklı olarak belirlenmesidir.

Ancak çođu zaman bu tahminin doğru olarak yapılması mümkün olmamaktadır veya ortam koşullarında meydana gelen değişmelerin korozyon ve aşınm hızını ne derecede arttıracadı konusunda önceden kesin bir bilgi edilememektedir. Bu durumda emniyet aısından korozyon veya aşınma payı gereğinden büyük sečilmesi yoluna gidilmektedir. Böylece muhtemel korozyon veya aşınma olayını önlemek amacıyla tonlarca malzeme bořa harcanmış olmaktadır. Burada meydana gelen kayıp yalnızca gereksiz yere kullanılmış olan elik kütlesi değildir. Buna ilave olarak, işletmede kullanılan elektrik enerjisinde de artış olur. Ayrıca borunun et kalınlığı arttırılınca i çapı azalır. Bunun sonucu olarak borudan taşınmakta olan akışkan debisinde azalma meydana gelir veya pompalama için gerekli enerji artar.

Kimyasal kaplama uygulamaları, çeliğin aşınma ve korozyon dayanımını arttırmak amacı ile sıkça kullanılan bir yöntemdir. Kaplamaların aşınma davranışlarının incelenmesi (Sarıkaya, 2004), St37 elik üzerine yapılan krom ve nikel kaplamaların korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi (Altınkök, 2001) isimli çalışmalarda, yapılan kimyasal kaplamaların çeliğin özelliklerini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ancak akımsız nikel üzerine sert krom kaplama uygulamasına, literatür ve piyasa araştırmalarında rastlanmamıştır.

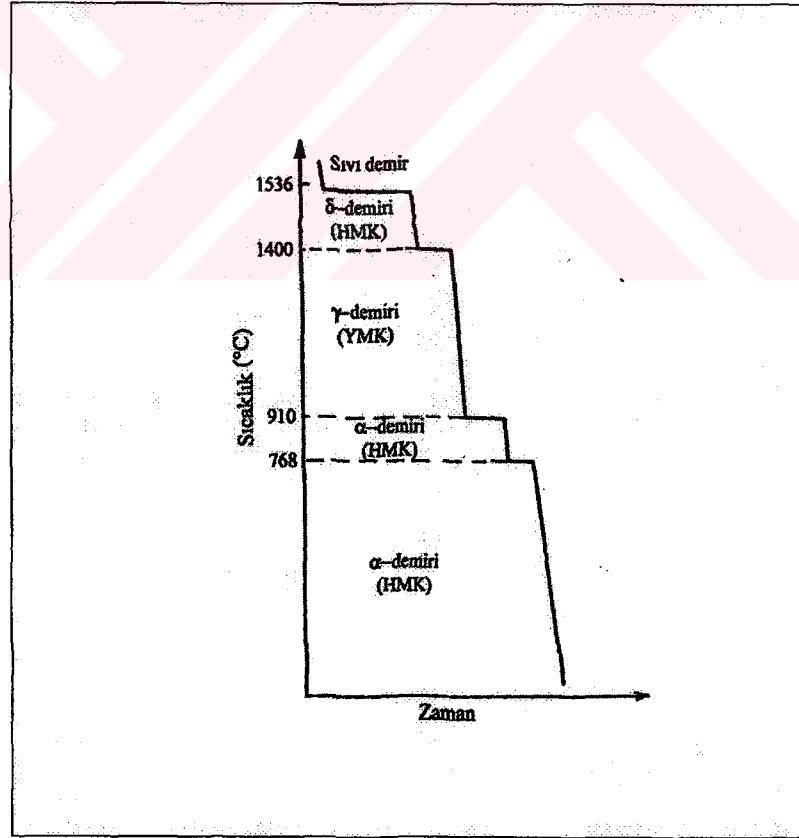
Bu alışmada; St 44-2 eliğin korozyon ve aşınma karşısındaki davranışı incelenmiş, korozyon ve aşınma dayanımını arttırabilmek için uygulanan kimyasal kaplamalar araştırılmıştır. Kimyasal kaplamaların çeliğin özelliklerini ne derecede iyileştirdiği, akımsız nikel kaplama üzerine sert krom kaplama yapılarak her iki kaplamanın avantajlarının biraraya getirildiği elde edilmiş, uygulanan testler sonrasında elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

## 2. ÇELİK MALZEMELER

Demir, pek çok mühendislik alaşımının temelini oluşturan bir metaldir. Külçe demir olarak bilinen ve hemen hemen saf durumdaki demir çatı, kanalizasyon, soba ve kokil kalıp yapımı gibi bazı uygulamalarda kullanılır. Tipik bir külçe demir %0,012 C, %0,017 Mn, %0,005 P, %0,025 S ve çok az miktarda Si içerir. Saf demirin çekme dayanımı 276 MPa, kopma uzaması % 40 ve sertliği 30 RSD-B civarındadır. Ancak, saf demirin sertlik ve mukavemeti pek çok uygulama için yeterli değildir.

### 2.1 Çelik Malzemeler

Demir alotropik bir metaldir ve bu durum demirin soğuma eğrisinden (Şekil 2.1) görülmektedir. Üç türlü alotropik değişim gösteren demir, belirli sıcaklık aralıklarında kararlı bir durum sergiler (Savaşkan, 1999).



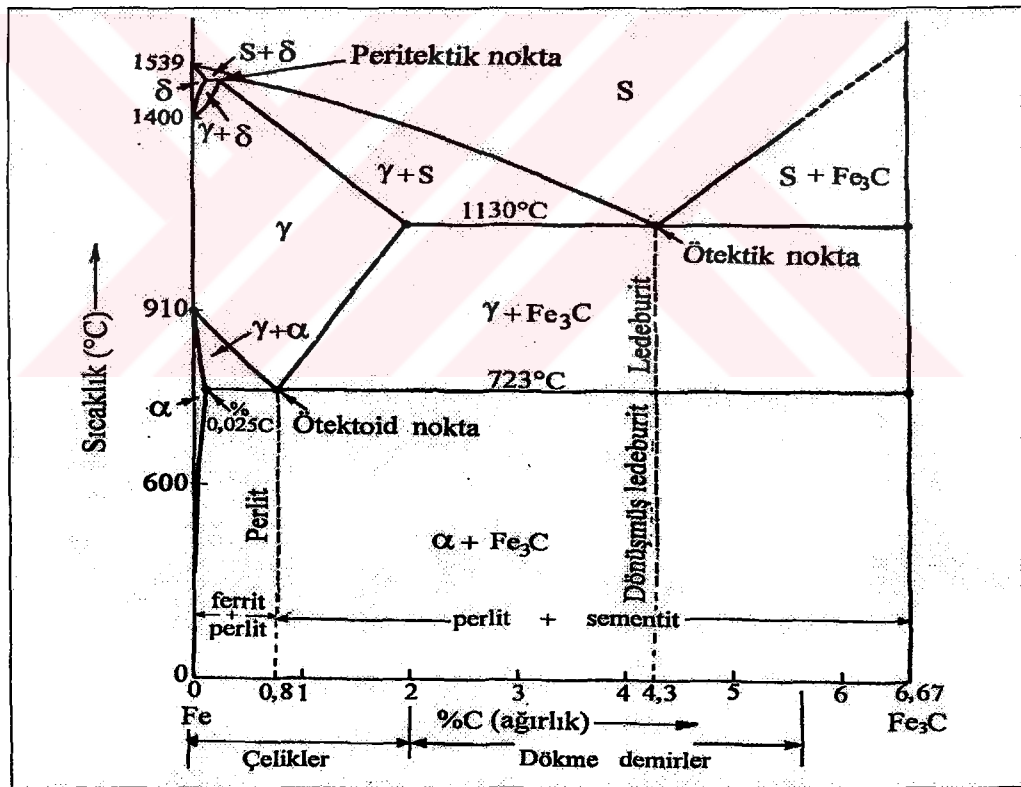
Şekil 2.1 Saf demirin soğuma eğrisi [Savaşkan, T. (1999)]

Karbon, alotropik değişim gösteren demir içerisinde çözünerek farklı arayer katı çözeltileri oluşturur. Katı çözeltili dışında kalan tüm karbonun demirle bir arayer bileşiği ( $Fe_3C$ )

oluşturmasına veya tamamen serbest yani grafit halinde bulunmasına göre, ya demir (Fe) - sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ya da demir (Fe) - grafit (C) faz diyagramı söz konusu olur. Bu faz diyagramlarından çelik ve dökme demirlerin incelenmesinde büyük ölçüde yararlanılır.

## 2.2 Demir-Sementit (Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ ) Faz Diyagramı

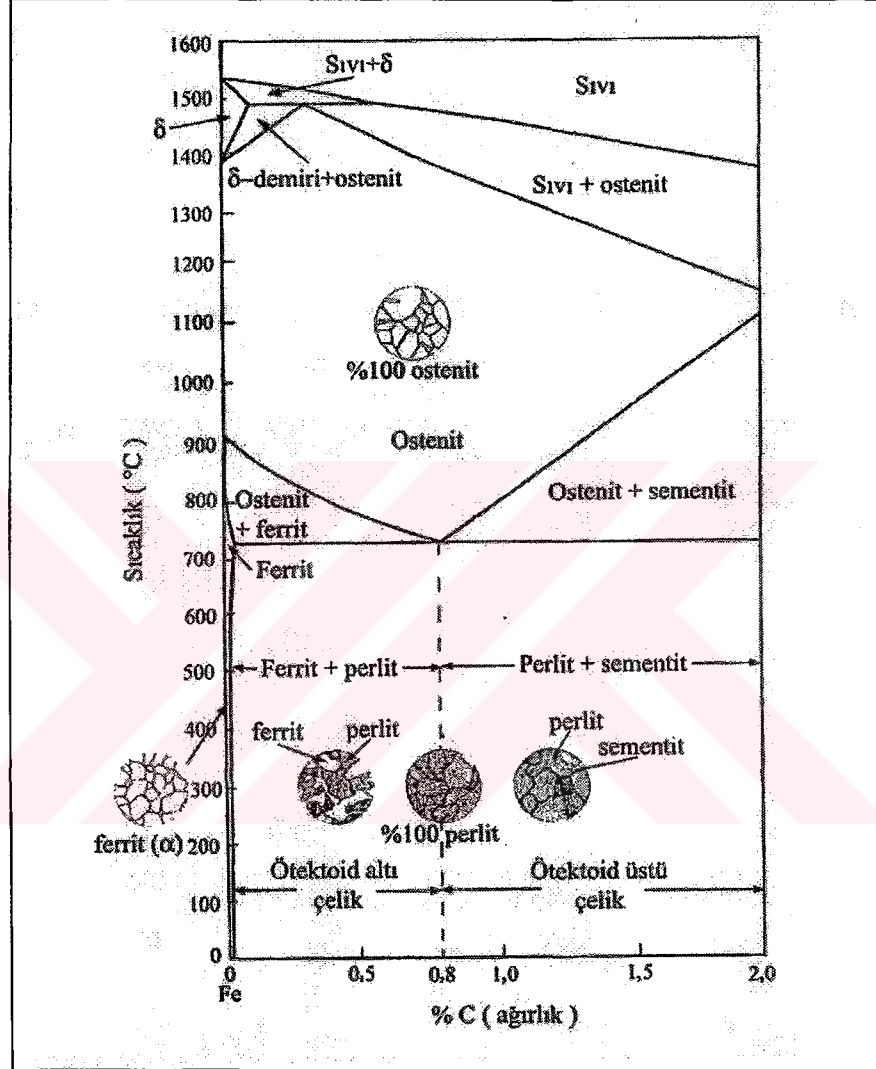
Sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) bileşiği ağırlık olarak % 6,67 oranında karbon içerir. Söz konusu bileşiğin meydana gelmesi durumunda, demir-karbon sisteminde Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  diyagramı geçerli olur. Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  denge diyagramı Şekil 2.2' de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi, söz konusu diyagram peritektik, ötektik ve ötektoid noktaları içermektedir. Karbon oranı %0,8' den az olan çeliklere ötektoid altı çelikler, %0,8 olan çeliklere ötektoid çelikler, %0,8' den fazla olanlara da ötektoid üstü çelikler denir.



Şekil 2.2 Demir (Fe) - sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) denge diyagramı [Demirci, A.H. (2004)]

### 2.2.1 Demir-Sementit Denge Diyagramındaki Fazlar

Fe-Fe<sub>3</sub>C faz diyagramının çeliklere ait kısmında yer alan fazların metalografik yapılarının şematik gösterimi Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 Fe-Fe<sub>3</sub>C faz diyagramının çeliklere ait kısmında bulunan fazlar ile bazı fazların yapılarının şematik gösterimi [Savaşkan, T. (1999)]

Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramında yer alan fazlar aşağıda açıklanmaktadır.

a) Ostenit ( $\gamma$ ): Ostenit, karbonun YMK yapılı  $\gamma$ -demiri içerisinde çözünmesiyle oluşan bir arayer katı çözültisidir. Bu faz, 1147°C sıcaklıkta, %2,0 oranında karbon çözündürür. Çekme mukavemeti 1030 MPa, kopma uzaması %10 ve sertliği

40 RSD-C civarında olan ostenitin tokluğu oldukça yüksektir. Normal olarak oda sıcaklığında kararsız bir faz olmasına karşın, bazı özel durumlarda oda sıcaklığında da ostenit elde edilebilir. Ostenitin metalografik yapısı Şekil 2.4a' da görülmektedir.

b) Ferrit ( $\alpha$ ): HMK yapılı demir içerisinde çok az orandaki karbonun çözünmesiyle oluşan arayer katı çözültisidir. Bu faz içerisinde, 723°C sıcaklıkta %0,025 oranında karbon çözünürken, bu oran oda sıcaklığında %0,008 değerine düşmektedir. Ferrit, Fe-C sistemindeki en yumuşak fazdır. Çekme mukavemeti 270 MPa, kopma uzaması % 40 ve sertliği 90 RSD-B civanıdadır. Şekil 2.4b' de ferritik yapı görülmektedir.

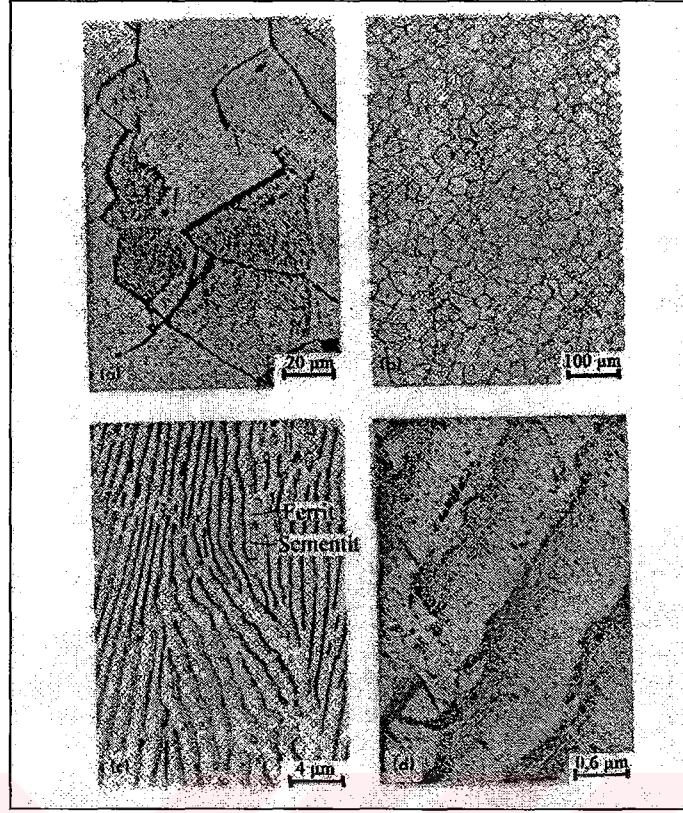
c) Sementit ( $Fe_3C$ ): Kimyasal formülü  $Fe_3C$  olan sementit (demir karbür) % 6,67 ağırlık oranında karbon içerir. Sert ve gevrek bir arayer bileşiği olan sementit, düşük çekme mukavemetine (35 MPa) ve nispeten yüksek basma mukavemetine sahiptir. Fe-C diyagramındaki en sert faz olup, ortorombik kristal yapıya sahiptir.

d) Perlit ( $\alpha + Fe_3C$ ): %0,8 C içeren çeliğin, ostenit bölgesinden yavaş soğutulması sırasında 723 °C sıcaklıkta meydana gelen ötektoid dönüşüm sonucunda oluşan bir yapıdır. Perlit, ferrit ve sementit lamellerinden oluşur ve bu yapıdaki beyaz renkli ferrit matrisi oluşturur, koyu renkli lameller ise sementit fazını gösterir. Perlitik yapının ışık mikroskobu ile elde edilen görüntüsü Şekil 2.4c' de, elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüsü ise Şekil 2.4d' de verilmiştir.

e) Ledeburit: Sementit ( $Fe_3C$ ) ve ostenit ( $\gamma$ ) tanelerinden oluşan ve %4,3 oranında karbon içeren ötektik kaşımıdır.

f) Dönüşmüş ledeburit: Ötektoid sıcaklığın (723°C) altındaki ledeburit demektir.

Bu yapıdaki ostenit taneleri perlite dönüşmüş durumda bulunur.



Şekil 2.4 (a) Ostenit, (b) ferrit ve (c) perlitin metalografik yapılan ile (d) perlitin elektron mikroskobu ile elde edilen görüntüsü [Savaşkan, T. (1999)]

### 2.2.2 Demir-Sementit Sistemindeki Faz Dönüşümleri

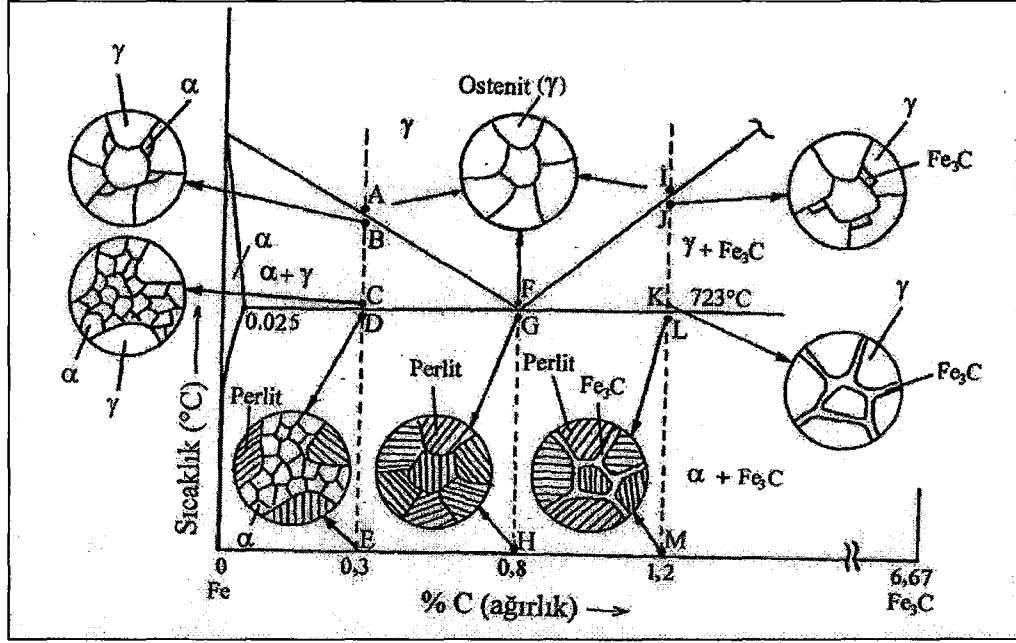
a) Peritektik dönüşüm ( $S + \delta \leftrightarrow \gamma$ ): Bu dönüşüm %0,18C içeren alaşımsız çelikte 1492 °C sıcaklıkta meydana gelir.

b) Ötektik dönüşüm ( $S \leftrightarrow \delta + Fe_3C$ ): Bu dönüşüm % 4,3C içeren Fe-C alaşımında 1130 °C sıcaklıkta meydana gelir.

c) Otektoid dönüşüm ( $\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$ ): % 0,80C içeren çelikte 723 °C sıcaklıkta meydana gelir.

### 2.2.3 Çeliklerde Soğuma Sırasında Oluşan İç Yapılar

Şekil 2.5'de Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramının çeliklere ait kısmı ile bazı çeliklerin ostenit fazından yavaş soğutulması sırasında oluşan iç yapılar görülmektedir.



Şekil 2.5 Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramının çeliklere ait kısmı ve soğuma sırasında oluşan iç yapılar [Savaşkan, T. (1999)]

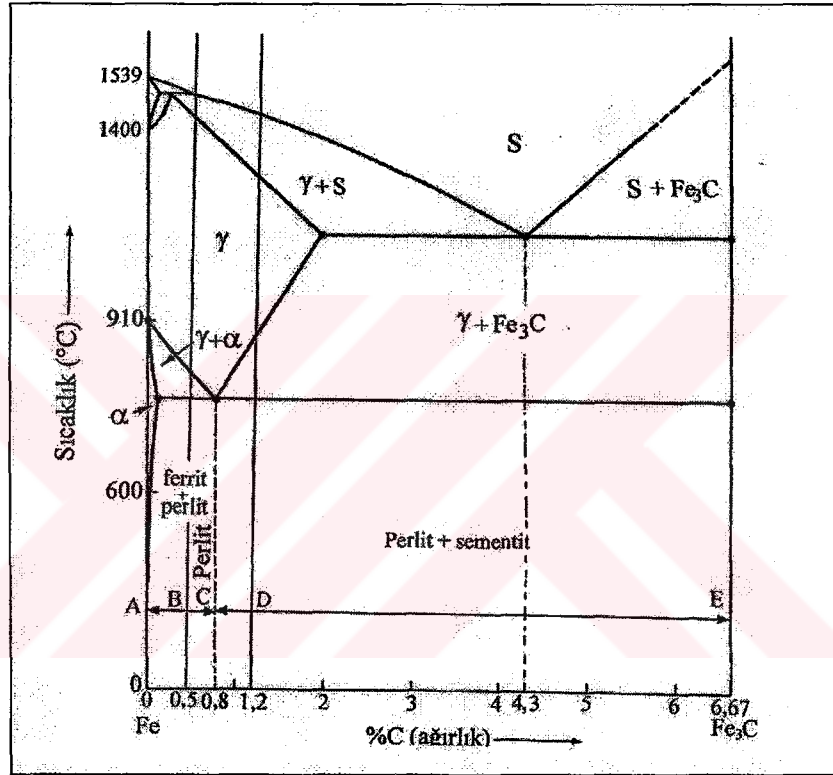
Yukandaki şekilden görüldüğü gibi; %0,3C içeren çelik A noktasında %0,3C oranına sahip ostenit ( $\gamma$ ) tanelerinden oluşur. B noktasında karbon atomları yayınarak uzaklaşmaya başlar ve demir atomlarının YMK yapıdan HMK yapıya geçmeleri sonucunda, çoğunlukla ostenit tanelerinin sınırlarında karbon oranı düşük olan ferrit ( $\alpha$ ) taneleri oluşmaya başlar. C noktasında ferrit taneleri çoğalır ve yapıdaki ostenit fazının karbon oranı artarak %0,8 değerine ulaşır. D noktasında, ostenit taneleri tamamen perlitte dönüşmüş durumda bulunur. E noktasına kadar soğutulan çelikte önemli bir faz dönüşümü meydana gelmediğinden, iç yapı D noktasındaki yapının aynısı olur. % 0,8C içeren çeliğin F noktasındaki yapısı ise %0,8C içeren ostenit tanelerinden oluşur. Bu yapı da G noktasında perlitik yapıya dönüşür. Bu dönüşümde, karbon atomları tane sınırlarından başlayıp, içeri doğru büyüyen sementit lamellerini oluşturacak şekilde bir araya gelir ve lamellerin aralarında karbonca fakir ferrit bölgeleri kalır. H noktasındaki yapı G noktasındaki yapının aynısı olur. %1,20 C içeren çelik İ noktasında ostenit tanelerinden oluşur. J noktasında karbon atomlarının tane sınırlarına yayınması ile bu noktalarda sementit çökelmeye başlar. K noktasında soğuma sırasında sürekli artan sementit bütün tane sınırlarını kaplar ve ayrıca ostenit içerisinde çözünen karbon oranı da sürekli azalarak bu noktada %0,8 değerine düşer. L noktasında ise arta kalan ostenit fazı tamamen perlitik yapıya dönüşmüş durumdadır. M noktasındaki yapı, L noktasındaki yapının aynısı olur. Bu yapıda bulunan ötektoid dışı sementitin oranı perlitin

oranından çok düşüktür, ancak bu fazın sürekli bir ağ oluşturması çeliği sert ve gevrek yapmaktadır.

#### 2.2.4 Demir-Sementit Faz Diyagramı ile İlgili Bazı Uygulamalar

a) % 0,5 C içeren alaşımsız çeliğin, oda sıcaklığındaki iç yapısında bulunan fazların yüzde oranlarının belirlenmesi:

Bu çelik Şekil 2.6'daki Fe-Fe<sub>3</sub>C denge diyagramında gösterilmektedir.



Şekil 2.6 % 0,5C ve %1,2C içeren çeliklerin demir - sementit faz diyagramında gösterimi [Savaşkan, T. (1999)]

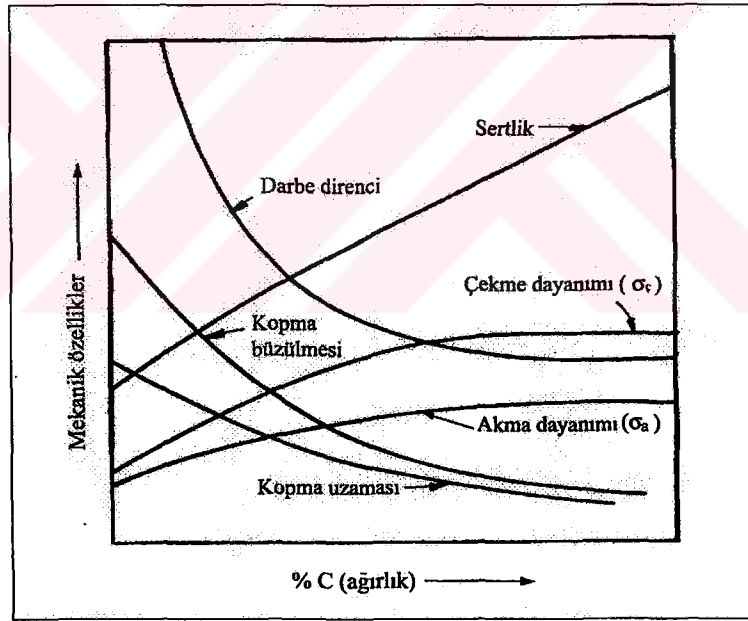
#### 2.3 Demir Eşlik Elementlerinin Çeliğin Özelliklerine Etkisi

Alaşımsız çelikler demir ve karbondan başka düşük oranlarda safsızlık elementleri de içerirler. Karbon ile safsızlık elementlerinin alaşımsız çeliğin özelliklerine etkileri aşağıda açıklanmaktadır.

### 2.3.1 Karbonun Etkisi

Karbon, çeliğin yapısal ve mekanik özelliklerini en fazla etkileyen alaşım elementidir. Karbonun, çeliğin özelliklerine etkisi Şekil 2.7' de görülmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi, karbon oranı arttıkça çeliğin sertlik ve mukavemeti artmakta, buna karşılık sünekliği azalmaktadır. Bu durum, çelikteki sementit oranının artan karbon oranı ile artmasından kaynaklanmaktadır. Karbonun çeliğin genel özelliklerine etkileri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Çeliğin ergime sıcaklığını ve ostenitin dönüşüm sıcaklığını düşürür.
- Çeliğin sertliği ile akma ve çekme dayanımlarını yükseltir, ancak kopma uzaması ile kopma büzülmesini azaltır.
- Çeliğe sertleşme yeteneği kazandırır.
- Çeliğin ısıl geçirgenliğini ve özgül ağırlığını azaltır.
- Yırtılma olayına neden olduğundan, çeliğin kaynak edilme kabiliyetini olumsuz etkiler.



Şekil 2.7 Karbonun çeliğin özelliklerine etkisi [Savaşkan, T. (1999)]

### 2.3.2 Kükürdün Etkisi

Ticari çeliklerdeki kükürt oranı genelde %0,05' in altında tutulur. Kükürt, demir ile birleşerek demir sülfür (FeS) bileşiğini oluşturur. Demir sülfür bileşiği demir ile birlikte ergime noktası düşük olan bir ötektik alaşım meydana getirir. Bu alaşım, daha çok çeliğin tane sınırlarında toplanır. Kükürt içeren çelik, sıcak dövme veya haddeleme işlemine tabi tutulduğunda, tane

sınırlarında bulunan ötektik alaşım ergir. Söz konusu alaşımın ergimesiyle taneler arasındaki bağlar kopar ve çelikte çatlama meydana gelir.

Bu olaya "sıcak yırtılma" adı verilir. Çelikte mangan (Mn) bulunması durumunda kükürt mangan ile mangan sülfürü (MnS) oluşturur. Yani FeS yerine MnS oluşur. MnS'ün büyük bir bölümü cürufta toplanırken, bir kısmı da MnS kalıntıları olarak yapı içerisinde dağılır. Mangan oranının, kükürt oranının 2 ile 8 katı arasında olması tercih edilir. Bazı çeliklerin işlenme kabiliyetini iyileştirmek için kükürt oranı %0,08 ile %0,35 arasındaki bir değere kadar artırılabilir. Çünkü kükürt oranının artırılması, talaşlı işlemi kolaylaştırarak takımın aşınmasını önler. Kükürt, çeliğin darbe dayanımını azaltır ve kaynak edilme özeliğini olumsuz etkiler.

### **2.3.3 Manganın Etkisi**

Bütün ticari alaşımsız çeliklerde %0,03 ile %1,0 oranları arasında mangan bulunur. Manganın en önemli yararı yukarıda belirtildiği gibi kükürdün olumsuz etkisini önlemesidir. Çelikte MnS oluşturacak miktardan daha fazla oranda mangan bulunursa, fazlalık mangan karbon ile reaksiyona girerek mangan karbür (Mn<sub>3</sub>C) oluşturur. Mangan, iyi bir oksijen alıcı (deoksidan) olduğundan çelik dökümlerin kalitesini iyileştirir.

### **2.3.4 Fosforun Etkisi**

Çeliklerdeki fosfor miktarı, genelde %0,04 oranının altında tutulur. Düşük oranlardaki fosfor ferrit içerisinde çözünerek, çeliğin mukavemet ve sertliğini bir miktar artırır. Bazı çeliklerde %0,07 ile %0,12 oranları arasında bulunan fosfor, çeliklerin kesme özelliğini iyileştirir. Ancak yüksek oranlardaki fosfor, çeliklerin sünekliğini azalttığından soğuk şekillendirme sırasında çeliğin çatlmasına veya kınılmasına neden olur. Bu olaya da "soğuk yırtılma" adı verilir.

### **2.3.5 Silisyumun Etkisi**

Ticari çeliklerin çoğu %0,05 ile %0,3 oranları arasında silisyum içerir. Silisyum, ferrit içerisinde çözünerek çeliğin sünekliğini fazla azaltmadan mukavemetini artırır. Ayrıca, silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>) oluşturarak sıvı çeliğin oksijenini büyük ölçüde alır ve böylece çeliğin kalitesini iyileştirir.

### 2.3.6 Azotun Etkisi

Az miktarda da olsa azot çeliklerde gevrekleşmeye neden olur. Hava üfleme yöntemiyle üretilen Thomas çeliklerinde %0,03 oranında azot bulunurken, oksijen üfleme yöntemiyle üretilen Siemens-Martin çelikleri %0,01 'den daha düşük oranlarda azot içerir.

### 2.4 Alaşım Elementlerinin Çeliğin Özelliklerine Etkisi

Alaşım elementleri sade karbonlu çeliklere pek çok amaç için katılırlar. Bunların en önemlilerinden bazıları şunlardır;

- Sertleşebilme derinliğini artırarak mekanik özellikleri iyileştirmek.
- Yüksek dayanım ve iyi sünekliliği korurken, yüksek temperleme sıcaklıkları sağlamak.
- Yüksek ve düşük sıcaklıklarda mekanik özellikleri iyileştirmek
- Yüksek sıcaklık oksidasyonunu ve korozyon direncini iyileştirmek.
- Aşınma direnci ve yorulma davranışı gibi özellikleri iyileştirmek

Çelikte kullanılan alaşım elementleri ve bu elementlerin çeliğin özelliklerine etkisi aşağıda sıralanmıştır.

#### 2.4.1 Nikelin Etkisi

Silisyum ve mangana göre çekme dayanımını daha az yükseltir ve özgül uzamayı biraz düşürür. Nikel elemanı çeliklerin çekirdeğe kadar sertleşebilmelerini sağlar. Bilindiği gibi Krom – Nikel çelikleri korozyona, tufallaşmaya ve sıcağa dayanıklı bir özellik kazanırlar. Özellikle düşük sıcaklıklarda imalat çeliklerinde çentik darbe dayanımını yükselten nikel kaynak kabiliyetini etkilemez. Sementasyon ve ıslah çeliklerinde mukavemeti artırıcı nitelik taşıyan nikelin çelikte alaşım elementi olarak kullanılmasındaki genel amaç, östenitik bir bünye, korozyon ve tufallaşmaya dayanım elde edilmesidir.

#### 2.4.2 Kromun Etkisi

Dayanımı yükseltir, özgül uzamayı çok az azaltacak şekilde etki eder, aynı zamanda sıcakta dayanımı ve tufallaşma dayanıklılığını oldukça yükseltir. Yüksek krom değerleri ile çelik paslanmaz hale gelir ve aşınma dayanımı yükselir. Kaynak edebilirlik, krom miktarının artması ile azalır. Krom, karbit elemanlarının oluşumuna geniş ölçüde yardımcı olur. Çekme dayanımı ve akma sınırı artar. Bunların yanısıra krom çentik darbe dayanımını düşürür.

### 2.4.3 Molibdenin Etkisi

Molibden özellikle çekme dayanımı ve sıcakta dayanımı oldukça fazla artırır. Öte yandan kaynak edilebilirliği geniş ölçüde ve olumlu yönde etkiler. Yüksek molibden değerleri ise çeliğin dövülebilirliğini zorlaştırır. Molibden genellikle krom ile kullanılır. Krom – Nikel ile birlikte molibdenin de çelikte bulunması yüksek akma sınırı ve mukavimlik elde edilmesini sağlar. Yüksek derecede karbit oluşturu olması nedeniyle molibden hız çeliklerinde, sıcak iş çeliklerinde, östenitik paslanmaz çeliklerde, sıcak iş çeliklerinde, östenitik paslanmaz çeliklerde, sementasyon, ıslah ve sıcağa dayanıklı çeliklerde alaşım elemanı olarak kullanılır.

### 2.4.4 Vanadyumun Etkisi

Az miktarda vanadyum elementi sıcakta dayanımı yükselterek aşırı ısınmadaki hassasiyeti düşürür. Hız çeliklerinin kesme dayanıklılığını yükseltir. Az miktarda katılan vanadyumun kaynak edilebilirliğe etkisi ise hissedilir düzeyde değildir. İyi bir karbit oluşturu olan vanadyum çelikte çekme dayanımını, akma sınırını ve özellikle sıcakta dayanıklılık özelliklerini iyileştirir. İmalat ve sıcağa dayanıklı çeliklerde krom ile, hız ve sıcak iş çeliklerinde ise wolfram ile birlikte kullanılır.

### 2.4.5 Wolframın Etkisi

Mukavemeti, sertliği, kesme kabiliyetini ve dayanıklılığı önemli ölçüde yükseltici rol oynar. Fakat en önemli işlevi sıcakta sertliği muhafaza ettirmesidir. Bu nedenle hız çeliklerinde ve sıcak iş çeliklerinde çok önemli olan wolfram çekme dayanımını ve akma sınırını her %1 artışta 4 kp/mm<sup>2</sup> kadar artırır. İyi karbit oluşturu etkisi nedeniyle hız çeliklerinde ve sıcağa dayanıklı çeliklerde tercih edilir. İyi karbür oluşturma yeteneği sayesinde ise çelik meneviş sıcaklığında dayanıklı hale gelir.

### 2.4.6 Kobaltın Etkisi

Kobalt elemanı mukavemet ve sertliği çok fazla artırır. Hız çeliklerinde ve sürekli mknatis çeliklerinde kullanılan kobaltın alaşım içerisindeki tutumu Ni'e benzer. Kuvvetli bir karbid oluşturu olduğundan meneviş dayanıklılığını ve sıcakta dayanımı fazla artırır. Bu nedenle özellikle hız çeliklerinde sıcağa dayanıklı çeliklerde ve sert maden imalinde kullanılır.

### 2.4.7 Alüminyumun Etkisi

Tutumu silisyuma benzer. Ayrıca karbonun grafit şeklinde ayrışmasını kolaylaştırır. Yüksek miktarlarda kullanıldığı zaman çeliği kaba taneli yapan alüminyum sıcakta tufallaşma

dayanımını artırır. Alüminyumun günümüzde alaşım elementi olarak sıkça kullanılmaya başlamasının en önemli sebebi ağırlığı azaltmasıdır.

#### **2.4.8 Borun Etkisi**

Ayrışma sertleşmesi söz konusu olan yerlerde ve diğer özel durumlarda kullanılır. Özellikle östenitik çeliklerde alaşım elemanı olarak görülür.

#### **2.4.9 Bakırın Etkisi**

Çeliğin çekme dayanımı ve akma sınırını yükseltir. Özgül uzamayı azaltır. Düşük miktarları ile çeliğin atmosferik havaya karşı dayanımını arttıran bakır kaynak edilebilirliğe etkimez.

#### **2.4.10 Kurşunun Etkisi**

Kükürtle birlikte çeliğin talaş verme kabiliyetini yükselten kurşun, yakım ömrünün artmasını sağlar. Kurşunun katık miktarı yaklaşık olarak %0.2 -&0.3 civarındadır.

#### **2.4.11 Tantalyumun Etkisi**

Her iki elementte östenitik bölgenin stabilize edilmesinde ve korozyona dayanıklı çeliklerde kullanılır.

#### **2.4.12 Titanyumun Etkisi**

Karbit oluşumuna yardımcı olan titan, östenitik ve korozyona dayanıklı çeliklerde stabilizatör olarak kullanılır. Son zamanlarda titan alaşımlı çelikler büyük önem kazanmaktadır.

### **2.5 Çeliklerin Sınıflandırılması**

Tanım ve kullanımda kolaylık sağlamak amacıyla çelikler değişik sınıflandırmalara tabi tutulmaktadır. En yaygın olarak kullanılan sınıflandırmalar;

- Karbon oranına göre sınıflandırma
- Alaşım elementi miktarına göre sınıflandırma
- Kullanım alanına göre sınıflandırma

olarak sıralanabilir.

### 2.5.1 Çeliklerin Karbon Oranına Göre Sınıflandırılması

Çelikler içerdikleri karbon oranına göre düşük karbonlu çelikler, orta karbonlu çelikler, yüksek karbonlu çelikler ve yüksek karbonlu takım çelikleri olmak üzere başlıca dört sınıfa ayrılırlar. Bu çelikler aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

#### 2.5.1.1 Düşük Karbonlu Çelikler

Bu çelikler, %0,25 oranına kadar karbon içerirler ve çok yumuşak ve yumuşak çelikler olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

a) Çok yumuşak çelikler: %0,07 ile %0,15 arasında karbon içerirler ve soğuk şekillendirmeye elverişlidirler.

b) Yumuşak çelikler: %0,15 ile %0,25 oranında karbon içerirler. Çok yaygın olarak kullanılan alaşımsız çeliklerdir. Çok iyi kaynak edilebilirler, ancak su verme yöntemi ile iyi sertleştirilemezler.

#### 2.5.1.2 Orta Karbonlu Çelikler

Bu çelikler, %0,25 ile %0,55 oranları arasında karbon içerirler. Isıl işlem için çok uygun çeliklerdir. Yani, bu çeliklerin yapı ve özellikleri ısıl işlemle büyük ölçüde değiştirilebilir. Bu çelikler, karbon oranlarına göre genel dövme çelikleri, mil çelikleri ve aşınmaya dayanıklı çelikler olmak üzere üç gruba ayrılabilir.

a) Genel dövme çelikleri: %0,25 ile %0,35 arasında karbon içerirler.

b) Mil çelikleri: %0,35 ile %0,45 oranları arasında karbon içerirler. Mil, tel ve dingil yapımı için kullanılırlar.

c) Aşınmaya dayanıklı çelikler: %0,45 ile %0,55 arasında karbon içerirler. Ray, ray tekerleği, silindir ve pres kalıpların yapımında kullanılırlar.

#### 2.5.1.3 Yüksek Karbonlu Çelikler

%0,55 - %0,9 arasında karbon içerirler. Yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren yerlerde kullanılırlar. Kullanım alanına örnek olarak, pres kalıp blokları gösterilebilir.

#### 2.5.1.4 Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri

Bu çelikler %0,9 - %1,6 oranları arasında karbon içerirler. Yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılırlar. Kullanım yerlerine örnek olarak torna kalem ve matkap uçları verilebilir.

### 2.5.2 Çeliklerin Alaşım Elementi Miktarına Göre Sınıflandırılması

EURONORM 20-74' e göre, alaşım elementi miktarına göre yapılan sınıflandırmada çelikler; alaşımsız çelikler, düşük alaşımlı çelikler, alaşımlı çelikler olmak üzere üç ana grupta toplanır.

Çizelge 2.1 Çeliklerin alaşım elementi miktarına göre sınıflandırılması

Alaşım Elementi	Alaşımsız Çelikleri	Düşük Alaşımlı Çelikler	Alaşımlı Çelikleri
C	% 1,5 den az	% 1,5 den az	% 2,2 den az
Mn+Si	% 1,5 den az	% 1,5 - 3,0	% 3,0 den fazla
P	% 0,08 den az	% 0,05 den az	% 0,04 den az
S	% 0,06 dan az	% 0,05 den az	% 0,04 den az
Al	% 0,3 den az	-	% 0,3 den fazla
B	-	-	% 0,001 den fazla
Co	% 0,2 den az	% 0,2 – 0,3	% 0,3 den fazla
Cr	% 0,3 den az	% 0,3 – 0,5	% 0,5 den fazla
Cu	% 0,4 den az	-	% 0,4 den fazla
Mo	% 0,05 den az	% 0,05 – 0,10	% 0,1 den fazla
Ni	% 0,05 den az	% 0,3 – 0,5	% 0,5 den fazla
Pb	% 0,4 den az	-	% 0,4 den fazla
V	% 0,05 den az	% 0,05 – 0,10	% 0,1 den fazla
W	% 0,2 den az	% 0,2 – 0,3	% 0,3 den fazla

Bir çeliğin düşük alaşımlı yada alaşımlı sayılması için bu elementlerden herhangi birinin kendisi için belirlenen alt sınırı aşması gerekir.

### 2.5.3 Çeliklerin Kullanım Alanına Göre Sınıflandırılması

Günümüzde daha çok sistematik olmayan fakat çeliklerin karakteristik özelliklerini ve/veya kullanım amaçlarını ön plana çıkaran sınıflandırmalar kullanılmaya başlanmıştır. Bu sınıflamada bir çelik türü birkaç grup içerisinde de yer alabilir. Örneğin C40 hem ıslah hem de karbon çelikleri gurubunda yer alabilir.

#### 2.5.3.1 Konstrüksiyon Çelikleri

Kükürt ve fosfor yüzdeleri % 0,050 – 0,080 arasında olup, analizleri ile deği,1 mukavemet değerleri ile anılırlar. İnşaat demiri, U-T- I profilleri olarak üretilirler. Vinçler, vagonlar, köprüler, makine gövdeleri ve fabrikaların yapımında kullanılırlar.

### 2.5.3.2 Yay Çelikleri

Üzerine yük uygulandığında şekil değiştiren ve yük kaldırdığında eski haline gelebilen çelik türleridir. Genellikle %0,4-0,7 C, %1,0-2,0 Si içerirler. Ayrıca % 0,5-1,0 Cr ve Mn, %0,05-0,10 V bulunması daha iyi özelliklere sahip olmasını sağlar. Isıl işlem yay imalinde önemli konulardan biridir.

### 2.5.3.3 Otomat Çelikleri

Otomat tezgahlarında kolaylıkla işlenebilen çeliklerdir. Kükürt ve Mangan içerikleri normal değerlerin üzerindedir. Daha rahat işlenebilmeleri amacıyla Pb ilave edilen türleri de mevcuttur. Sementa edilebilen ve direk sertleştirilebilenler olarak iki grupta toplanırlar. Taşıdıkları kolay işlenebilirlik özelliklerinde dolayı bu çelikler çok milli veya revolver torna tezgahlarında yapılan boyuna ve alın tornalama, diş açma, matkapla delme, raybalama gibi talaş kaldırma işlemlerine en uygun çelikler olarak tanımlanır.

### 2.5.3.4 Karbon Çelikleri

% C, Si, Mn, P, S içeriklerine göre değerlendirilen düşük alaşımlı ve alaşımsız çelikler grubunda bulunurlar. İmalat çelikleri olarak bilinirler.

### 2.5.3.5 Sementasyon Çelikleri

Genellikle %0,10-0,25 C değerleri içeren düşük alaşımlı ve alaşımsız çeliklerdir. Sementasyon ( yüzeye C emdirilmesi ) işlemi ile yüzeylerindeki % C miktarı artırılarak dışı sert içi yumuşak, darbe dayanımı gerektiren parçaların imalinde kullanılırlar. Örneğin, dişli parçaların imalinde kullanılır.

### 2.5.3.6 Islah Çelikleri

Bu tür çeliklerin % C oranları % 0,35'den başlar. Genellikle uygun bir sertleştirme ve menevişleme işleminden sonra özellikleri iyileştirilerek kullanılırlar. Alaşımsız ve alaşımlı türleri vardır. Alaşımsız olanları ıslah edilmeden de imalat çelikleri olarak kullanılmaktadır. Bu tür çelikler, makine imalatının büyük bölümünde kullanılmakla beraber alaşımlı olanlar mil, shaft, krank gibi parçaların imalinde kullanılır.

### 2.5.3.7 Rulman Çelikleri

Rulman türlerinin çeşitli kısımlarının yapımında kullanılan çeliklerdir. Bu çelikler çok yüksek çekme, basınç, devamlı titreşim ve aşınma etkilerine dirençli olmak zorundadır. Bu

nedence özel kimyasal bileşim yanında tam sertleştirme veya yüzey sertleştirme işlemleri de gerekebilir.

### **2.5.3.8 Takım Çelikleri**

Uygulamalarda kullanılan bir çok çeşidi vardır. Alaşımısız, alaşımli, yüksek hız, soğuk iş ve sıcak iş takım çelikleri olarak oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kesici takımlar, makaslar, zımbalar, kalıplar, sıcak ve soğuk şekil verme kalıpları, darbeli çalışan takımlar, el aletleri, hava tabancaları, ölçü ve kontrol takımları v.b. imalatında kullanılırlar.

### **2.5.3.9 Mikro Alaşımli Çelikler**

Özellikleri açısından yüksek dayanımlı düşük alaşımli çeliklerdir. Dünyada son 50 yılın üretilen miktarlar açısından en önemli gelişmesini gösteren çelik türüdür. Mikro alaşımli çeliklerin üretim potansiyeli günümüzde gelişmiş ülkelerdeki çelik üretim miktarının %10'nu aşmış bulunmaktadır.

### **2.5.3.10 Paslanmaz Çelikler**

Bileşiminde fazlaca krom ve nikel ihtiva eden, yüksek sıcaklığa, kimyasal etkilere dayanıklı çeliklerdir. Ferritik, östenitik ve martenzitik paslanmaz çelikler olarak üç grupta incelenebilirler. Ferritik paslanmaz çelikler %18-30 Cr ve çok az karbon ihtiva eder. Isıl işlemle sertleştirilemezler. Östenitik paslanmaz çelikler, krom yanında önemli oranda nikel içerirler. En büyük özellikleri yumuşak, şekillendirmeye çok uygun korozyona, aside ve ısıya dayanıklıdır. Martenzitik paslanmaz çelikler, karbon yanında %12-17 civarında krom içerirler ve sertleştirilebilirler.

### **2.5.3.11 Borlu Çelikler**

Sementasyon ve ıslah kalitesindeki bazı çeliklerin bünyesine çok düşük oranlarda bor ilave edilerek üretilen çeliklerdir. Bor elementi, ıslah çeliklerinde su verme sertliğinin derinlere erişmesinde, sementasyon çeliklerinde ise merkez kısımlarının dayanımının artmasında rol oynamaktadır. Ayrıca nötron absorpsiyonu yüksek olduğundan, nükleer enerji santrallerinin yapımında kullanılan çeliklerde alaşım elementidir.

## **2.6 Çeliklerin Türk Standartlarına Göre Gösterimi**

Çelik ve dökme demirlerin kimyasal bileşimi ve özelliklerine göre kısa gösterilişleri TS 1111' de ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Çelikler ergitme yöntemine göre, T ( Thomas konverteri),

O (oksijen konverteri), M (Siemens-Martin ocağı), E (elektrik ark ocağı), I (endüksiyon ocağı); döküm şekline göre de S (sakinleştirilmiş), SY (yan sakınleştirilmiş), K (kaynar dökülmüş) işaretleri ile gösterilebilir.

### **2.6.1 Mekanik Özellikleri Esas Alman Çelikler**

Bunlar ısıtılma işlem için öngörülmemeyen çeliklerdir. Fe işaretine ek olarak çekme dayanımının en düşük değerleri ile tanımlanırlar. Örneğin; çekme dayanımının en düşük değeri 37 kgf/mm<sup>2</sup> olan genel yapı çeliği Fe37 şeklinde gösterilir. Aynı çekme dayanımına sahip, bazik Siemens-Martin ocağında ergitilmiş ve sakın dökülmüş genel yapı çeliği ise MBS Fe37 şeklinde gösterilir. Çekme dayanımları en az 42, 60 ve 70 kgf/mm<sup>2</sup> olan çelikler sırasıyla; Fe42, Fe60 ve Fe70 şeklinde gösterilirler.

### **2.6.2 Kimyasal Bileşimi Esas Alman Çelikler**

Bunlar alaşımsız ve alaşımlı çelikler olup, ısıtılma işleme uygundur.

#### **2.6.2.1 Alaşımsız Çelikler**

C harfi ve ortalama yüzde karbon oranının 100 katı ile gösterilirler. Örneğin; bileşiminde %0,35 karbon bulunan alaşımsız ve sakınleştirilmiş oksijen konverter çeliği: OS C 35 şeklinde gösterilir. Ortalama karbon oranı % 0,45 olan alaşımsız çelik C 45 şeklinde gösterilir. Karbon (C) işaretinden sonra gelen küçük harfler ise alaşımsız çeliğin türünü gösterir. Örneğin; ortalama karbon oranı %0,45 olan alaşımsız asal çelik Ck 45 şeklinde, %0,53 oranında karbon içeren ve yüzeyi sertleştirilebilen alaşımsız çelik ise Cr 53 şeklinde gösterilir.

#### **2.6.2.2 Alaşımlı Çelikler**

Alaşımlı çelikler, az alaşımlı çelikler ve yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere iki gruba ayrılır.

##### **2.6.2.2.1 Az Alaşımlı Çelikler**

Bu tip çeliklerin gösteriminde C işareti kullanılmaz. Ortalama yüzde karbon oranının 100 katı yazıldıktan sonra, oran sırasına göre alaşım elementlerinin simgeleri ve bu elementlerin Çizelge 2.2'deki katsayılarla çarpılarak tam sayıya yuvarlatılmış ortalama yüzde oranla belirtilir.

Çizelge 2.2 Az alaşımlı çeliklerin Türk Standartlarına göre gösteriminde kullanılan katsayılar  
[Savaşkan, T. (1999)]

Alaşım Elementi	Katsayısı
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Pb, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Zr	10
P, S, N, Ce, C	100
B	1000

Örneğin; bileşiminde %0,20 C ve % 1 ,25 Mn bulunan az alaşımlı çelik 20 Mn 5, bileşiminde %0,15 C ve %0,75 Cr bulunan az alaşımlı asal çelik 15Cr3 ve , bileşiminde %0,15 C, % 1 Cr ve %0,40 Mo bulunan az alaşımlı çelik ise 15 Cr Mo 44 şeklinde gösterilir.

#### 2.6.2.2.2 Yüksek Alaşımlı Çelikler

Yüksek alaşımlı çeliklerin gösterimi için en başta X harfi kullanılır. Karbon oranı, az alaşımlı çeliklerde olduğu gibi yazılır ve alaşım elementlerinin her birinin gerçek yüzde oranı kendi simgesinden sonra belirtilir. İkinci derecede önemli olan alaşım elementlerinin oranları gösterilmeyebilir. Örneğin; bileşiminde %0,08 C, %18 Cr ve %8 Ni bulunan yüksek alaşımlı çelik X 8 Cr 18 Ni 8 şeklinde, bileşiminde %0,10C, %18Cr, %9Ni ve %2Ti bulunan yüksek alaşımlı çelik X10Cr18Ni9Ti2 şeklinde ve bileşiminde %0,10C, %22 Cr, %5Ni, %0,6 Mo ve %0,6 Cu bulunan yüksek alaşımlı çelik ise X10Cr22Ni5MoCu şeklinde gösterilir.

### 3. ÇELİK MALZEMELERİN AŞINMASI

Sürtünmenin bulunduğu ortamlarda çalışan parçalar, çeşitli aşınma etkileri altında bulunmaktadır. Bu parçaların aşınma karakteristikleri, ömürlerini de belirleyen en önemli kriter olmaktadır. Bir çok çalışma ortamında yüksek aşınma direnci öncelikli olarak aranmakta ve aşınma ömrünün arttırılması için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

#### 3.1 Çelik Malzemelerin Aşınması

Aşınma katı cisimlerin yüzeylerinden çeşitli etkenlerle sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma; kullanılan malzemelerinin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması şeklinde tanımlanmaktadır. Katı cisimlerin yüzeyleri oksitlerle yada yağlayıcılarla kaplıysalar bile oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının absorpsiyonunun zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı-katı teması olur. Bu temaslar ise aşınmaya neden olmaktadır. Bu şekilde, yüzeyler ilk şekillerini kaybederler. Parçalar arasındaki boşluklar büyür, gürültü ve titreşimler meydana gelir, verim azalır. Kısaca makine amaçlanan fonksiyonunu normal bir şekilde yerine getiremez. Bir aşınma sisteminde;

Ana malzeme; aşınan

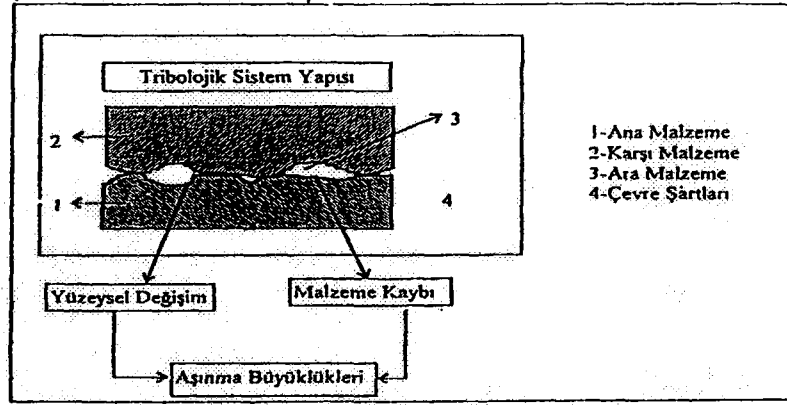
Karşı malzeme; aşındıran

Ara malzeme

Yük

Hareket

temel unsurlar olarak sayılabilir (Rollason, 1975). Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılır ve Şekil 3.1'de böyle bir sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterimi [Avner, S. H., (1974)]

### 3.2 Aşınma Hasarları

Aşınma makine ve konstrüksiyon tasarımında çok önemlidir. Temas eden yüzelerde sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise işleme toleranslarının azalmasına neden olmaktadır. Aşınma sorunlarının yaşandığı tesislerde, meydana gelen aşınma maliyetini beş grupta toplamak mümkündür.

- Aşınmış ve dolayısıyla kullanılamaz duruma gelmiş parçanın ve yenisinin maliyeti,
- Aşınma yüzünden tesisdeki proses parametrelerinin meydana getirdiği maliyet. Örneğin, kağıt fabrikasında aşınma yüzünde silindirlerin dönme hızının ve dolayısıyla üretimin artırılması gibi,
- Bakım ve onarım için tesisin durdurulması sebebiyle oluşan üretim kaybı ve dolayısıyla üretimin durdurulması ve yeniden başlatılmasıyla (ön ısıtma gibi) maliyeti,
- Aşınmanın önceden tahmin edilememesi yüzünden meydana gelecek kazaların sebep olduğu kayıplar,
- Yukarıdaki sorunların daha az yaşandığı rakip firmalarla rekabet edememenin meydana getirdiği maliyet

### 3.3 Aşınma Türleri

Aşınma, hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve bu parçaların bozulmasına neden olan çok önemli bir faktördür. Bu sebeple, ekonomik açıdan aşınmanın neden olduğu kayıplar ve hasarlar çok büyük olmaktadır.

Rabinowicz aşınmayı dört temel grupta toplamıştır. Bunlar; adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, kalkma veya oyuklanma ve kimyasal veya korozif etkidir (Rollason, 1975). Problemin doğru olarak çözülmesi için aşınma mekanizmasının çok iyi anlaşılması gerekmektedir.

Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik

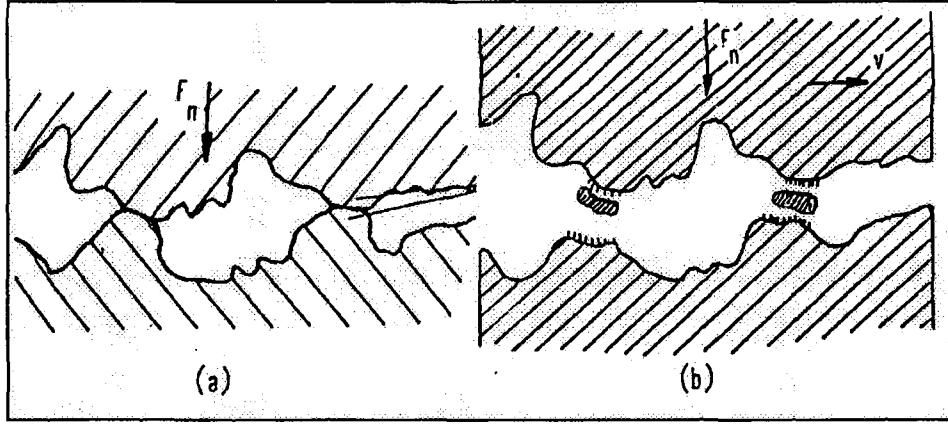
gibi özelliklerinin değiştirilmesinden etkilenmektedir. Aşınmanın gözlenmesinde ortaya çıkan izler mekanizmanın belirlenmesinde oldukça önemlidir. Ancak Dorrison oluşan izlerden mekanizmanın belirlenmesinin oldukça zor olduğunu göstermiş; çoğu zaman bir mekanizmanın etkili olduğunu belirtmiştir.

Genel olarak aşınma, dış etkiler altında, temas yüzeylerinde oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin sonucudur. Dış etkileri, fiziksel ve kimyasal değişikliklerin çokluğu nedeniyle pratikte, bir aşınma hali değil, bir çok aşınma halleri vardır. Adhesiv, Abresiv, oyuklanma ve kalkma, kazıma olmak üzere dört grupta toplanır.

### 3.3.1 Adhesiv Aşınma

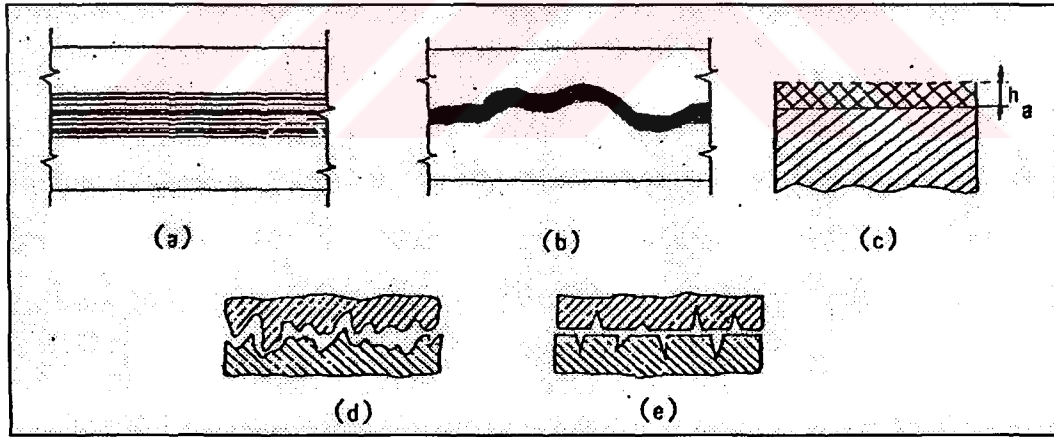
Yapışma aşınması olarak ta bilinen adhesiv aşınma en yaygın olarak rastlanan aşınma türü olmasına rağmen, genellikle adhesiv aşınma hasarlarının etkisi bulunmaz. Bu tür aşınma iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi sırasında yapışması ve kayması sonucunda küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşmaktadır. Teorik olarak, malzeme yüzeyinde bulunan düzensizlikler sebebiyle birbirine temas etmekte olan iki yüzey arasında uygulanan yüke bağlı olarak bir çok noktada temas gerçekleşir. İki metal yüzeyi birbiri ile temas ettiği takdirde, malzemenin yüzeylerinde bulunan izler, düzensizlikler malzeme yüzeyinde bölgesel yüksek basınçlar oluştururlar ve yüzey filmlerinin kırılmasına neden olurlar. Temiz metal yüzeyleri birbirlerine temas ettirildikleri zaman, yüzeylerdeki elektrostatik düzensizlikler sebebiyle, kaynama için bir eğilim söz konusudur. Eğer bir yüzey diğer yüzey üzerinde hareket halinde ise, kaynamanın olduğu bölgeler kırılacaktır. Kırılma düzlemi orijinal ara yüzey olabilmekte ve ana malzemede bir zayıflamaya neden olmaktadır.

Adhesiv aşınmanın esası kaynak bağı teorisi ile açıklanabilir. Daha önce belirtildiği gibi yüzeyler arasındaki gerçek temas alanı çok küçük olduğundan temas noktaları büyük bir basınç altında bulunmaktadır. Normal olarak yüzeylerde adsorbe edilmiş olan tabii veya yağ tabakaları basınç altında parçalanır; malzemelerin molekülleri doğrudan doğruya temasa gelir ve bölgesel kaynak bağları oluşur. Bu kaynak bağlarının kopması ile meydana gelen malzeme kaybı, adhesiv aşınmasını oluşturur (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Adhesiv aşınmanın oluşması a) bölgesel kaynak bağları, b) malzeme kaybının oluşması [Avner, S. H., (1974)]

Adhesiv aşınması, yüzeylerde bir takım çizikler şeklinde (Şekil 3.3a) veya tam tersine yüzeyleri parlatmış gibi görülmektedir; bu şekilde yüzeylerden bir tabaka kaldırılmaktadır (Şekil 3.3b). Teorik olarak bu tabaka Şekil 3.3c'de gösterildiği gibi olur. Aşınma bu tabakanın  $h_a$  kalınlığı veya aşınma alanı  $A_h$  ile gösterilirse aşınma hacmi  $V_h = h_a \cdot A_h$  ile ifade edilebilir .



Şekil 3.3 Adhesiv aşınma çeşitleri a) yüzeyde oluşan çizikler, b) parlatılmış yüzey görüntüsü, c) yüzeyden kalkan tabaka, d) rodajdan önce yüzey durumu, e) rodajdan sonra yüzey durumu [Avner, S. H., (1974)]

Adhesiv aşınması temas yüzeylerde meydana gelen basınç  $(P - F_n) / A$  ve kayma  $v$  tarafından önemli şekilde etkilenmektedir. Ayrıca aşınmanın zamana bağlı olarak geliştiği göz önünde tutulursa, analitik olarak adhesiv aşınması;

$$h_a = k_a p v t \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada;

$k_a$ : temasta bulunan malzeme çiftine bağlı olan ve deneylerle tayin edilen bir faktördür.

P : ortalama yüzey basıncı.

F: temas yüzeyine normal kuvvet,

A: temas yüzey alanı,

V: kayma hızıdır,

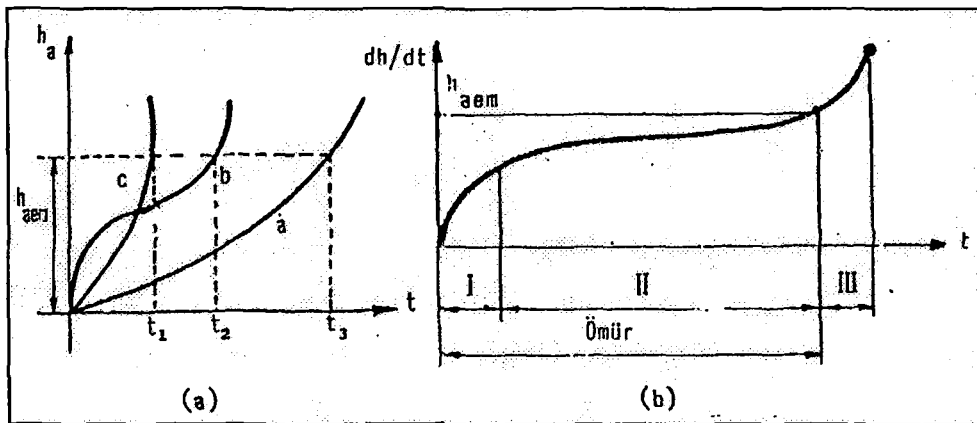
t: zamandır.

$$dh/dt = k_a p v \quad (3.2)$$

Aşınmanın yanı sıra pratikte aşınma hızı (veya şiddeti) da önem taşımaktadır. Belirli bir (pv) değeri için zamana bağlı olarak aşınma, Şekil 3.4a'da gösterildiği gibi malzemenin yüzey yapısına göre a, b ve c olarak belirtilen eğriler şeklinde gelişebilir. I. bölgede; yani parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Rodaj denilen bu safha parçaların birbirine alıştıırılma safhasıdır.

Bazen imalatın devamı olarak sayılan bu safhada pürüzlükler eşitlenir; Şekil 3.3'de rodajdan önce (d) ve rodajdan sonra (e) yüzey durumu gösterilmiştir. Rodaj parçanın daha sonraki aşınmasını büyük ölçüde etkiler.

II. bölgede esasen çalışma sırasındaki meydana gelen aşınmadır; burada aşınma hızı az ve sabittir. Ancak zaman geçtikçe parçalar arası boşluklar büyür, dinamik ve titreşimlerinin artması ve yağlama koşullarının kötüleşmesi sonucu aşınma gittikçe artar ve şiddetli denilen aşınmanın III. bölgesine girilir. Bu safhada parçaların kırılması tüm makinanın bozulması beklenebilir.



Şekil 3.4 Adhesiv aşınmanın zamanla gelişmesi [Avner, S. H., (1974)]

Elemana ait, çalışma şartlarına bağlı olarak müsaade edilen bir aşınma sınırı ( $h_{em}$ ) tayin edilirse, aşınma-zaman diyagramından elemanın normal çalışma zamanı veya ömrü hesaplanabilir. Bu zamandan sonra parça değiştirilmeli veya tamir edilmelidir.

Yukarıda açıklanan zamana bağlı aşınmanın yanı sıra yenme adını taşıyan ani aşınma tipide vardır; bu aşınmada yüzeyler arasında kuvvetli kaynak bağlan oluşur, parçalar birbirine kilitletir veya hareket ettiği halde yüzeyler tamamen bozulur. Genellikle yenme; eş çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan, basınç veya kayma hızlarının çok büyük ve yağlanmanın yetersiz olmasından kaynaklanır. Yenmede görülen şiddetli kaynama, o noktanın sıcaklığının artmasından ileri gelir. Sıcaklık arttıkça, yapışmış tabakanın düzeni bozulmaya başlar, belirli bir sıcaklıkta kopar ve metalik kaynak bağları oluşur. Bu sıcaklığa tabakanın kritik sıcaklığı da denilir.

Adezyon aşınmasının hesap bağıntıları;

$$P_m = F/A < P_{em} \quad \text{veya} \quad (P_m v) < (P_m v)_{em} \quad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada;

$P_m$  : ortalama yüzey basıncı.

$P_{em}$  : emniyet yüzey basıncı,

$(P_m v)_{em}$  değerleri aşınmaya maruz kalan makine elemanına bağlı olarak verilmektedir.

Rabinowicz ve Tabor aşınma ve yağlayıcılar üzerine bazı çalışmalar yapmışlar ve yüzeylerde yağlayıcı olmazsa yüzeye dik olan yükün artışına bağlı olarak, aşınmanın da lineer olarak arttığını bulmuşlardır. Yüzeye yağlayıcı uygulanması durumunda ise, malzeme transferinin azalması kadar, sürtünme kat sayısının da düşürüldüğünü gözlemlemişlerdir. Skorski çoğu metaller için yapışma sabitinin sürtünme katsayısı ile ilişkili olduğunu göstermiştir ve malzeme transferindeki azalmanın şüphesiz olarak, yapışmanın boyut ve sayısındaki azalmanın bir sonucu olduğunu göstermiştir. Bu çalışmalar adhesiv aşınmanın bazı genel özelliklerinin çıkartılmasında faydalı olmuştur. Bunlar;

- Aşınma miktarı normal yükü orantılıdır
- Aşınma miktarı kayına mesafesiyle orantılıdır
- Aşınma miktarı aşınan yüzeyin sertliği ile orantılıdır.

Bu çalışmalar, gösterilen parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak, bir çok aşınma probleminin çözülebileceğini göstermektedir. Metalografik çalışmalar sonucunda belirlenen başlıca özelliklerden biri de, malzeme taşınımının yumuşak metal yüzeyinden sert olan metal yüzeyine doğru olmasıdır.

Adhesiv aşınmanın etkisini azaltmak için düşünülen bir çok faktör vardır. Bunlar içerisinde yağlayıcı uygulaması tatmin edicidir ve malzeme seçiminde en çok çalışılan konular arasındadır. Araştırmalar ve deneyler sonucunda adhesif aşınmanın azaltılmasında bazı uygulamaların faydalı olduğu görülmüştür. Bunlar;

- Malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olmalıdır. Roach, Goadzeit, ve Hunnicut adhesif yapışmada alaşımlamanın çok etkili bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.
- Malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması gerekmektedir. Genellikle sert metaller çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler. Rabinowicz silisyumun çok iyi bir şekilde kayma sistemine sahip olarak yüzey sarma etkisinin olduğunu işaret etmiştir. Skorski, metallerin yapışmasını etkileyen faktörleri özetlemiştir. Bu faktörler Çizelge 3.1’de görülmektedir.
- Adhesiv aşınması, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu bakımdan malzeme çiftinin birisi sert (örneğin çelik) diğeri yumuşak, (örneğin bronz) veya kalaya dayanan yatak malzemesi olması şeklinde seçilmelidir.
- Yağlanmanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adezyon aşınmasını önlemektedir. Yüksek hız ve basınç altındaki yüzeyler arasına katı (aditifli) bir yağ konulursa, aşınma ve bilhassa yenme önlenir. Buna göre adezyon aşınmasını önlemek için iyi bir yağlama yöntemi sağlanmalı ve uygun yağlayıcı maddeler ile katıklar kullanılmalıdır. Yenmeyi önleyen yağlara, yüksek basınçlı yağlar denilmektedir.

Çizelge 3.1 Metallerin adhesyonunu etkileyen faktörler [Avner, S. H., (1974)]

Özellik	Tür veya Büyüklük	Adhesyon Katsayısı
1 . Yüzeğe yardımcı bir madde sürmek	Yüksek	Düşük
2. Kristal sistemi	Kübik Hegzagonal	Düşük
3. Deformasyon sertleşmesi katsayısı	Yüksek	Yüksek
4. Saflık	Yüksek	Düşük
5. Sertlik	Yüksek	Düşük
6. Elastik modül	Yüksek	Düşük
7. Ergime sıcaklığı	Yüksek	Düşük
8. Yeniden kristalleşme sıcaklığı	Yüksek	Düşük
9. Atomik yarıçap	Düşük	Düşük
10. Yüzeğe enerjisi	Yüksek	Yüksek

### 3.3.2 Abrasiv Aşınma

Çok hızlı bir şekilde gelişen, etkisini anında belli eden ve çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve de sistemin hasarına sebep olacak şekilde gelişen bir aşınma türüdür.

Abrasiv aşınma iki yüzeğden birinin çok sert ve yüzeğyin pürüzlü olduğı şartlarda oluşun bir aşınmadır. Benzer davranış çok sert partiküllerin daha yumuşak bir yüzeğe batmasıyla da görölmektedir. Etki, yumuşak malzemenin üzerinde gelişen belirgin çizikler şeklinde ortaya çıkmaktadır. Aşınma etkisi sert partikülün, yumuşak malzemenin yüzeğyinden parça kopartarak uzaklaştırmasıyla olur ve parçanın kopması sırasında yapışmanın olmadığı bir sistemle gerçekleşmektedir. Yüzeğyden malzeme kaybının çok hızlı geliştiğı bir aşınma mekanizmasıdır.

Genel olarak abrasiv aşınma türleri üç ana grupta toplanmaktadır. Bunlar; oymalı sürtünme aşınması, öğütmeli sürtünme aşınması ve erozyondur. Bir çok karakteristik açıdan bu aşınma türlerini birbirlerine benzemelerine rağmen, tek tek incelendikleri zaman, birbirlerinden önemli farklılıklar sergiledikleri görülür.

Oymalı sürtünme aşınması, kütlesele bir şekilde yüzeğyin deformasyonu sonucunda oluşun bir

aşınma türüdür, aşırı yüklemeler etkisi ile meydana gelen oymalı sürtünme aşınmasına örnek olarak, ağır koşullar altında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınmalar verilebilir.

Öğütmeli sürtünme aşınması, iki yüzeyin birbiri üzerinde hareket etmesi sonucunda ortaya çıkar ve ara yüzeyde abrazyona dayalı parçacıklar bulunmaktadır. Bu ara yüzeyde yer alan taneler, ya bir yüzeyden aşınarak gelir yada her iki yüzeyin birlikte aşınması sonucunda ortaya çıkar. Abrasiv aşınma, keskin köşelere sahip olan abrasiv tanelerin yüzeye yük uygulanması durumunda parçanın yüzeyini kazıyarak veya kaldırarak parçalar koparmasıyla hasara neden olmaktadır. Örnek olarak bilyalı değirmenler gösterilebilir.

Erosiv aşınma ise, aşındırıcı tozların askıda durduğu sıvı veya hava gibi akışkan bir ortam vasıtasıyla malzeme yüzeyine çarpma etkisi ile gerçekleşmektedir. Her bir temas malzeme yüzeyinden küçük bir parçanın kaybına neden olmaktadır. Normal şartlar altında aşınma hızı düşüktür. Ancak yüksek sıcaklıklarda, malzemenin akma dayanımı düşmekte ve yüksek akış hızlarında eroziv aşınma, hız kazanmaktadır. Bazı şartlarda, malzemenin yüzeyinin her tarafını korozyon ürünleri kaplayabilmektedir.

Buna erozyonun korozyon etkisi de denilmektedir. Örnek olarak gemi pervaneleri verilebilir.

Çizelge 3.2'de tipik abrasiv aşınma uygulamaları ve aşınma miktarları verilmektedir. Burada görülmekte olan önemli bir durum, oymalı sürtünme aşınmasının son derece yüksek aşınma hızlarına sahip olduğudur. Diğerleri, eğer yüksek uygulama hızlarına sahip değilseler, örneğin kum çarpması gibi bu kadar yüksek aşınma hızlarına sahip olmazlar.

Çizelge 3.2 Çeşitli çelik malzemelerde Abrasiv aşınma proseslerinin içerdiği tipik aşınma hızları [Avner, S. H., (1974)]

Mekanizma	Aşınma miktarı (mg/m)
1.Oymalı sürtünme aşınmasında a. Darbeyle toz üretiminde kullanılan çelikler b. İş makinelerinin dişlileri c. Kaba cevher kazıyıcılarının aşındırıcı bıçakları d. Top milli kepçe ağızları e. Silis cevherlerinin kırılması için kırıcı bantlar	5-1000 5-500 4-15 2-20 0,1-1,0
2. Öğütmeli sürtünme aşınmasında a. Silis cevherlerinde kullanılan mil bantları b. Silis cevherlerinin aşındırma bilyelerinde c. Çimento çamurundaki öğütücü bilyeler d. Çimento klinkerlerinde kullanılan öğütücü bilyeler	0,5-5 0,15-0,45 0,05-0,15 0,005- 0,015
3. Erozyon aşınmasında a. Kum püskürtme nozulları b. Kum taşıma bantları c. Aşındırıcı mineral çözeltilerde kullanılan vanalar d. Abrasiv mineral çözeltilerinde kullanılan pervaneler e. Vida tipi sınırlandırıcıların pabuçları	100-1000 50-250 0,1-5 0,05-1 0,05-0,2

Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrasiv aşınmaya tabii tutulabilmesi için, ikinci malzemedен çok daha yumuşak olması gerekir. Bu sebeple abrasiv aşınmayı minimuma indirmek için aşınmaya uğrayan malzemenin diğer malzemeye göre daha sert olması istenir. Bu özellik değişik metotlarla sağlanabilir. Bunlar;

- Alaşımlamayla malzemelerin sertlikleri iyi bir şekilde artırılabilir.
- Isıl işlem uygulamaları yine malzemelerin sertliklerini önemli ölçüde değiştirebilir.
- Malzemelerin yüzeylerine dışarıdan müdahale ederek sert yüzey tabakası oluşturabilir. Buna örnek olarak anodizasyon, elektro-kaplama, alev püskürtme, nitrasyon, plazma sprey, borlama ve bunun gibi birçok diğer uygulamalar örnek olarak verilebilir. Bir çok yüzey işlemleri aşınmayı azaltmak ve sınırlandırmak amacıyla uygulanmaktadır.

### 3.3.3 Oyuklanma ve Kalkma

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, kam kam mekanizmaları gibi makine elemanlarında, yani yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde ortaya çıkar ve esas olarak bir malzeme yorulması sonucudur. Bu elemanlarda temas alanları küçük olduğundan yüzeylerde Hertz yüzey basınçları meydana gelir. Bu çeşit basınçların etkisi altında yüzeylerin hemen altında kayma gerilmeleri oluşur. Değişken zorlanma nedeniyle malzemenin yüzeyinde bir yorulma olayı başlar. Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına da bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Zamanla bu boşluklar yüzeye doğru hareket etmekte, büyümekte ve yüzeyde küçük çukurcuklar meydana getirmektedir. Bu durumda yüzeyler arasındaki yağın etkisi de önemlidir. Yüksek basınç altındaki yağın çatlaklara girmesi, bunların büyümesinde önemli rol oynayabilir. Pitting aşınmasının diğer bir açıklama tarzında ise, çukurcukların plastik deformasyonlar nedeniyle doğrudan doğruya temas yüzeyinde meydana geldiği ve buradan malzemenin iç kısımlarına da yayıldığı ileri sürülmektedir.

Oyuklanma bir aşınma mekanizması olarak düşünülmektedir ve metal yüzeyinin yorulması sonucu ortaya çıkan bir hasardır. Oldukça düşük gerilmeler altında yapılan hızlı uygulamalarda metal yüzeyinde oyuklara benzer bir çok boşluk meydana gelebilir.

Yüzeyin yorulma kusurunun karakteristiği normal yorulmadan bazı farklılıklar içermektedir. Birinci farklılık, yüzey yorulması kütleli yorulma dayanım sınırını göstermez.

İki türlü Pitting vardır. İlkel pitting'te çukurcuklar çok küçük olup büyümmezler ve yüzeye yayılmazlar. Tahripkar pitting'te ise, çukurcuklar zamanla büyür ve yayılırlar.

Birinci tipteki pitting, elamanın normal çalışmasını genellikle engellemez. Tahripkar pitting, elamanı işe yaramaz hale getirir.

Çatlaklar yüzeyin hemen altında, maksimum Hertz gerilmesine ulaşıldığı zaman, yüzeyin altında bulunan bir inklüzyon köşesiyle birleşerek gerçekleşmektedir. Son teknolojik gelişmelere bağlı olarak çok temiz malzemelerin üretilmesiyle malzemedeki inklüzyon sayısı düşürülebilmektedir. Çalışmalar inklüzyon dokusunun, segregasyonun, bant teşekkülünün ve kalıntı ostenit miktarının oyuklanmayı etkilediğini göstermiştir.

Deney ve tecrübe göstermiştir ki, pitting oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemi rol oynar. Doğal sertlikteki malzemelerde, örneğin çeliklerde, pitting meydana gelir; ancak çeliğin yüzeyi sertleştirilirse pitting meydana gelmez. Bu aşınma türü yumuşak malzemelerde

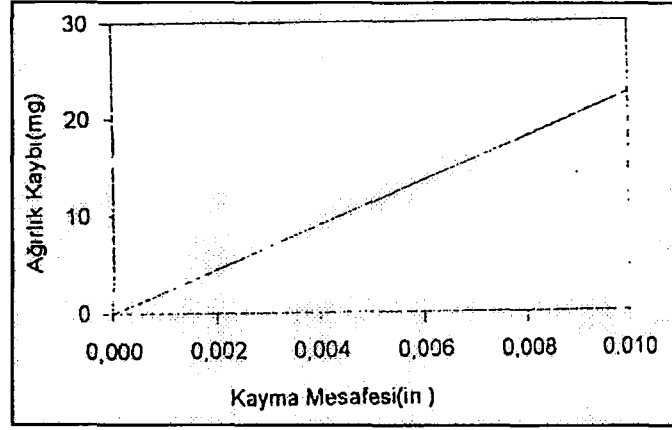
görülmemektedir. Yorulma aşamasını önlemek için en önemli tedbir temas yüzeylerinin sertleştirilmesidir.

Yuvarlanma veya kayma şeklinde yüzey hareketinin yüzeyde oluşacak çatlığın yüzeyde mi, yoksa yüzeyin hemen altında mı başlayacağı hakkında bize bilgi vermektedir. Yalnızca yuvarlanma, yüzeyin hemen altında maksimum kayma gerilmesi ortaya çıkarmaktadır. Buna ilaveten yüzeye kayma işleminin uygulanması yüzeyde maksimum kayma gerilmesi oluşumuna yol açmaktadır.

### 3.3.4 Mekanik Korozyon Aşınması

Kazıma olarak ta adlandırılan mekanik korozyon aşınması, korozyonla desteklenen aşınma türleri arasında çok yaygın olan bir aşınma türüdür. Yük altında birbirine temas eden iki yüzey arasında hafif titreşimli hareket sebebiyle oluşmaktadır ve oksit kalıntıları tarafından çevrelenen yüzeyde oyuklarına gibi kendi kendini geliştirir. İki metal yüzey birbirine temas ettiği zaman, yük altında yüzeyde bulunan düzensizlikler sebebiyle yapışma oluşur. Bundan sonra yüzeyde bu yapışma noktalarından koparak kaynaklanmış alanlarda aşınma ürünü kırıntılar yer alır. Bu parçalar çok küçüktür ve oksitlenmek için gerekli olan ısıya ulaşmış durumdadır. Bu oksit kalıntıları küçük hareketlerin oluşması sebebiyle uzaklaştırılmazlar. Bu parçaların abrasiv karakterli olmaları sebebiyle, malzeme oldukça etkili aşınma hızına ulaşmaktadır. Örnek olarak, gemi ile uzun mesafe giden makinelerde görülen aşınma hasarı. Yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da elde edilir. Değişken yük altında bu sert tabaka kırılır ve sert parçacıklar düşerek aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder. Henüz kesin olarak bilinmemekle beraber, hava rutubetinin de bu olay üzerinde etkisi önemlidir.

Relatif hareketin oldukça küçük boyutlu partiküllerin oluşmasına sebep olacak şekilde gerçekleşmesi gerekir.  $10^{-6}$ cm'lik bir yer değiştirme bu hasara yol açabilir. Ancak, uygulamada bir inç in birkaç binde biri kadar bir titreşimle oluştuğu görülmüştür. Şekil 3.5' te yumuşak çelikte toplam ağırlık kaybının yer değiştirme mesafesi ile değişimi görülmektedir.



Şekil 3.5 Kazıma etkisiyle kaynaklanan toplam ağırlık kaybında, toplam yer değiştirme miktarının etkisi[Avner, S. H., (1974)]

### 3.4 Aşınma Miktarını Belirleme Metodları

Endüstride kullanılan alet ve ekipmanlarda aranılan özelliklerden bir tanesi de servis ömürleridir. Makine parçalarının çabuk aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyetini artırdığı gibi, onarım için geçen süre de üretimin önemli ölçüde azalmasına neden olmaktadır. Bu sebeple makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmaktadır.

Bu malzemelerin tespiti için de bir çok laboratuvar deneylerinin yapılması gereklidir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde, ana malzemenin bir modeli ile çalışır. Bu model, basit geometrik şekil 'e sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde yapılabilir

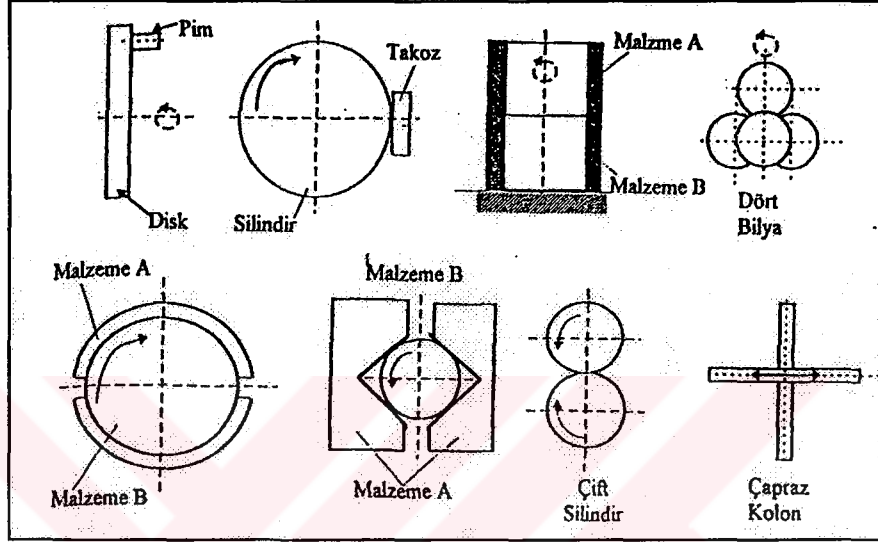
Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

- Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemelerinin adhesiv (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler (Şekil 3.6).
- Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler (Şekil 3.7).

ASLE (American Society of Lubrication Engineers, 1976) tarafından yüz kadar deney sistemi belirtilmiştir. Bunlardan en çok kullanılanları Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de görülmektedir. Aşınma farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyoizotop metodları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

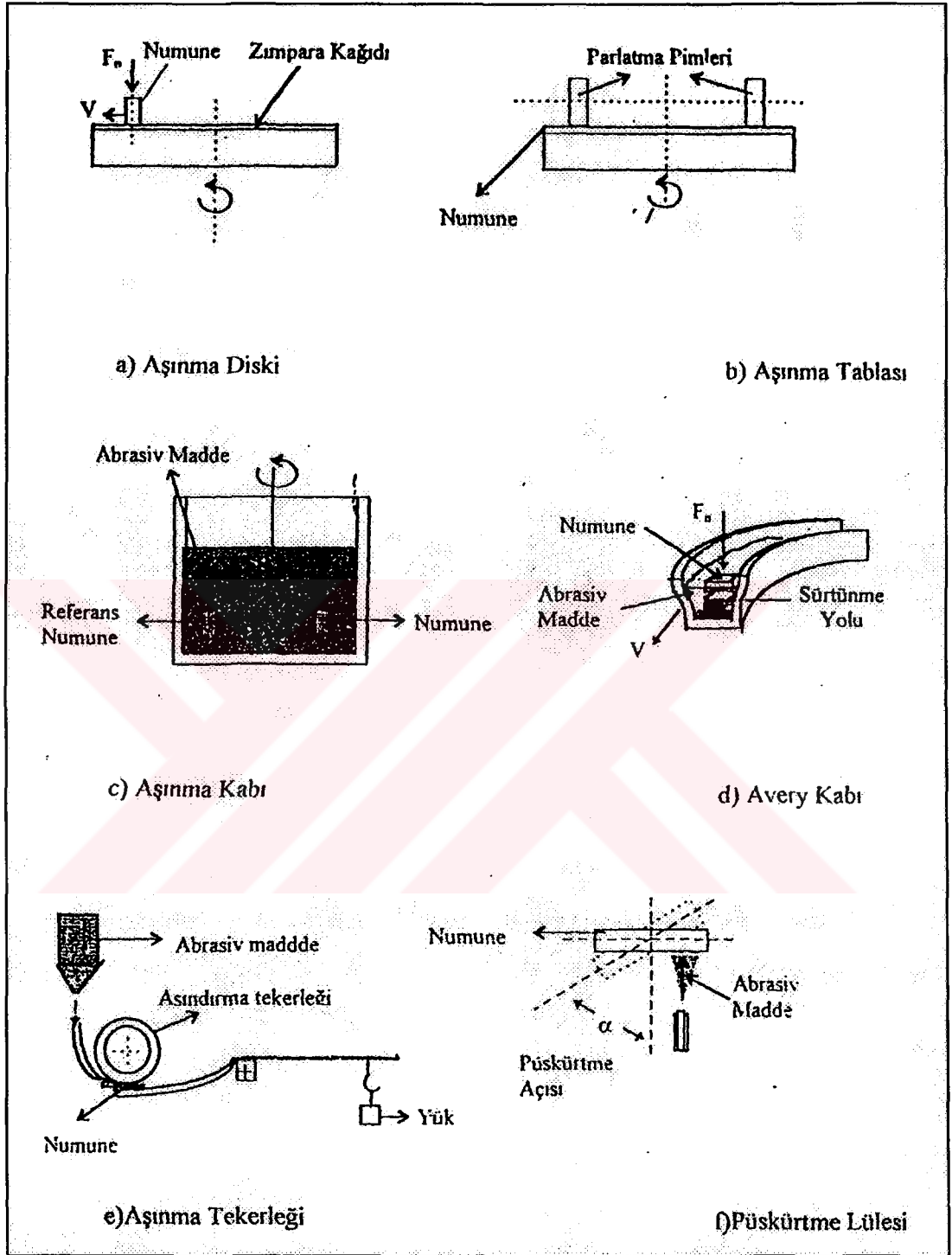
### 3.4.1 Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır.



Şekil 3.6 Yağlamalı veya yağlamasız adhesiv (metal-metal) aşınma deney yöntemleri  
[Avner, S. H., (1974)]

Ağırlık kaybının ölçülmesi  $10^{-3}$  veya  $10^{-4}$  gr. hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre, birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı, (gr/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı, hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybindan hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybindan gidilerek de bulunabilir.



ŞekiI 3.7 Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler [Avner, S. H., (1974)]

Bu tanımlara göre, en çok kullanılan ağırlık kaybı ölçme metodunda kullanılan bağıntılar şunlardır.

$$W_a = \frac{\Delta G}{d.M.S.} (\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (3.4)$$

Burada;

$W_a$ : Aşınma oranı ( $\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$ ),

$\Delta G$ : Ağırlık kaybı (mg),

$M$ : Yükleme ağırlığı (N),

$S$ : Aşınma yolu (m),

$d$ : Yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

olarak verilmiştir. Aşınma ( $W_a$ ) ters değeri de aşınma direnci ( $W_r$ ) olarak gösterilir.

$$W_r = \frac{1}{W_a} \text{ (N.m/mm}^{-3}\text{)} \quad (3.5)$$

Başka bir bağıntı olarak da, bir kilometre kayma yoluna kabul eden yükseklik kaybı bağıntısı vardır ki, genellikle iki elemanlı abrasiv aşınmanın hesaplanmasında kullanılır.

$$W_s = \frac{10^4 \Delta G}{F.d.s} \text{ (}\mu\text{/km)} \quad (3.6)$$

Burada;

$V_s$ : Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı ( $\mu\text{m}$ ),

$\Delta G$ : Ağırlık kaybı (mg),

$F$ : Aşınma yüzeyi ( $\text{cm}^2$ ),

$d$ : Yoğunluk ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ),

$s$ : Kayma yolu (km)

olarak alınır. Deney malzemesi yükseklik kaybının, mukayese malzemesinin (örneğin Fe 37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma oranı sayısını ( $W_s$ ) verir.

$$W_s = V_g(\text{deney numunesi}) / V_s \text{ (Fe 37 çeliği)}$$

Bu oranı sayısının ters değende bağlı aşınma direnci  $R$ , olarak kullanılır.

$$R = \frac{1}{V_s} \quad (3.7)$$

Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, genellikle DIN 50320 standardında verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır.

### 3.4.2 Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeri ile karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek, hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır, kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla  $\pm 1\mu\text{m}$  duyarlılıkta ölçülmelidir.

### 3.4.3 İz Değişimi Metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile, geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca bu iz karakteristیک bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyanın bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir.

### 3.4.4 Radyoizotop Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya  $\alpha$ -parçacıklarıyla bombardıman edilerek, radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetlerle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi yöntemin avantajıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle ancak özel amaçlarla kullanılabilir. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metod değildir.

#### 4. ÇELİK MALZEMELERİN KOROZYONU

Geleneksel anlamda korozyon metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektro kimyasal reaksiyonları sonucu bozunmalarını tanımlamak için kullandığımız deyimdir. Ancak yeni bulgular metal olmayan malzemelerin de çevresel koşullardan benzer biçimde etkilendiklerini ortaya koymaktadır. Örneğin, metal ve alaşımlarının gerilimli korozyonla bozunmalarını tariflemek için kullanılan yöntemler cam, seramik malzemeler, polimerler ve geleceğin yapı malzemesi olarak kabul edilen bileşik malzemelere başarı ile uygulanabilmektedir. Bu nedenle, korozyon deyimini yapı malzemesi niteliği olan tüm malzemelerin çevrenin etkisi ile bozunmalarını kapsar biçimde kullanılabilir. Dilimizde kesinlikle yerleşmemiş olmakla birlikte paslanma deyimini demir ve demir cinsinden olan çelik ve dökme demir malzemelerin korozyonu, pas deyimini de aynı tür malzemelerden kaynaklanan korozyon ürünü anlamında kullanabiliriz.

Yukarıda verilen tarife bakılınca oluşumunu sağlayan reaksiyonun türüne göre kimyasal ve elektro kimyasal korozyon olmak üzere iki tür korozyon olayında söz etmek gerekecektir. Kimyasal korozyon metal ve alaşımların gaz ortamlar içindeki oksitlenmesidir (kuru korozyon). Ancak çevremizi dolduran nemli havanın sonuçladığı korozyon olayı bu tarifin dışındadır. Metal ve alaşımların sulu ortamlar içinde bozunmaları ise elektro kimyasal korozyon veya diğer bir deyişle ıslak korozyon olarak adlandırılır. Gerçekte her iki korozyon türünün de elektro kimyasal mekanizma ile oluştuğu bilinmektedir. Ancak temeldeki farksızlığa karşın kimyasal ve elektro kimyasal korozyon ayrımı yerleşmiş bulunmaktadır.

##### 4.1 Çelik Malzemelerin Korozyonu

Teknolojik öneme sahip metallerin, birkaç istisna dışında, hemen hemen tümü tabiatta “bileşik” halinde bulunur. Başka bir deyişle metallerin tabiatın etkisine milyonlarca yıl dayanabilen şekli “bileşik” halidir. Bileşiklerden “metal” veya “alaşımların” üretimi ancak ilave “sermaye - malzeme - enerji - emek ve bilgi” sarfı ile mümkündür. Üretilen metal ve alaşımların ise tekrar kararlı halleri olan “bileşik” haline dönme eğilimleri yüksektir. Bunun sonucu metalik malzemeler, içinde buldukları ortamın elamanları ile reaksiyona girerek önce iyonik hale ve oradan da ortamdaki başka elementlerle “bileşik” haline dönmeğe çalışırlar, yani kimyasal değişime uğrarlar ve bozunurlar. Sonuçta metal veya alaşımın bazı özellikleri (kimyasal - fiziksel - mekanik vb..) istenmeyen değişikliklere yani “zarara” uğrar.

Örneğin demir, yüzeyindeki su filmi içinde çözülmüş havanın oksijeni ile tepkiyerek çözünür. Meydana gelen demir iyonları ise su ve oksijenin etkisiyle demir hidroksiti oluştururlar :



Demir hidroksidin tekrar oksitlenmesi (üç değerlikli demire) ise bildiğimiz kahverengi pası, hidrate demir oksidi, verir:  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ . Eğer oksijen, yani oksitleyici madde sınırlı miktarda ise siyah magnetit,  $Fe_3O_4$ , oluşur.

Korozyon, genelde, metal için zararlı olarak nitelendirilebilecek bir değişikliktir. Çinko kaplı çelik saçlarda çinko kaplamanın korozyonu ile alttaki çelik saç korunur; bu olay bir metalin korozyonu ile bazen başka bir metali korozyondan nasıl koruyabileceğimize örnektir.

Korozyon bir yüzey olayıdır. Yani metal ile ortamın temas yeri olan ara yüzeyde oluşur. Metal ile ortamın temas etmediği bölgelerde meydana gelen değişiklikler korozyon olarak nitelendirilemez. Fakat metal - ortam ara yüzeyinde oluşan bazı korozyon ürünleri metalik bünyeye yayınarak orada metal - ortam ara yüzeyinden uzak bir bölgede tahribata örneğin kırılmaya neden olabilirler. Buna örnek olarak asit bir çözeltiye daldırılmış yüksek karbonlu bir çelik yüzeyinde hidrojen iyonunun redüklenmesi ile açığa çıkan hidrojen atomunun metal içine yayınması ve metal içinde birleşip hidrojen gazı oluşturarak metali çatlatması (hidrojen kırılabilirliği) gösterilebilir.

Korozyon “metal ile ortam” arasında “ara yüzey” de oluşan bir olay olduğuna göre korozyondan korunma yöntemleri de:

- Metali ortama daha dayanıklı kılmak
- Ortamın metal üzerindeki koroziv etkisini azaltmak veya değiştirmek
- Ara yüzeye müdahale ederek metal-ortam ilişkisini kesmek, metali yalıtkan bir malzeme ile kaplayarak değiştirmek, metali başka metallerle kaplayarak veya yüzey özelliğini değiştirerek
- Ara yüzeyin elektro kimyasal özelliğini değiştirmek; katodik veya anotik koruma olarak gruplanabilir.

Korozyon metalik malzemelerin uğradığı bir hasar, bir zarardır. Ekonomik açıdan her ülkenin büyük kayıplara uğramasına neden olur. Bunun dışında korozyon nedeni ile uğranılan zararları kısaca şu şekilde özetleyebiliriz:

- Korozyon her şeyden önce insan hayatını ve sağlığını zarara sokan bir olaydır.

Bilindiği gibi bakırın korozyon ürünlerinin insan sağlığı için çok zararlı olması nedeni ile bakır kaplar yüzyıllarca kalayla kaplanarak kullanılmışlardır. Uçaklarda bazı önemli parçaların korozyon nedeni ile kırılması (korozyonlu yorulma, gerilimli korozyon çatlaması gibi nedenlerle ) uçağın düşmesine ve can kaybına neden olabilir.

- Korozyon dünyadaki sınırlı metal kaynaklarının en önemli israf nedenidir.

Her yıl üretilen metalik malzemelerin yıl sonunda yaklaşık 1/3' ü korozyon nedeni ile kullanılmaz hale gelir. Devre dışı kalan metalik malzemeler hurda olarak kısmen değerlendirilebilirse de 1/3'ü bir daha geri kazanılamamak üzere kaybedilir, yani tabiata geri döner. Bu ise yıllık metalik malzeme üretiminin 1/10'unun, korozyon nedeni ile, bir daha geri kazanılamamak koşulu ile kaybı demektir.

- Korozyon nedeni ile "malzeme" kaybı yanında "sermaye - emek - enerji ve bilgi" de kaybolur.

Metalik malzemelerin üretimi sermaye, emek, enerji ve bilgi gerektirir. Korozyon nedeni ile kullanılamaz hale gelmeleri bu nedenle ilave kayıplara neden olur.

- Korozyon ortamı kirletir ve ayrıca kirli ortam metal korozyonunu hızlandırır.

Metalik malzemelerin tabiata geri dönen kısmı ortamı kirletir. Kirli ortam ise korozyonu hızlandırır. Örneğin, metalik safsızlıklarla kirli iletkenlik ve dolayısı ile korozyon artar. Bakır iyonu içeren sular dökme demir veya alüminyum yüzeyle temas edince bakır metalik hale döner ve metali (dökme demir veya alüminyum) çözer; ayrıca açığa çıktığı bölgelerde korozyonu hızlandırır, delikler oyuklar oluşumuna neden olur.

Metal kaybı yeni metal üretimini ve dolayısı ile ilave çevre kirlenmesine neden olarak atmosferin ve suyun kirliliğini artırır. Kirli ortamda ise metaller daha hızla korozyona uğrarlar.

- Korozyon olarak nitelendirilebilecek çözünmeler teknolojinin gelişimi ile daha aşağı sınırlara çekilmektedir.

Örneğin, ilaç endüstrisi veya atom santrallerinde korozyon olarak nitelenebilecek metal çözünmesi ile atmosferik koşullarda bir çelik yapının korozyonu arasında çok büyük farklar vardır. Atmosferik koşullarda milimetrenin kesirli düzeyindeki korozyon nedeni ile uğranılan kalınlık azalmaları normal kabul edilirken bir atom santralında soğutma suyunun içinden geçtiği borularda korozyonun pratik olarak sıfıra yakın olması istenir.

## 4.2 Korozyon Çeşitleri

Korozyonun meydana geliş şekli gözönüne bulundurulduğunda, korozyon 12 gruba ayrılabilir.

### 4.2.1 Homojen Dağılımlı Korozyon

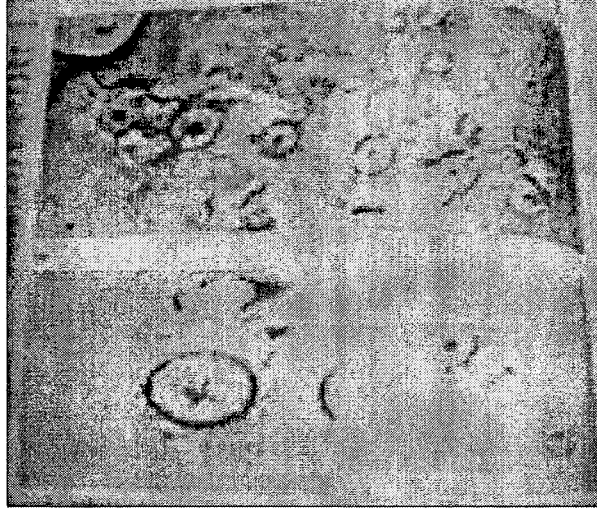
En yaygın korozyon türüdür. Uzun süreler için hesaplanan ortalama korozyon hızlarının her yerde aynı olduğu kabul edilebilir. Eşit dağılımın başlıca kaynağı anodik ve katodik çevrelerin sürekli olarak yer değiştirmeleridir. Homojen dağılımlı korozyonun yararlı bir işlem olarak değerlendirildiği hallerde vardır. Örneğin, sıcak haddeleme sonucu çeliğin yüzeyini kaplayan oksit tabakalarının uzaklaştırılmasında yararlandığımız yol bu tür korozyon koşulunun gerçekleştirildiği kimyasal işlemlerdir.

Homojen dağılımlı korozyonun yol açtığı metal kaybı diğer korozyon türlerine oranla yüksektir. Buna karşın en az korkulan korozyon türü olduğunu belirtmek gerekir. Çünkü homojen dağılımlı korozyonun hızı basit laboratuvar deneyleri ile saptanabilir. Böylece saldırgan ortamlara terk edilen parça ve yapıların ömrüne ilişkin tutarlı tahminlere ulaşmak mümkün olur.

### 4.2.2 Galvanik Korozyon

Birbiriyle temas halinde olan farklı türden metal ve alaşımların aynı ortama terk edilmesi halinde karşılaştığımız korozyon olayıdır. Bu tür galvanik eşlemeler çoğunlukla arzumuz dışında ve bir tasarım veya imalat gereksinimi olarak karşımıza çıkarlar. Örneğin otomobil motorunun soğutma sisteminde aynı türden malzemeler soğutucu ortamla temas halindedirler. İlke olarak aktif olan metallerin korozyonu yavaşlayacak veya tamamen önlenecektir. Demirin korozyon hızı eşlendiği metalin soylaşmasına paralel olarak artmaktadır.

Galvanik dizide birbirlerinden uzak metal veya alaşımların eşlenmesi olanaklar ölçüsünde önlenmeye çalışılmalıdır. Bu tür eşlemeler kaçınılmaz bir zorunluluk olarak ortaya çıkarsa aynı türden metaller yalıtkan conta veya ara parçaları kullanarak izole edilmelidir. Eşlemede vidalı ve perçinli bağlantılardan kaçınılmalı, kaynak ve lehim türünden bağlantılara öncelik tanınmalıdır.



Şekil 4.1 St37-2 çeliğin galvanik korozyon mikro yapısı [www24.brinkster.com]

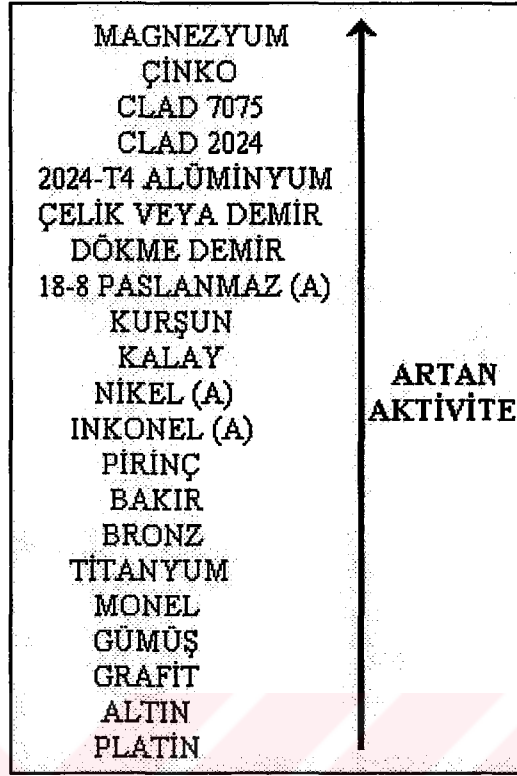
Eşlenen metallere yüzey alanı küçük olanların diğerlerine kıyasla soy olanlarına dikkat edilmelidir.

Eşlenen metallere daha aktif bir metalin ilştirilmesi ile galvanik korozyonun etkenliği sınırlanır ve hatta tamamen önenebilir. Bu önlemin uygulanması halinde korozyon, amaçlı olarak sisteme eklenen metal üzerinde yoğunlaşır ve sistemin daha soy metallere oluşan kısımları korozyona karşı korunur. Sisteme ilave edilen aktif metal, yani anot belirli zaman aralıklarında değiştirilerek önlemin sürekliliği sağlanır.

Ortamdan ayrışarak sistemin belirli yerlerinde çökelen metaller olumsuz bir eşlemeye olanak sağlayabilir. Bu tür ayrışımın zararsız hale getirilmesi için gerekli tasarım önlemleri üzerinde durulmalıdır.

Korozyon hızlarının yüksek olmadığı ve sürekli bakım ve yenilemenin sağlanabildiği koşullarda yüzey kaplamaları yararlı olabilir. Ayrıca ortamın saldırganlığını sınırlayıcı önlemlere de başvurulabilir.

Sistemin korozyona uğrayan kısımları diğer kısımlarına oranla daha kalın olmalıdır. Gereğinde bu kısımların kolay değiştirilmesine olanak sağlayıcı tasarım üzerinde durulmalıdır.



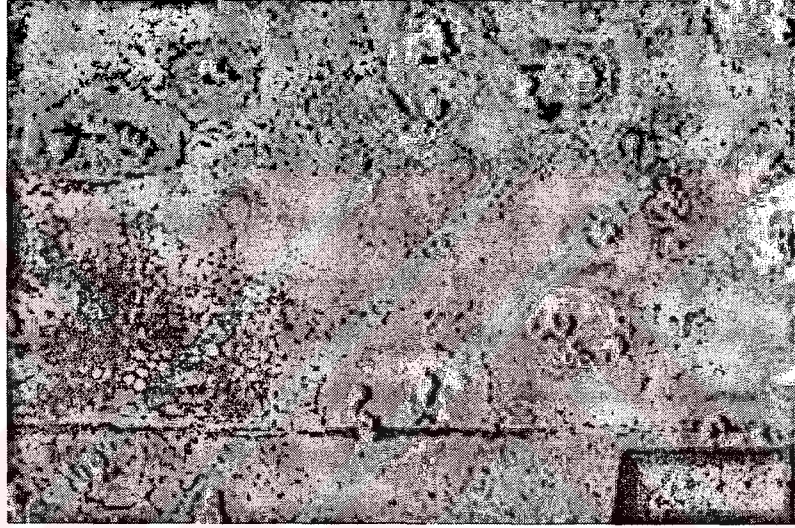
Şekil 4.2 Galvanik seri [Savaşkan, T. (1999)]

Çizelge 4.1 Farklı metallerle eşleme sonucu demirin korozyon hızında değişmeler (ortam: %1 NaCl) [Savaşkan, T. (1999)]

Eşlenen metal	Ağırlık kaybı, mg / hafta
Magnezyum	0,0
Çinko	0,4
Kadmiyum	0,4
Alüminyum	9,8
Antimon	153,1
Wolfram	176,0
Kurşun	183,2
Kalay	171,1
Nikel	181,1
Bakır	183,1

### 4.2.3 Çukurcuk (oyuklu) Korozyonu

Korozyon olayının çok dar bölgeler üzerinde yoğunlaşması sonucu ortaya çıkan korozyon türüdür. Metal yüzeyinde oluşan çok sayıda çukurcuklar genellikle bir karıncalanma görünümü verir. Çukurcukların çapı, derinliği ve sıklığı malzeme ve ortama bağlı olarak değişir. Toplam metal kaybı homojen dağılımlı korozyonun aksine çok küçüktür. Ancak parçalar kısa zamanda delinerek kullanılmaz hale gelirler. Ayrıca, çukurcuk diplerinde oluşan mekanik gerilim yoğunlaşması dayanç kaybı yanında korozyonlu yorulma ve gerilimli korozyon olarak tanınan çatlama olaylarını başlatabilir. Bozucu etkisi, yaygınlığı ve kontrolündeki güçlükler nedeni ile çukurcuk korozyonu en korkulan korozyon türlerinin başında gelir.



Şekil 4.3 C22 çeliğinin çukurcuk (oyuklu) korozyonu mikro yapısı [www24.brinkster.com]

Çukurcuk korozyonunu birçok metal ve alaşımlarda görmek mümkündür. Çukurcuk korozyonu genellikle klor ve brom iyonları içeren nötr ortamlarda oluşur. NaCl ve oksijen bakımından hayli zengin olan deniz suyu çukurcuk korozyonuna yol açan etken bir ortamdır.

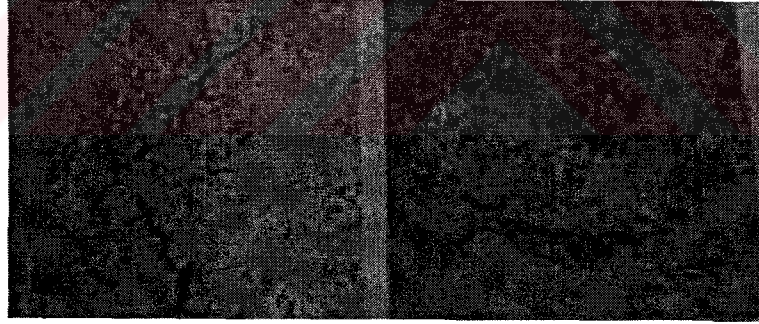
PH - değeri ortamın çukurcuk korozyonu bakımından etkenliğini belirleyen önemli bir göstergesidir. Çukurcuk korozyonu öncelikle nötr ortamlarda oluşur. PH - değeri düşürülünce yerini genel korozyona (homojen dağılımlı korozyon) terk eder.

Oksitleyici, yani indirgenebilen metal iyonlarının klorürlerini içeren ortamlar çukurcuk korozyonu yönünden en tehlikeli olanlardır.  $FeCl_3$ ,  $CuCl_2$  ve  $HgCl_2$  bunların akla gelen ilk örnekleridir. Bu ortamlar da katodik olay klorürlerden kaynaklanan metal iyonlarının indirgenmesidir. Oksijene gerek olmadığı gibi, oksijen miktarının çukurcuk korozyonuna etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Çukurcuk korozyonunun belirgin özelliklerinden biri de çok küçük çözelti miktarları ile oluşmasıdır. Yani korozyonun yoğunlaştığı çukurcuk dipleri ile ortamın büyük hacmi arasında bir tıkanıklığın gerekliliğinden söz edilebilir. Bu tıkanıklığı giderici etkiler, örneğin durgun haldeki bir ortamın akış haline dönüştürülmesi, çukurcuk korozyonu eğilimini önemli ölçüde azaltabilir. Bu tür etkileri saldırgan ortamların nakli için kullanılan paslanmaz çelik pompalar sürekli çalışma koşullarında tam dayanç gösterirken çalışmaya bir süre ara verilmesi üzerine korozyona uğrarlar. Çukurcuk korozyonu çoğunlukla dişliler ve piston iç yüzeylerinde görülür.

#### 4.2.4 Aralık Korozyonu

Aralık korozyonu, perçin civata gibi birleştirmelerden dolayı oluşan veya kaplamaların altında kalan dar aralıkta oluşan bir korozyon türüdür. Bu tür dar aralıklar, içerisinde durgun çözelti bulunduran yerlerdir. Bu bölgelere oksijen difüzyonu zordur. Metaller üzerinde biriken kir ve birikintilerin altında da bu tür korozyona rastlamak mümkündür. Bazı makine parçalarında montaj sırasında yok edilemeyen dar bölgeler ve aralıklar vardır ve aralık korozyonun oluşumu bu bölgelerden başlar.



Şekil 4.4 Düşük alaşımlı 49MnVS3 çeliğin aralık korozyonu mikro yapısı

[www24.brinkster.com]

Aralık korozyonunun oluşabilmesi için aralığın, sıvının içerisine girebileceği kadar geniş, ancak durgun bir bölge oluşturabilmesi içinde yeterince dar olması gerekir. Bu mesafe milimetrenin onda biri veya daha küçük boşluklar kadardır. Aralık genişledikçe korozyon etkinliğini kaybeder ve genişliğin birkaç milimetre olduğu durumlarda korozyon nadiren görülür. Aralığı oluşturan malzemelerin ikisinin de metal olması gerekmez. Conta gibi metal ve metal olmayan malzemelerin temas yerlerin de aralık korozyonu oluşabilir. Ağaç, cam, beton, kauçuk, asbest gibi maddeler de aralık korozyonuna sebep olabilir.

#### 4.2.5 Seçici Korozyon

Alaşımarda belirli bir metal veya belirli bir faz üzerinde yoğunlaşarak öncelikle çözümlerini sonuçlayan korozyon türüdür. İlke olarak, elektro kimyasal gerilim dizisinde birbirinden çok uzak metallere oluşan alaşımlar seçici korozyona uğrarlar. Örneğin, altın-gümüş alaşımı seyreltik nitrik asit çözeltisine terk edilince gümüşün çözüldüğü ve hatta giderek geriye yalnız saf altının kaldığı görülür.

Çizelge 4.2 Havadaki nem miktarına göre emaye kaplı çelik levhaların kaplama altı korozyonundan etkilenmeleri

Bağıl nem	Etkilenme
0 – 65	Korozyon yok
65 – 85	Çok ince lifler
80 – 90	Geniş lifler
93	Çok geniş lifler
95	Kaplamada yerel açılmalar
100	Kaplamada yaygın açılmalar

Seçici korozyonun bozucu etkisi malzemenin uğradığı dayanç kaybıdır. Korozyonun etkili olduğu bölgelerde çekme dayanıcının sıfıra indiği kabul edilir. Bu nedenle korozyona uğrayan parçalarda saptanan dayanç kaybı korozyondan etkilenen kesit alanının doğrudan bir göstergesi olarak önem taşır. Büyük ölçüde dayanç kaybına karşın korozyona uğrayan parçaların dış görünümünde renk değişimi dışında hiçbir farklılık görülmeyebilir.

#### 4.2.6 Tane Sınırları Korozyonu

Korozyon olayının malzemenin tane sınırları yakınında yoğunlaşması sonucu ortaya çıkan bozunma türüdür. Tane sınırları korozyonu özellikle ostenitik dokulu krom - nikel çeliklerinde ve alüminyum - bakır alaşımlarında görülür. Ferritik dokulu paslanmaz çelikler ancak çok sınırlı koşullar altında bu tür korozyona duyarlılık gösterirler.

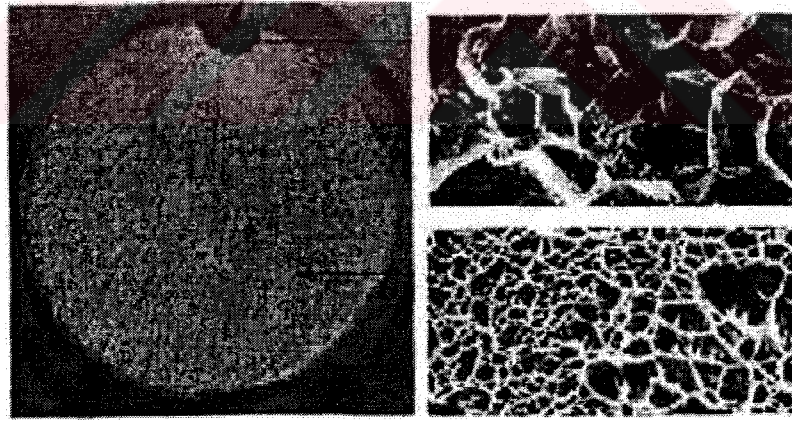
Tane sınırları korozyonunun en belirgin özelliği çok küçük ağırlık kaybına karşın, korozyon hızının tane sınırları yakınında çok yüksek değerlere ulaşabilmesidir. Bu koşul parçaların kısa sürede tüm kesit alanı boyunca korozyona uğrayarak bozunmalarına yol açar. Taneler

bütünlük ve şekillerini korurlarken taneler arası bağ bozunmaya uğrar. bunun sonucu olarak metallere özgü bazı tutumlarda önemli değişiklikler beklemek gerekir. Bunlardan en önemlisi korozyonun etken olduğu bölgelerde mekanik dayanımın sıfıra indirgenmesidir.

Örneğin tane sınırları korozyonu ile bozulan ostenitik krom - nikel bir parçayı parmaklar arasında ezerek toz haline getirmek mümkündür. Parçaların dış görünüm ve ölçülerinde önemli bir değişiklik görülmez. Bu koşullar tane sınırları korozyonunun izlenmesini ve kontrol altına alınmasını güçleştirir.

#### 4.2.7 Gerilimli Korozyon

Saldırgan ortamlarla temas halinde olan makine parçaları ve metal yapıların çoğu mekanik gerilimler altındadır. Yüksek basınçlı kaplar, buhar kazanları, içten yanmalı motorların silindir gömlekleri, pompa mili ve rotoru verilebilecek çok sayıda örnekten birkaçıdır. Gerilimli korozyon aynı zamana rastlayan koroziv ve mekanik etmenlerin yol açtığı bozunma türü olarak tanımlanabilir. Bozunma parça yüzeyinde mevcut çatlaklar veya gerilim yoğunlaşmasına olanak sağlayan diğer geometrik düzensizliklerle başlar (örneğin, çukurcuk korozyonunun parça yüzeyinde oluşturduğu çukurcuklar mekanik gerilimlerin de etkisi altına girerek keskin uçlu çatlaklara dönüşebilirler).



Şekil 4.5 St37-2 çeliğinin gerilimli korozyon mikro yapısı [www24.brinkster.com]

Çatlaklar mekanik gerilimlerin büyüklüğü ve çevresel koşulların etkinliğine bağlı olarak belirli hızlarla malzeme içine doğru yürürler. Parça kesitinin mevcut yükleri taşıyamayacak ölçüde daralması sonucu ani kopmalar meydana gelir.

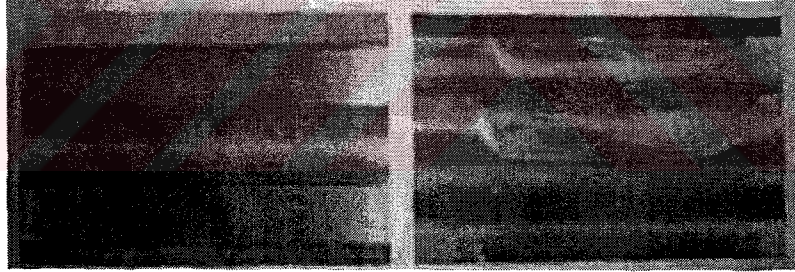
Gerilimli korozyonun en önemli özelliği kimyasal ve mekanik etkilerin birbirlerini destekler nitelikte gelişmeleridir. Bu nedenle aynı zamana rastlamayan koroziv mekanik etkilerin

toplamı gerilimli korozyon olarak nitelenemez. Gerilimli korozyonun oluşabilmesi için gerekli koşulları şöyle özetleyebiliriz.

- Duyarlı bir malzeme
- Etken bir ortam
- Çekme gerilimi
- Zaman

#### 4.2.8 Kazımalı Korozyon

Yeterli yük altında birbirleri üzerinde ileri geri hareket eden metal yüzeylerde görülen bozunma türüdür. Bozunan yüzeylerin görünümü çok sayıda oksit parçaları ile çevrelenmiş çukurcuklardan oluşur. Olaya korozyonla desteklenen aşınma olarak bakılabilir. Başlangıçta parçaların teması yüzeylerin çıkıntılı kısımlarının birbirlerine değmesi ile sağlanır. Yüksek gerilim altında birbiriyle kaynayan sivri uçlar parçaların kayma hareketi sırasında kazınırlar ve ara yüzeye giren havanın oksijeni ile oksitlenirler. Böylece oluşan oksit parçacıklarını ara yüzeyden uzaklaştırma olanağı yoktur. Bunlar genellikle serttir ve kazıyıcı ortam olarak etkilidirler. Olay kazınan parçaların oksitlenmesi ile tekrarlanarak sürdürülür.



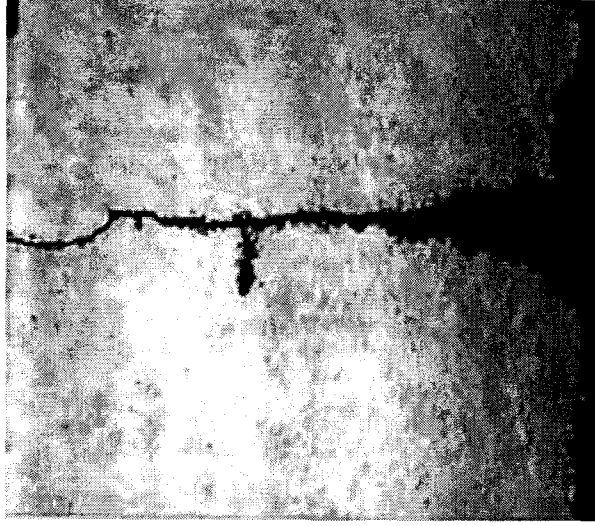
Şekil 4.6 Alaşım 100Cr6 çeliğin kazımalı korozyon makro yapısı[www24.brinkster.com]

#### 4.2.9 Yorulma Korozyonu

Korozyonlu yorulma çevrimli gerilme ve korozyonun müşterek etkisi ile meydana gelen ve gerilmeli korozyon çatlama benzer bir hasardır. Korozyonlu yorulma hasarı iki aşamada meydana gelir :

- Korozyon ve alternatif gerilmelerin birlikte etkisi sonucu metal oyuklanma ve oyuk bölgesinde çatlak oluşumu ile hasar,
- Doğrusal yorulma moduna göre çatlağın ilerlemesi

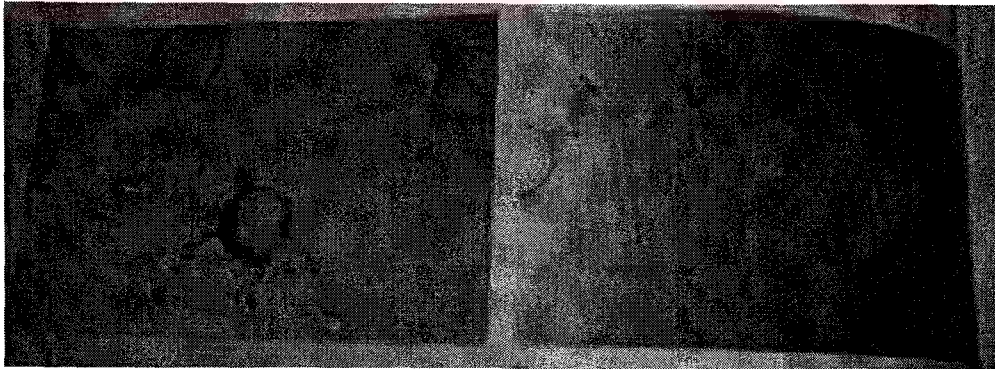
Korozyonlu yorulma nedeniyle parçanın kırılması limit yorulma gerilmesinin çok altında ve inanılmayacak derecede küçük korozyon şiddetinde meydana gelebilir.



Şekil 4.7 St37-2 çeliğin Yorulma korozyonu mikro yapısı [www24.brinkster.com]

#### 4.2.10 Kurtçuk (Filiform) Korozyon

Bu tür korozyon aralık korozyonunun özel bir şeklidir ve yüzeyleri organik kaplamalı metallerde meydana gelir. Boya filmin altında oluşan kurt (ince tel) şeklindeki korozyon ürünleri sayesinde tanınır. Filiform korozyon havadaki nem miktarının % 78 ile % 90 arasında ve yüzeyin hafifçe asidik olduğu durumlarda meydana gelir. Çelikler, magnezyum ve alüminyum yüzeylerinde meydana gelir ve bazı bölgelerde çok ciddi korozyona neden olur. Özellikle uçak gövdelerinde, çelik tutturucuların etrafında görülür.

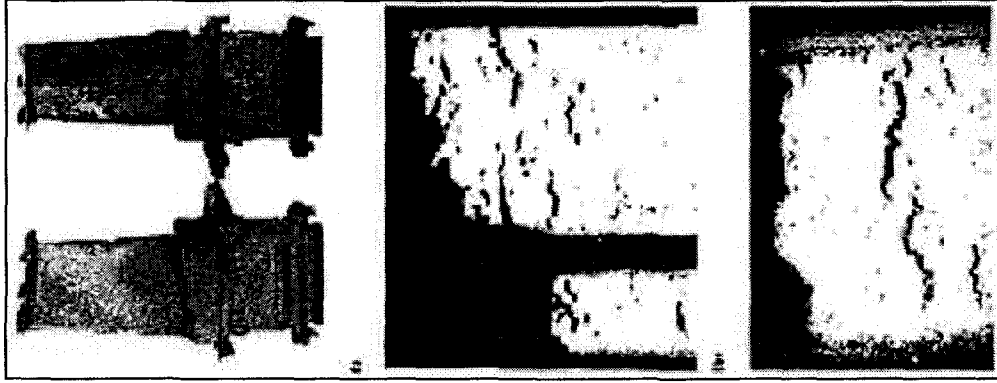


Şekil 4.8 Düşük alaşımlı 44MnSiVS5 çeliğin Kurtçuk korozyonu mikro yapısı [www24.brinkster.com]

#### 4.2.11 Yüksek Sıcaklık Korozyonu

Susuz ortamda korozyon yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Ortam yeteri kadar sıcaklığa ulaştığında metaller ortamdaki gazlar ile reaksiyona girerek yüzeylerinde oksit tabakası oluşur. Ortamda bulunan kirleticiler örneğin klorürler ve sülfatlar metalik oksitlerin erime sıcaklığını düşürerek ve buharlaşmasını teşvik ederek sıcak korozyonu hızlandırabilir.

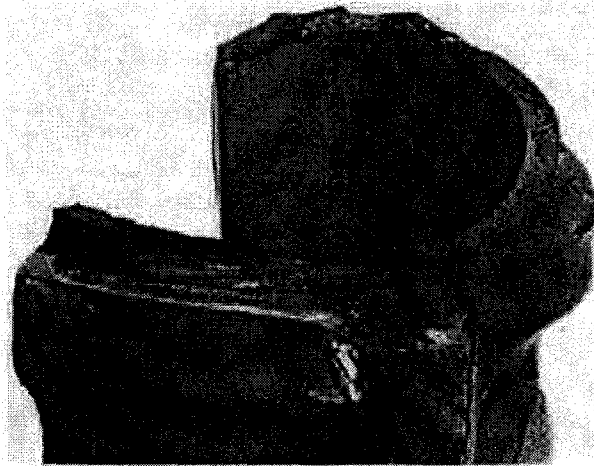
Yüksek sıcaklık seramik kaplamalar bu tip korozyonu azaltabilir. Türbin motor kompresörlerinde ve sıcak bölümlerde görülen korozyon bu tür korozyona örnektir.



Şekil 4.9 C55 çeliğin yüksek sıcaklık korozyonu mikro yapısı [www24.brinkster.com]

#### 4.2.12 Hidrojen Gevrekliği

Yüksek mukavemetli çelikler, alüminyum alaşımları ve bazı paslanmaz çelikler çeşitli asidik banyolara daldırıldıklarında metal yüzeyinde meydana gelen katodik reaksiyon sonucu hidrojen gazı açığa çıkar. Hidrojen metale nüfuz ederek tane sınırlarında birikir ve malzemeyi zayıflatır. Eğer parça yük altında veya üretimden gelen kalıcı gerilmeler içeriyorsa bu gerilmeleri kaldıramaz ve ani olarak hasara uğrar.



Şekil 4.10 Düşük alaşımlı 27MnSiVS6 çeliğin hidrojen gevrekliği makro yapısı [www24.brinkster.com]

### 4.3 Korozyondan Korunma Metodları

Korozyon bir yüzey olayıdır ; yani metal ile ortamın temas yeri olan ara yüzeyde oluşur. Metal ile ortamın temas etmediği bölgelerde meydana gelen değişiklikler korozyon olarak nitelendirilemez ; fakat metal - ortam ara yüzeyinde oluşan bazı korozyon ürünleri metalik bünyeye yayınarak orada metal ortam ara yüzeyinden uzak bir bölgede tahribata , örneğin kırılmaya neden olabilirler. Buna örnek olarak asit bir çözeltiliye daldırılmış yüksek karbonlu bir çelik yüzeyinde hidrojen iyonunun redüklenmesi yani indirgenmesi ile açığa çıkan hidrojen atomunun metal içine yayınması ve metal içinde birleşip hidrojen gazı oluşturarak metali çatlatması gösterilebilir.

Korozyon , metal ile ortam arasında arayüzeyde oluşan bir olay olduğuna göre korozyondan korunma yöntemleri de şunlardır :

- Malzeme seçimi
- Üretim ve dizayn
- Koruyucu kaplama
- Ortamın değiştirilmesi

#### 4.3.1 Malzeme Seçimi

Malzeme seçimi herşeyden önce ekonomik şartlara dayandırılmalıdır.

- Ürünün tahmini ömrü ve bakım süresine bağlı kalınarak bir miktar korozyon için verilebilir.
- Metalde istenen kalite minimum harcamayla sağlanmalıdır. Metalin korozyona direncini arttıran bileşenleri veya metalin içindeki safsızlıklar (düzensizlikler) metalurjiyi ilgilendirir.

Mümkün olan bazı eklemeler ve etkileri aşağıdaki gibidir.

- a) Karbon ve düşük alaşımlı çeliğe % 0.20.5 bakır eklenmesi korozyon direncini 1,5-3 kat arttırır.
- b) Paslanmaz çeliğin bileşeni olan krom, nikel ve molibden korozyon direncini çok arttırır.
- c) Alüminyum içindeki demir düzensizlikleri korozyona eğilimi arttırır. Tuzlu suda %99,99 saf alüminyum %1 Fe içeren alüminyumdan 20 kere daha dirençlidir.
- d) Deniz suyu sistemlerinde kullanılan tüm pirinç bileşenlerine çinkonun çözülmesine karşı %0,002-0,006 arsenik eklenmelidir.

### 4.3.2 Dizayn ve Üretim

Bölgesel korozyonu önlemek için, dizayn ve üretim safhalarında da uyulması gereken bazı kurallar vardır.

- Galvanik serilerde birbirlerinden uzak yerleştirilmiş, benzer olmayan metallerin direk teması engellenmelidir. Örneğin alüminyum alaşımları-bakır veya alüminyum alaşımları paslanmaz çelik birbirlerine temas etmemelidir. Bu metaryalleri neopren, bitümen, polivinil klorür tabakalarıyla ayırmak veya kaplamayla mümkündür.
- Yarıkların önlenmesi mümkün değilse, aynı bileşikle doldurulmalıdır.
- Suyun hızında ani değişiklikler yapacak dizayn özellikleri önlenmelidir.
- Basınç korozyon çatlaklarına hassas metaller kullanılıyorsa, basınç minimum tutulmalıdır.
- Elektrikli makinalardan oluşan rasgele akımlar önlenmelidir.

### 4.3.3 Koruyucu Kaplama

Koruyucu kaplama 3 grupta toplanabilir;

- Korozyona sebep olan ortamdan yüzeylerin izole edilmesi
- Katod koruması
- Korozyon reaksiyonuna ters etkili reaksiyon oluşturmak.

Korunan metale göre, anodu korumak için kullanılan metal (yani daha negatif elektrot potansiyeli olan ) ile kaplama yapılarak katot koruması yapılır.

Ortamda yavaş çözülerek, metal bir yüzeyin belli bir süre korozyonunu önleyen bileşenlerden oluşan koruyucu kaplama yapılabilir. Örneğin, boyalara eklenen çinko kromat, alüminyum veya çelik yüzeyleri korur. Kaplamaların ekonomik yönü de önemlidir. Kaplama maliyet, tüm boyama maliyetinin %25' ini geçmemelidir.

### 4.3.4 Ortamın Değiştirilmesi

Ortamda yapılacak değişiklikler şunlardır:

- Sıcaklığı azaltmak
- Hızı azaltmak
- Oksijen veya oksitleyici vasıtaları ortadan kaldırmak.
- Konsantrasyonu değiştirmek

Birçok durumda bu değişiklikler korozyonun önemli ölçüde azalmasını sağlayabilir, fakat değişiklik dikkatle uygulanmalıdır.

Sıcaklığı azaltmak;

Bu işlem genellikle korozyon hızının azalmasına sebep olur. Ancak bazı şartlar altında sıcaklık değişimleri korozyon hızı üzerine az tesir eder. Diğer bazı durumlarda ise sıcaklığın artması korozyonu azaltır. Bu olay, sıcak tatlı ve tuzlu su kaynama noktasına yükseldiğinde olur. Korozyonun az olması sıcaklık artışı ile oksijen çözünürlüğünün azalmasının bir sonucudur. Bu yüzden kaynayan deniz suyu, sıcak deniz suyundan daha az koroziftir.

Hızı azaltmak;

Korozyon kontrolünde pratik bir metod olarak hız kullanılır. Hız genellikle korozyonu, bazı istisnalar hariç artırır. Paslanmaz çelik gibi pasifleşen metal ve alaşımlar, akış halindeki ortamlardan genellikle daha iyi bir direnç gösterir. Çok yüksek hızlar mümkünse daima önlenmelidir, çünkü erozyon korozyonuna yol açar.

Oksijeni veya oksitleyici etkileri ortadan kaldırmak;

Bu çok eski bir korozyon kontrol tekniğidir. Kazan besleme suyu çelik parçalarının büyük bir kütlesi içinden geçirilerek, çözünmüş oksijen miktarı azaltılır. Bugün bu işlem vakumla inert gaz püskürtmekle veya oksijenle reaksiyona girebilecek bir madde ilavesiyle yapılmaktadır. Üretimi veya depolanması sırasında çelikle temas eden hidroklorik asit bir oksitleyici madde olarak  $FeCl_3$  ihtiva eder.

Bu saf olmayan asit, piyasada "tuz ruhu" diye bilinir. Bu asit nikel molibden alaşımları (Hastellay B, Chlorimet 2) hızla korozyona uğratar, halbuki bu materyaller saf HCl'e mükemmel direnç gösterirler.

Konsantrasyonu değiştirmek;

Korozif unsurun konsantrasyonunu azaltmak umumiyetle etkilidir. Birçok proseste korozif unsurun mevcudiyeti tesadüfidir. Mesela nükleer reaktörlerle soğutma suyunun korozif etkisi klorür iyonlarını elimine etmekle azaltılır. Sülfirik ve fosforik asit gibi birçok asitler fazla yüksek olmayan sıcaklıklarda yüksek konsantrasyonlarda oldukları zaman hemen hemen inerttirler. Demek ki asit konsantrasyonu arttırmakla korozyon azaltılabilir.

## 5. ÇELİKLERİN KAPLANMASINDA KULLANILAN KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Çelik malzemelerin kaplanmasında kullanılan yöntemler 3 grupta toplanabilir,

- Mekanik yöntemle kaplama
- Elektrolitik ve daldırma yöntemiyle kaplama
- Püskürtme yöntemiyle kaplama

### 5.1 Mekanik Kaplama

Mekanik kaplama, demir-çelik malzemelerin, bakır alaşımlarının, paslanmaz çelik ve bazı döküm çeşitlerinin kaplandığı bir metoddur. Proses ile sünek yapıda, metalik ve korozyona karşı dayanıklı çinko, kadmiyum, kalay, bakır veya alüminyum kaplama elde edilir. Çoğunlukla mühendislik, ekonomi ve atık problemlerine çözüm getirir. Tercih edilmekte olan mekanik ve galvanik özellikleri, en az hidrojen kırılabilirliği riski ile sağlar. Ayrıca elektrolitik kaplama karşısında fiyat açısından da avantaj sağlamaktadır.

Mekanik kaplama, parçaların, cam partikülleri karışımının, metalik tozların yükseltici ve hızlandırıcı kimyasalların ve suyun tanburda birlikte çevrilmesi ile oluşur.

Avantajları şunlardır:

- Hidrojen kırılabilirliğine karşı hassasiyeti büyük ölçüde azaltır
- Birçok metal üzerinde, değişik oranlarda kaplama kalınlığı elde edilebilir
- Başka proseslerden daha az enerji harcanır
- Zehirli kimyasal kullanımı gerektirmez
- Artık işlemlerini kolaylaştırır
- Çoğunlukla pişirme işlemi gerektirmez
- Üniorm kaplama sağlar

### 5.2 Elektrolitik ve Daldırma Yöntemiyle Kaplama

Bir kaplama işlemi genel olarak:

- Polisaj
- Elektrolitik ve daldırma yöntemiyle kaplama

olmak üzere iki kısımda incelenebilir.

Polisajda kaplanacak yüzeyler bir ayna parlaklığına getirilir. Burada en önemli husus demir veya alüminyum parçaların polisajlarının aynı polisaj tezgahında değil, ayrı ayrı tezgahlarda yapılması gerekir, aksi halde Al tozları yangına sebebiyet verir.

Yüzey temizleme;

- Yağdan temizleme
- Parça üzerindeki oksid ve pasın giderilmesi
- Elektrolitik kimyasal parlatma

Banyolarda Kaplama;

Polisaj gerektiren parçalarda, polisaj işleminden sonra parçalar bekletilmez. Yüzey temizliği yapılan parçalar elektrolite daldırılır ve akım verilir, bazı durumlarda da parçalar akım altında asılır. Aksi halde metalin yüzeyinde bir oksit tabakası oluşur. Kaplama işleminin aralıksız, bekletilmeden devam edilmesi gerekir. Akım kesilmesi durumlarında ise kaplanmış ve ya yarı kaplanmış parçalar bir sonraki yıkama banyosunda bekletilmelidir. En son kaplamadan çıkan parçalar demineralize sıcak suda 95 °C de 5-10 dakika bekletilmelidir.

Kimyasal kaplamanın kalitesini etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir;

- Akım yoğunluğu
- Konsantrasyon ve karıştırma
- Sıcaklık
- Temel metalin ve elektrolitin yapısı
- pH ın etkisi
- Kaplama gücü yani dağılma gücü

Elektrolitik ve daldırma yöntemiyle kaplamanın avantajları:

- Üniform kaplama sağlanması
- Metal yüzeyinde çok iyi tutunması
- Kaplanacak malzemelerin özelliklerini değiştirmemesi
- Az enerji harcanması
- Kullanım ömrünün uzun olması
- Hasas ölçü toleranslarında çalışmayı sağlaması

### 5.3 Püskürtme Yöntemi

Öncelikli olarak geliştirilen Metalizasyon adı verilen yöntemde, yüzeyin kaplanması yüksek kinetik ve termik enerjiye sahip olan parçacıkların bombardıman edilmesiyle gerçekleşmektedir. 1915 te İsviçre 'de geliştirilen yöntemle eritilmiş metal, küçük damlalar şeklinde basınçlı hava akımı ile yüzeye püskürtülmektedir. Daha sonra bu yöntem geliştirilerek gaz-alev metalizasyon yöntemi adını aldı. Bu yöntem aşınmış metal parçaların onarımında günümüzde de geniş olarak kullanılmaktadır.

Toz püskürtme yönteminin başlıca amacı, kaplama işleminden geçen bir ürün yada parçanın, termik deformasyona uğramaksızın ve ana malzeme özelliklerini olumsuz olarak etkilemeksizin yüzeyde dayanıklı, sert bir katman oluşturmaktır. Bunu sağlayacak yöntem olarak ta detonasyon püskürtme yöntemi geliştirilmiştir. Gaz ortamında meydana gelen detonasyon, belirli bir maddenin belirli bir ortamda maksimuma ulaşmış sabit süpersonik hızla yayılan bir patlama sürecidir. Detonasyon yönteminde toz taneciklerin yüzeye çarpma hızı 800-1300 m/s ye kadar ulaşmaktadır. Oldukça yüksek olan bu detonasyon hızları, yüksek kaliteli kaplamaların yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Detonasyon yönteminin en büyük avantajı, kaplama süresince malzeme yüzeyini aşırı olarak ısıtmamasıdır.

Detonasyon kaplama yönteminin avantajları:

- Metal yüzeyinde çok iyi tutunması
- Yüksek yoğunluk
- Herbir malzeme tozuyla birçok malzeme yüzeyinin kaplanabilmesi
- Kaplama sürecinde kaplanacak malzemelerin özelliklerini değiştirmemesi
- Volfram karbür, titan karbür gibi metal ve seramik tozlarının sağlam koruyucu katmanın oluşmasına olanak sağlaması

## **6. ÇELİKLERİN AŞINMA VE KOROZYON DAYANIMINI ARTTIRMAK İÇİN UYGULANAN KİMYASAL KAPLAMALAR**

Çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımını arttırmak için parçanın kullanım şartlarına bağlı olarak kimyasal kaplama işlemi uygulanmaktadır. Bu uygulama yapılmadan önce yüzeyin çeşitli yüzey işlemleri uygulanarak kaplamaya hazır hale getirilmesi gerekmektedir.

### **6.1 Çelik Yüzeylerin Kaplamaya Hazırlanması**

Günümüzde artık yüzey kaplama işlemlerinde en önemli aşamanın, ilk kaplama tabakasının uygulanmasından önce altlık malzemesinin hazırlanması olduğuna inanılmaktadır. İlk tabaka, altlık malzemesi ile kaplamanın fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin farklı veya benzer olması durumunda ve bütünlüğün sağlanabilmesi için hem elektriksel hem de yapısal sürekliliğin gerektiği durumlarda altlık malzemesi ile kaplama arasında bir köprü kurulabilmesini sağlamaktadır. Aynı şekilde kirletici artıklar da böyle bir sürekliliği bozan doğal bir engeldir.

Bu amaçla yüzeyin kaplamaya hazırlanması, mekanik temizleme, solvent yardımıyla temizleme, alkaliler ile temizleme, asitle temizleme, biyolojik oluşumların temizlenmesi işlemlerini içerir.

### **6.2 Çeliklere Uygulanan Kimyasal Kaplamalar**

Çeliklere uygulanan kimyasal kaplama türleri;

- Çinko kaplama
- Çinko fosfat kaplama
- Mangan fosfat kaplama
- Kadmiyum kaplama
- Akımsız nikel kaplama
- Sert krom kaplama

olarak sıralanabilir.

### 6.2.1 Çinko Kaplama

Çinko, sert, kristalik ve kırılğan olan mavimsi beyaz parlak bir metaldir. Bu metal demire karşı elektronegatiftir ve özellikle sanayi ve şehir çevrelerinde korozyona karşı mükemmel bir dayanım gösterir. Çinko, birçok metal ile kendiliğinden alaşımlar meydana getirir ve en önde gelen kullanım alanlarından biri, metal piyasasında önemi olan çinko esaslı kalıp dökümler için bir alaşım şeklidir. Süperplastik alaşımlarda da çinko esaslıdır ve üfleme yöntemiyle kaplanabilir.

Çinko, korozyona dayanıklı bir sonuç istenilen yerlerde daima parlak bir şekilde kaplanır, bu da sonradan pasive edilebilir.

Çinko seyreltik asit ve çeliklerde kendiliğinden çözünür, bu sebeple yiyecek maddeleri ile temas etme ihtimali olan parçalar üzerine elektrolitik yolla kaplanması uygun olmayan bir malzemedir. Parlak çinko kaplanmış parçalar soğutucularda geniş ölçüde kullanılır.

Çinko kaplama özellikle elektrik sanayiinde daha önceleri kadmiyum kaplanan parçalar için artan bir ölçüde kullanılır.

Sıcak daldırma yöntemi ile galvanizleme, bağlantıları kapatmak için kalın bir kaplamanın istendiği, yıllarca aşınmaya karşı dayanımın gerektiği alanlarda sık bir şekilde uygulanmaktadır.

Çinko kaplama çözeltileri;

- Yüksek/orta siyanürlü çinko çözeltileri
- Düşük siyanürlü çinko çözeltileri
- Siyanürsüz çinko çözeltileri
- Asitli çinko çözeltileri

şeklinde sınıflandırılabilir.

### 6.2.2 Çinko Fosfat Kaplama

Çinko fosfat kaplamalar, metallerin, metalik ve iletken olmayan özellikler sahip yeni yüzeylere dönüştürülemesi için kullanılır.

Çinko fosfat kaplamaların en geniş kullanım yeri boyanmış ürünlerin yararlı ömrünü uzatmaktır.

Çinko fosfat kaplamalar,

- Boya için taban oluşturmak
- Plastik veya lastik kaplamalar için taban oluşturmak
- Metal şekillendirme ve yağlama
- Pas önleme

amacıyla kullanılır.

Çinko fosfat kaplamaların en önemli özellikleri,

- Çok ağır kristal yapısı
- Daha büyük hacimde yağ tutma
- 0,01-0,03 mg/mm<sup>2</sup> 'lik kaplama kalınlığı
- Düşük ekipman masrafları
- Düşük kimyasal masrafları
- Kolay kontrol

olarak sıralandırılabilir.

Çinko fosfat kaplanacak parça temizlendikten sonra, akar suda yıkanır ve çalkalama işlemine tabi tutulur. Yüzeyi temizlenen parça kaplama banyosunda çinko fosfat kaplandıktan sonra, çalkalanarak yeniden temizlenir ve kurutulur.

### **6.2.3 Mangan Fosfat Kaplama**

Mangan fosfat kaplamalar, metallerin, metalik ve iletken olmayan özellikler sahip yeni yüzeylere dönüştürülemediği için kullanılır.

Mangan fosfat kaplamaların en geniş kullanım yeri boyanmış ürünlerin yararlı ömrünü uzatmaktır.

Mangan fosfat kaplamalar,

- Boya için taban oluşturmak
- Plastik veya lastik kaplamalar için taban oluşturmak
- Metal şekillendirme ve yağlama
- Pas önleme

amacıyla kullanılır.

Mangan fosfat kaplamaların en önemli özellikleri,

- Çok kalın kristal yapısı
- Daha büyük hacimde yağ tutma
- 0,01-0,04 mg/mm<sup>2</sup> 'lik kaplama kalınlığı
- İyi çözelti ömrü
- Düşük ekipman masrafları
- Düşük kimyasal masrafları
- Kolay kontrol

olarak sıralandırılabilir.

Mangan fosfat kaplanacak parça temizlendikten sonra, akar suda yıkanır ve çalkalama işlemine tabi tutulur. Yüzeyi temizlenen parça kaplama banyosunda mangan fosfat kaplandıktan sonra, çalkalanarak yeniden temizlenir ve kurutulur.

#### **6.2.4 Kadmiyum Kaplama**

Kadmiyumun elektrolitik birikimi çelik ve döküm demirin korozyona karşı korunmasında geniş ölçüde kullanılır. Kadmiyum altında bulunan demire göre anodik olduğundan, altta bulunan demirli metal kadmiyum ile kaplandığında, bu kadmiyum kesilerek veya kazınarak etkiyi alta geçirse dahi korunur.

Kadmiyum atmosferik korozyona karşı korunmak için kullanıldığında her zaman ince bir tabaka olarak uygulanır. Diğer metallerin bir alt kaplaması olarak nadiren kullanılır ve kimyasalların çoğunun korozyona olan dayanıklılığı azdır. Parçaların ve birbirine benzemeyen metallerden oluşan grupların kaplanması için, galvanik korozyonu en aza indirme kabiliyeti nedeniyle sık sık kullanılır. Mükemmel lehim olma kabiliyeti birçok elektriksel uygulamada avantajdır.

Kaplama banyoları;

Kadmiyum kaplamanın çoğu genellikle kadmiyum oksidin siyanür çözeltisinde çözülmesi ile elde edilen siyanür banyosunda yapılır. Sodyum siyanür iletkenliği sağlar ve kadmiyum anotların korozyonunu mümkün kılar.

İyi dengelenmiş ve dikkatlice çalıştırılan banyoda kaba ve çukurlu birikimler ile karşılaşmaz. Çukurlu birikimler Herzaman metalik safsızlıkların ve fazla miktardaki bozulmuş organik ilave maddelerin sonucudur. Çukurlar nitratların bulunmasından da ileri gelebilir.

Kabalığın ve çukurluğun düzeltilmesi, fazla sodyum karbonatın alınması, çinko tozu ile saflaştırma, aktif karbon uygulaması ve süzmeyi içeren komple çözelti temizlemesini gerektirebilir.

Bir siyanür çözeltili kadmiyum kaplama anot sistemi çıplak çelikten spiral bir kafeste top şeklindeki kadmiyum anotlardan ibarettir. Küresel şekil, kadmiyum için büyük yatırım olmadan, ağırlığa göre büyük bir alan sağlar. Top anotlar hemen hemen sabit bir anot alanı sağlar, çok az veya hiç fire meydana gelmez. Kadmiyum toplar genellikle 2" çapında ve 1¼ lb ağırlığındadır.

Eğer kadmiyum siyanür çözeltisi uzunca bir süre kullanılmıyacaksa çelik anot kafesler dışarı alınmalıdır. Çünkü çelik ile kadmiyum anotlar arasında meydana gelecek galvanik pil, akım durdurulduğunda anotların kimyasal çözünmesini hızlandıracaktır.

Çubuk anotların siyanür çözeltilisinde kullanımları yüksek oranda atık ile sonuçlanır. Çünkü bunlar, kesit alanları küçülünce alınmalı ve değiştirilmelidir veya bunlar çözeltinin yüzeyinde çözünecekler ve kaplama havuzun dibine düşecektir.

Kadmiyum kaplama için güç motor jeneratörler veya redresörler ile sağlanabilir.

### **6.2.5 Akımsız Nikel Kaplama**

Akımsız nikel kaplama nikel ve fosforun sıkı bir alaşımıdır. Fosfor miktarı genellikle, banyonun bileşimine, çalışma pH ına ve banyonun eskiliğine göre %3-12 arasında değişir. Akımsız nikel kaplama redresör, elektrik akımı ve anot gerektirmez. Birikim, metal iyonları, bir indirgeyici maddeyi, parlaticıları, kompleks yapıcı maddeleri ve sabitleyicileri ihtiva eden bir sulu çözeltide meydana gelir. Kaplanacak parçanın yüzeyindeki kimyasal reaksiyonlar bir nikel alaşımının birikimine neden olur.

Akımsız nikel kaplama fonksiyonel bir kaplamadır ve sadece dekoratif amaçlarla nadiren kullanılır. Akımsız nikel kaplama kullanımı için ilk kriterler şu şekildedir;

- Korozyona dayanıklılık
- Eskimeye dayanıklılık
- Sertlik
- Tamir edilebilirlik
- Geometriye bağlı olmaksızın birikim uniformsuzluğu

Akımsız nikel kaplama gerçekten olağanüstü özellikleri olan bir alaşım elde eder. Bu özellikler geniş bir alandaki fonksiyonel uygulamalarda çok yararlıdır. Uygulamaların çoğu, akımsız nikel kaplamanın kompleks geometrileri ve dış yüzeyleri olduğu kadar iç yüzeyleri de kaplama kabiliyetine dayanır. Sertliğinin, yağlılığının, korozyona dayanıklılığının, elektriksel ve manyetik özelliklerinin avantajlarını alır.

Akımsız nikel kaplama banyoları;

- Nikel-fosfor banyoları: mühendislik uygulamaları için en fazla kullanılan asit nikel-fosfor banyoları %88-93 nikel ve %7-12 fosfor biriktirir. Bu banyolarda elde edilen birikim serttir, tabii yağlılığa sahiptir, aşınmaya ve korozyona dayanıklıdır.
- Alkali nikel-fosfor banyoları: bu banyolar, plastikleri üzerine kaplamayı mümkün kılar, oldukça düşük sıcaklıklarda kaplama yapar.
- Nikel-bor banyoları: kimyasal indirgeyici olarak daima amin boran kullanılarak formüle edilir. Alaşım asit olduğu kadar alkali banyolarda da birikir ve kaplama olarak nikel-fosfor birikimlerinden daha serttir, ayrıca nikel-bor alaşımlarının erime noktası daha yüksektir.

Akımsız nikel kaplanmış ürünün uygunluğunun, uzun banyo ömrünün, ve sabit birikimlerin sağlanabilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır;

- Tank hacmi belirlenmelidir
- Sıcaklık kontrol edilmelidir
- Çözelti uygun bir ortamda, uygun bir hızda filtre edilmelidir
- Belirlenen pH devam ettirilmelidir
- Banyo gereksiz yere uzun süre ısıtılmamalıdır
- Banyo normal ömrünün üzerinde kullanılmamalıdır.

### 6.2.6 Sert Krom Kaplama

Sert krom kaplama aşınmaya karşı dayanıklı bir yüzey elde etmek için kullanılır.

Sert krom kaplama işlemi polisaj ve elektrolitik yolla kaplama olarak iki kısımda incelenebilir.

Krom kaplanacak parçanın şekline göre polisaj işlemi yapılır. Önce yüzeyindeki polisaj, cila vs. artıkları giderilmelidir. Organik yağlardan oluşan, kirlilik, alkalısıcak yağ alma banyolarında sabunlaştırma yolu ile giderilebilir. Kaplanacak parça, özel firmaların hazır olarak sattıkları kimyasallardan %5-10 gibi oranda suda eritilerek hazırlanan çözeltiye, 65-70

°C' de ve 5-15 dakika müddetle temizlemeye tabi tutulur. Burada en etken kimyasallar  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ' tür.

Sert krom kaplamanın kalitesine etki eden faktörler;

- Akım yoğunluğu
- Konsantrasyon ve karıştırma
- Sıcaklık
- Temel metalin ve elektrolitin yapısı
- pH' ın etkisi

olarak sıralandırılabilir.



## 7. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan deneysel çalışmada; St 44-2 kalitesindeki çelik malzemenin aşınmaya ve korozyona karşı dayanımının artırılması amaçlanmıştır. Bu çerçevede, seçilen malzeme üzerine çeşitli kimyasal kaplama uygulamaları yapılmış, kaplama sonrası uygulanan testlerle kaplamaların aşınma ve korozyona karşı gösterdiği dayanım araştırılmıştır. Kimyasal kaplamalar ve test çalışmaları, Kalekalıp Makina ve Kalıp Sanayi A.Ş. Özel Prosesler Bölümü' nde yapılmıştır.

### 7.1 Malzeme

Deneysel çalışmada malzeme olarak St 44-2 çeliği kullanılmaktadır Çok namlulu roketatar ve topçu roketatar sistemlerinin çeşitli konstrüksiyon yapılarında, kimya fabrikalarındaki mikser ve taşıyıcı yapılarda yük altındaki yüksek dayanımı nedeniyle çoğunlukla kullanılan bir malzeme olması, seçimimizde önemli bir etken olmuştur.

Çizelge 7.1 St 44-2 çeliğin kimyasal bileşimi

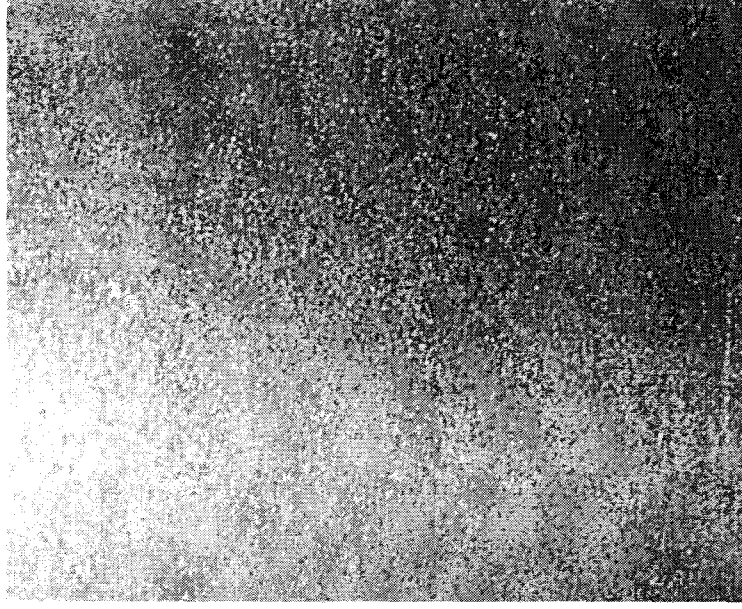
C	Mn	P	S	N
< % 0,21	< % 1,5	< % 0,045	< % 0,045	< % 0,009

Çizelge 7.2 St 44-2 çeliğin mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Kopma Uzaması	Kullanım Alanları
410...560 N/mm <sup>2</sup>	250...275 N/mm <sup>2</sup>	22%	Belli ölçüde yük altında kalan parçalar, dingiller, miller, pistonlar

#### 7.1.1 Numune Hazırlanması

Deneysel çalışmamızda kullanacağımız St 44-2 çeliğinden tuz testinde ve adhezyon testinde kullanmak için 1x100x150 ebadında, aşınma testinde kullanmak için 1x100x100 ebadında numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 7.1 St 44-2 çeliğinin makro yapısı (10X)

## 7.2 Uygulanan Kimyasal Kaplamalar

St 44-2 çelik malzemesinin korozyona ve aşınmaya karşı dayanımını arttırabilmek için çeşitli kimyasal kaplamalar uygulanmıştır.

### 7.2.1 Çinko Kaplama

Çinko kaplama işlemi, ASTM B 633-85 standardına göre yapılmıştır.

Kaplama öncesinde St44-2 çelik numuneye buhar fazında yağ alma işlemi uygulandıktan sonra, oda sıcaklığında su ile yıkanarak ön temizleme işlemi uygulanmıştır. Numuneye %10 HCl içeren çözeltide nötrleme işlemi uygulanmış, oda sıcaklığında su ile yıkanmış ve %1 siyanürlü çözelti ile oda sıcaklığında çalkalandıktan sonra numune kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir. 20-30 °C sıcaklığa getirilmiş kaplama banyosunda, çinko kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplanacak alan gözönünde bulundurularak  $dm^2$  başına 1-3 amp akım uygulanmıştır. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığındaki demineralize su ile çalkalandıktan sonra kurutularak St 44-2 çelik numune kimyasal olarak çinko kaplanmış hale getirilmiştir.

Çinko kaplama banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

NaCN: 75-90 g/l

ZnO: 35-45 g/l

NaOH: 60-75 g/l

Na<sub>2</sub>S 9.H<sub>2</sub>O: 1-1, 5 g/l



Şekil 7.2 Çinko kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

### 7.2.2 Çinko Fosfat Kaplama

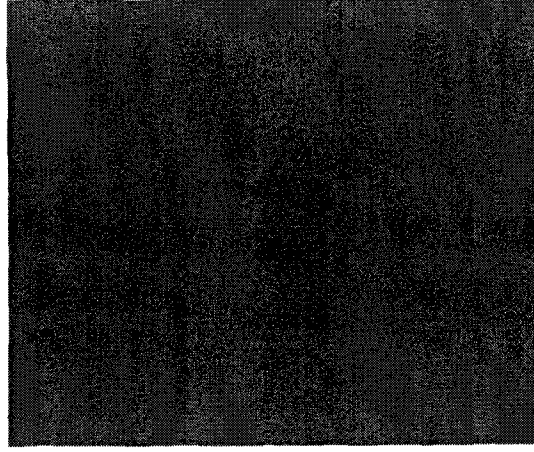
Çinko fosfat kaplama işlemi, TT-C-490 standardına göre yapılmıştır.

Kaplama işlemi öncesinde St44-2 çelik numuneye buhar fazında yağ alma işlemi uygulanmış, pas alma çözeltisi ile numunenin yüzeyindeki paslar giderilmiştir ve oda sıcaklığındaki su ile yıkanarak numune kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Sıcaklığı 50-60 °C sıcaklıkta sabit tutulan banyo içerisinde 1-2 dakika bekletilen numune, banyodan çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığındaki demineralize su ile yıkanmıştır. 80-120 °C' deki sıcak hava ile kurutulduktan sonra St44-2 çelik numune kimyasal olarak çinko fosfat kaplanmış hale getirilmiştir.

Çinko fosfat kaplama banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

fosforik asit [H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>] : %2,5 (hacimce)

çinko fosfor [ Zn(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> ] : %1,5 (hacimce)



Şekil 7.3 Çinko fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

### 7.2.3 Mangan Fosfat Kaplama

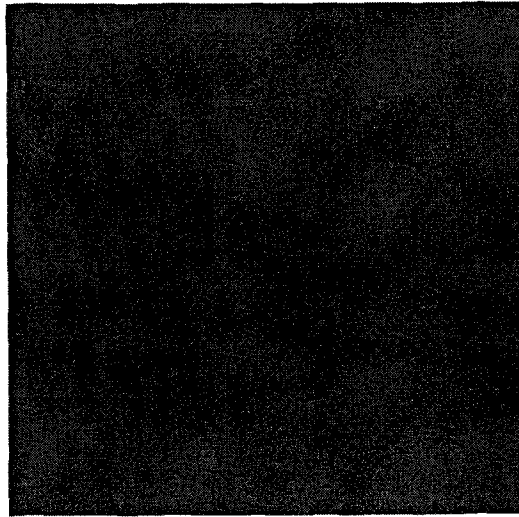
Mangan fosfat kaplama MIL-P-16232 standardına göre yapılmıştır.

St44-2 çelik numuneye buhar fazında yağ alma işlemi uygulandıktan sonra oda sıcaklığındaki su ile yıkanarak numune kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Sıcaklığı 75-85 °C sıcaklıkta sabit tutulan banyo içerisinde 5-15 dakika bekletilen numune, banyodan çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığındaki demineralize su ile yıkanmıştır. 80-90 °C' deki sıcak hava ile kurutulduktan sonra St44-2 çelik numune kimyasal olarak mangan fosfat kaplanmış hale getirilmiştir

Mangan fosfat kaplama banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

fosforik asit [ $H_3PO_4$ ] : %2,5 (hacimce)

mangan fosfor [ $Mn(H_2PO_4)_2$ ] : %1,5 (hacimce)



Şekil 7.4 Mangan fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

#### 7.2.4 Kadmiyum Kaplama

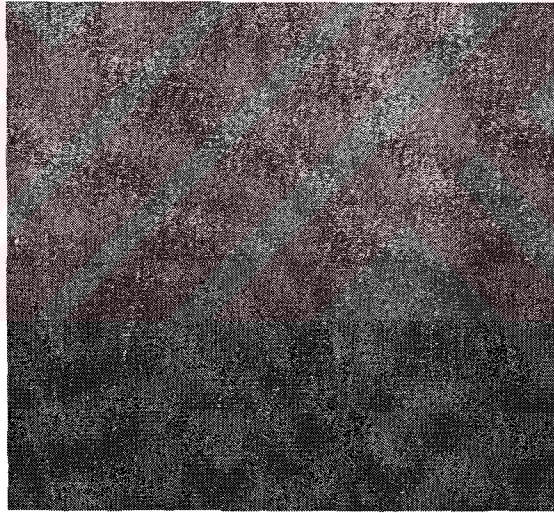
Kadmiyum kaplama QQ-P-416 standardına göre yapılır.

St44-2 çelik numuneye buhar fazında yağ alma işlemi uygulandıktan sonra oda sıcaklığındaki su ile yıkanarak numune kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Sıcaklığı 15-30 °C sıcaklıkta sabit tutulan banyo içerisinde 5-15 dakika bekletilen numuneye kaplama işlemi esnasında  $dm^2$  başına 1-1,5 amp akım uygulanmıştır. Banyodan çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığındaki demineralize su ile yıkanmıştır. 100-120 °C' deki sıcak hava ile kurutulduktan sonra St44-2 çelik numune kimyasal olarak kadmiyum kaplanmış hale getirilmiştir

Kadmiyum kaplama banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

kadmiyum oksit: 32-36 g/l

sodyum siyanür: 130-150 g/l



Şekil 7.5 Kadmiyum kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

#### 7.2.5 Akımsız Nikel Kaplama

Akımsız nikel kaplama MIL-C-26074 standardına göre yapılır.

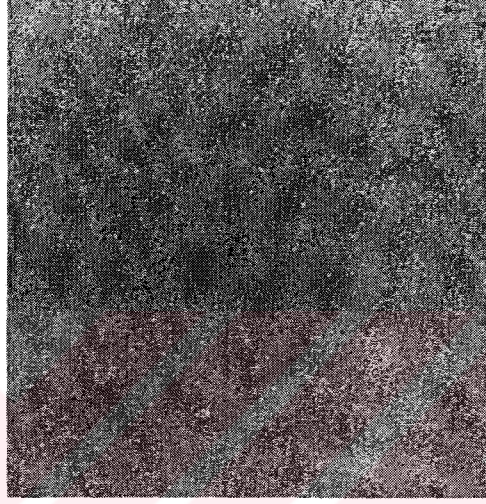
St44-2 çelik numuneye buhar fazında yağ alma işlemi uygulandıktan sonra oda sıcaklığındaki su ile yıkanarak numune kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Sıcaklığı 85-95 °C sıcaklıkta sabit tutulan kaplama banyosu içerisinde 120-240 dakika bekletilen numune, banyodan

ıkarıldıktan sonra oda sıcaklığındaki demineralize su ile yıkanmıştır. 100-120 °C’ deki sıcak hava ile kurutulduktan sonra St44-2 elik numune kimyasal olarak akımsız nikel kaplanmış hale getirilmiştir.

Akımsız nikel banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

nikel: %88-93 (hacimce)

fosfor: %12-7 (hacimce)



şekil 7.6 Akımsız nikel kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

### 7.2.6 Sert Krom Kaplama

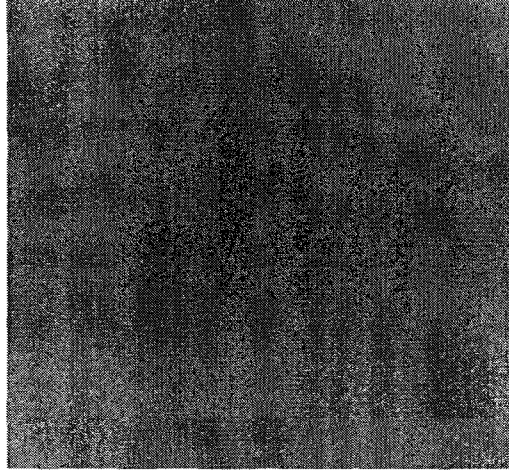
Sert krom kaplama QQ-C-320 standardına göre yapılır.

St44-2 elik numune parlatma işlemi yapıldıktan sonra bakır aparata bağlanmıştır. Sıcaklığı 50-55 °C arasında bulunan sert krom kaplama banyosuna işkence yardımı ile konulan numunelere  $dm^2$  başına 50-55 amp olacak şekilde akım verilmiştir. Her 1 mikron kalınlık için banyoda 1 dakika kaplama işlemi uygulanan numuneler, banyodan çıkarılıp oda sıcaklığındaki demineralize su ile yıkanıp, kurutulduktan sonra sert krom kaplanmış hale getirilmiştir.

Sert krom kaplama banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

kromik asit: 250-300 g/lt

sülfirik asit: 2-2,5 g/lt



Şekil 7.7 Sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

### 7.2.7 Akımsız Nikel Üzerine Sert Krom Kaplama

Akımsız nikel kaplama MIL-C-26074 standardına göre, sert krom kaplama QQ-C-320 standardına göre yapılır.

St44-2 çelik numuneye buhar fazında yağ alma işlemi uygulandıktan sonra oda sıcaklığındaki su ile yıkanarak numune kaplamaya hazır hale getirilmiştir. Sıcaklığı 85-95 °C sıcaklıkta sabit tutulan banyo içerisinde 120-240 dakika bekletilen numune, banyodan çıkarıldıktan sonra oda sıcaklığındaki demineralize su ile yıkanmıştır. 100-120 °C' deki sıcak hava ile kurutulduktan sonra St44-2 çelik numune kimyasal olarak akımsız nikel kaplanmış hale getirilmiştir. Akımsız nikel kaplanan St44-2 çelik numune bakır aparata bağlanmıştır. Sıcaklığı 50-55 °C arasında bulunan sert krom kaplama banyosuna işkence yardımı ile konulan numunelere dm<sup>2</sup> başına 50-55 amp olacak şekilde akım verilmiştir. Her 1 mikron kalınlık için banyoda 1 dakika kaplama işlemi uygulanan numuneler, banyodan çıkarılıp oda sıcaklığındaki demineralize su ile yıkanıp, kurutulduktan sonra akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış hale getirilmiştir.

Akımsız nikel banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

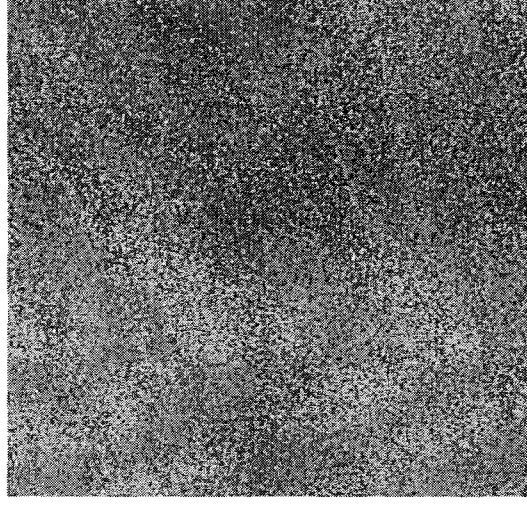
nikel: %88-93 (hacimce)

fosfor: %12-7

Sert krom kaplama banyosundaki kimyasalların analiz değerleri;

kromik asit: 250-300 g/lit (hacimce)

sülfirik asit: 2-2,5 g/lt



Şekil 7.8 Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)



### 7.3 Kimyasal Kaplama Uygulanmış Numunelerin Test Edilmesi

Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma ve korozyona karşı gösterdikleri dayanımı belirleyebilmek ve dayanımlarını karşılaştırabilmek için kaplama öncesi ve sonrası çeşitli ölçüm ve testler yapılmıştır.

#### 7.3.1 Kaplama Kalınlığının Ölçülmesi

Demir, konstrüksiyon çeliği, magnetik yüksek geçirgenlikli paslanmaz çelik, nikel, nikel ve demir alaşımli yüzey üzerine, boya, plastik, bakır, nikel, krom, akımsız nikel, çinko, kadmiyum, kurşun, lehim kaplamaların kalınlıklarının ölçülmesinde kullanılan bir uygulamadır.

Tahribatsız ölçüm grubuna giren elektromanyetik test metodları, kaplama kalınlığı ölçme metodları içinde en çok kullanılanlardır. Temel olarak iki değişik metod vardır:

- Manyetik indüksiyon test tekniği
- Eddy akımı test tekniği

Eddy akımı test tekniği demir dışı metaller üzerindeki yalıtkan kaplama kalınlıklarını ölçmek için uygulanır. Deneysel çalışmada kullanılan numuneler St44-2 çelik malzemedden hazırlandığı için kaplama kalınlığı ölçümü yapmak için manyetik indüksiyon test tekniği kullanılmıştır.

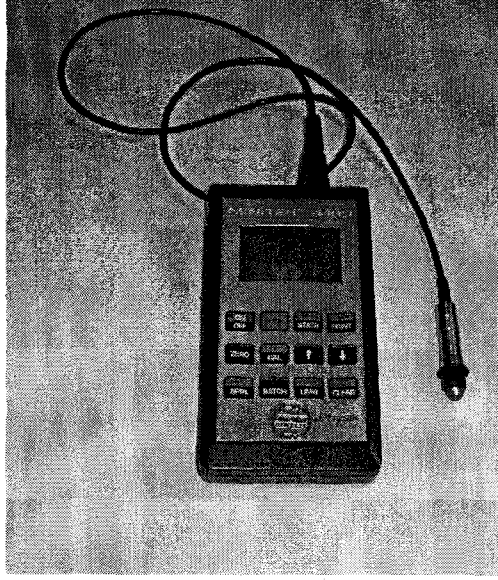
#### Manyetik İndüksiyon Test Tekniği

Demir ve çelik bazlı, malzemeler üzerinde yapılan demirdışı metal ve izolasyon kaplama kalınlıklarının ölçümünde kullanılır.

Burada dikkat edilecek husus, bazı malzemelerin mıknatıslanabilir özellikte ve kaplama malzemesinin de demir dışı olması gerekliliğidir.

Manyetik indüksiyon metodu ile pratikte bir kaç mikrondan 30-40 mm ye kadar kaplama kalınlıkları ölçülebilmektedir.

Kullanılan cihaz: Minitest 4100 kaplama kalınlığı ölçme cihazı.



Şekil 7.9 Minitest 4100 kaplama kalınlığı ölçme cihazı

Adaptör cihaza ve fişe takılıp probun (dokunma ucu) fişi cihaza monte edilmiştir. Düğmeyi “ I ” konuma getirdikten sonra store tuşu O pozisyonuna getirilmiştir. Probu kalibrasyon bloğu üzerine bastırılıp, zero düğmesi ekranda sıfır veya sıfıra yakın değer okunana dek çevrilmiştir. Daha sonra zero düğmesi ile hassas ayar yapılarak değerın sıfırlanması sağlanmış ve prob bloktan kaldırılmıştır. Ölçümünü yapacağımız numunede hangi kalınlık değeri ölçmeyi bekliyorsak o değere yakın kalibrasyon folyosu blok üzerine yerleştirilmiştir (folyonun kırıştırılmadan tutulmasına dikkat edilmelidir). Prob folyo üzerine bastırılarak tutulup, folyo üzerinde yazan değer veya yakın olan değer okunana dek cal düğmesi ile kaba ayar yapılmıştır. Daha sonra cal düğmesi ile ince ayar yapılarak folyo üzerindeki değere ayarlama yapılmıştır. Folyo değeri ekranda okunduktan sonra store tuşu I pozisyonuna getirilmiştir. Böylece cihaz bu değere kilitlenmiştir. Folyo blok üzerinden alınmış ve prob blok üzerine tekrar tutulmuştur. Ekranda sıfır değeri görüldüğünde cihazın kalibre olduğu anlaşılmıştır. Cihazın kalibre olduğu görüldükten sonra tuşu tekrar O pozisyonuna getirilmiştir. Kaplanmamış numune, kalibrasyon bloğu gibi kullanılmıştır. Cihaz ölçüm yapılacak kaplanmamış numuneye göre kalibre edildikten sonra, prob ölçümü yapılacak kaplanmış numune üzerine tutulmuştur. Ekranda okunan değer parça üzerindeki kaplamanın kalınlığı olarak elde edilmiştir. Numunelerin 5 farklı noktasında yapılan ölçüm ile herbir numune için kaplama kalınlıkları tespit edilmiştir. Numunelerin ölçülen kaplama kalınlıkları Çizelde 7.3’te gösterilmiştir.

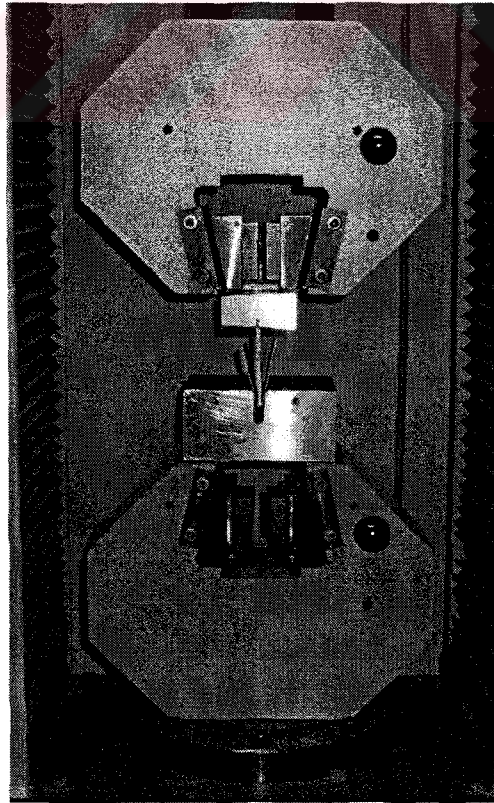
Çizelge 7.3 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin kaplama kalınlıkları

Kaplama Türü	Kaplama kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )				
	10	11	10	9	9
Çinko kaplanmış numune	10	11	10	9	9
Çinko fosfat kaplanmış numune	8	9	7	6,5	6,5
Mangan fosfat kaplanmış numune	13	12	14	13	13,5
Kadmiyum kaplanmış numune	49	35	45	35	38
Akımsız nikel kaplanmış numune	27	30	28	30	30
Sert krom kaplanmış numune	30	25	27	28	26
Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numune	61	59	57	62	60

### 7.3.2 Adhezyon (Yapışma) Testi

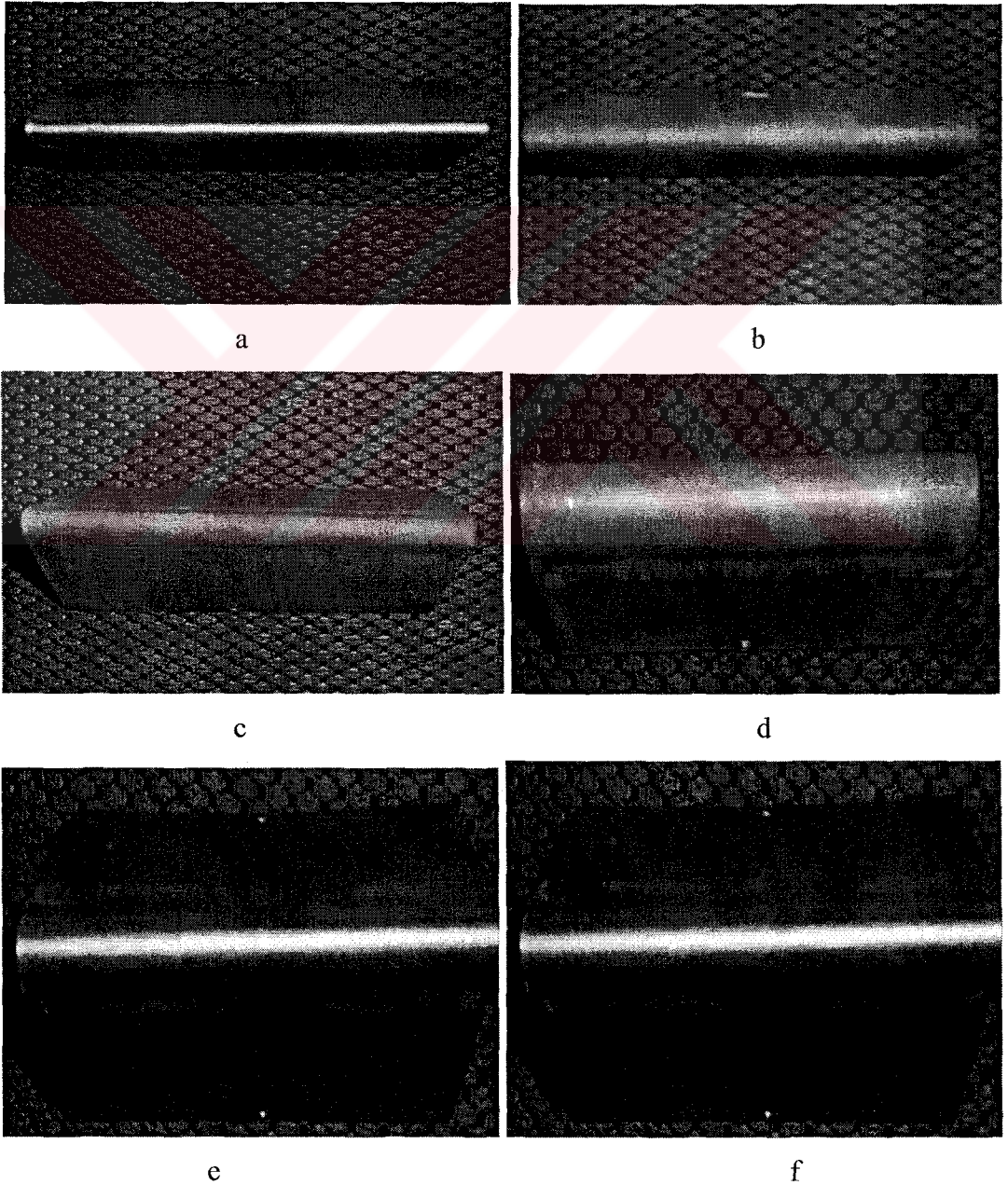
Kaplama ile parça arasındaki yapışmanın ne kadar sağlıklı olduğunun test edilmesi amacıyla ASTM A370 standardına göre yapılır. Parça ile kaplama arasında uygun yapışmanın sağlanabilmesi için, parçanın yabancı maddelerden arındırılmış olması ve kaplama işleminin talimatlara uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekir.

Kullanılan cihaz: Srenck trebel bükme cihazı



Şekil 7.10 Srenck trebel bükme cihazı

Kimyasal kaplama uygulanmış numuneler bükme cihazının alt bölümüne yerleştirilmiştir. Numunenin üstüne parçaya uygun olarak dizayn edilmiş bükme aparatının erkek kısmı konularak numune üzerine kademeli olarak yük uygulanmıştır. Alt bölmeye yerleştirilmiş olan bükme aparatının dişi kısmı ile üst kısımdaki erkek kısmı arasında kalan parçanın iki ucu arasındaki açı  $15^{\circ}$  -  $30^{\circ}$  arasında oluncaya kadar yük uygulama işlemi devam etmiştir. Bükme işlem tamamlandıktan sonra gözle muayene yapılarak veya flouresan penetrant kontrol yöntemi kullanılarak kaplamada kalkmanın veya çatlağın olup oluşmadığı kontrol edilmiştir.





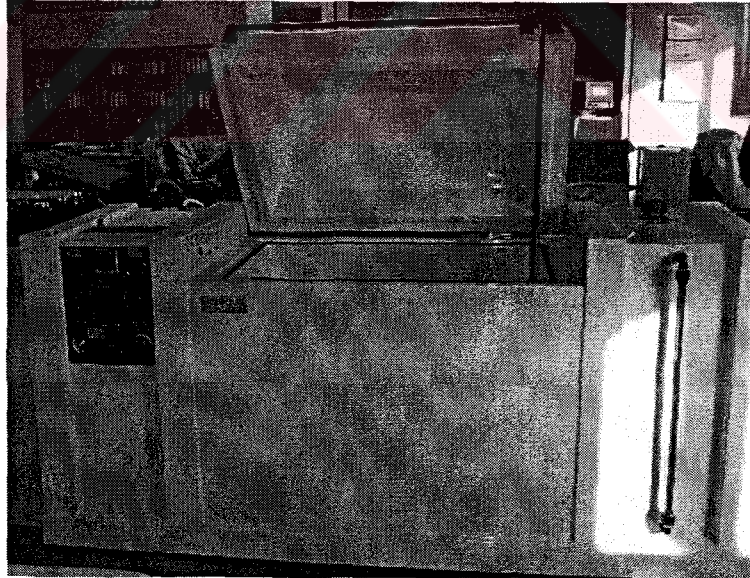
g

Şekil 7.11 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin bükme testi sonrası makro yapıları a) çinko kaplama, b) çinko fosfat kaplama, c) mangan fosfat kaplama, d) kadmiyum kaplama, e) akımsız nikel kaplama, f) sert krom kaplama, g) akımsız nikel üzerine sert krom kaplama

### 7.3.3 Tuz Testi

Elektrokimyasal olarak kaplanan metal yüzeylerde kaplamaların korozyona karşı dayanıklılığını kontrol etmek için ASTM-B-117 standardına uygun olarak yapılır.

Kullanılan ekipman;Heraeus-votch korozyon test cihazı, HSN-400 Model

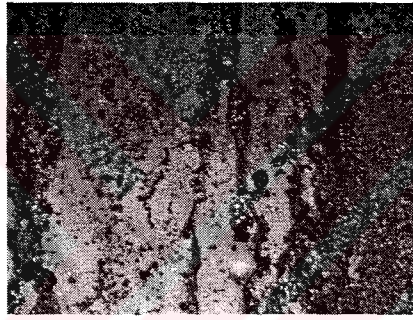


Şekil 7.12 Heraeus-votch tuz testi cihazı

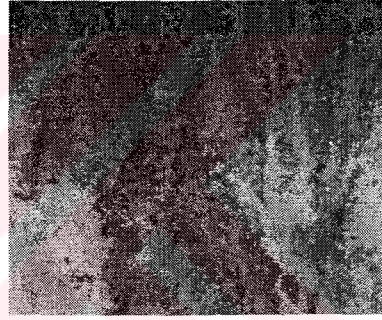
Deneyde tuzlu su çözeltisi %5 (ağırlıkca) saf NaCl , çözücü olarak saf su kullanılmıştır. Tuz testi cihazı içerisinde, suyla doymuş hava ile püskürtme yapılır. Çözelti deney süresi boyunca devamlı olarak püskürtülmüştür. Yoğuşan çözeltinin Ph değeri 6.5-7.2 arasında olması

sağlanmıştır. Deney 35°C sıcaklıkta yapılmıştır. Numuneler test kabine dikeyden 15°-30° açı ile ve akış yönüne paralel olarak asılmıştır. Numuneler birbiriyle temas etmeyecek ve çözeltinin serbestçe akmasını sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. Deney süresi, kaplama tipine bağlı olarak 2-96 saat arasında sürdürülmüştür. Deney sonunda numuneler ılık su ile (max.38°C) yıkanıp, hemen kurulanmıştır. Yüzeyde korozyon meydana gelip gelmediği gözle muayene yapılarak araştırılmıştır. Korozyonun iç yapıda oluşturduğu değişiklik mikro yapı incelenerek belirlenmiştir. Ağırlık farkı metodu kullanılarak korozyon hızı tespit edilmiştir.

Numunelerin tuz testi sonrası makro yapıları Şekil 7.13' te, mikro yapıları Şekil 7.14' te görülebilmektedir.



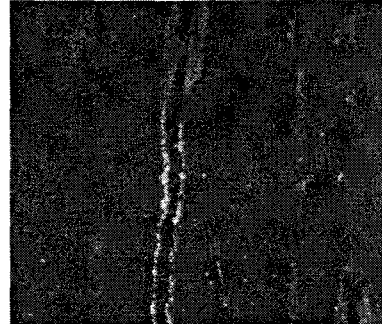
a



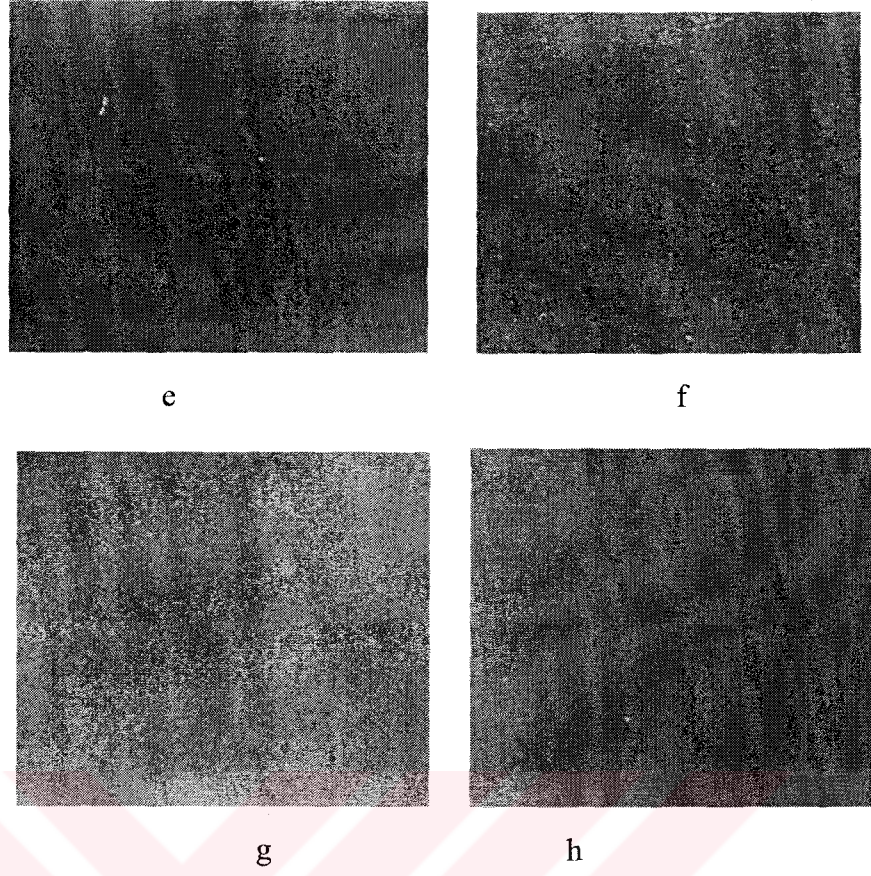
b



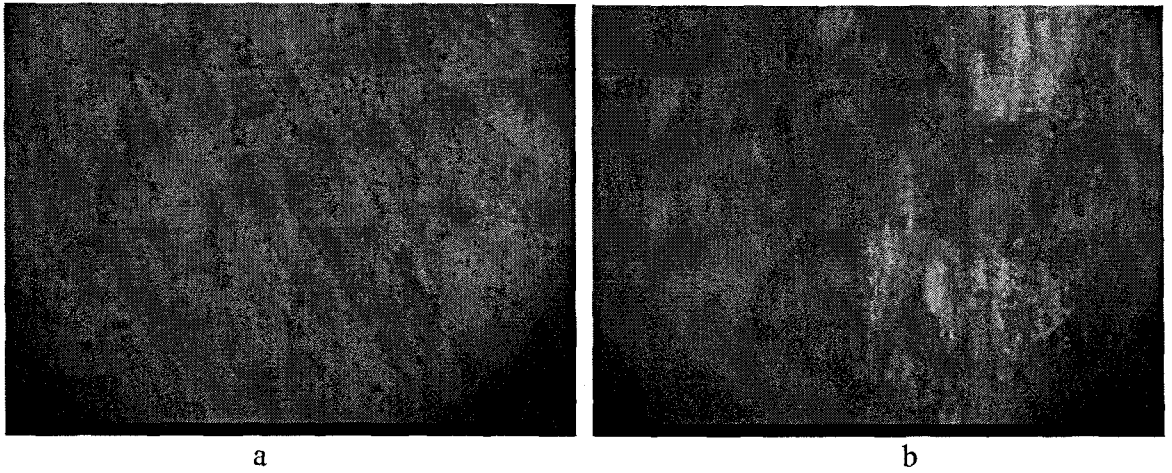
c

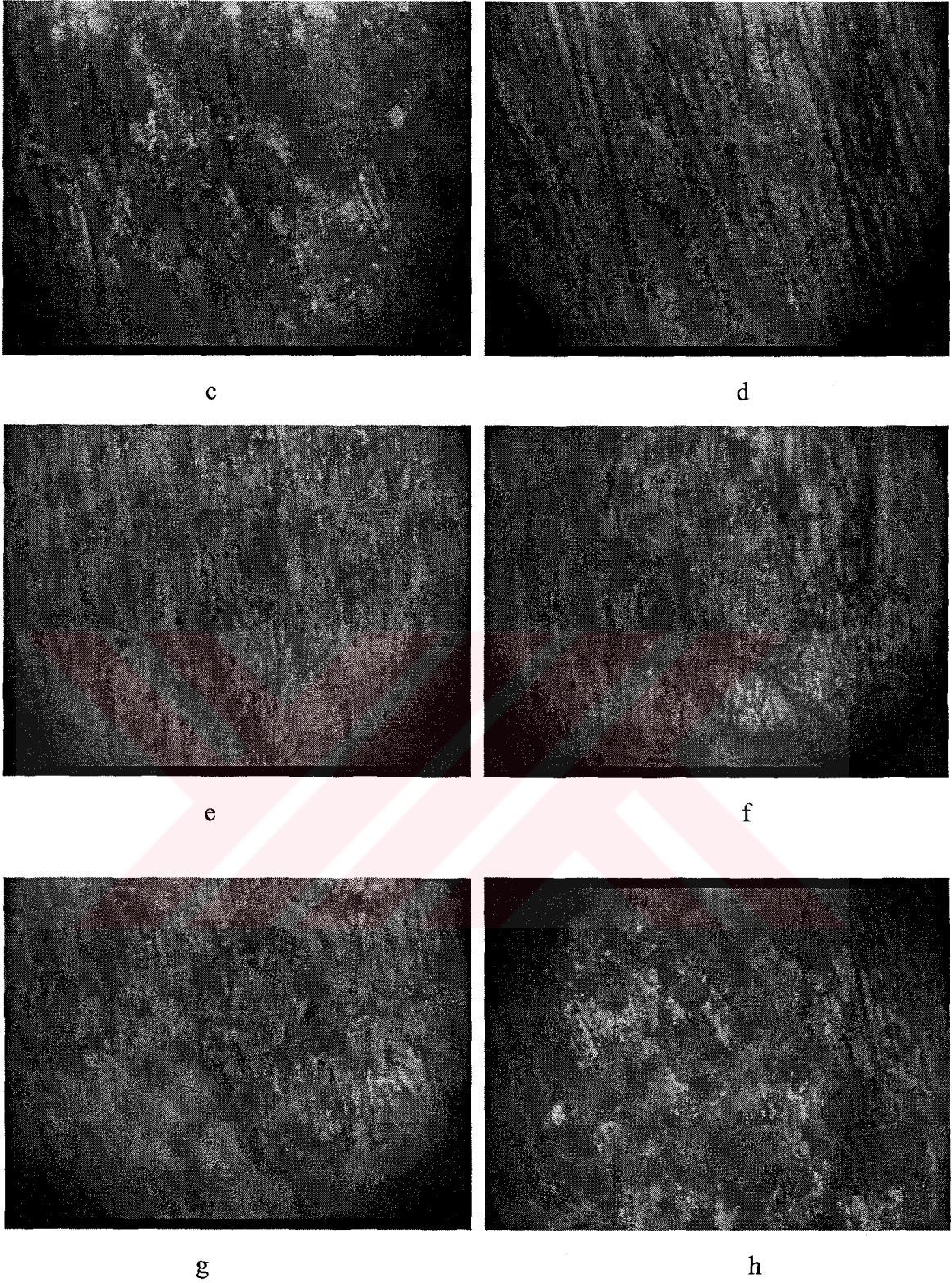


d



Şekil 7.13 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin tuz testi sonrası makro yapıları (10X)  
a) kaplanmamış, b) çinko kaplanmış, c) mangan fosfat kaplanmış, d) çinko fosfat kaplanmış,  
e) kadmiyum kaplanmış, f) akımsız nikel kaplanmış, g) sert krom kaplanmış, h) akımsız nikel  
üzerine sert krom kaplanmış





Şekil 7.14 Kimyasal kaplama uygulanmış numunelerin tuz testi sonrası mikro yapıları ( 400X) a) kaplanmamış, b) çinko kaplanmış, c) mangan fosfat kaplanmış, d) kadmiyum kaplanmış, e) akımsız nikel kaplanmış, f) sert krom kaplanmış, g) akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış, h) çinko fosfat kaplanmış

Çizelge 7.4 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin korozyon hızları

Kaplama Türü	Korozyon Hızı (mg/h)		
	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Kaplanmamış numune	2,050	2,052	2,051
Çinko kaplanmış numune	1,570	1,569	1,570
Çinko fosfat kaplanmış numune	1,470	1,470	1,471
Mangan fosfat kaplanmış numune	1,880	1,882	1,880
Kadmiyum kaplanmış numune	0,207	0,208	0,208
Akımsız nikel kaplanmış numune	0,088	0,089	0,087
Sert krom kaplanmış numune	0,780	0,781	0,780
Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numune	0,110	0,111	0,110

#### 7.3.4 Mikro Sertlik Ölçüm Testi

Kaplanmış veya kaplanmamış malzemelerin mikrosertliğini tespit etmek için yapılan bir ölçümdür.

Kullanılan ekipman; HVM-2000 shimadzu mikrosertlik test cihazı.



Şekil 7.15 HVM-2000 shimadzu mikrosertlik test cihazı

Cihaz üzerine yerleştirilen numune mikrosertlik test cihazına yerleştirilmiş, cihazın uç kısmında bulunan özel şekilli blok ile numune üzerine 50gr-1000gr arasında yük uygulanmıştır. Uçun numune üzerinde oluşturduğu prizma şeklindeki izin köşe noktaları

arasındaki mesafe cihaza tanımlanmış, bu sayede yapılan hesaplamayla kuponun sertliği vickers cinsinde hesaplanmıştır. Herbir kimyasal kaplama türü için hazırlanan 3 farklı numunenin farklı bölgelerinde 5 adet ölçüm yapılmıştır.

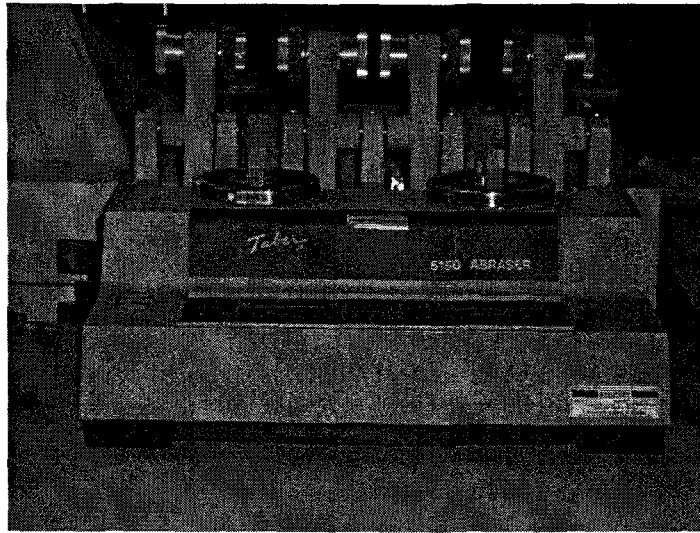
Çizelge 7.5 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin sertlik değerleri

Kaplama Türü	Sertlik (VSD-HV)				
	100	105	105	95	100
Kaplanmamış numune	100	105	105	95	100
Çinko kaplanmış numune	220	225	230	235	230
Çinko fosfat kaplanmış numune	65	80	70	90	75
Mangan fosfat kaplanmış numune	70	90	85	70	65
Kadmiyum kaplanmış numune	220	210	240	230	225
Akımsız nikel kaplanmış numune	850	820	870	810	880
Sert krom kaplanmış numune	1150	1170	1150	1180	1160
Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numune	1090	1150	1220	1050	1100

### 7.3.5 Aşınma Testi

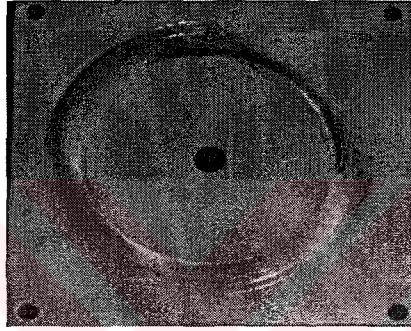
Elektrokimyasal olarak kaplanan metal yüzeylerde kaplamaların aşınmaya karşı dayanıklılığını kontrol etmek için ASTM-B-571 standardına uygun olarak yapılır.

Kullanılan ekipman; Model 5150 aşındırıcı cihaz

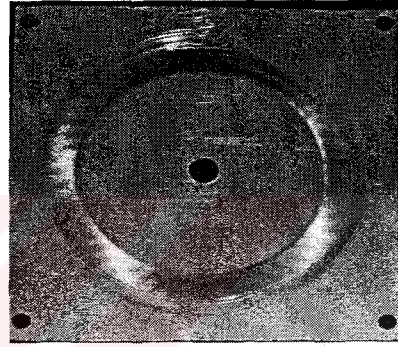


Şekil 7.16 Model 5150 aşındırıcı cihaz

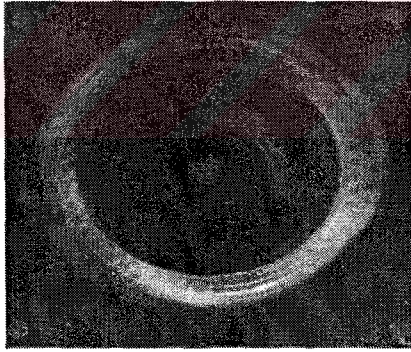
Numunelerin aşındırma cihazına bağlanabilmesi için ortasına ve dört kenarına uygun ölçülerde delik delindikten sonra kimyasal olarak kaplanmıştır. Her numunenin kaplandıktan sonraki ağırlığı  $10^{-3}$  gr hassasiyetindeki terazi ile tartılmıştır. Kaplanan numuneler aşındırma cihazına yerleştirilmiştir. Aşındırıcı diskler numune üstünde hareket edecek şekilde cihazda bulunmaktadır. Her bir numune 1000 devir tamamlanıncaya kadar test cihazında aşınmaya tabi tutulmuştur. Bu mesafe 220 metreye karşılık gelmektedir. Aşınma testi tamamlandıktan sonra numuneler saf su ile yıkanıp kurutulmuş ve tekrar tartılmıştır. Aradaki ağırlık farkı kullanılarak mg/metre cinsinden aşınma hızı tespit edilmiştir.



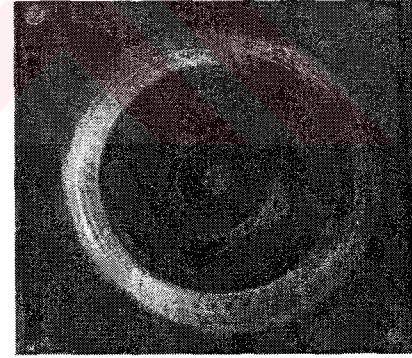
a



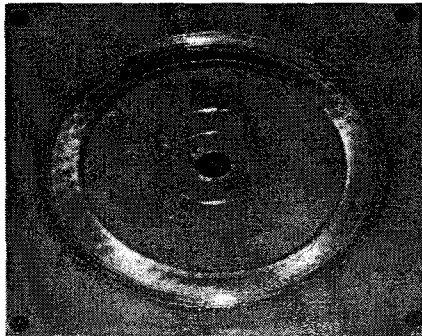
b



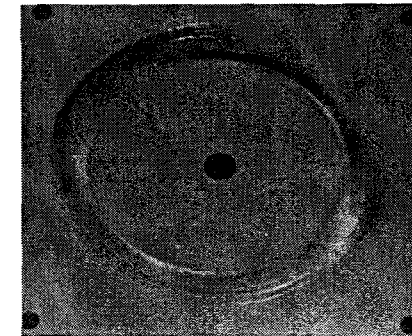
c



d



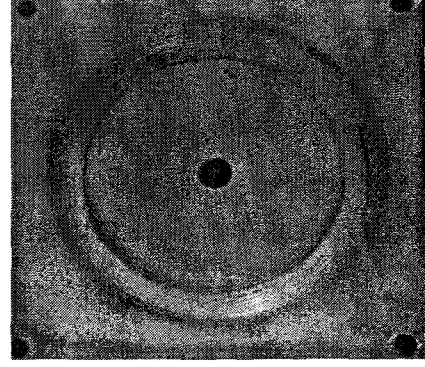
e



f



g



h

Şekil 7.17 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma testi sonrası makro yapıları  
 a) kaplanmamış, b) çinko kaplanmış, c) mangan fosfat kaplanmış, d) çinko fosfat kaplanmış,  
 e) kadmiyum kaplanmış, f) akımsız nikel kaplanmış, g) sert krom kaplanmış, h) akımsız nikel  
 üzerine sert krom kaplanmış

Çizelge 7.6 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma hızları

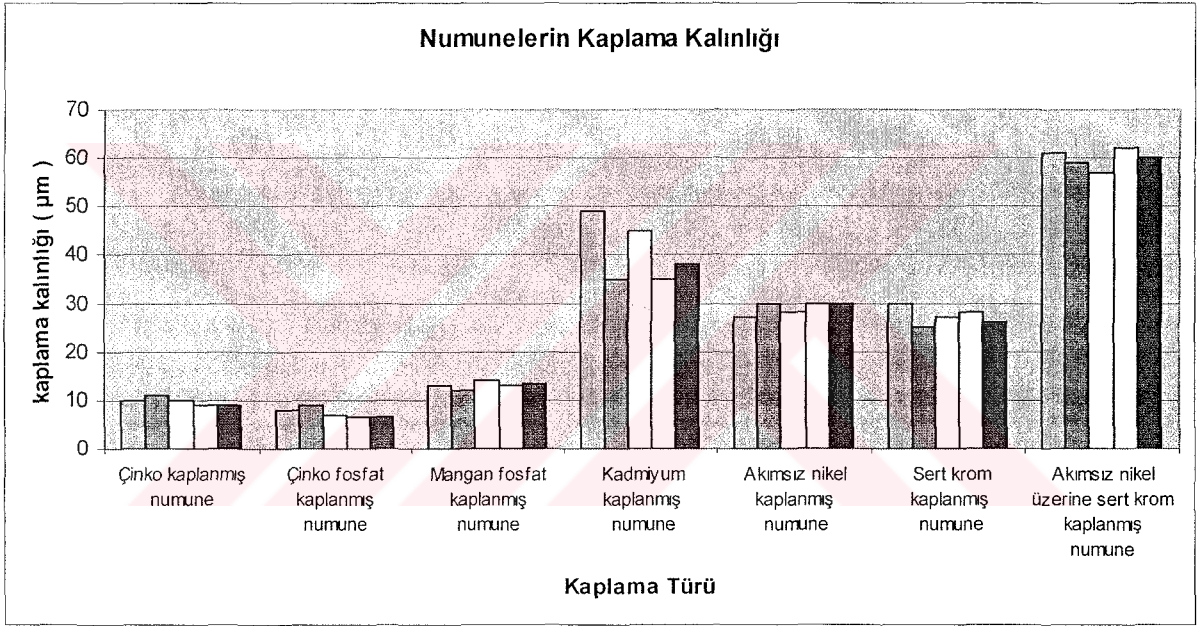
Kaplama Türü	Aşınma Hızı (mg/m)		
	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Kaplanmamış numune	0,09100	0,09101	0,09099
Çinko kaplanmış numune	0,09510	0,09511	0,09509
Çinko fosfat kaplanmış numune	0,10010	0,10010	0,10011
Mangan fosfat kaplanmış numune	0,08990	0,08991	0,08990
Kadmiyum kaplanmış numune	0,21800	0,21802	0,21803
Akımsız nikel kaplanmış numune	0,08200	0,08201	0,08198
Sert krom kaplanmış numune	0,00501	0,00500	0,00500
Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numune	0,00504	0,00503	0,00504

## 8. İRDELEME

Hazırlanan numuneler ilgili standartlara göre kimyasal olarak kaplandıktan sonra, kimyasal kaplamaların aşınma ve korozyona karşı dayanımının ne derecede olduğu test sonrası elde edilen verilerle karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir.

### 8.1 Kaplama Kalınlığı Ölçüm Sonuçlarının İrdelenmesi

Kaplama kalınlığının ölçülmesi testi sonrasında elde edilen kaplama kalınlıkları Şekil 8.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 8.1 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin kaplama kalınlıkları

Kaplanan numunelerde homojen bir kaplama kalınlığı elde edilmiştir. Kadmiyum kaplanan numunenin deney şartlarının yeniden gözden geçirilmesi ve yapılan ölçüm sayısının artırılması ile bu sapmanın nedeni tespit edilmelidir.

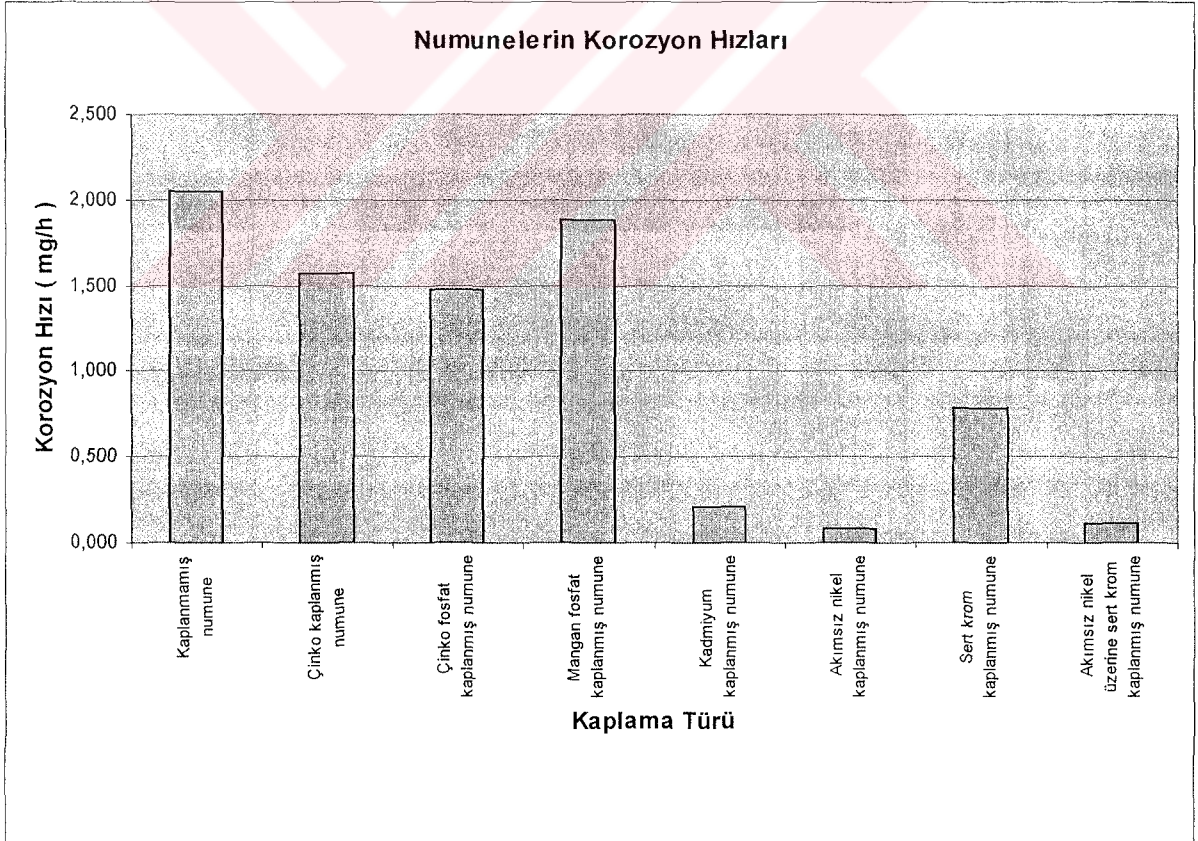
### 8.2 Adhesyon Testi Sonuçlarının İrdelenmesi

Kimyasal kaplama işlemi uygulanan numunelerde yapılan adhesyon testi sonrasında, bütün kaplama türlerinde metal ile kaplama arasında herhangi bir kalkmanın veya çatlamanın oluşmadığı, tek bir metal gibi davrandığı hem gözle muayene yapılarak, hem de floresan penetrant yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Kimyasal kaplama işlemi yapılırken gözönünde

bulundurulması gereken hususlardan bir tanesi de kaplanacak metal ile kaplama arasındaki sertlik farkının çok fazla olmamasıdır. Aksi takdirde, yumuşak bir malzeme üzerine yapılan sert bir kaplama, mekanik zorlamalar karşısında yeterli dayanımı gösteremeyip çatlamalara mazur kalabilmektedir.

### 8.3 Tuz Testi Sonuçlarının İrdelenmesi

Kimyasal kaplama uygulanmış numuneler 96 saat tuz testi cihazında bekletildiğinde, kaplanmamış numune üzerinde çok belirgin bir şekilde korozyon ürünlerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Manganoz fosfat kaplanmış numunedeki 2 saat sonra, çinko ve çinko fosfat kaplanmış numunelerde 12 saat sonra korozyon ürünlerinin oluşmaya başladığı, 96 saat sonrasında ise bu korozyon ürününün çok belirgin bir hale geldiği görülmüştür. Kadmiyum, akımsız nikel, sert krom ve akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numunelerde ise 96 saat sonrasında gözle görülebilir korozyon ürünlerinin oluşmadığı gözlemlenmiştir.

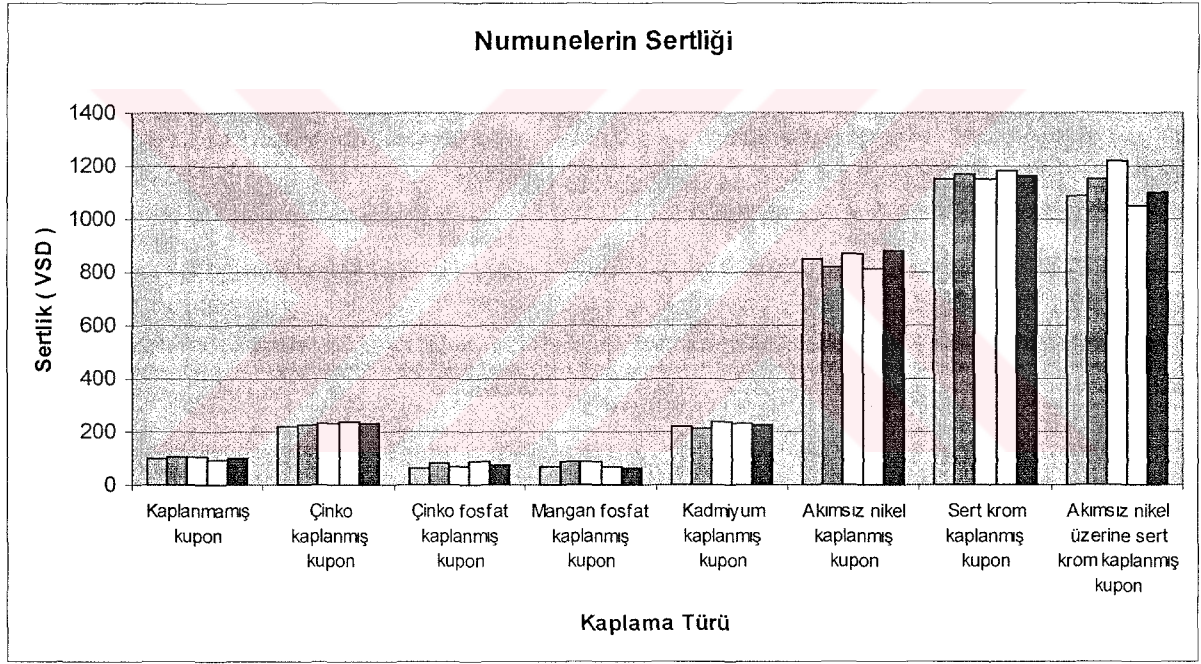


Şekil 8.2 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin korozyon hızları

Yapılan bütün kimyasal kaplamalar numuneyi olduğundan daha fazla korozyona karşı daha dayanıklı hale getirmiştir. En düşük dayanımı mangan fosfat kaplama, en yüksek dayanımı akımsız nikel kaplamanın sağladığı görülmektedir. Ancak akımsız nikel üzerine sert krom kaplanarak hazırlanmış numuneninde en az akımsız nikel kaplanmış numune kadar korozyona karşı dayanıklı olduğu görülmektedir.

#### 8.4 Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçlarının İrdelenmesi

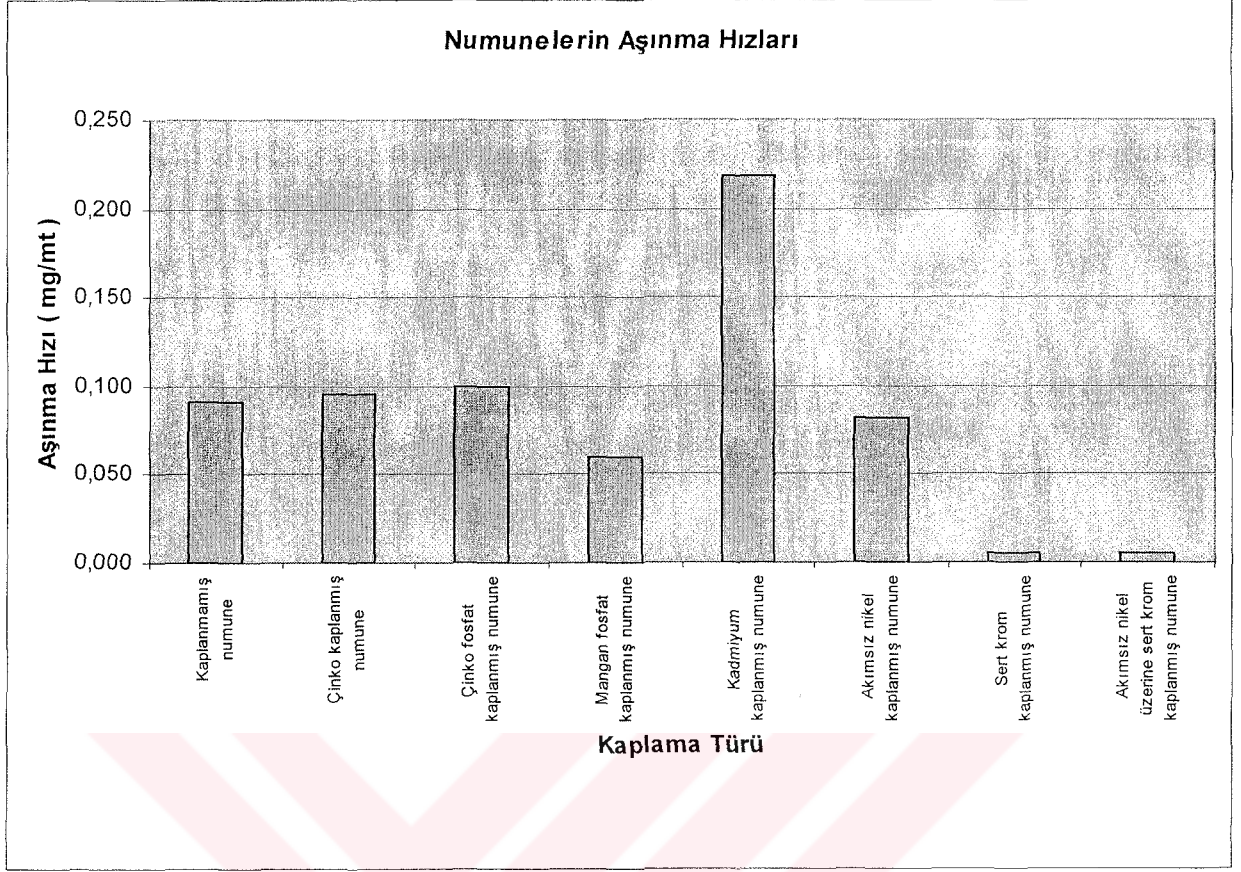
Kaplama uygulanmış numunelerin sertliği ölçüldüğünde, çinko fosfat ve mangan fosfat kaplama dışındaki tüm kaplamaların malzemeyi olduğundan daha sert hale getirdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte numunelerin yüzeyinde homojen bir şekilde sertlik sağlandığı görülmüştür.



Şekil 8.3 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin sertlik değerleri

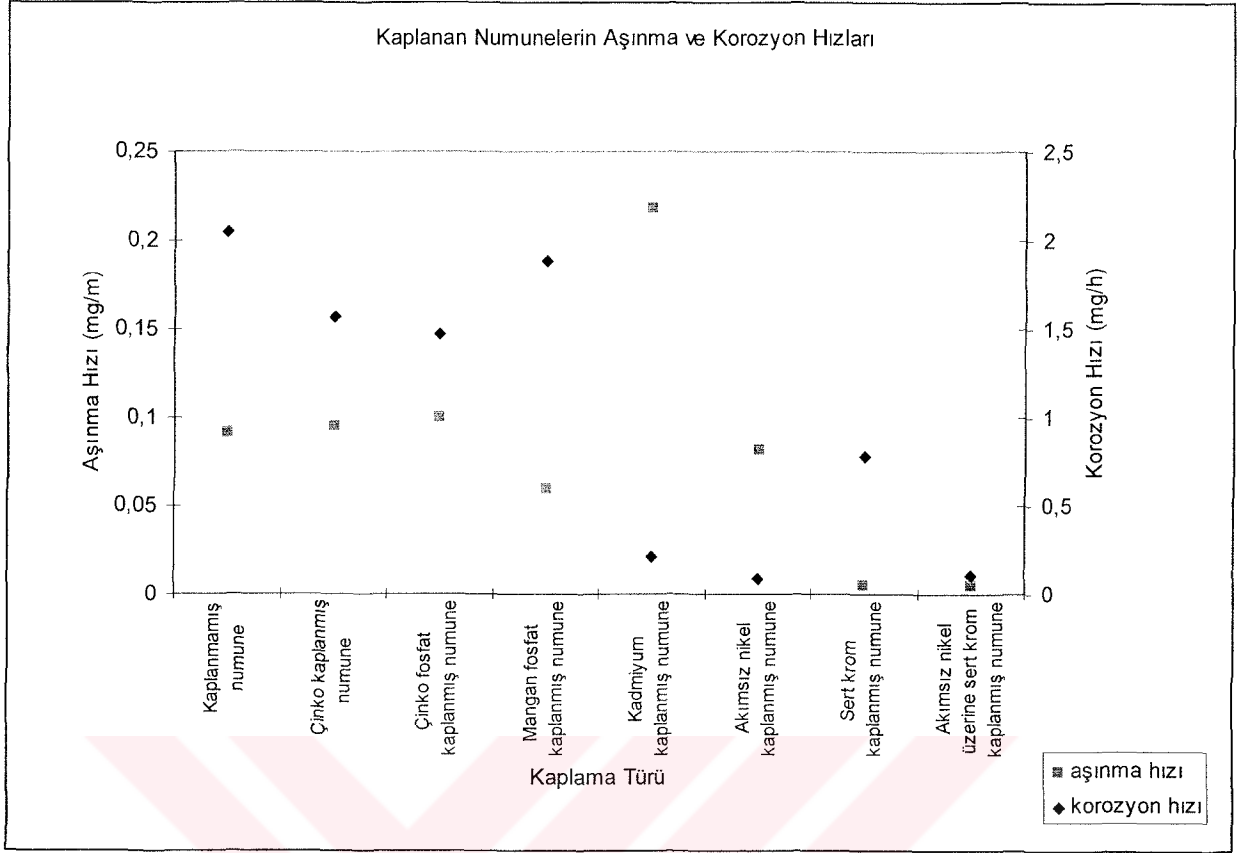
#### 8.5 Aşınma Testi Sonuçlarının İrdelenmesi

Kimyasal kaplanmış numunelere uygulanan aşınma testi sonrasında, mangan fosfat, çinko fosfat, kadmiyum, akımsız nikel kaplanmış numunelerin malzemenin aşınmaya karşı olan dayanımında bir artış sağlamadığı görülmüştür. Sert krom kaplamanın ve akımsız nikel üzerine sert krom kaplamanın aşınmaya karşı en dayanıklı kaplamalar olduğu görülmüştür.



Şekil 8.4 Kimyasal kaplama uygulanan numunelerin aşınma hızları

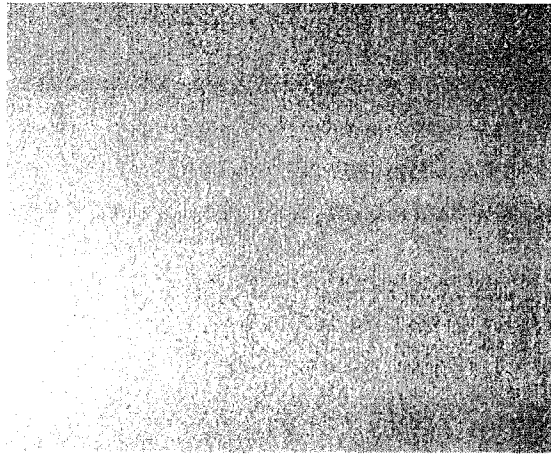
Yapılan aşınma testi ve tuz testi sonrasında numunelerin aşınma ve korozyon hızları incelendiğinde, aşınma hızı düşerken, korozyon hızının arttığı Şekil 8.4' te görülmektedir. Aşınma ve korozyon hızı için oluşturduğumuz eğrilerin mangan fosfat kaplama ve akımsız nikel üzerine sert krom kaplama türlerinde kesiştiği, yani her iki açıdanda birbirini dengeleyici hızlara sahip olduğu gözlemlenmiştir. Akımsız nikel kaplama üzerine sert krom kaplama uygulanan numunede, yüksek korozyon direnci ve aşınma dayanımı elde edilmiştir (Şekil 8.5).



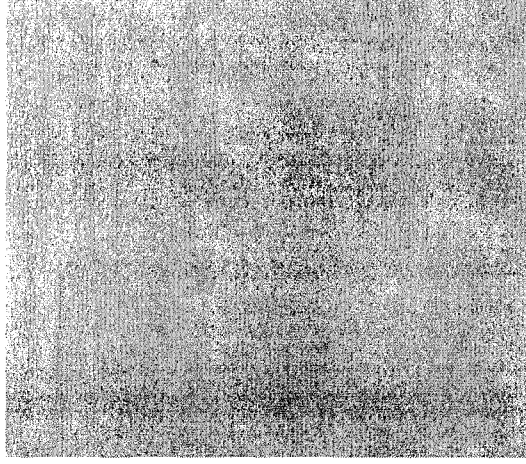
Şekil 8.5 Kaplama uygulanan numunelerin aşınma ve korozyon hızları

### 8.6 Makroyapısal İrdeleme

Şekil 8.6 'daki makroyapıda görüldüğü gibi kaplanmamış numune mat ve pürüzlü bir yüzeye sahipken, çinko kaplama uygulanan numunede parlak, mavimsi düzgün bir yüzey elde edilmiştir. Bu sebeple çinko kaplama işlemi genellikle dekoratif amaçlı olarak tercih edilmektedir (Şekil 8.7).

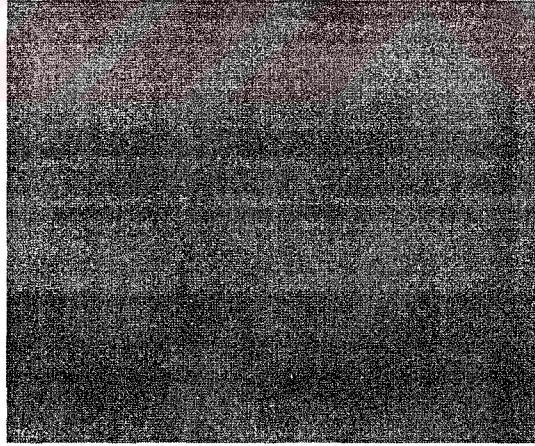


Şekil 8.6 Kaplanmamış numunenin makro yapısı (10X)

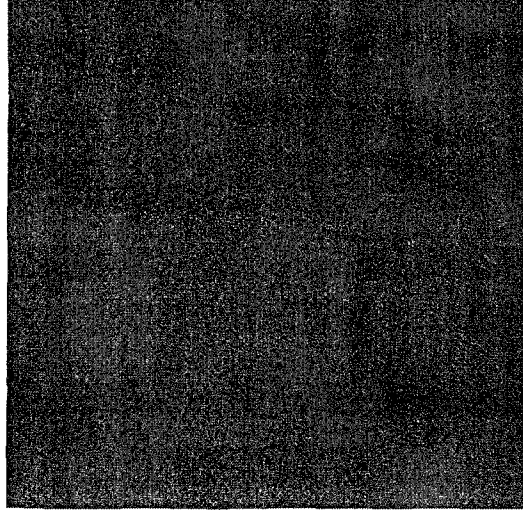


Şekil 8.7 Çinko kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

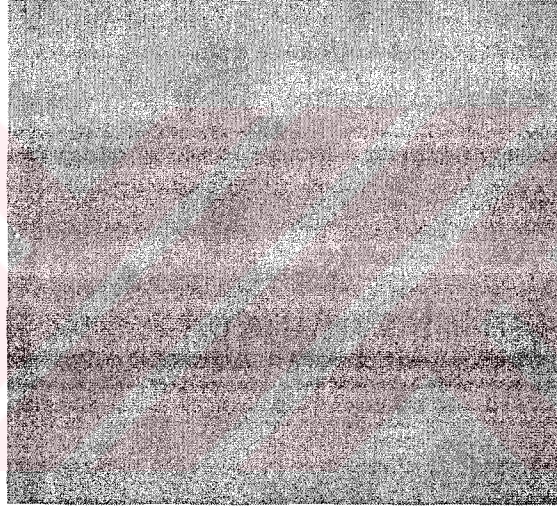
Çinko fosfat kaplama, mangan fosfat kaplama, kadmiyum kaplama ve akımsız nikel kaplama uygulanan numunelerde Şekil 8.8, Şekil 8.9 ve Şekil 8.10' da görüldüğü gibi pütürlü bir yüzey elde edilmiştir. Bu kaplama türleri genel olarak boya altlığı olarak kullanılmaktadır. Pütürlü yüzey boyanın yüzeye tutunmasını kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda bu kaplamalarda elde edilen yüzeyin pütürlü olmasından dolayı aşınma hızlarının diğerlerine göre yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 8.8 Çinko fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

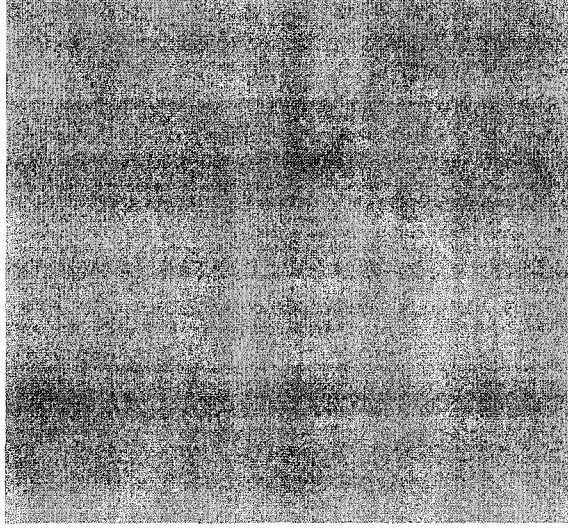


Şekil 8.9 Mangan fosfat kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)



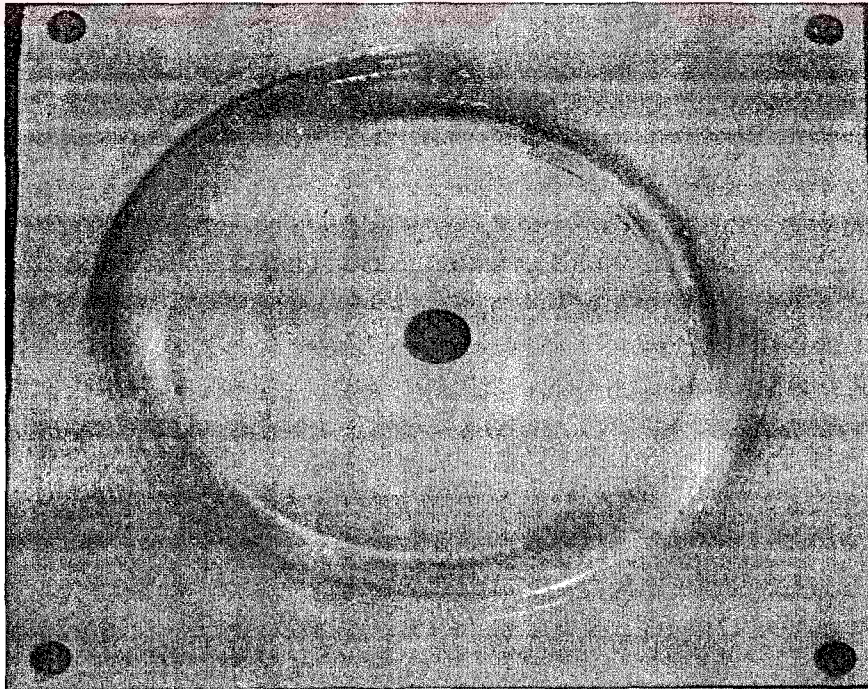
Şekil 8.10 Kadmiyum kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

Sert krom kaplama uygulanan numunede çok düzgün bir yüzey elde edilmiştir. Yüzeyin düzgün olması parçayı aşınmaya karşı dayanıklı hale getirmekle birlikte, bu kaplama türünün dekoratif amaçlı olarak ta kullanılmasını sağlamaktadır.

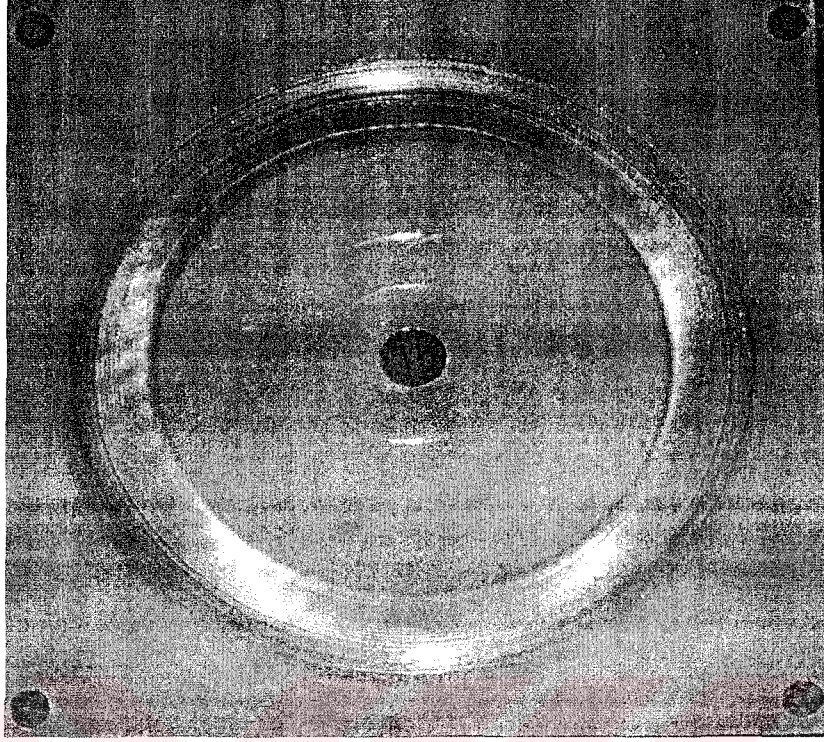


Şekil 8.11 Sert krom kaplanmış numunenin makro yapısı (10X)

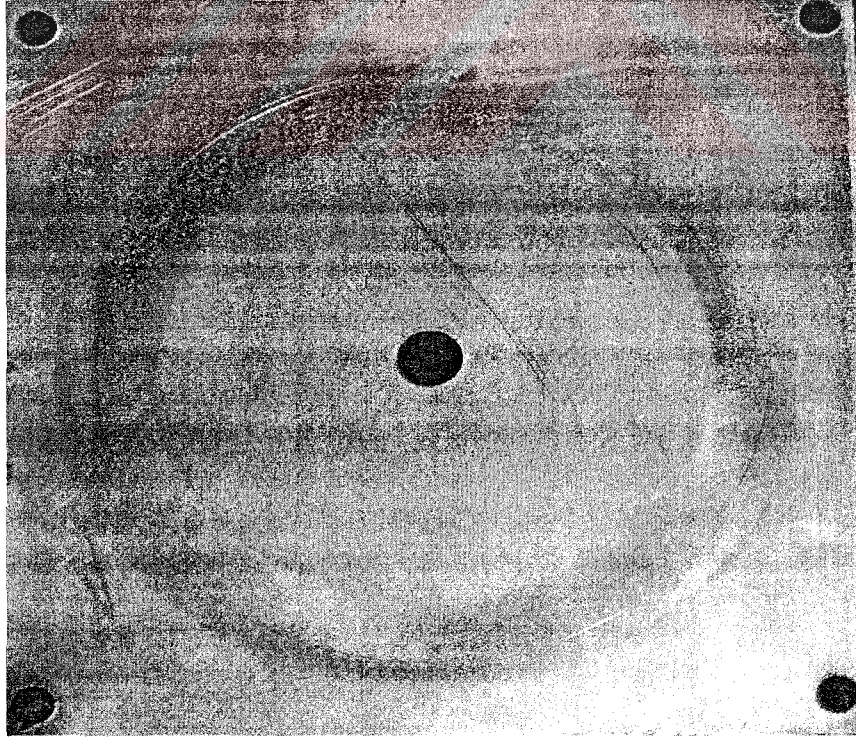
Yapılan aşınma testi sonrasında, kadmiyum kaplama uygulanan numunenin yüzeyi çok fazla deformasyona uğrarken, aşınmanın olduğu bölgelerde kaplamanın tamamen kalktığı Şekil 8.13 'te, sert krom kaplama ve akımsız nikel kaplama üzerine sert krom kaplama uygulanan numunelerde ise yüzey deformasyonunun sadece bir iz şeklinde olduğu , kaplamaya çok büyük bir hasar vermediği Şekil 8.14 ve Şekil 8.15' te görülebilmektedir.. Kaplanmamış numunede de gözle görülebilir yüzeysel değişimlere meydana gelmiştir.



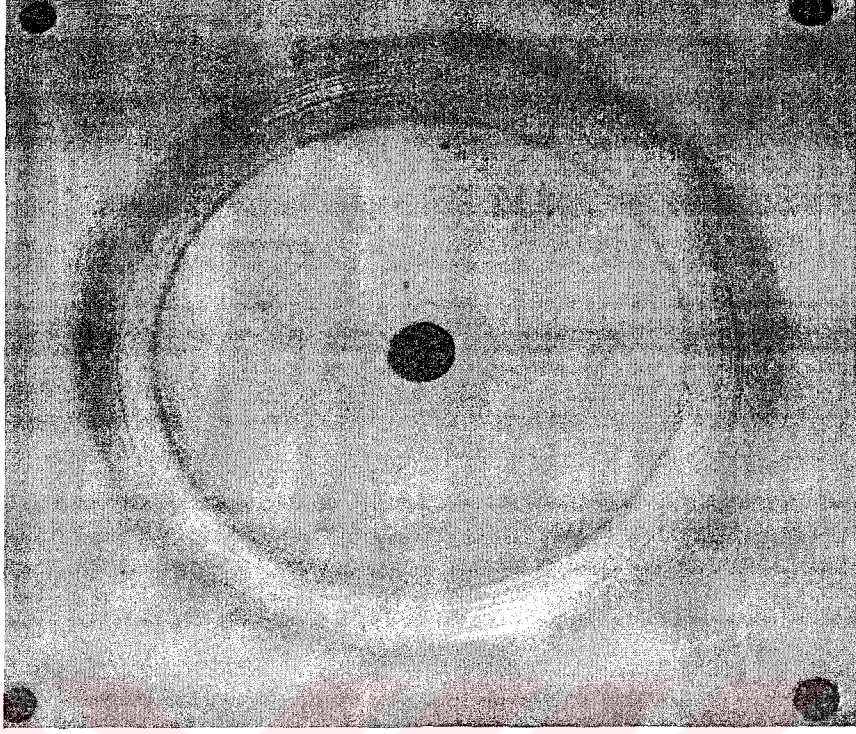
Şekil 8.12 Kaplanmamış numunenin aşınma testi sonrası makro yapısı



Şekil 8.13 Kadmiyum kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası makro yapısı



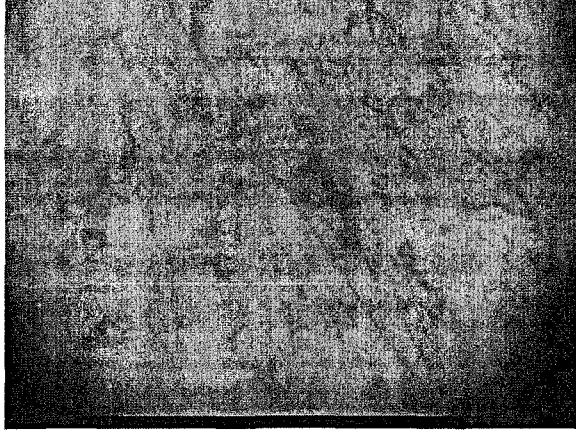
Şekil 8.14 Sert krom kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası makro yapısı



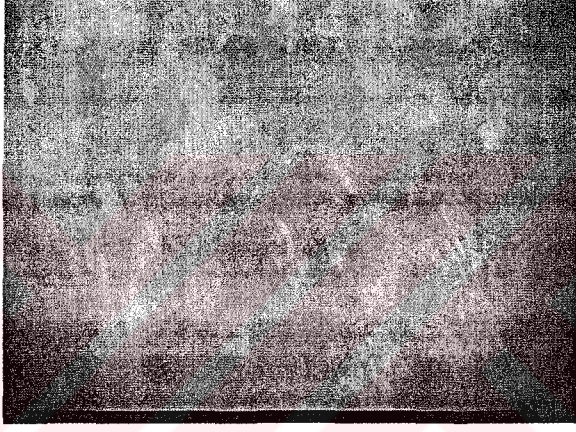
Şekil 8.15 Akımsız nikel üzerine sert krom kaplanmış numunenin aşınma testi sonrası makro yapısı

## 8.2 Mikroyapısal İrdeleme

Yapılan tuz testi sonrasında, kaplanmamış numunede tane sınırlarında oluşna yoğun korozyon nedeniyle taneler arası bağın bozulduğu, korozyon hızı en yüksek olarak tespit edilen mangan fosfat kaplama uygulanan numunenin mikro yapısı incelendiğinde, tane sınırları arasındaki bağın bozulduğu, parçanın 96 saat sonrasında tüm kesit alanı boyunca korozyona uğradığı görülmüştür (Şekil 8.17). Korozyon hızı en düşük olarak tespit edilen sert krom kaplama uygulanmış numunede ise, tane sınırlarının çok belirgin bir şekilde korunduğu, korozyonun tane sınırlarında düşük derecede meydana geldiği görülmüştür (Şekil 8.18).



Şekil 8.16 Kaplanmamış numunenin tuz testi sonrası mikro yapısı (400X)



Şekil 8.17 Mangan fosfat kaplama uygulanan numunenin tuz testi sonrası mikro yapısı ( 400X)



Şekil 8.18 Sert krom kaplama uygulanan numunenin tuz testi sonrası mikro yapısı ( 400X)

## 9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Alaşımsız çelikler, aşınma ve korozyona karşı yüksek dayanım göstermemektedir. Bu durum, hem malzeme maliyetine hem de işçilik maliyetine neden olmakta ve mekanizma verimini düşürmektedir. Bunu önlemek için kimyasal kaplamaların kullanılması durumunda ne gibi sonuçlar elde edilebileceği yapılan testler sonrasında araştırılmıştır.

Kimyasal kaplamadaki temel amaç; bir metali, düşük maliyetle daha iyi özelliklere sahip hale getirebilmektir. Bu çalışmada uygun çelik-kimyasal kaplama eşlemesi yapılabilmesi durumunda istenilen verimin elde edilebileceği sonucu elde edilmiştir.

Akımsız nikel üzerine sert krom kaplama yapılan numunede elde edilen sonuç ise, malzemenin hem aşınmaya hem de korozyona karşı dayanıklı hale gelmiş olmasıdır (Şekil 8.5). Bu uygulamada her iki kaplamanın avantajlarını bir araya gelmiştir. Yani, akımsız nikel kaplamanın korozyona dayanıklılığı, sert krom kaplamanın aşınmaya dayanıklılığı, bu iki kaplamanın bir arada kullanılması yolu ile metali hem korozyona hem de aşınmaya dayanıklı hale getirmiştir. Çinko kaplama ve sert krom kaplama uygulamalarında elde edilen düzgün ve parlak yüzey görüntüsünden dolayı dekoratif amaçlı olarak kullanılmaktadırlar.

## KAYNAKLAR

- Altınkök, N., (2001), “St37 Çelik Üzerine Yapılan Krom ve Nikel Kaplamaların Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, II. Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojisi Sempozyumu, (2001), Manisa.
- Andrade, C., (2004), “Benchmarking Through An Algorithm of Repair Methods of Reinforcement Corrosion”, *Cement and Concrete Composites*, 27:727-733.
- Ashby, M.F., (1988), *Engineering Materials 1*, Pergamon Press, Oxford.
- Avner, S.H., (1974), *Introduction to Physical Metallurgy*, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Batis, G., (2004), “Corrosion of Steel Reinforcement Due to Atmospheric Pollution”, *Cement and Concrete Composites*, 27:269-275.
- Batistaa, M., (2001), “Development of Steel Construction”, *Journal of Constructional Steel Research*, 61:1009-1024.
- Berk, V., (1996), Fosfatlama Prosesi, *Chemist Dergisi*, 46-61.
- Chena, B., (1997), “Evaluation of Atmospheric Corrosion Damage to Steel Space Structures in Coastal Areas”, *International Journal of Solids and Structures*, 42:4673-4694
- Cottrell, A., (1975), *An Introduction to Metallurgy*, Edward Arnold Ltd., London.
- Çakır, A.F., (1988), *Metallerin Korozyonu*, Borusan Postası, İstanbul.
- Demirci, A.H., (2004), *Mühendislik Malzemeleri*, Alfa Akademi Basım Yayım Dağıtım Ltd., Bursa.
- Doruk, M., (1982), *Korozyon ve Önlenmesi*, O.D.T.Ü Mühendislik Fakültesi, Yayın no:70, Ankara.
- Durney, L., (1969), *Elektro Plating*, Mc Graw-Hill Book Company, New York.
- Gabe, D., (2001), Yüzeylerin Kaplamaya Hazırlanması, *Yüzey İşlemler Dergisi*, 27-35.
- Ghavamib, K., (2002), “Development of Steel Construction”, *Journal of Constructional Steel Research*, 61:1009-1024.
- Gua, C., (2001), “High Corrosion Resistant coatings on Steel”, *Surface and Coatings Technology*, 197:61-67.
- Haidopoulou, M., (1998), “Surface Modifications of 316 Stainless Steel for the Improvement of Its Interface Properties”, *Surface and Coatings Technology*, 197:278-287.
- Han, J., (2001), “Detection of Corrosion Steel Under an Organic Coating by Infrared Photography”, *Corrosion Science*, 46:787-793.

Jackson, C.W., (1997), "Insulation an Investment Worth Protecting", *Insulation Outlook*, 13:104-109.

Kayalı, E.S., (1996), *Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri*, İ.T.Ü Kütüphanesi, Sayı:1262, İstanbul.

Larochea, G., (2002), "Hard Chrome Coating of Steel", *Surface and Coatings Technology*, 192:118-127.

Mc Clintock, F.A., (1996), *Mechanical Behaviour of Materials*, Addison-Wesley Publishing Company, U.S.A.

Onaran, K., (1993), *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

Onaran, K., (1993), *Malzeme Bilimi Problemleri ve Çözümleri*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

Onaran, K., (1997), *Malzeme Bilimi*, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.

Özbek, Y., *Kişisel Uygulama Notları*.

Parthiban, G.T., (2000), "Corrosion Resistance of Steel", *Corrosion Science*, 47:1625-1642.

Ravi, R., (2004), "Analysis for corrosion of steel", *Corrosion Science*, 47:1625-1642.

Rollason, E., (1975), *Metallurgy for Engineers*, Edward Arnold Ltd., Norwich.

Sarıkaya, Ö., (2004), "Kaplama Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 2004, Denizli.

Savaşkan, T., (1999), *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*, Derya Kitabevi, Trabzon.

Smith, W.F., (1980), *Principles of Materials Science and Engineering*, Mc Graw-Hill Book Company, New York.

Şanbaşoğlu, S., (1985), *Standart Çeliklerin Uluslararası Eşdeğerleri*, On. Ar Ltd., Ankara.

Tekin, E., (1986), "Mühendisler İçin Çelik Seçimi", *TMMOB Makina Mühendisler Odası Yayını*, 119:42-47.

TS 1111, (1972), *Çelikler ve Demir-Karbon Malzemesi Sınıflar ve İşaretler*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Z., Malgarzota, (2004), "Protective Properties of Organic Phosphate Coatings", *Progress in Organic Coatings*, 53:276-285.

**INTERNET KAYNAKLARI**

- [1] [www.akcelik.com.tr](http://www.akcelik.com.tr)
- [2] [www24.brinkster.com](http://www24.brinkster.com)
- [3] [www.korozyon.org.tr](http://www.korozyon.org.tr)
- [4] [www.korozyondernegi.org.tr](http://www.korozyondernegi.org.tr)
- [5] [www.metalurji.org.tr](http://www.metalurji.org.tr)



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum Tarihi	23.03.1979	
Doğum Yeri	İstanbul	
Lise	1993-1996	Yeşilköy 50. Yıl Lisesi
Lisans	1996-2001	Uludağ Üniversitesi Makina Fak. Endüstri Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2005	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilimdalı İmal Usulleri Programı
<b>Çalıştığı Kurum</b>	2001-Devam ediyor	Kalekalıp Makina ve Kalıp San. A.Ş. Endüstri Mühendisi