

**TOZALTI SERT DOLGU KAYNAĞINA
BOR TOZU İLAVESİNİN
AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Serkan APAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2007
ANKARA**

Serkan APAY tarafından hazırlanan TOZALTI SERT DOLGU KAYNAĞINA BOR TOZU İLAVESİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitim Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adem KURT
Metal Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ
Metal Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA
Metal Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. Hakan ATEŞ
Metal Eğitim Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi
Yrd. Doç. Dr. İbrahim ERTÜRK
Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 19/10/2007

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Serkan APAY

**TOZALTI SERT DOLGU KAYNAĞINA BOR TOZU İLAVESİNİN
AŞINMA ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Serkan APAY

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ekim 2007

ÖZET

Aşınan veya aşınması muhtemel yüzeyler sert dolgu ile kaplandığında kullanım ömürlerinde artış olmaktadır. Aşınan yüzeylerin bakımı ve tamirâtı için uygulanan yöntemlerden biriside tozaltı ile sert dolgu kaynağı uygulamalarıdır. Bu çalışmada tozaltı sert dolgu işlemlerinde yaygın olarak kullanılan OP 1250 A kaynak tozu ve bu toza ilave edilen BOR ve Grafit tozları kullanılmıştır. İlave tel olarak SG₂ kaynak teli kullanılmıştır. Deney numunelerine azot gazı ortamında ve gaz ortamı olmadan kaynak dikişleri çekilmiştir. Elde edilen kaynak dikişlerinden aşınma, sertlik ve mikro yapı numuneleri çıkartılmıştır. Bu numuneler üzerinde sertlik ölçümü, aşınma deneyi ve metalografik incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda aşınma değerlerinin ve sertlik değerlerinin ilave edilen Bor, Grafit tozu ve azot gazı ilavesi ile arttığı görülmüştür. Bu numunelere uygulanan deneyler neticesinde, % 40 Bor + % 10 Grafit ve % 50 OP 1250 A toz karışımı kullanılarak, azot gazı ilaveli, numunede en iyi sertlik ve en iyi aşınma direncine ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 710.3.019
Anahtar Kelimeler : Tozaltı kaynağı, sert dolgu, bor, aşınma, sürtünme
Sayfa Adedi : 120
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENC

**THE EFFECT OF BORON POWDER ADDITION ON WEAR PROPERTIES OF
SUBMERGED HARD FACING WELDING**

(M. Sc. Thesis)

Serkan APAY

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE & TECHNOLOGY**

October 2007

ABSTARACT

When worn and likely to worn surfaces are coated with hard facing, their service life increase. One of the maintance method for the worn surfaces is the application of Submerged hard facing welding. In this study, OP 1250 A welding powder, which is used commanly, with additions of Boron and Graphite are used. SG₂ was used as welding wire. Samples were welded under N and in the air. Samples were cut out for hardness, and microstructural investigations. Hardness measurements and microstructural investigations were carried out on these samples. It is pointed out from the examinations that hardness of weld increased with the addition of Boron and Graphite and the usage of N. The highest hardness value was obtained with the powder combination of 40 % Boron, 10 % Graphite and 50 % OP 1250 A under N.

Science Code	: 710.3.019
Key Words	: Submerged arc welding, hard facing, boron, wear, tribology
Page Number	: 120
Advisers	: Assist. Prof. Dr. Behçet GÜLENC

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ hocama yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Yrd. Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU hocama, ayrıca Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Nurullah KIRATLI' ya, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji Malzeme Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. İsmail Özdemir ve Arş. Gör. Işıl Kayatekin' e, yapmış olduğum deneysel çalışmalarında emeği geçen bütün arkadaşlarıma ve maddi, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. TOZALTI KAYNAĞI VE SERT DOLGU KAYNAĞI	4
2.1. Tozaltı Kaynağı.....	4
2.1.1. Tozaltı kaynağının genel özellikleri.....	4
2.1.2. Tozaltı kaynağı prensibi ve kaynak donanımı	5
2.1.3. Tozaltı kaynağının avantajları ve dezavantajları.....	8
2.1.4. Tozaltı kaynağının uygulama alanları.....	9
2.1.5. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak tozları	10
2.1.6. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak telleri	12
2.2. Sert Dolgu Kaynağı.....	15
2.2.1. Sert dolgu kaynağı için kaynak yöntemi seçimi	17
2.2.2. Sert dolgu alaşımlarının sınıflandırılması	18
2.2.3. Sert dolgu kaynağının uygulama alanları.....	22
2.2.4. Sert dolgu kaynağının uygulanması	22

Sayfa

3. SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	24
3.1. Sürtünme	24
3.1.1. Genel tarif ve sınıflandırma	24
3.1.2. Sürtünme kanunları	37
3.1.3. Sürtünme katsayısı	38
3.2. Aşınma	39
3.2.1. Aşınma hasarları.....	40
3.2.2. Aşınma türleri.....	41
3.2.3. Aşınma deneyleri ve ölçüm yöntemleri	53
4. BOR MİNERALİ VE BOR BİLEŞİKLERİ	58
4.1. Bor Mineralleri.....	59
4.1.1. Kalsiyum boratlar.....	61
4.1.2. Sodyum – kalsiyum boratlar	63
4.1.3. Sodyum boratlar	64
4.1.4 Magnezyum – kalsiyum boratlar.....	66
4.1.5. Magnezyum boratlar	67
4.1.6. Stronsiyum boratlar	67
4.1.7. Silisyum – kalsiyum boratlar	68
4.1.8. Kompleks boratlar	68
4.2. Bor Minerallerinin Kullanım Alanları	68
4.3. Bor Yataklarının Dünyadaki Dağılımı	70
4.4. Türkiye Borat Yataklarının Dağılımı Ve Jeolojik Konumu.....	71
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	74

Sayfa

5.1. Deneyde Kullanılan Materyaller	74
5.1.1. Ana malzeme.....	74
5.1.2. Kaynak teli	74
5.1.3. Kaynak tozu	75
5.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar	75
5.2.1. Kaynak makinesi.....	75
5.2.2. Aşınma cihazı.....	75
5.3. Metot	76
5.3.1. Deneylerde kullanılacak tozların hazırlanması	77
5.3.2. Kaynak numunelerinin hazırlanışı ve kaynağın yapılışı	79
5.3.3. Metalografik deneyler için numune hazırlama ve metalografik inceleme	80
5.3.4. EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) analizi ve kimyasal yaş analiz	81
5.3.5. Numune sertlik ölçümleri.....	82
5.3.6. Aşınma deneyi.....	83
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	84
6.1. Metalografik İnceleme Sonuçları	84
6.1.1. Ana metal görüntüleri	84
6.1.2. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB) görüntüleri	85
6.1.3. Kaynak metali görüntüleri.....	88
6.1.4. Ana metal, ITAB ve kaynak dikişi birleşik görüntüler	95
6.2. EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) Analizi ve Kimyasal Yaş Analiz Sonuçları	98

Sayfa

6.2.1. EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) analizi sonuçları	98
6.2.2. Kimyasal yaş analiz sonuçları	100
6.3. Sertlik Ölçümü Deney Sonuçları	102
6.4. Aşınma Deneyi Sonuçları	103
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR	111
EKLER	116
ÖZGEÇMİŞ	120

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri	13
Çizelge 2.2. TS 5387 EN 756' ya göre tozaltı kaynağında kullanılan tellerin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça %)	14
Çizelge 2.3. Tozaltı kaynak tellerindeki manganez miktarı	14
Çizelge 3.1. Metallerin adhesyonunu etkileyen faktörler	46
Çizelge 3.2. Abrasiv aşınma proseslerinin içerdiği tipik aşınma hızları	49
Çizelge 4.1. Ticari öneme sahip bor mineralleri	61
Çizelge 5.1. Ana malzemenin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)	74
Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan SG ₂ kaynak telinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)	74
Çizelge 5.3. Toz karışım oranları ve kaynak ortamları	78
Çizelge 6.1. Deney numuneleri EDS analizi sonuçları	100
Çizelge 6.2. Kimyasal yaş analiz sonuçları	101
Çizelge 6.3. Sertlik ölçüm deneyi sonuçları	102
Çizelge 6.4. Aşınma deneyi sonucu numunelerdeki aşınma miktarları	104

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tozaltı kaynak yönteminin prensip gösterimi	6
Şekil 2.2. Tozaltı kaynak yönteminin donanım gösterimi	7
Şekil 2.3. Sert dolgu kaynakları	15
Şekil 2.4. Saç kesme zımba matris takımı.....	16
Şekil 2.5. Fe bazlı sert dolgu alaşımlarının mikro yapılarına göre uygulama alanları (Kotecki diyagramı)	19
Şekil 3.1. Sürtünme çeşitleri	24
Şekil 3.2. Kuru sürtünme modeli	26
Şekil 3.3. Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu	26
Şekil 3.4. Mikro kaynakların oluşması	27
Şekil 3.5. Sınır sürtünmesi	30
Şekil 3.6. Sıvı sürtünme	31
Şekil 3.7. Hidrodinamik sıvı sürtünmesi.....	33
Şekil 3.8. Sürtünme katsayısının değişimi	34
Şekil 3.9. Hidrostatik sıvı sürtünme.....	34
Şekil 3.10. Yuvarlanma sürtünmesi	36
Şekil 3.11. Elastohidrodinamik sürtünmesi	37
Şekil 3.12. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları.....	38
Şekil 3.13. Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterimi	40
Şekil 3.14. Adhesiv aşınmada oluşan kaynak bağı	42
Şekil 3.15. Kaynak bağlarının kopması ve malzeme transferi.....	43
Şekil 3.16. Üç cisimli abrasiv aşınma mekanizması	48
Şekil 3.17. Abrasiv tane boyutunun fonksiyonu olarak iki metalin aşınma oranı	48
Şekil 3.18. Kazımadan kaynaklanan toplam ağırlık kaybında toplam yer değiştirme miktarının etkisi	53

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Yağlamalı ve yağlamasız adhesiv aşınma deney yöntemleri.....	54
Şekil 3.20. Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler.....	55
Şekil 5.1. Pin on Disk tipi aşınma cihazı	76
Şekil 5.2. Numune ölçülerinin gösterimi	79
Şekil 5.3. Numune hazırlama kısımları.....	80
Şekil 5.4. Deney numunesi	81
Şekil 5.5. Sertlik ölçüm noktaları.....	83
Şekil 6.1. Deney numuneleri aşınma deneyi sonuçları	106
Şekil 7.1. Fe-B ikili faz diyagramı	108
Şekil 7.2. B-C ikili faz diyagramı	109

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Bor mineralinin görünümü.....	59
Resim 4.2. Kolemanit mineralinin görünümü.....	62
Resim 4.3. Pandemit mineralinin görünümü	63
Resim 4.4. Üleksit mineralinin görünümü	64
Resim 4.5. Boraks mineralinin görünümü	65
Resim 4.6. Kernit mineralinin görünümü	66
Resim 6.1. Deney numunesi ana metal görünüşü x 400	84
Resim 6.2. 1 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	85
Resim 6.3. 2 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	86
Resim 6.4. 3 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	86
Resim 6.5. 4 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	86
Resim 6.6. 5 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	87
Resim 6.7. 6 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	87
Resim 6.8. 7 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	87
Resim 6.9. 8 Nolu numune ITAB görünüşü x 400	88
Resim 6.10. 1 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	89
Resim 6.11. 1 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	89
Resim 6.12. 2 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	89
Resim 6.13. 2 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	90
Resim 6.14. 3 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	90
Resim 6.15. 3 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	90
Resim 6.16. 4 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	91
Resim 6.17. 4 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	91
Resim 6.18. 5 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	91
Resim 6.19. 5 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	92

Resim**Sayfa**

Resim 6.20. 6 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	92
Resim 6.21. 6 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	92
Resim 6.22. 7 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	93
Resim 6.23. 7 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	93
Resim 6.24. 8 Nolu numune kaynak metali görünüşü x 400	93
Resim 6.25. 8 Nolu numune SEM görüntüsü x1000	94
Resim 6.26. 1 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	95
Resim 6.27. 2 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	95
Resim 6.28. 3 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	96
Resim 6.29. 4 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	96
Resim 6.30. 5 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	97
Resim 6.31. 6 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	97
Resim 6.32. 7 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	97
Resim 6.33. 8 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x 50	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simge ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
<i>a</i>	Metalik bağ yüzdesi
A	Amper
A_g	Temas alanı
B	Bor
C	Karbon
Ca	Kalsiyum
Co	Kobalt
cm	Santimetre
d	Yoğunluk
dev	Devir
dk	Dakika
F	Kuvvet
Fe	Demir
F_n	Normal kuvvet
F_s	Sürtünme kuvveti
gr	Gram
h	Yükseklik
Ha	Aşındırıcı sertliği
Hm	Aşınan malzeme sertliği
HRc	Rockwell C sertlik değeri
kg	Kilogram
km	Kilometre
M	Yükleme ağırlığı

Simgeler	Açıklama
m	Metre
mg	Miligram
mm	Milimetre
Mn	Mangan
M_{sr}	Yuvarlanma sürtünme momenti
N	Newton
Na	Sodyum
Ni	Nikel
O	Oksijen
R_{t1} - R_{t2}	Her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğü
S	Kükürt
s	Saat
SG₂	Gazaltı kaynak teli çeşidi
Si	Silisyum
t_{km}	Kesme mukavemeti
t_{ko}	Kayma mukavemeti
U	Tabaka hızı
μ	Sürtünme katsayısı
μ_s	Statik sürtünme katsayısı
V	Volt
V_s	Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı
W_a	Aşınma oranı
W_r	Ters aşınma oranı
Δ G	Ağırlık kaybı
σ_{ko}	Kopma mukavemeti
σ_{kf}	Yağ tabakası kopma mukavemeti

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AISI	Amerikan çelik standardı
ASTM	Amerika standardı
AWS	Amerika kaynak standardı
DIN	Alman normu
EDS	Enerji Dispersif Spektrometresi
EN	Avrupa normları
EPMA	Elektron Işınli Mikro Analiz
GB	Güney batı
GD	Güney doğu
ITAB	Isı tesiri altındaki bölge
KB	Kuzey batı
KD	Kuzey doğu
MİG – MAG	Gazaltı kaynak yöntemi
OE-S1	Oerlikon tozaltı kaynak teli
OP 1250 A	Oerlikon sert dolgu tozu
PPM	Part(s) Per million/Milyonda bir
SEM	Scanning Electron Microscope
TIG	Tungsten Inert Gas
TS	Türk standartları
XRD	X - Işınlari Difraksiyon

1. GİRİŞ

Hızlı gelişim süreci içersinde olan metal imalat sektöründe sökûlemeyen birleştirmelerde kaynaklı birleştirme uygulamaları oldukça fazla yeralmaktadır. Mevcut kaynaklı birleştirme uygulamaları genelde sökûlemeyen birleştirmeler için kullanılsa da birbirleri ile temas halinde olan ve birbirleri üzerinde izafî hareketi sonucu birbirine temas eden iki yüzeyde oluşan aşınmayı gidermek ve yüzeyi tekrar kullanılabilir hale getirmek için tercih edilir.

Bu amaçla en fazla kullanılan kaynaklı birleştirme teknikleri olarak toz altı kaynağı, gazaltı kaynağı ve elektrik ark kaynağı uygulamaları gelmektedir. Gelişen teknolojiler vasıtasıyla her üç kaynak uygulamalarının otomasyonu ile kaynaklı birleştirme uygulamalarında insanlardan kaynaklanan kaynak hatalarının en aza indirilmesi sağlanmıştır.

Mali değeri yüksek olan bazı makine parçaları, dozer çeneleri ve taş kırıcı silindirler gibi sürekli aşınmaya maruz kalan iş parçalarının aşınma nedeniyle kullanılamayacak hale gelmeleri sonucu yerine yenilerinin takılması her zaman kurtarıcı bir çözüm olmamaktadır.

Maddi imkânları sonuna kadar kullanılarak hazırlanan konstrüksiyonlar da herhangi bir parçanın kırılması veya aşınması, işletmenin günlerce veya haftalarca atıl kalmasına neden olabilir. Bu durumu engellemek amacıyla çeşitli aşınma türleri ve zorlanma şartlarıyla karşılaşan, parçalar kullanılamaz hale gelmeden önce aşınan kısmın uygun kaynak yöntemiyle doldurulması sonucu hem ilk fonksiyonunu yerine getirecek hem de aşınmalara karşı daha dirençli bir hal alacaktır.

Bu gibi durumlarda iş parçasını yenilemek yerine tamir ederek tekrar kullanıma hazır hale getirmek hem maliyeti azaltacak hem de iş parçasına istenilen aşınma özellikleri kazandırılarak iş parçasının çalışma ömrü uzatılacaktır. Böylece mali yönden ve çok değerli olan zamandan kazanç sağlanacaktır. Hatta bazı makine parçalarının

yenisinin veya yedeğinin ülke dışından getirilmesi durumlarından kurtularak işletme büyük ölçüde iş ve zaman kaybından korunacaktır.

Makine parçasının aşınan kısımlarının tamirâtı esnasında uygulanacak kaynak yönteminin özenle seçilmesinin de önemi büyüktür. Seçilen kaynak yönteminin önemini maliyet ve zaman açısından değerlendirmek en doğru yaklaşımdır. Dikkatsiz, plansız ve programsız seçilen kaynak yöntemi maliyet ve zaman kaybına neden olabilir.

Seçilen kaynak yönteminin yanı sıra, kaynaklı birleştirme veya dolgu kaynağı için seçilecek elektrot da diğer büyük önem arz eden bir maddedir. Aşınma değeri yüksek olan bir bölgenin doldurulması için aşınma mukavemeti yok denecek kadar az olan elektrot kullanılması yine maliyeti ve zamanı büyük ölçüde etkileyecektir. Aşınan bölge belirli bir süre kullanıldıktan sonra tekrar aşınacak ve yeniden parça sökülerek yeniden dolgu kaynağı uygulanacaktır.

Toz altı kaynağı ile dolgu kaynağı yapılacağı zaman, kullanılacak elektrot ve toz cinsi de büyük önem arz etmektedir. Aşınmaya dayanıklı elektrot bileşimi yerine düşük alaşımlı bir elektrot kullanmak çoğu zaman iyi sonuç vermemektedir. Kullanılacak elektrotun yanı sıra toz bileşimi de özenle seçilmelidir. Bu konuda kaynak elektrotları, koruyucu tozları ve araç gereçleri satan, çoğu firmanın kendi bünyelerinde geliştirdikleri, elektrot ve koruyucu toz bileşimi bulunmaktadır.

Kaynak esnasında kullanılacak toz altı kaynak tozuna kendi bileşimi ile kullanmanın yanı sıra dışardan aşınmaya dayanımı artırıcı toz veya katı durumdaki minerallerde eklenebilir. Kaynak bölgesinde aşınma dayanımını arttıracak düşünülen aynı zamanda bu çalışmanın da temelini oluşturan bor minerali gelmektedir.

Bor minerali (B), periyodik tabloda, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, yoğunluğu 2,84 gr/cm³, ergime noktası 2200 °C ve kaynama noktası 2250 °C olan, metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip, 3A grubunun ilk ve en hafif elementidir. Bor minerali tabiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmadığı

bilinmektedir. Doğada yaklaşık olarak 230 değişik bor minerali olduğu bilinmektedir [1].

Çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler endüstride birçok bor bileşiğinin kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Bor bileşikleri metal dışı bileşikler gibi davranır, ancak farklı olarak saf bor minerali, karbon gibi elektrik iletkenidir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir.

Bor bileşiklerinin yaygın kullanımları ve borun element olarak erken tanımlanmış olmasına karşın, bor kimyası çalışmaları nispeten kısıtlı bir alanda sürdürülmüştür. Bunun nedenleri; temel olarak bor bileşiklerinin hidroliz veya oksidasyona yönelik sabit olmayan nitelikleri ve malzemelerin birçoğunun kullanımındaki yapısal zorluklarıdır.

Bugün bor ürünleri birçok endüstri dalının ana ham maddesidir. Kullanılan alanlarında tüketimin hızla artışı kadar, yeni kullanım alanlarının da günden güne artışı ve borun yakın gelecekte enerji üretim kaynağı olarak kullanılabilme olasılığı bu hammaddeye diğerleri arasında bir ayrıcalık kazandırır. Bilinen dünya bor rezervlerinin %65'inden daha fazlasının Türkiye'de bulunuşu, bu hammaddenin Türkiye ekonomisi ve gelişmesi için önemini daha da artırır [2].

Bu çalışmada, toz altı sert dolgu kaynağına bor ilavesinin aşınma özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla bor tozu kullanılarak, malzemeye sertlik artışı ve aşınma dayanımı kazandırılmıştır.

2. TOZALTI KAYNAĞI VE SERT DOLGU KAYNAĞI

2.1. Tozaltı Kaynağı

Tozaltı kaynak metodu, arkın ve erimiş metalin korunmasında, ince bir tabaka halinde olan, taneli bir yapıya sahip ve genellikle toz diye adlandırılan bir malzemenin kullanılması açısından diğer ark kaynağı metotlarından ayrılır. Ark, iş parçası ile çıplak tel elektrot arasında oluşur. Ark toz ile tamamen kaplanır yani tozun altında yanar, gözle görülmez. Sıçrama ve kıvılcım oluşumu meydana gelmez. Arkın devamlı olarak toz yığını altında yanması bu yöntemde tozaltı kaynağı isminin verilmesine sebep olmuştur.

Tozaltı kaynak yöntemi ilk defa 1933 yılında Amerika Birleşik Devletlerinde uygulanmaya başlamıştır. Yöntem daha sonraları 1937 yılında Avrupa'da kullanılmaya başlamış ve bugünkü şeklini ise 1946 yılında Rusya'da almıştır. Yöntemin Türkiye'ye girişi 1960'lı yıllara rastlamaktadır. Türkiye' de kaynaklı imalat yapan büyük kuruluşların tümünde toz altı kaynağı uygulanmaktadır [3].

2.1.1. Tozaltı kaynağının genel özellikleri

Tozaltı kaynağı otomatik bir kaynak yöntemi olmanın yanında, yüksek güçlüdür. Bir paso ile 85 mm, iki paso ile 180 mm ve çok paso ile 300 mm kalınlığa kadar parçaların kaynağını yapmak mümkün olmaktadır. Kaynak yapılabilecek en ince sac ise 1,2 mm dir. Bu yöntemde normal elektrik ark kaynağına nazaran elektrot teli daha yüksek bir akım şiddeti ile yüklenebilir. Bu nedenle, derin girişli ve geniş banyolu dikişler elde edilir. Örneğin, 4 mm çapındaki bir elektrot ile elektrik ark kaynağında 150–190 amper arasında akımla kaynak yapılırken, tozaltı ark kaynağında 400–650 amper arasında bir akım ile kaynak yapılabilir [4].

Tozaltı kaynak yönteminde kaynak parametreleri; kaynak akımı, ark voltajı, tel ilerleme hızı, kaynak hızı iyi seçildiği takdirde hatasız ve çok güzel görünümlü

dikişler elde edilir. Normal örtülü elektrotla yapılan kaynağa göre bu yöntemde kullanılan aynı çaplı elektrot daha yüksek kaynak akımı ile yüklendiğinden, daha büyük kaynak banyosu ve daha derin nüfuziyet elde edilir. Yöntem, yarı otomatik ve tam otomatik kaynak uygulamalarına da müsait olduğu için, modern kaynak uygulaması olarak sanayileşmiş ülkelerde yaygın kullanım sahası bulmuştur. Basınçlı kap, kazan ve depolama tankı imalatında, boru imalatında gemi ve makine imalatında aşınan mil ve parçaların dolgu işlemlerinde korozyona ve oksidasyona dayanıklı kaplama işlemlerinde kullanılır [5,6].

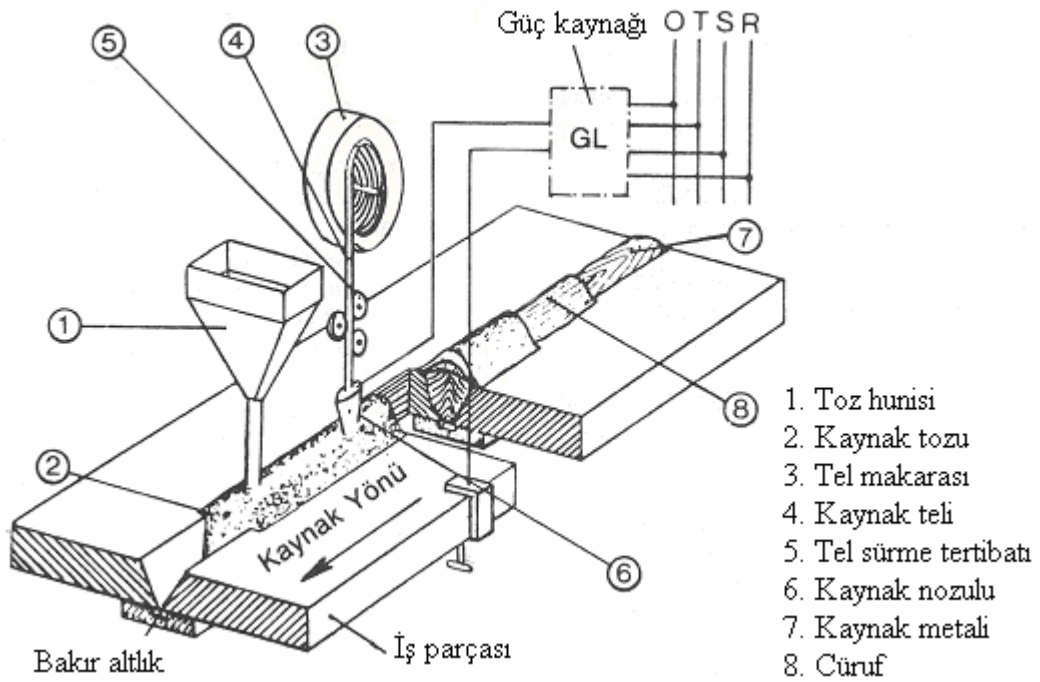
Netice olarak toz altı kaynak yöntemi, göreceli olarak özetlenirse;

- i. Sürekli kaynakta sürat
- ii. Malzeme ve işçilikten ekonomi
- iii. Güvenilir ve güzel görünümlü kaynak dikişi, elde edilen bir kaynak yöntemidir, denilebilir.

2.1.2. Tozaltı kaynağı prensibi ve kaynak donanımı

Tozaltı kaynak yönetiminde ark, otomatik olarak kaynak yerine sürülen çıplak elektrot ile iş parçası arasında meydana gelir ve ayrı bir kanaldan kaynak yerine dökülen toz yığını altında işlevine devam eder [8].

Kaynak donanımının prensip şeması Şekil 2.1’ de görüldüğü gibidir.

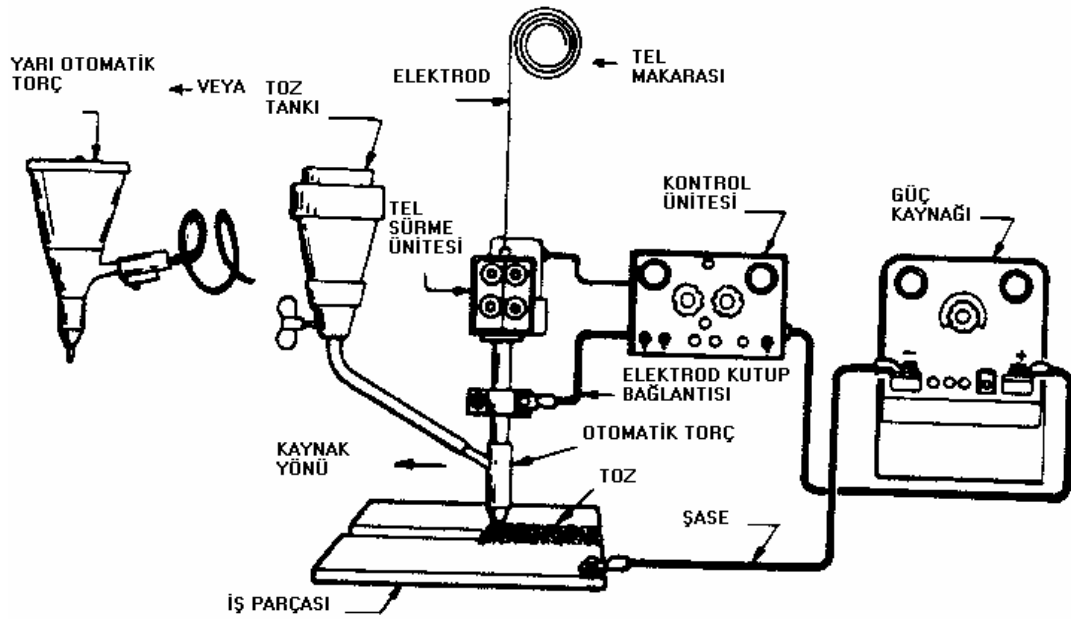


Şekil 2.1. Tozaltı kaynak yönteminin prensip gösterimi [3]

Elektrik arkı metalin ergimesi için gerekli ısıyı sağlar. Böylelikle arkın ürettiği yüksek miktardaki ısı birleştirilecek parçaların kenarlarını ertirirken, sürekli olarak kaynak bölgesine itilen elektrot eriyerek gerekli ilave metali sağlar. Elektrot eridiğinden, servo kontrolü motor tarafından arka doğru beslenir. Elektrodun besleme hızı erime hızına eşit tutulur. Böylece ark uzunluğu daima sabit kalır. Elektrot ve elektrodu besleyen sistem bir otomatik sistem tarafından bağlantı çizgisi boyunca hareket ettirilir.

Kaynak edilen iş parçası sabit olup bir araba düzenine monte edilen ve kaynak kafası denilen toz hunisi, tel bobini, kontrol ünitesi birlikte hareket ederler. Kaynak süresince kaynak ilerleme hızı sabit tutulur. Silindirik parçalarda ise kaynak kafası sabit olup, iş parçası döner. Toz, ark oluşumu başladığı anda dökülmeye başlar. Ark bu toz altında olduğundan dışarıdan görülmez. Toz denen tanecikli madde eriyerek bir cüruf örtüsü oluşturarak elektrik arkını tamamen çevreleyerek arkı ve eriyik kaynak metalini havanın etkilerinden korur. Kaynak tozu kaynak kafasının

üzerinde bulunan bir toz kabından aşağıya dökülerek elektrodun etrafından bir lüle vasıtasıyla yayılır. Ergimemiş toz bazı makinelerde yeniden kullanılmak amacıyla bir vakum sistemi ile çekilerek depolanır ve basınçlı hava ile fazla toz tekrar gönderilir [7]. Tozaltı kaynağı donanımının şematik olarak gösterilişi Şekil 2.2' de verilmektedir.



Şekil 2.2. Tozaltı kaynak yönteminin donanım gösterimi [20]

2.1.3. Tozaltı kaynağının avantajları ve dezavantajları

Tozaltı kaynağının avantajları aşağıdaki gibi verilebilir [9];

- i. Kaynak arkı, kaynak tozu tarafından korunduğundan ark ışınlarından korunmak için maske kullanmaya gerek yoktur.
- ii. Kaynak esnasında zararlı metal tozları ve duman çıkarmaz.
- iii. Sıçrama kaybı yoktur.
- iv. Penste kalan elektrot parçasını kullanmamaktan ileri gelen kaynak malzemesi kaybı yoktur.
- v. Derine nüfuziyet kabiliyeti iyi olduğu için daha dar ve daha derin kaynak ağızlarında kaynak işlemi uygulanabilir. Bu özelliği, daha az işçilik ve daha az kaynak malzemesi kullanımı demektir.
- vi. Gerekli toz tutma önlemleri alındığında tek taraflı kaynakta kaynak ağızı açmadan 16 mm kalınlığa kadar, iki taraflı kaynakta ise 30 mm. kalınlığa kadar kaynak yapabilme imkânı sağlar.
- vii. Kaynak tozu, kaynak dikişinin özelliklerini etkileyecek şekilde alaşımlandırılabilir. Böylece ucuz ve alaşımsız bir elektrotla alaşımlı bir toz kullanarak istenen özellikte daha ekonomik kaynak dikişleri elde edilebilir.
- viii. Yarı otomatik, tam otomatik uygulamalara uygun olduğu gibi istenirse manüel olarak elle uygulama imkânı da vardır.
- ix. Küçük bir değişiklikle gaz altı kaynağına dönüştürülebilir.
- x. Yüksek kaynak hızı, kaynak parametreleri uygun seçildiğinde hatasız ve düzgün görünümlü kaynak dikişleri elde edilir

Dezavantajlarından bazıları ise şunlardır [9];

- i. Pahalı makine ve teçhizata ihtiyaç gösterir, dolayısıyla ilk yatırım masrafları yüksektir.
- ii. İnce saçların kaynağı için ekonomik olmadığından uygun bir usul değildir.
- iii. İnce saçlar için gaz altı kaynağı gibi daha uygun yöntemler vardır.

- iv. Her pozisyonda, örneğin tavan ve düşey pozisyonda kaynak yapılamaz.
- v. Kısa boylu ve karışık şekilli dikişler için otomatik tozaltı makineleri geliştirilmiş ise de bunlar tozaltı kaynak yönteminin bütün avantajlarını bünyelerinde toplayamamaktadır. Dolayısıyla ekonomik bir kaynak yapılamamaktadır.
- vi. Kaynak tozu iyi korunmadığı takdirde nem kapacağından kaynak dikişinde hataya yol açma olasılığı vardır.
- vii. Kaynak tozu, kaynak işleminden sonra tekrar kullanıldığı için nemlenmekte ve kalitesi düşmektedir.

2.1.4. Tozaltı kaynağının uygulama alanları

Tozaltı kaynak yöntemi birleştirme kaynaklarında olduğu kadar dolgu ve kaplama kaynak işlemlerinde de başarıyla kullanılan bir yöntemdir [9].

Birleştirme yöntemi olarak kullanıldığı alanlar;

- i. Basınçlı kazan ve tank imalatında
- ii. Çelik konstrüksiyon imalatında
- iii. I, H, T gibi profil üretiminde
- iv. Otomotiv ve lokomotif sanayisinde
- v. Gemi inşa sanayisinde

Dolgu işlemlerine örnek olarak;

- i. Aşınan mil ve makine parçalarının dolgusunda
- ii. Darbe ve aşınmaya dayanıklı sert dolgu işlemlerinde

Kaplama yöntemi olarak;

- i. Korozyona ve oksidasyona dayanıklı kaplama işlemlerinde kullanılır.

2.1.5. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak tozları

Tozaltı kaynak tozları istenen özelliklere bağlı olarak çeşitli şekillerde ve oranlarda karıştırılmış taneli mineral bileşiklerdir. Tozaltı kaynağındaki kaynak tozları, ark kaynağındaki elektrot örtüsünün görevini yerine getirir. Bu görevler [10];

- i. Kaynak banyosunu havanın zararlı etkisinden koruma
- ii. Kaynak dikişine uygun bir form verme
- iii. Kaynak dikişinin yavaş soğumasını sağlama, olarak sıralanır.

Tozaltı kaynağında kullanılan tozları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [10];

Kaynağın amacına göre;

- i. Hızlı kaynak tozları
- ii. Derin nüfuziyet kaynak tozları
- iii. İnce saç kaynağı tozları
- iv. Aralık doldurma kabiliyetine sahip kaynak tozları

Üretim şekline göre;

- i. Erimiş kaynak tozları
- ii. Sinterlenmiş kaynak tozları
- iii. Aglomere kaynak tozları

Kimyasal karakterine göre;

- i. Asit karakterli tozlar
- ii. Bazik karakterli tozlar
- iii. Nötr karakterli tozlar
- iv. Rutil karakterli tozlar

Manganez miktarına göre;

- i. Yüksek manganezli tozlar
- ii. Orta manganezli tozlar
- iii. Düşük manganezli tozlar

Erimiş tozlar, suni olarak üretilmiş silikatlardır ve katı hallerinde kristal karakterli amorf kütlelerdir. Bu tozların imalatında kuvars, manganez cevheri veya dolomit, kalkspat ve kil gibi maddeler uygun miktarlarda karıştırılarak eritilir. Eritme işleminde ark fırınları kullanılır [10].

Sinterlenmiş tozların imalinde uygun bileşimdeki malzeme karışımı öğütülür. Daha sonra öğütülmüş tozlar belirli büyüklükte taneler halinde sıkıştırılır ve alevli fırınlarda sinterleme işlemine tabi tutulurlar. Sinterlenen tozlar daha sonra kullanıma uygun olarak boyutları küçültülür. Küçültme işlemi sonrası tozlar elekten geçirilerek kullanıma uygun olanlar ayrılır.

Aglomere tozlar, ince öğütülmüş toz halindeki hammadde bir yapıştırıcı ile aglomere edilmesiyle elde edilirler. Aglomere olmuş bu karışımın yapıştırma esnasında bünyesine giren nemi ortamdan uzaklaştırmak için tavlama işlemine tabi tutulur. Aglomere tozlar son zamanlarda genişçe kullanım alanı bulmaktadır [10]. Aglomere tozların erimiş tozlara göre çeşitli üstünlükleri bulunmaktadır. Aglomere tozlarla kaynak metali daha iyi alaşımlandırılmakta ve toz sarfıyatı daha düşük olmaktadır.

Kaynak tozlarından istenen özellikler

İyi bir tozaltı kaynak tozu aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır [10];

- i. Kararlı bir ark sağlamalıdır.
- ii. Kaynak dikişi istenen mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi vermelidir.
- iii. İçyapı düzgün ve temiz olmalıdır.
- iv. Kaynak dikişinde, çatlama ve gözenek oluşumunu teşvik etmemelidir.

- v. Kaynak sonrası, kaynak dikişi üzerindeki cüruf kolayca kalkmalı ve kolayca temizlenebilir olmalıdır.
- vi. Kaynak dikişinde gözenek oluşturabilecek harici maddeler içermemelidir.
- vii. Nem alma özelliği çok az olmalıdır.

Kaynak tozlarının kimyasal bileşimleri ve kaynak metaline etkileri

Kaynak tozlarının büyük çoğunluğu, bileşimlerinde SiO_2 ihtiva ederler. SiO_2 çok iyi deoksidandır ve cürufu daha akıcı hale getirir. Aynı zamanda kaynak tozunun yüksek akım şiddetiyle yüklenmesini sağlar. Kaynak tozları içerisinde bulunma oranı fazlalığına göre ikinci sırada MnO bulunmaktadır. MnO kaynak dikişi için önemlidir, fakat toz içerisindeki oranı arttıkça kaynak tozunun yüksek akım şiddetiyle yüklenme özelliğini azaltır. Kaynak tozunda bulunan SiO_2 kaynak dikişine Si geçişini sağlar. SiO_2 oranı arttıkça kaynak dikişine geçen Si oranı da artar. Silisyum kaynak dikişini deokside ederek, dikişin gözeneksiz olmasını sağlar ve kükürt ve fosfor segregasyonunu azaltır. Kaynak dikişi içerisindeki Si ve Mn oranı, kaynak dikişinin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler [10,11].

Kaynak tozlarının kaynak dikişi üzerine fiziksel etkileri

Tozaltı kaynak tozunu özgül ağırlığı, erime noktası, akıcılığı, tane büyüklüğü ve yığılma yüksekliği gibi fiziksel özellikleri, kaynak dikişi üzerine önemli etkileri vardır. En önemlisi, ark bölgesini atmosferin zararlı etkilerinden korumaktır. Kaynak dikişinin yavaş soğumasını sağlar. Ana metal ile kaynak metali arasındaki geçiş bölgesinde, çentik oluşumunu önler ve dikiş formunun belirlenmesinde önemli rol oynar [10,11].

2.1.6. Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan kaynak telleri

Tozaltı kaynak yönteminde kullanılan çıplak elektrotlar, kaynak teli diye adlandırılır. Tozaltı kaynak telleri, elektrik ark ocaklarında üretilen, kimyasal yapısı ile kaynak yerinin metalürjik güvenliği bakımından yüksek manganez (Mn) içeren özel

eliklerden imal edilirler. Çeşitli amaçlar için genellikle dairesel kesitli olarak 1,2 ile 12 mm çaplarında imal edilirler. Bazı istisnai durumlarda, örneğin kaplama kaynaklarında, dikdörtgen kesitli lama şeklinde imal edildiği görülür. Dairesel kesitli olanlar bakırla kaplanmış olarak kangal halinde piyasada bulunmaktadır [11,12].

Çıplak telin bakırla kaplanması üç nedeni vardır. Soğuk ekme esnasında passız ve temiz hale gelen teli, kullanım anına kadar oluşabilecek her türlü zararlı dış etkilerden korumak. Bakırın iyi bir elektrik ileticisi olmasından dolayı, telin kontakt elemanlarına temasında iyi iletkenlik sağlayarak, temas yüzeylerinin ısınmasını ve enerji kaybını önlemek. Bakırın yumuşak olmasından dolayı, kaynak esnasında devamlı ilerleyen tel, kontakt elemanlarının temas yüzeylerinde oluşacak aşınmayı önlemek veya azaltmaktır [12].

Yüksek manganezli toz altı kaynak tellerinde, Fosfor ve Kükürt miktarlarının her birinin % 0.03 ten fazla olmaması gerekir. Birleşimde bulunan diğer elemanların % sınırları ve kaynak dikişindeki etkileri izelge 2.1’ de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak tellerinde bulunan elementlerin % sınırları ve etkileri [12]

Alaşım Elemanı	% Sınırları	Etkisi
Karbon (C)	0,05 – 0,25	Sertliği arttırır. Çekme dayanımını yükseltir.
Silisyum (Si)	0,05 – 0,45	Deokside eder. İşlenebilme özelliğini ve kaynak kabiliyetini arttırır.
Manganez (Mn)	0,5 – 3,0	Sertliği arttırır. Çekme ve çentik-darbe dayanımını yükseltir. Uzunluğu arttırır.
Molibden (Mo)	0,5 – 1,0	Isıya dayanımını arttırır.
Krom (Cr)	1,0 – 2,9	Sertliği arttırır. Isıya dayanımını arttırır.
Nikel (Ni)	1,0 – 2,0	Düşük alışma sıcaklıklarında dayanımı arttırır.

Çizelge 2.2. TS 5387 EN 756' ya göre tozaltı kaynağında kullanılan tellerin kimyasal bileşimleri (ağırlıkça %)[12]

Sembol	Kimyasal Bileşim (%)			
	C	Mn	Si	Mo
S1	0,06–0,15	0,35–0,60	0,15	0,15
S1 Si	0,07–0,15	0,35–0,60	0,15–0,40	0,15
S2	0,07–0,15	0,80–1,30	0,15	0,15
S2 Si	0,07–0,15	0,80–1,30	0,15–0,40	0,15
S3	0,07–0,15	1,30–1,75	0,15	0,15
S4	0,07–0,15	1,75–2,25	0,15	0,15
S5	0,08–0,16	2,30–2,70	0,05–0,25	0,15
S6	0,07–0,15	2,80–3,20	0,20–0,30	0,15
S1 Mo	0,05–0,15	0,35–0,60	0,05–0,25	0,40–0,60
S2 Mo	0,07–0,15	0,80–1,30	0,05–0,25	0,45–0,60
S3 Mo	0,07–0,15	1,30–1,75	0,05–0,25	0,45–0,60
S4 Mo	0,07–0,15	1,75–2,25	0,05–0,25	0,05–0,50
S5 Mo	0,07–0,15	2,80–3,20	0,05–0,25	0,45–0,60

Tozaltı kaynak telleri Amerikan standardında (AWS A5–17) bileşimlerindeki Manganez (Mn) miktarlarına göre sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma Çizelge 2.3' te görülmektedir [13].

Çizelge 2.3. Tozaltı kaynak tellerindeki manganez miktarı [13]

Düşük Manganezli Kaynak Telleri	% 0,30 – 0,60 Mn
Orta Manganezli Kaynak Telleri	% 0,90 – 1,25 Mn
Yüksek Manganezli Kaynak Telleri	% 1,75 – 2,25 Mn

Tozaltı kaynak yöntemi ile ister birleştirme kaynağı, isterse sert dolgu kaynağı yapılsın, kaynak dikişinden beklenen mekanik mukavemetler ve metalürjik yapı ile istenen sertlik sadece kaynak telini uygun seçmekle sağlanamaz. Bunun nedeni toz altı kaynağında kullanılan çıplak tellerin, imalat esnasında soğuk haddeleme

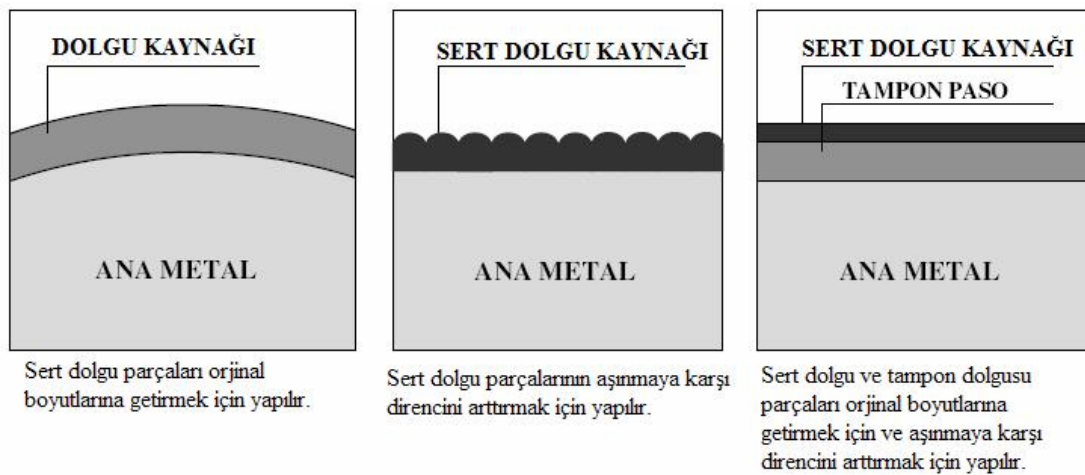
işleminde, sorunsuz çekilebilmesi için düşük alaşımlı ve düşük karbonlu çeliklerden olması gerekmektedir.

Kaynak dikişinden istenen mukavemetler, mekanik yapı ve sertlik derecesi, tel+toz seçiminin uygun yapılması ile sağlanır. Bu seçime tel+toz kombinezonu denir [9,10].

2.2. Sert Dolgu Kaynağı

Sert dolgu, aşınmaya karşı daha nitelikli yüzeyler oluşturmak veya parçaları orijinal boyutlarına getirilebilmek için metal parçaların yüzeylerinin değişik kaynak yöntemleri kullanarak özel alaşımlı malzemelerle doldurulmasıdır [14]. Metalik malzemeler çalıştıkları ortam ve denge şartları gibi birçok nedenden dolayı aşınırlar.

Sert dolgu, metal parçaların çalışma ömürlerini uzatmak için aşınma direnci yüksek yüzey oluşturan düşük maliyetli bir kaynak uygulamasıdır [15].



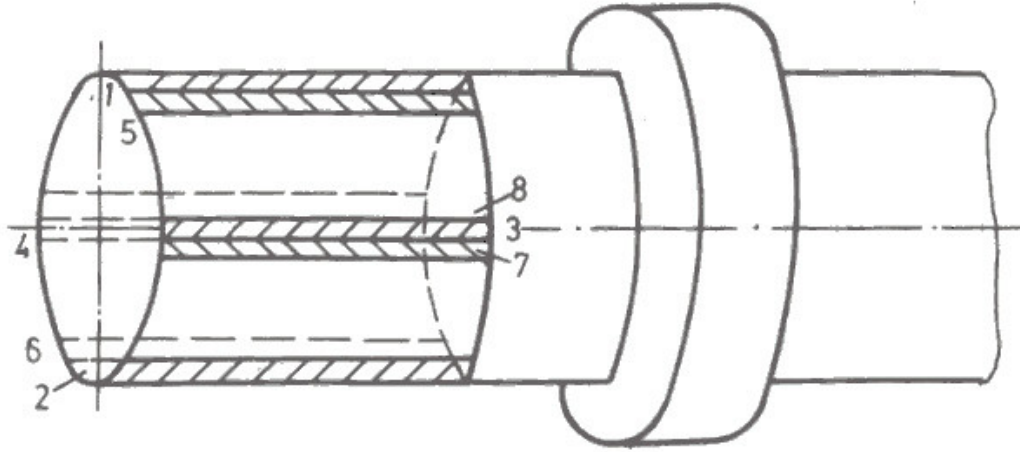
Şekil 2.3. Sert dolgu kaynakları [15]

Aşınan parçaların onarımı genellikle aşağıdaki üç aşamayı içerir (Şekil 2.3) [15]

- Dolgu, çok fazla aşınan parçaların veya bölgelerin tok, çatlama direnci yüksek ve üst üste çok sayıda paso yapılabilecek kaynak malzemeleri ile çalışma boyutlarına yakın veya üzerinde doldurulmasıdır.

- ii. Tampon paso, ana metalin veya kaynak metalinin bileşiminde bulunan karbon veya diğer alaşımların içeriğini seyreltmek için uygulanır.
- iii. Sert dolgu, ana metal ve dolgu kaynakları üzerine ark kaynağı ile oluşturulan aşınma direnci yüksek olan yüzeyler elde etmek için uygulanır. Sert dolgu, çoğunlukla bir, iki veya üç paso ile sınırlıdır.

Şekil 2.4’ de kesme zımbasının sert dolgu yöntemi ile doldurulması gösterilmiştir. Bu takımın yenisini almak yerine, mevcut imkânlar doğrultusunda aşınan yüzeylerinin tamiratının yapılması hem maliyet yönünden hem de boşa geçen zaman açısından önemli bir kazanç sağlayacaktır [16].



Şekil 2.4. Saç kesme zımba matris takımı [16]

2.2.1. Sert dolgu kaynağı için kaynak yöntemi seçimi

Sert dolgu alaşımları herhangi bir kaynak yöntemiyle uygulanabilir. Bu yöntemler içinden seçilen kaynak yöntemi uygulanabilirlik açısından kolay ve maliyeti düşük olmalıdır. Aynı zamanda ihtiyaçlara en iyi şekilde cevap verebilmelidir [17].

Kaynak yönteminin göz önünde tutulması gereken noktalar aşağıda sıralanmıştır.

- i. Mevcut kaynak ekipmanları,
- ii. Kaynak operatörünün tecrübesi,
- iii. Doldurulacak parçaların şekli ve ebatları,
- iv. Doldurulacak parçaların bulunduğu ortam,
- v. Mevcut sert dolgu kaynak malzemeleri.

Sert dolgu kaynağı uygulamasında genel olarak kullanılan yöntemler şunlardır [18].

- i. Örtülü elektrot kaynağı,
- ii. Gaz altı kaynağı,
- iii. Özlü tel kaynağı,
- iv. Tozaltı kaynağı,
- v. Oksi-Asetilen kaynağı,
- vi. TIG kaynağı

Oksi - Asetilen ve TIG kaynağı sert dolguda kullanılmakla beraber düşük metal yığılma oranları nedeniyle uygulama alanları kısıtlıdır. Sert dolgu için istisnai durumlar haricinde yüksek yığılma oranı gereklidir. Buna en uygun kaynak yöntemlerini uygulayarak istenilen oranda kaynak metalinin yığılması sağlanabilir. Uygulanacak her türlü kaynak yöntemlerinin kendilerine has avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle sert dolgu yapılacak parçaya ve uygulamaya en uygun yöntem seçilerek istenilen özellikler ve dolgu miktarı elde edilebilir [18].

2.2.2. Sert dolgu alaşımlarının sınıflandırılması

Demir bazlı sert dolgu alaşımları metalürjik fazlarına veya mikro yapılarına göre alt gruplara bölünebilir ve her biri belli bir aşınma türüne, diğerlerine göre daha fazla direnç gösterir [15]. Bu alaşımlar üç ana grupta toplanırlar [19].

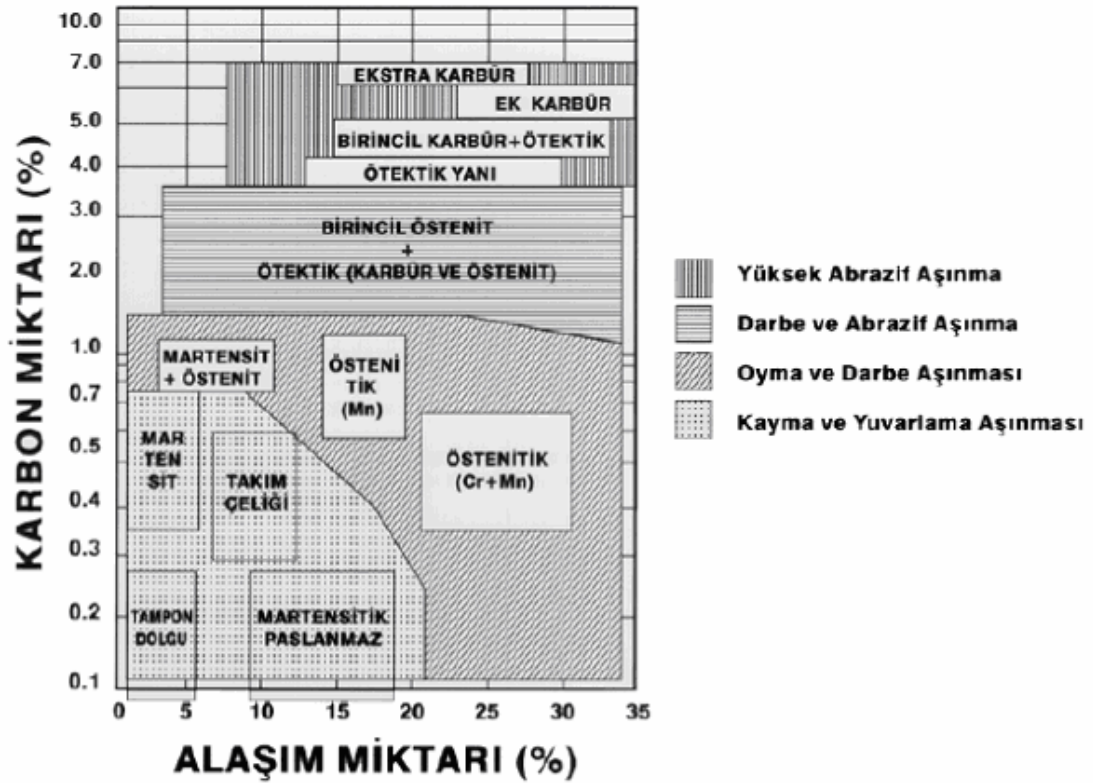
- i. Östenitik alaşımlar,
- ii. Martensitik alaşımlar,
- iii. Karbürlü alaşımlar.

Elektrotlardaki gelişmeler, karşılaşılan spesifik aşınma türüne göre, en yüksek direnç gösterecek malzemenin seçimine olanak sağlamaktadır. Bazı uygulamalarda aşınma türlerinin kombinasyonu etkilidir. Örnek olarak tek bir örtülü elektroda, birincil östenit ile ötektik karbürleri birleştirerek, darbe ve aşınma direnci özelliği kazandırılabilir. Alternatif olarak, manganlı çelik üzerine veya manganlı dolgu kaynağı üzerine bir paso krom-karbür kaynak metali yığılarak darbe ve aşınma direnci birleştirilebilir.

Bileşik elektrot darbe direncinin daha önemli olduğu yerde tercih edilebilirken, östenitik manganlı çelik üzerine krom-karbür malzemede aşınmanın daha önemli olduğu yerde tercih edilebilir.

Çeşitli elektrotların mikro yapılarına göre uygulama alanları Şekil 2.5’ de Kotecki diyagramında verilmiştir [19]. Diyagramda karbon miktarı dikey eksen ve alaşım miktarı da yatay eksen gösterilmiş ve diyagram mikro yapı ve alaşım türüne göre bölünmüştür.

Sert dolgu ürünün, mikro yapısal özelliği ve direnç göstereceği aşınma türü diyagramdan bulunabilir. Birçok ürün burada birbiri ile kıyaslanabilir ve uygulama için en iyi ürün seçilebilir.



Şekil 2.5. Fe bazlı sert dolgu alaşımlarının mikro yapılarına göre uygulama alanları (Kotecki diyagramı) [19]

Östenitik sert dolgu alaşımları

Bu alaşımlar mikro yapılarının oda sıcaklığında dahi östenit olması sebebiyle böyle adlandırılırlar. % 0.5–1 karbon ve % 13–20 alaşımlı çelikler manganlı östenitik çelikler veya *Hadfield Çelikler* olarak adlandırılırlar [17].

Bu alaşımlar genellikle temiz bir yüzey elde edilmesi istenen dolgularda ve karbürlü alaşımlarla doldurulacak manganlı östenitik çeliklerde tampon tabaka olarak kullanılırlar. Östenitik alaşımların % 0.7 karbon ve % 20–30 alaşım elementi içerenleri, düşük alaşımlı ve karbonlu çelikler üzerine yapılan ve ana metalden fazla karışma olan durumlarda dahi tam östenitiklerdir. Bu durum bu tip sert dolgu alaşımları karbonlu ya da düşük alaşımlı çeliklerin manganlı çeliklerle birleştirmelerinde ya da karbonlu çeliklerin sert dolgusunda manganlı östenitik çeliklerden daha avantajlı kılar [17].

Östenitik sert dolgu alaşımları oldukça tokturlar ve soğuk sertleşme gösterirler. Aynı zamanda mükemmel darbe, orta abrazyon dayanımı ve gerilim çatlakları oluşturmama özellikleri vardır. Bu tip alaşımlar 50 HRC' ye kadar darbe ile sertleşirler, bu durum onlara darbe dayanımı yanında iyi bir abrazyon dayanımı da sağlar. Östenitik sert dolgu alaşımları aynı manganlı östenitik manganlı ana malzeme gibi 250°C' nin üzerine çıkmamalıdır aksi halde gevrekleşir ve kırılır [17].

Martensitik sert dolgu alaşımları

Martensit, çeliklerin hızlı soğuması sonucu oluşan bir fazdır. Martensitik alaşımlar havada sertleşebildiklerinden soğuma hızı sonuçta oluşacak sertliği etkiler. Çatlaksız bir kaynak metali için 100–350°C arasında bir ön tav uygulanmalı ve bu işlem yapılırken ana malzemede göz önüne alınmalıdır [17,19].

Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı martensitik alaşımlar çeliklerin sert dolgu kaynaklarında kullanılır. Bu tür alaşımların tokluk, sıkışabilme dayanımı ve metal-metale sürtünme dayanımları iyi olduğundan sert dolgu kaynaklarında ve daha sert malzemelerde tampon tabaka olarak kullanılırlar.

Biraz daha yüksek karbonlu ve daha yüksek alaşımlı martensitik alaşımlar, oldukça yüksek kaynak sonrası sertliğe sahiptirler. Bu sertlik, bunlara daha iyi metal-metale sürtünme ile abrazyon dayanımı sağlar, fakat tokluk düşer. Bunların toklukları temperleme ile yükseltilebilir. Sert dolguda daha çok tampon olarak kullanılırlar. Diğer bir grup martensitik alaşımlar da martensitik paslanmaz çeliklerdir. % 0.25'e kadar karbon, % 18 alaşım elementi ihtiva ederler. Bu grup alaşımlar ısıl şoklara karşı çok iyi dayanım gösterirler. Bu alaşımlar iyi metal-metale sürtünme ve orta seviyede korozyon direncine sahiptirler. Doğru kaynak prosedürü ile merdanelerin sert dolgu kaynaklarında başarıyla kullanılırlar.

Martensitik sert dolgu alaşımları darbe ve adhezyon dirençleri yanında, uygun karbon ve krom miktarı seçimi ile iyi abrazyon, darbe ve adhezyon direncine de

sahip olabilirler. Bu daha iyi çalışma koşulları sağlar. Bu alaşım grubu birleştirme kaynaklarında ve östenitik ana metallerde kullanılamaz.

Karbürlü sert dolgu alaşımları

Aşınma faktörünün yalnızca abrazyon olduğu hallerde başlıca krom ve diğer karbürleri en az % 12 oranında içeren dolgu alaşımları kullanılır. Karbürler kendilerini çevreleyen matristen daha serttir ve mükemmel abrazyon dayanımı sağlar. Abrazyon ve darbenin birlikte olduğu hallerde karbon oranı düşük seviyelerde (% 3' ten az) olmalıdır, karbürler matris içinde az miktarda dağılmıştır ve bunlar iyi tokluk değerinin yanında iyi bir abrasif direnç de sağlarlar [17,19].

Abrazyon ve yüksek sıcaklığın birlikte olduğu hallerde karbür alaşım içinde karbon oranı (%7 gibi) arttığında abrazyon direnci yükselir, fakat tokluk düşer. Bütün yüksek karbürlü sert dolgu alaşımları gerilim nedeniyle oluşan çatlakları ihtiva ederler. Bu tür alaşımlar birleştirme kaynaklarında kullanılmamalıdır. Karbonlu düşük alaşımlı, manganlı östenitik çeliklerle ve dökme demirlerde özel kaynak prosedürleri ile uygulanabilir. Ana metal hatasız ve tok olmalıdır. Kaynak dikişinin pullanıp dökülmesini önlemek için karbürlü sert dolgu alaşımları 2 – 4 paso ile sınırlandırılmalıdır. Çatlaklar ince malzemeye sirayet edebilir. Önce malzemeler üzerine sert dolgu yaparken gerilim çatlaklarının oluşmaması için özel dikkat sarf edilmelidir. Bu tür alaşımlar 650 °C' ye kadar yüksek sıcaklıklarda da abrazyon direncine sahiptirler ve mekanik yöntemlerle işlenemezler.

Demir dışı sert dolgu alaşımları

Östenitik, martensitik ve karbürlü sert dolgu alaşımları demir dışı sert dolgu alaşımlarına göre çok daha fazla kullanılırlar. Demir dışı sert dolgu alaşımları genel olarak servis sıcaklığının karbürlü alaşımların kullanım sınırlarının üzerine çıktığı durumlarda kullanılırlar. Ni ve Co bazlı olan bu alaşımlar tüm aşınma türlerine iyi direnç gösterirler, ancak yüksek maliyetleri nedeniyle çok özel durumlarda kullanılırlar.

Kobalt (Co) bazlı sert dolgu alaşımları

Kobalt bazlı alaşımlar yüksek sıcaklıklarda kullanılırlar. Düşük gerilimli kazıcı abrazyon kombinasyonlarında, yüksek dayanıma, ihtiyaç duyulan tokluk ve darbe direncine sahiptirler. Alaşımlara bağlı olarak metal – metale sürtünme, korozyon ve oksidasyona dayanıklıdırlar [17].

Nikel (Ni) bazlı sert dolgu alaşımları

Nikel bazlı sert dolgu alaşımları bazı, kobalt bazlı sert dolgu alaşımlarının maliyetini düşürmek için kobalt yerine kullanılır. Nikel, demire göre, yüksek sıcaklıklarda daha mukavemetli matrise sahiptir. Nikel bazlı alaşımlar yüksek sıcaklık uygulamaları için kobalt bazlı alaşımların ucuz alternatifleridir [17].

2.2.3. Sert dolgu kaynağının uygulama alanları

Temel olarak sert dolgu kaynağının uygulandığı iki alan vardır.

- i. Aşınan parçaları orijinal boyutlarına getirmek için uygulanır. Bu işlemde sert dolgu kaynağı veya sert dolgu + tampon pasoları olarak yapılabilir. Doğru kaynak prosedürü uygulandığı takdirde aşınmış parçalar defalarca doldurularak kullanılabilir.
- ii. Yeni ve aşınmaya hassas metal parçaların hızlı aşınmasını önlemek için uygulanır. Bu yöntemde ise parçaların servis ömrü en az iki kat artar. Her ne kadar kaynak malzemesi parçaların maliyetini arttıracak yönde etki etse de ana malzemenin ucuz malzemelerden seçilmesi ile bu maliyet düşürülebilir.

2.2.4. Sert dolgu kaynağının uygulanması

Sert dolgu kaynağında, gerçek dolgu kalınlığı uygulamanın ihtiyaçlarına göre değişir. Genelde malzeme ne kadar sert ise o kadar ince uygulanır. Çok sert malzemeler için,

mesela krom karbür, pek çok uygulamada çok fazla çatlak oluşumunu engellemek için iki pasodan fazla uygulanmamalıdır. Krom-karbür malzemeler gerilim giderme sırasında çatlak oluşması için tasarlanmıştır. İlk paso büyük birkaç çatlak yerine ince fakat çok sayıda çatlakların oluşumunu kontrol etmek için yüksek kaynak hızı ile yapılmalıdır.

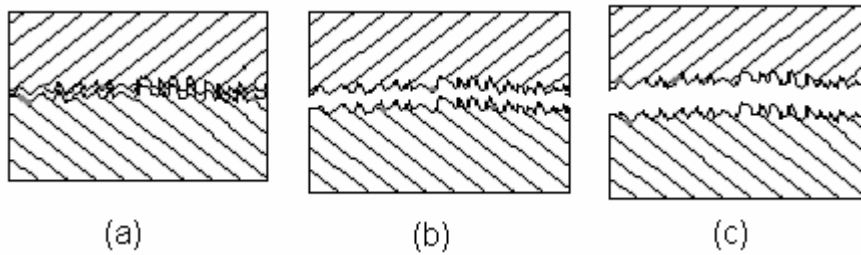
Bazı sert dolgu kaynak uygulamaları özel kaynak prosedürleri gerektirir. Büyük aşındırıcı ve sert bir malzemeyle çalışan bir değirmen veya çene, malzemenin hareket yönünde kaynak yapılması, sıvılı karışımın aktığı bir taşıyıcı da hareket yönüne dik olarak kaynak yapılması aşınmayı azaltmakta etkili olabilir. Merdane üzerinde kaynak yaparken, spiral şekilde kaynak yapmak, uzunlama kaynak yaparken olabilecek çarpılmayı azaltmakta etkilidir.

3. SÜRTÜNME VE AŞINMA

3.1.Sürtünme

3.1.1. Genel tarif ve sınıflandırma

Genel anlamda sürtünme temasta olan ve izafî hareket yapan bir cismin temas yüzeylerinin harekete veya hareket ihtimaline karşı gösterdikleri dirençtir.



Şekil 3.1. Sürtünme çeşitleri [21, 22]

(a) kuru (b) sınır (c) sıvı

İzafî hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme birbirine göre izafî harekette bulunan ve doğaldan doğruya temasta bulunan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir (Şekil 3.1.a). Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arsında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir (Şekil 3.1.c). İkinci durumda yani yüzeyler tamamiyle ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır (Şekil 3.1.b). Birbirlerine temas eden hareketli parçalar arsında kayma, yuvarlanma veya kayma yuvarlanma mevcut olabilir. Böylece sürtünme kinematik bakımdan kayma yuvarlanma veya kayma-yuvarlanma sürtünmesi şeklinde olur [21].

Kuru sürtünme

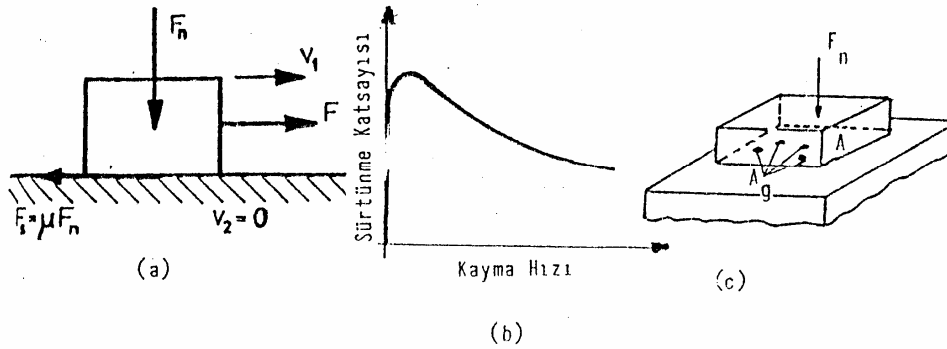
Teorik olarak kuru sürtünmeyi ifade etmek için şekli 3.2.a' da gösterilen model kullanılmaktadır. Buna göre izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin (F_n) etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı $F_s = \mu F_n$ değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada μ -sürtünme katsayısıdır [26].

Genel ifadeye göre sürtünme izafi hareket yapabilme olanağına sahip olan yüzeylerde oluşur. Şekil 3.2.a' da cisimlerin herhangi birine teğetsel bir F kuvveti tatbik edilirse, durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda $F_s > F$ yani sürtünme kuvveti kuvvetinden daha büyük olabilir. Bu halde F kuvvetine rağmen cisimler birbirleri üzerinde kaymazlar. Ancak hareket olanağı olduğundan, yüzeyler arası statik sürtünme denilen bir direnç meydana gelir. Kavrama, fren gibi sürtünme esasına göre çalışan elemanlarda bu sürtünme hali vardır ve bu elemanların hesabı bu denkleme dayanır. İkinci durumda $F_s < F$ yani sürtünme kuvveti F kuvvetinden daha küçük olabilir. Kinematik sürtünme denilen bu halde, F kuvvetin etkisi altında yüzeyler birbirleri üzerinde kayarlar [22].

Teknikte sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen bir olay olarak çıkar. Fren, kavrama, sürtünmeli çarklar gibi makine elemanlarında sürtünme istenilen bir olaydır. Bu gibi yerlerde sürtünme arttırılır. Bunların dışında, bütün izafi hareket yapan yüzeylerde istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkan sürtünmenin azaltılması gerekir [21, 22].

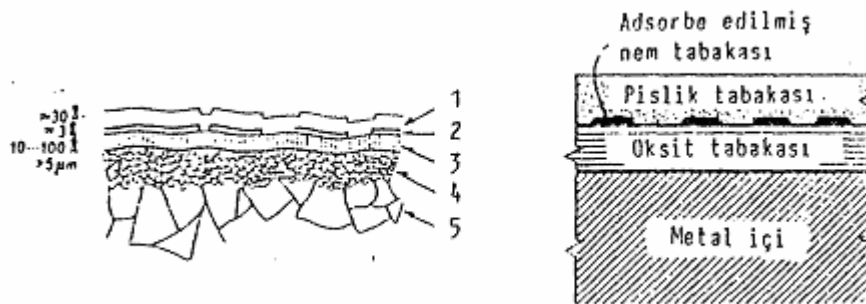
Genellikle statik sürtünme katsayısı, kinematik sürtünme katsayısından daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça kinematik sürtünme katsayısı azda olsa azalır (Şekil 3.2.b). Şekil 3.2.b' de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Buna karşılık normal kayma hızlarında hıza göre sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan sürtünme katsayısı sabit

sayılabilir. Sürtünme olayı incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam madensel temiz olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır.



Şekil 3.2. Kuru sürtünme modeli [22]

Yüzeylerin durumu, yapılan inceleme ve deneylere göre kuru olarak tarif edilen madenlerin yüzeyleri aslında atmosferi teşkil eden elemanların etkisi altında oksit, yağ, su buharı, pislik vs. gibi yüzey tabakaları ile kaplıdır (Şekil 3.3). Adsorpsiyon yolu ile oluşan ve ancak elektronik mikroskoplarla varlığı kanıtlanabildiği bu tabakalar madensel yüzeylere kuvvetle bağlanabilmekte ve yalnız çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Ayrıca yüzeylerdeki oksit tabakası, talaş kaldırma veya temizlenmiş yüzeylerin atmosferle etkileşimi sonucu ani olarak meydana gelebilmektedir [26].



Şekil 3.3. Kuru sürtünme halinde yüzeylerin durumu [21]

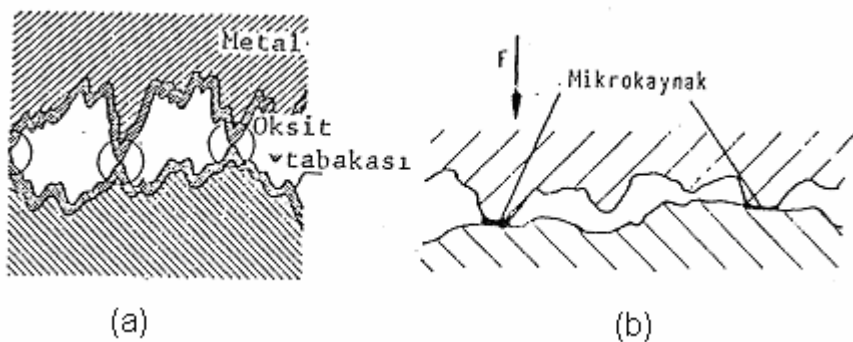
1. pislik tabakası; 2. adsorpsiyon tabakası; 3. oksit tabakası
4. (soğuk) şekillendirilmiş tabaka

Teknikte kullanılan elemanların yüzeyleri çeşitli kimyasal bileşikleri ihtiva eden tabi bir adsorpsiyon tabakası ile kaplıdır. Bunun sonucu olarak doğrudan doğruya temas eden yüzeyler arasında daima bu tabakalar bulunur.

Sürtünme olayını açıklamaya çalışan birçok teoriler vardır. Bunlardan gerçeğe en yakın olanı Bowden ve Tabor' un kaynak bağları teorisidir. Yukarıdaki olaylara dayanarak bu teori şu şekilde açıklanabilir.

Yüksüz durumda yüzeyler belirli pürüzlük noktalarında temasta bulunur (Şekil 3.4.a) Bu noktalarda tabi tabakalar arsında bağlar oluşur. Yük tatbik edildikten sonra çok küçük olan temas yüzeylerinde çok büyük basınçlar meydana gelir. Bu basınçların altında bazı temas noktalarındaki tabi tabaka kopar, metalik temas meydana gelir ve yüksek basıncın etkisi altında bu noktalarda moleküler bağ şeklinde mikroskobik kaynak bağları oluşur. Bu bağlar, tabii tabaka bağlantısından çok daha kuvvetlidir. Temasta bulunan elemanların izafi hareketi ancak bu bağların kopması ile mümkündür.

O halde sürtünme gerek metalik, gerekse tabi tabaka bağlarının oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti ise bu bağların kopması için gereken kuvvettir (Şekil 3.4.b).



Şekil 3.4. Mikro kaynakların oluşması,
a) pürüzlü yüzey temasları, b) kaynak oluşumu [21]

Yukarıdaki teoriye göre sürtünme katsayısını analitik olarak ifade etmek mümkündür. Buna göre yükü taşıyan A_g temas alanında oluşan metalik bağların yüzdesi a , bunların kesme mukavemeti t_{km} , tabii tabakalar arasındaki bağların kayma mukavemeti t_{ko} ve tabakanın kopma mukavemeti σ_{ko} ifade edilirse, sürtünme katsayısı;

$$\eta = \frac{F_s}{F_n} = \alpha \frac{t_{km}}{\sigma_{ko}} + (1 - \alpha) \frac{t_{ko}}{\sigma_{ko}} \quad (3.1)$$

olarak bulunur. Gerçek temas alanı tamamen metalik temas noktalarından meydana geldiği durumda $a = 1$ olur ve böylece

$$\mu = t_{km} / \sigma_{ko} \quad (3.2)$$

yazılır. Diğer taraftan sadece tabii tabaka bağları olduğu halde $a=0$ olur ve sürtünme katsayısı için

$$\mu = t_{ko} / \sigma_{ko} \quad (3.3)$$

olarak elde edilir, a , t_{km} ve σ_{ko} değerlerinin tayini çok güç olduğundan pratikte yukarıdaki bağlantıların kullanılması olanaksız gibi görünür. Buna rağmen bu bağıntılardan şu sonuçları çıkarmak mümkündür.

Sürtünme katsayısı, metal kaynak bağ teşkil etmiş olan temas noktalarının kesme mukavemetine (t_{km}), tabakanın kopma mukavemetine (σ_{ko}) ve tabii tabaka bağlarının kayma mukavemetine (t_{ko}) bağlıdır, σ_{ko} m ve t_{ko} 'ın ise büyük olması halinde, sürtünme katsayısı da küçük olur.

Metal kaynak bağ teşkil eden olan temas noktalarının kesme mukavemeti, temas halindeki malzemelerin cinsine bağlıdır. Bu bakımdan;

- i. Birbirleriyle kolayca alaşım haline gelebilen demir, krom ve nikel gibi sert malzemeler arsında kuvvetli kaynak bağları oluşmaktadır. Sürtünme katsayısı düzensiz olarak değişmekte, yüzeyler üzerinde izler ve bir yüzeyden diğerine

malzeme transferi görülmektedir. Bazı hallerde kaynama noktaları o kadar şiddetli olur ki, yüzeyler birbirine kilitlenir, hareket sağlansa bile yüzeyler tamamen bozulmuş olur. Buna yenme denir. Bu olay yukarıdaki malzemelerin alaşımları için de geçerlidir.

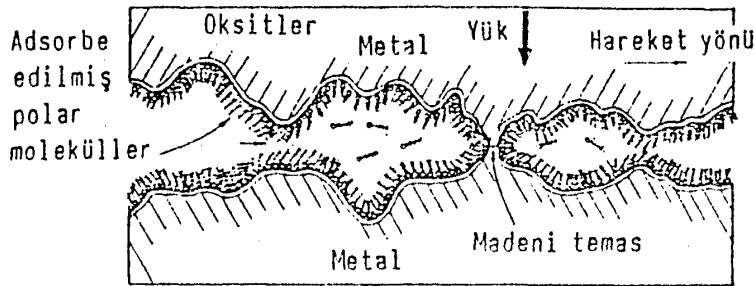
- ii. Benzemeyen ve birbirleriyle ilgili olmayan malzemeler daha hafif ve düzenli bir sürtünme oluşmakta ve yüzeyler üzerinde çok ince izler görülmektedir.
- iii. Birbiri üzerinde kayan malzemelerin biri sert, diğeri yumuşak (örneğin, kalay, kurşun, indiyum ve bunların alaşımları) olduğu takdirde, yumuşak malzeme diğeri malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile derhal kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış gibi rol oynar. Bunun sonucunda sürtünme katsayısı azalır ve bu yüzeyler arasında yenme olayı meydana gelmez. Pratikte kalay alaşımlarının çok iyi yatak malzemeleri olmalarının nedeni bu olaya bağlıdır.

Küçük bir sürtünme katsayısı elde etmek ve aşırı aşınmayı önlemek için malzemeler aynı veya birbiriyle kolayca alaşım haline gelebilen cinsten olmamalıdır. Ayrıca malzemelerden birinin yumuşak, diğeri sert olması gerekir.

Sınır sürtünmesi

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulamadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0,02 ile 0,1 arasında değişir [23].

Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması haline yağlayıcı maddenin molekülleri, adsorpsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Yapılan deneyler göstermiştir ki, polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır (Şekil 3.5). Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorpsiyon tabakaları oluşmaktadır [23].



Şekil 3.5. Sınır sürtünmesi [23]

Yağın bu özelliğine yapışma kabiliyeti denir. Bu özellik yağ ve madensel yüzeylerin karşılıklı etkilerine bağlıdır. Oluşan bu tabaka, tabii tabakada olduğu gibi, metalik yüzeylerin doğrudan doğruya temasa geçmesini önler. Ancak yağ tabakası ile tabii tabaka arasında önemli bir farktır. Havanın etkisi ile oluşan tabii tabakanın esası oksit tabakasıdır; burada tesadüfen bulunan yağ molekülleri çok azdır. Yağ tabakası ise tamamen yağ moleküllerinden oluşur ve özelliğini buraya yağlamak amacıyla konulan yağ maddesinden alır. Yağ tabakasının tabii tabakaya göre kopma mukavemeti çok daha büyüktür ve bunun sonucu olarak doğrudan doğruya madensel temasta olan yüzeyler daha azdır. Yapışmış yağ tabakasının kopma mukavemeti σ_{kf} ve kayma mukavemeti τ_{kf} ile ifade edilirse, eşitlik (3.2) denklemi burada da geçerlidir. İyi bir yağlama sisteminde a çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı;

$$\mu \approx \tau_{kf} / \sigma_{kf} \quad (3.4)$$

olarak bulunur.

Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma mukavemetleridir. Adı yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetinin büyütmek veya kayma mukavemetini azaltmak için yağlara katık denilen bir takım ek maddeler konulur.

Genellikle organik yağlardan oluşan katık maddeleri yağ içerisine çok az miktarda konulur. Bu maddeler metalsel yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerler ve yüzeyler

arasında, kopma mukavemeti yüksek olan yarı sıvı halinde madeni sabunlar meydana getirirler.

Böylece sınır sürtünme; sırf adsorpsiyon tabakalarından oluşan fiziksel veya kimyasal reaksiyonu sonucu meydana gelen tabakalarından oluşan kimyasal esasına dayanabilir. Pratikte kuru sürtünmede olduğu gibi sınır sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerin sürtünme katsayıları deney ile tayin edilir [23].

Sıvı sürtünme

Sıvı sürtünmesi, madeni yüzeylerin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme haidir (Şekil 3.6). Yüzeylerin pürüzlüğü göz önüne alınırsa, analitik bakımından sıvı sürtünmesi [23].



Şekil 3.6. Sıvı sürtünme [23]

$$H_o > R_{t1} + R_{t2} \quad (3.5)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. Burada R_{t1} ve R_{t2} her iki yüzeyin maksimum pürüzlülüğüdür.

Madensel yüzeylerle doğrudan doğruya temasta bulunan yağ tabakaları, adsorpsiyon yolu ile bu malzemelere tamamen yapışmış olduğu görülür; şöyle ki U hızıyla hareket eden yüzeye yapışmış olan tabakanın hızı U; sabit yüzey üzerindeki tabakanın hızı ise sıfırdır. Ara tabakalarının hızı y mesafesine bağlı olarak U ile sıfır arasında değişir. Böylece sıvı sürtünmesi halinde sürtünme esas itibariyle birbiri

üzerinde kayan yağ tabakaları arasında oluşmaktadır. Viskoz bir akışkanda meydana gelen kayma gerilmeleri Newton kanununa göre

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (3.6)$$

şeklinde, belirtilebilir. Burada η -yağın viskozitesi, du/dy -y mesafesine göre hız değişimi (gradyanı) veya kayma oranıdır. Kayma gerilmelerine bağlı olan sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı

$$F_s = \eta \frac{du}{dy} A; \quad \eta = F_s / F \quad (3.7)$$

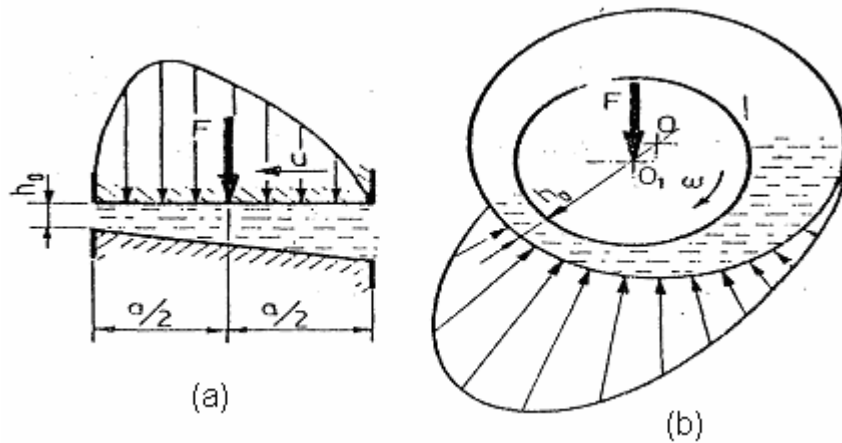
olarak yazılır. Burada;

$$\eta(\mu/h)A \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir, burada h -yağ tabakasının kalınlığıdır.

Sıvı sürtünmenin oluşumunda rol oynayan esas etken yağ tabakasında meydana gelen basınçtır. Basınç oluşumu Hidrodinamik ve Hidrostatik olmak üzere iki olaya bağlıdır.

Hidrodinamik sıvı sürtünmesinde, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı olarak yağ tabakasında kendi kendine bir basınç alanı oluşur. Basınçlı bir yağ filminin oluşabilmesi için kinematik ve geometrik şartlar, yüzeylerin birbirine göre belirli bir izafi hıza sahip olması ve yağ tabakasının hareket yönünde daralmasıdır. Pratikte bu iki şart, eğik düzlemsel yüzeylerde (eksenel yataklarda, Şekil 3.7.a) ve birbirine göre eksantrik bir durumda olan silindirik yüzeylerde (radyal yataklarda, Şekil 3.7.b) gerçekleşir.



Şekil 3.7. Hidrodinamik sıvı sürtünmesi [24]

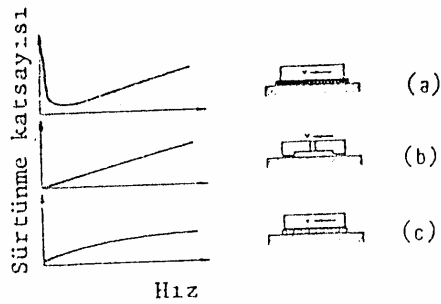
a) eksenel yataklarda sürtünme, b) radyal yataklarda sürtünme

Hidrodinamik sıvı sürtünmesi kinematik ve dinamik şartlara bağlı olduğundan uygulama alanı sınırlıdır. Genellikle bu sürtünme hali, izafi hareketin sürekli olduğu ve yağ tabakasının hareket yönünde daraldığı sistemlerde oluşur. Öteleme hareketi sırasında hareket yönünde daralan bir yağ tabakası oluştuğu takdirde, çok kısa süreli bir sıvı sürtünmesi hali gerçekleşebilir; ancak bu sürtünme hali hiçbir zaman sürekli olmaz.

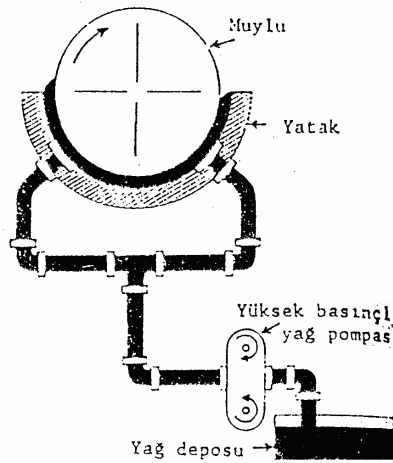
Şekil 3.8.a' da hidrodinamik sıvı sürtünmesinde sürtünme katsayısının hız ile değişimi görülmektedir. Görüldüğü gibi hidrodinamik sıvı sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında kuru ve sınır sürtünmesi halleri ve bunlara bağlı olarak aşınmalar meydana gelir. Bu nedenle hidrodinamik sıvı sürtünmesi halinde sitemlerin aşınması tamamen önlemez. Hidrodinamik sıvı sürtünmede yağlayıcı maddeler olarak sıvı, gaz veya gres kullanılabilir. Buna göre sıvı sürtünmesi halleri Hidrodinamik, Gazodinamik veya Reodinamik olarak isimlendirilir.

Hidrostatik sıvı sürtünmesi halinde, dış kuvvetin dengelenmesi ve yüzeylerin birbirinden ayrılması için gereken basınç, bir yüksek basınçlı pompa vasıtası ile dışardan sağlanır ve yağ basınç ile yüzeyler arasına gönderilir (Şekil 3.9). Bu durumda bütün sistemlerde, yüzeylerin kinematik ve geometrik şartlarına bağlı

olmaksızın sıvı sürtünmesi sağlanabilir; yani hidrostatik sıvı sürtünmesi hareketsiz yüzeylerde de oluşturulabilir. Böylece bu gibi sistemlerde hareketin başlangıcında ve durma sırasında sıvı sürtünmesi hali vardır (Şekil 3.8.b), kuru veya sınır sürtünmesinin bulunmadığı bu yağlama durumunda aşınma da yoktur [22, 23].



Şekil 3.8. Sürtünme katsayısının değişimi [23]
(a)Hidrodinamik, (b)Hidrostatik, (c)Rulmanlar



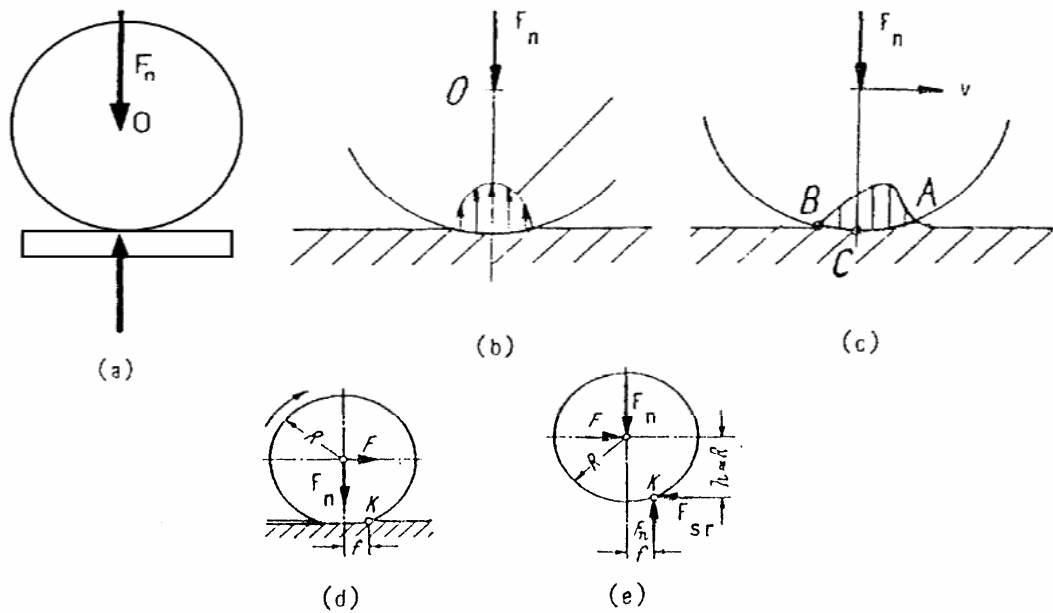
Şekil 3.9. Hidrostatik sıvı sürtünme [23]

Bu üstünlüklerine rağmen hidrostatik sıvı sürtünmesi ile çalışan sistemlerin mahzurları şu şekilde özetlenebilir. Tesisat bakımından (motor, pompa, süzgeç, dirençler) oldukça karışık ve pahalı bir sistemdir; bu tesisatta bir arıza olduğu ve yatağa yağ gönderilmediği durumda, yüksek hızda çalışan elemanlar direkt temasa

geçerler ve şiddetli bozulmalar meydana gelir. Ancak modern sistemlerde, bu durumu önlemek için uyarıcı cihazlar konulur. Yağlayıcı maddeler sıvı, gaz veya gres olabilir. Buna göre sistemler Hidrostatik, Gazostatik veya Reostaitik olarak isimlendirilir. Teknolojinin gelişmesi ile yağlama alanında da yeni yöntemler uygulanmaya başlanmıştır. Örneğin sıvı sürtünmesi bölgesinde çalışan sistemlerdeki yağlayıcı elektromanyetik alan içerisinde bulunursa, bu sistemlere, sıvı sürtünmesinin cinsine göre Magnetohidrodinamik, Magnetogazodinamik, Magnetohidrastatik denilmektedir [23].

Yuvarlama sürtünmesi

Yuvarlanma sürtünmesi, yuvarlanma hareketine karşı temas yüzeylerinde oluşan dirençtir. Teorik bakımdan tam rijit ve yüzeyi pürüzsüz olan tam silindirik veya küre şeklinde bilye elemanın, rijit pürüzsüz bir düzlem üzerinde serbest yuvarlanmasında (Şekil 3.10.a), hiçbir sürtünme kuvveti meydana gelmez. Aslında bu tür elemanların temas yüzeylerinde Hertz tipi elastik ve daha az olarak da plastik deformasyonlar oluşur (Şekil 3.10.b). Ayrıca hareket yönüne doğru temas alanında bir dalga meydana gelir (Şekil 3.10.c) [21, 23].



Şekil 3.10. Yuvarlanma sürtünmesi [21]

a) pürüzsüz yüzeyde yuvarlanma, b) plastik deformasyon oluşumu, c) deformasyonla dalga oluşumu, d) kayma oluşumu, e) sürtünme momenti

Dolayısıyla F_n kuvvetine karşı basınçların tepkisi f değeri ile ileri kayar (Şekil 3.10.d). Bu durumda, elemanın yuvarlanmasında meydana gelen yuvarlanma sürtünme momenti (Şekil 3.10.e),

$$M_{sr} = F_n \cdot f \quad (3.9)$$

ve yuvarlanmayı gerçekleştiren kuvvet $F_h = F_n \cdot f$ bağıntısından $h \approx R$ değeri ile;

$$F = (f/h)F_n \approx (f/R)F_n = \mu_r F_n \quad (3.10)$$

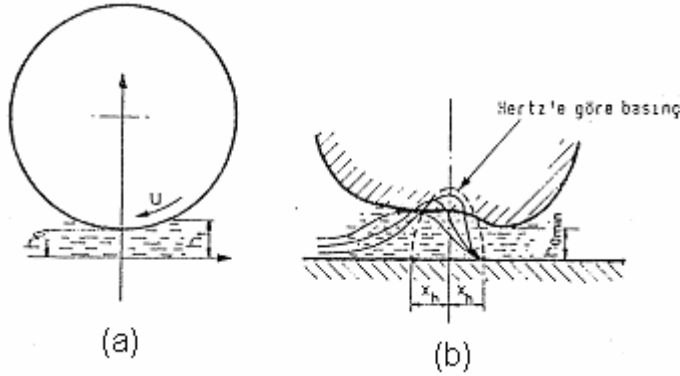
olarak bulunur. Burada: f -mm veya cm ile ifade edilen yuvarlanma sürtünmesinin

kolu ve $\mu_r = f/R$ -yuvarlanma sürtünme katsayısıdır (3.10) bağıntısına göre yuvarlanmada harekete karşı direnci simgelemeyen sürtünme kuvveti

$$F_{sr} = \mu_r F_n \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu kuvvet $F_{so} = \mu_r F_n$ statik sürtünme kuvveti ile karşılaştırılırsa $F_{sr} < F_{so}$ yani $\mu_r = f/R < \mu_o$ olduğu durumda eleman kaymaksızın sadece yuvarlanır; $F_{sr} > F_{so}$ yani $\mu_r = f/R > \mu_o$ olduğu halde eleman yuvarlanmaz, sadece kayar. Yuvarlanma hareketi ve buna bağlı olan yuvarlanma sürtünmesi, yukarıda

gösterilen olaylardan çok daha karışıktır. Harekete karşı direnç, temas yüzeylerinde oluşan kayma, histerezis, yüzey enerji kayıpları, geometrik düzgünsüzlükler gibi olaylara bağlıdır.



Şekil 3.11. Elastohidrodinamik sürtünmesi [24]

a) hidrodinamik sıvı sürtünmesi, b) elastohidrodinamik sürtünmesi

Yuvarlanan yüzeyler arasında yeterli yağ bulunduğu durumda, bir hidrodinamik sıvı sürtünmesi oluşabilir (Şekil 3.11.a). Fakat Hertz basıncı ve şekil değiştirmeler de dikkate alınırsa burada esasen Elastohidrodinamik denilen bir sıvı sürtünmesi meydana gelir (Şekil 3.11.b). Pratikte yuvarlanma hareketi dişli, kam mekanizmalarında ve rulmanlarda rastlanır. Bu nedenle yukarıda gösterilen olaylar bu sistemlerde önemlidir [23, 24].

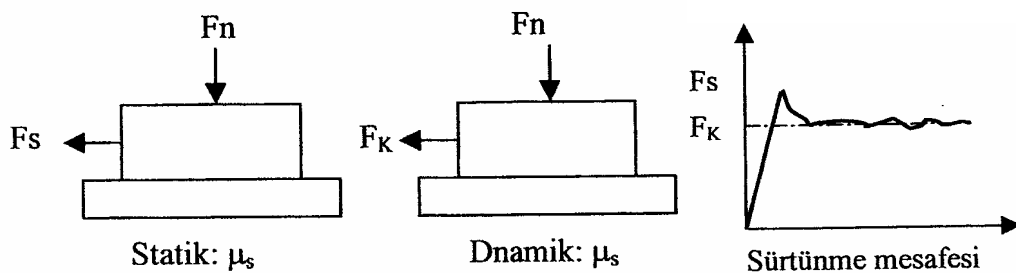
3.1.2. Sürtünme kanunları

Sürtünme kanunlarının belirlenmesinde iki temel esas vardır ve bunlar büyük oranda uyumluluk gösterirler. Birinci kanun; temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti, görünür temas alanından bağımsızdır. İkinci kanun; sürtünme kuvveti, cisimler arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Böylece bir cisim diğeri üzerinde kayarken eğer normal yük iki katına çıkartılırsa, sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Bu kural daha çok Amontons kuralı olarak bilinir ve ilk kez 1699 yılında Fransız bilim adamı Amontons tarafından açıklanmıştır. Üçüncü bir kural olarak da; kinetik sürtünme kayma hızından yaklaşık olarak bağımsızdır. Bu kuralın ilk ikisine göre uygulanabilirliği daha düşük değerlerlerdir. Üçüncü kural Coulomb tarafından 1785 yılında açıklanmıştır [25].

3.1.3. Sürtünme katsayısı

Bilindiği gibi iki malzeme birbirine temas edecek şekilde yerleştirilirse, malzemelerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde, bir sürtünme kuvveti oluşur. Kaymayı başlatan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden kuvvet (F_n) arasında, $F_s = \mu_s \cdot F_n$ bağıntısı mevcuttur. Burada μ_s , statik sürtünme katsayısıdır.

Birinci durumda, teğetsel kuvvete rağmen cisimler birbiri üzerinde kayamaz, yani hareket edemezler. Bu durumda hareket olanağı olmadığından yüzeyler arasında "statik sürtünme" denilen bir direnç oluşur ve Newton kanununa göre F_s sürtünme kuvveti teğetsel sürtünme kuvvetine eşit ve ters yöndedir. Böylece; $F_s = F_t$ yazılabilir. Kavrama ve fren gibi sürtünme ile çalışan sistemlerde gerçekte bu sürtünme hali mevcuttur. Diğer durumda ise, F_k teğetsel kuvvetin etkisi altındaki yüzeyler birbiri üzerinde kayarlar. Şekil 3.12' de görüldüğü gibi, kinetik veya dinamik sürtünme kuvveti denilen bu halde, F_s sürtünme kuvveti F_k teğetsel kuvvetinden daha küçüktür ve harekete ters yöndedir. Kaymanın başlamasıyla birlikte sürtünme kuvvetinde bir azalma görülür ve bu durumda, $F_s = \mu_k F_n$ bağıntısı yazılabilir [27].



Şekil 3.12. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları [25]

Kinetik sürtünme katsayısı μ_k , statik sürtünme katsayısı μ_s ' den daha küçük değerdedir. Bunun sebebi, dinamik haldeki yüzeylerde bulunan küçük çıkıntılar

statik haldeki gibi yapışmak, μ_k n gerekli zamanı bulamazlar. Bu nedenle geçilmesi gereken temas alanı azalır, 1 numaralı eşitlik göz önüne alınacak olursa, μ_k değeri μ_s ' ye göre daha küçük değer alacaktır. Kayma durur durmaz, sürtünme temas yüzeylerinin çok az büyümesine müsaade eder ve burada, yayınma mekanizması bağların kuvvetlenmesini sağlar. Böylece sürtünme katsayısı yeniden μ_s değerine ulaşır [25].

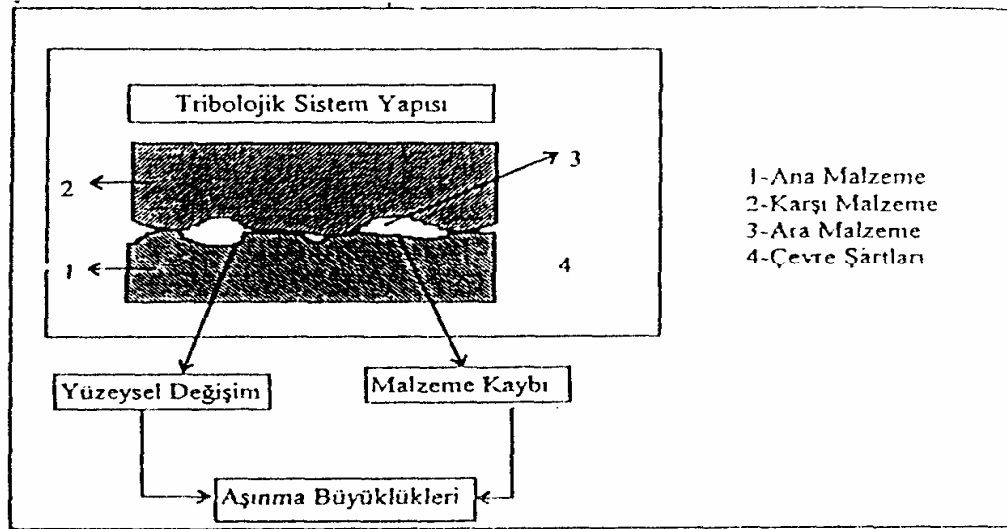
3.2. Aşınma

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 ya da yağlayıcılarla kaplansalar bile oksit filminin mekanik yük altında parçalandığı ve yağlayıcının adsorbsiyonunun 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 [28].

Bir aşınma sisteminde;

- i. Ana malzeme (aşınan),
- ii. Karşı malzeme (aşındıran),
- iii. Ara malzeme,
- iv. Yük ve
- v. Hareket

temel unsurlar olarak sayılabilir. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılır ve Şekil 3.13' de böyle bir sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.13. Tribolojik bir sistemin şematik olarak gösterimi [28]

3.2.1. Aşınma hasarları

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

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

3.2.2. Aşınma türleri

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

Rabinowicz aşınmayı dört temel grupta toplamıştır [30]. Bunlar; adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, kalkma veya oyuklanma ve kimyasal veya korozyon etkidir. 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 [30].

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, birçok aşınma halleri vardır. Adhesiv, abrasiv, oyuklanma ve kalkma, kazıma olmak üzere dört grupta toplanır.

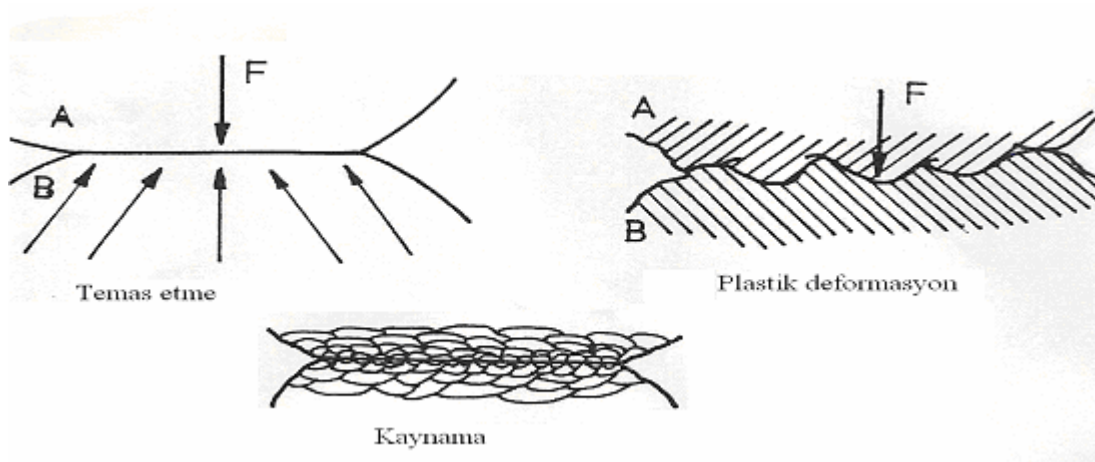
Adhesiv aşınma

Özellikle kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti oluşur [30].

Adhesiv aşınma en çok rastlanan aşınma türüdür. Bu aşınma, birbiriyle temas halinde bulunan iki metalin yüzeylerinin, yüksek basınç ve meydana gelen sıcaklık yükselmesi ile birlikte, metallerin yüzey kısımlarında bir kaynama meydana gelir. Çalışma esnasında bu kaynaklar birbirlerinden ayrılırken yüzeylerinden ufak parçacıklar kopar. Bu şekilde meydana gelen aşınma Adhesiv aşınmadır [31].

Adhesiv aşınma en kolay alaşım yapan benzer malzemelerde görülür. Bu aşınma bağlı hız, normal kuvvete, yüzeylerin sertliğine bağlıdır. Yüksek hız ve yüklerde görülen bu aşınma yüzeydeki oksit ve nem tabakasının etkisindedir. Adhesiv aşınma en çok benzer kristal kafes yapılı malzemelerde görülür. Benzer kristal yapısına sahip metallerin, hareket ve sürtünme nedeniyle sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynama daha kolaydır. Buradaki kaynama terimi bazen yanlış anlaşılmalara neden olur. Şöyle ki kaynak yüksek sıcaklıklarda meydana gelen bir birleşmedir. Adhesiv aşınma durumunda ise temas bölgelerindeki sıcaklıklar düşük olabilir. Burada meydana gelen kaynak soğuk kaynak olarak tarif edilebilir. Şekil 3.14’ de adhesiv aşınmada kaynak bağının oluşumu görülmektedir [30].

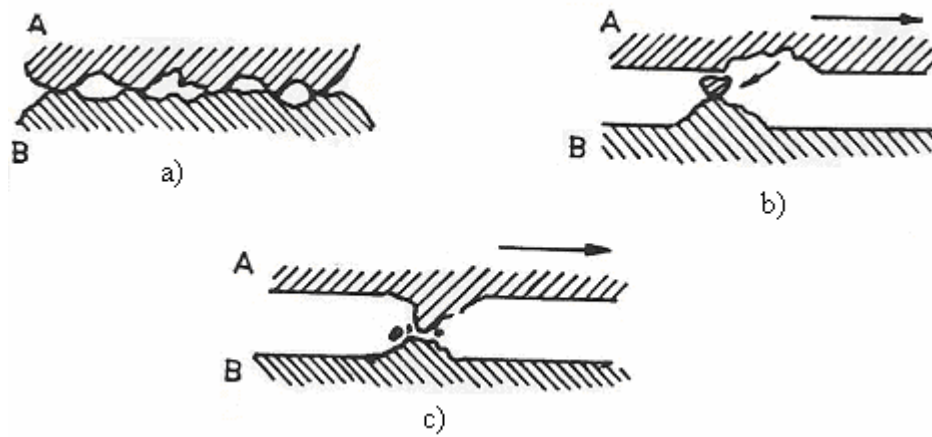
Birbiriyle temas halinde bulunan metaller, yüzeylerindeki pürüzler vasıtasıyla etkileşirler. Çok düzgün yüzeylerde bile bu durum söz konusudur. Metalin ağırlığında veya herhangi bir yükleme durumunda, pürüz tepelerinde meydana gelen gerilme sonucu plastik deformasyon oluşur. Malzemenin deforme edilebilirliği kolay ise temas alanı artarak bütün yüzeye dağılır. Bu durumda yüzeylerde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak, malzeme moleküllerinin direkt temas etmelerine olanak verir. Böylece temas noktalarında soğuk kaynak bölgeleri oluşur. Bu bölgeler izafi hareket durumunda, sürtünme kuvvetinin etkisiyle kırılarak yüzeyler arasına taşınır. Bu şekilde meydana gelen malzeme kaybına Adhesiv aşınma denir.



Şekil 3.14. Adhesiv aşınmada oluşan kaynak bağı [32]

Sürtünme esnasında malzemenin yüzeylerinde meydana gelen kaynak bağlarının kırılması tam temas yüzeylerinde meydana gelmesi durumunda malzemenin kaybı olmaz [31]. Fakat kırılmanın malzemenin temas yüzeyinin uzağında veya herhangi birinin içinde olması durumunda, kırılan parçalar bir yüzeyden diğer yüzeye geçerek malzeme transferi meydana gelir. Şekil 3.15' de adhesiv aşınmada oluşan kaynak bağlarının kopması ve malzeme transferi şematik olarak gösterilmiştir [33].

Metallerin birinin diğerine göre yumuşak olması durumunda, meydana gelen kaynak bağı vasıtasıyla kırılma yumuşak malzemede olur ve malzeme transferi sert olan malzemeye doğru oluşur. Fakat yüzeyde bulunan nitrürler ve oksitler koparak yumuşak malzemeye gömülerek sert olan malzemeyi aşındırabilir [34]. Ortam ısısı, yüzey pürüzlülüğü, hareket hızı ve ortam basıncı aşınmanın şiddetini arttıran temel faktörlerdir. Adhesiv aşınma miktarı uygulanan yük ile ve alınan yol ile doğru orantılı olup aşındırılmış yüzeyin sertliği ile orantılıdır [14].



Şekil 3.15. Kaynak bağlarının kopması ve malzeme transferi [33]

a) yüzeyde kaynak bağları, b) malzeme transferi, c) aşınma taneciklerinin teşekkülü

Metaller arasındaki yağlamanın adhesiv aşınmaya çok büyük etkisi vardır. Metal - metal aşınmasında metal yüzeylerin sürtünmesi ve birbiri üzerinde kayması sırasında yüzeylerden parçacıklar kopar. Yağlama olmadığında sık sık kopan parçalar diğer metale yapışarak aşınmayı artırır [20]. Adhesiv aşınmanın söz konusu olduğu durumlarda, sökölüp takılması ve tamir olması kolay olan parçanın diğerine göre

yumuşak olması tercih edilir. Örnek olarak ana dişliye göre küçük olan pinyon dişlisinin yumuşak olması istenir.

Adhesiv aşınma genellikle yataklarda, dişlilerde, kam mekanizmalarda ve demiryollarında çalışan teker - ray sistemlerinde görülür. Yüksek yükleme ve hız durumlarında, yağlama aşınmanın azaltılmasını sağlar. Yapılan çalışmalarda azotlu ortamdaki aşınmanın, karbondioksitli ortamda meydana gelen aşınmadan daha fazla olduğu ispat edilmiştir. Yüzeyler arasında bulunan oksit, CO₂, nem ve N gibi maddeler adhesiv aşınma miktarının azalmasını sağlar [26].

Yüzeyler hareket ettirildiğinde başlangıçta yüzeylerin teması sivri tepeciklerde olduğundan yüksek gerilmeler meydana gelir ve aşınma hızla artar. Sivri noktaların düzleşmesi ve kopan partiküllerin yağlar tarafından uzaklaştırılması ile yüzey teması çok geniş bir alana yayılır. Dolayısıyla gerilme düşer ve aşınma miktarı azalır. Aşınmanın başlangıcındaki alıştırma aşınmasına (rodaj) denmektedir. Bu aşınmada yüklerin yüksek olması tehlikelidir. Tüm yağlamalı sistemlerde alıştırma aşınması uygun şartlarda, aşırı yüklenmeden gerçekleşirse faydalı olur. Alıştırma aşınması ile aşınma miktarı atılarak yüzeyler düzgünleşir. Dolayısıyla temas alanı artarak yük düşer. İkinci bölgedeki aşınmaya durgun aşınma denir ve uzun süre önemli bir aşınma meydana gelmez. Tezgâh ve makinelerin ömrünü bu aşınma tayin eder. Durgun aşınma sonunda aşırı aşınma meydana gelir. Bu aşınma durumunda malzeme çiftleri birbirine tamamen yapışabilir [20].

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 [33].

Bunlar;

- i. Aşınma miktarı normal yüklerle orantılıdır
- ii. Aşınma miktarı kayma mesafesiyle orantılıdır
- iii. Aşınma miktarı aşınan yüzeyin sertliği ile orantılıdır.

Bu çalışmalar, gösterilen parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak, birçok 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 birçok faktör vardır [29]. Bunlar içerisinde yağlayıcı uygulaması tatmin edicidir ve malzeme seçiminde en çok çalışılan konular arasındadır. Araştırmalar ve deneyler sonucunda adhesiv aşınmanın azaltılmasında bazı uygulamaların faydalı olduğu görülmüştür [26]. Bunlar;

- i. Malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olmalıdır. Roach, Goadzeit ve Hunnicut adhesiv yapışmada alaşımlamanın çok etkili bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.
- ii. 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 3.2’ de görülmektedir.
- iii. 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.
- iv. 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 kuvvet 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 [33]

Özellik	Büyüklik	Adhesyon Katsayısı
1 . Yüzeye yardımcı bir madde süre	Yüksek	Düşük
2. Kristal sistemi	Kübik Hegzagonal	Düşük
3. Deformasyon sertleşmesi katsayısı	Yüksek	Yüksek
4. Safılık	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. Yüzey enerjisi	Yüksek	Yüksek

Hegzagonal sıkı paket yapıda olan çinko metali üzerinde çalışılmıştır. Büyük oranlarda bir değişimin olmadığı görülmüştür. Aksine yüzey merkezli kübik yapıda olan bakır üzerindeki çalışmalar büyük ölçüde etkinin var olduğunu göstermiştir.

Abrasiv aşınma

Bu aşınma şekli kaba sert bir yüzeyin veya içinde sert tanecikler ihtiva eden bir yumuşak yüzeyin, daha yumuşak bir yüzeyin üzerinde kayması ve yumuşak yüzeyde bir takım oluklar açılması halidir. Oluklardan çıkan malzeme genellikle gevşek aşındırma parçacıkları şeklinde kalır [34]. Sürtünen iki yüzey arasına dışarıdan giren yada iki yüzey arasında oksitlenmeden dolayı meydana gelen daha sert bir maddenin yüzeylerde yaptığı hasar olarak tanımlanır. Bu sert maddeler, yüzeylerde taşlama işleminde olduğu gibi bir malzemedan parça kopartılması olayı ile benzer işlem

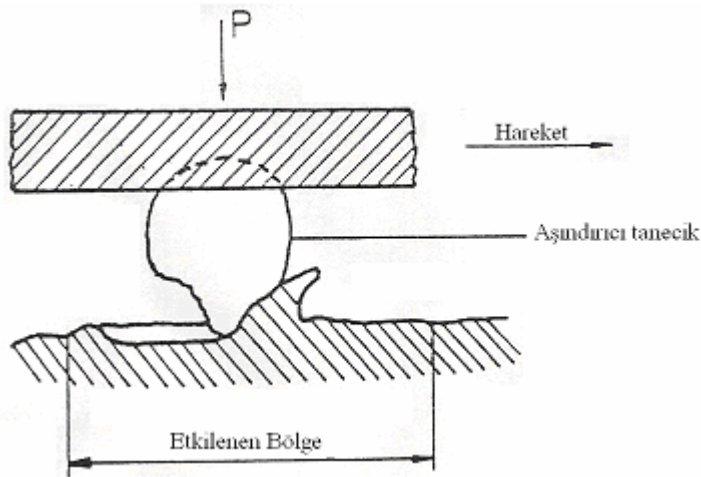
gösterirler [35]. Abrasiv aşınma, aşınma türlerinin arasında en önemlisidir. Çünkü toplam aşınmanın %63'ünü içerir [36]. Yüzeylere baskı kuvveti uygulandığı zaman sert yüzey üzerindeki asperiteler (kaba parçalar) yumuşak yüzeye gömülür. Dolayısıyla yüzeyleri hareket ettirmek için bir kuvvet uygulandığı zaman asperiteler yumuşak yüzeyi kazırlar. Aşınma yumuşak ve sert iki yüzey arasında olduğu gibi sert taneciklerin yüzey üzerinde akması ile de gerçekleşir. Üç cisimli aşınmada yüzeyler arasındaki sert tanecikler tam bir kayma hareketi yapmaz, bazen de yuvarlanırlar. Bu nedenle aşınma daha yavaş olur.

Metalin (aşınan malzeme) sertliği (Hm) ve aşındırıcının sertliği (Ha) olmak üzere Hm/Ha bir kıstas olarak kullanılır. Hm/Ha < 0.8 ise metalde çok aşırı kazıma aşınması meydana gelir. Talaşlı imalatla istenen durum budur. Hm/Ha > 0.8 ise kazıma aşınması düşüktür. Hm/Ha ≥ 1 ise metalde kazıma aşınması meydana gelmediği belirtilir [24].

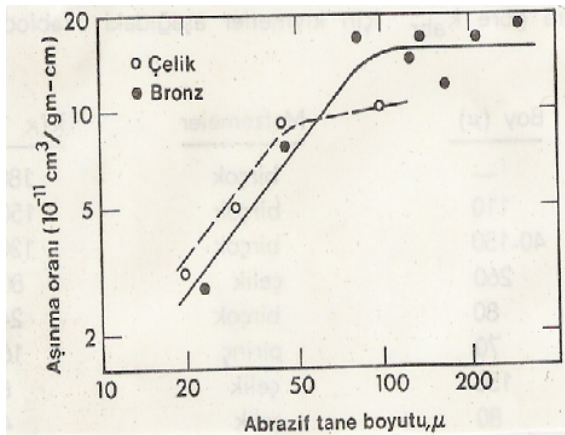
Günümüzdeki otomobil motorları, motor bloğunun işlenmesi sırasında oluşmuş sert dökme demir tozları içerir. Eğer bu parçacıkların kalınlığı en ince yağ filminin kalınlığından daha fazla ise abrasiv aşınma meydana gelir. Bu problemin çözümü için iki yol mevcuttur. Bunlardan biri komşu yüzeyleri yabancı parçacıklardan daha sert yapmaktır. Bu nedenle krank millerinin yüzeyleri sertleştirilir [37]. Abrasiv aşınma iki cisimli ve üç cisimli abrasiv aşınma olmak üzere iki şekilde meydana gelir. İki cisimli abrasiv aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzeyin kendinden daha yumuşak bir malzeme ile temas ettiği durumda, kuvvet ve basıncın etkisiyle yumuşak malzeme yüzeyinde oluşan çizikler ve küçük parçacıklar kaldırarak meydana gelen aşınma, iki cisimli abrasiv aşınma olarak tarif edilebilir. İki cisimli abrasiv aşınmaya kazı makineleri, toprak işleme aletleri, eğeleme ve zımparalama işlemi örnek olarak verilebilir [26, 33].

Üç cisimli abrasiv aşınma, metal-metal sürtünmesi durumunda adhesiv veya iki cisimli abrasiv aşınma olarak başlayıp üç cisimli abrasiv aşınma olarak devam eder. Bu aşınmada iki metal arasına sert tanecikler girer ve malzeme üzerinde çizikler oluşturarak aşınmayı meydana getirir [38]. Araya giren tanecikler toz, kum, mikro talaşlar ve parçalanmış oksit tabakaları vb. taneler olabilir [26]. Kum gibi bir

parçacığın ara yüzeye girmesi sonucunda abrasiv aşınma artar ve her iki yüzeyde de değişiklikler meydana getirir [39]. Üç cisimli abrasiv aşınmanın aşınmayı hızlandırdığı tespit edilmiştir. Bu nedenle sert taneciklerin araya girmesine engel olunmalıdır [26]. Malzemelerin yüzeylerinin durumları değiştirilerek korozyona, çarpmaya ya da abrasiv aşınmaya karşı direnci artabilir [20]. Şekil 3.16 'da üç cisimli abrasiv aşınma mekanizması şematik olarak görülmektedir [33]. Abrasiv aşınmadaki sürtünme katsayısı metal malzemenin mekanik davranışına ve abrasiv parçanın karakteristikleri, özellikle abrazyon durumunda geometrisine göre değişir. Goddart ve Wilmon'a göre abrazyon oluşumundaki ilişkide (metal-abrasiv, metal-metal, abrasive-metal) sürtünme katsayısı değişik şekilde olabilir [40].



Şekil 3.16. Üç cisimli abrasiv aşınma mekanizması [33]



Şekil 3.17. Abrasiv tane boyutunun fonksiyonu olarak iki metalin aşınma oranı [34]

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. Abrasiv aşınma proseslerinin içerdiği tipik aşınma hızları [32]

Mekanizma	Aşınma miktarı (mg/s)
Oymalı sürtünme aşınmasında östenitik mangan çeliği	
i. Darbeyle <i>toz</i> üretiminde kullanılan çekişler	5 – 1000
ii. İş makinelerinin dalıcı dişleri	5 – 500
iii. Kaba cevher kazıyıcılarının aşındırıcı bıçakları	4 – 15
iv. Top milli kepçe ağızları	2 – 20
v. Silis cevherlerinin kırılması için kırıcı bantlar	0,1 – 1,0
vi. Kaba silis cevherlerinin tutulmasında kullanılan oluk bantlar	
Yüksek gerilmeli abrasiv aşınmada düşük alaşımlı yüksek karbonlu çelikler	
i. Silis cevherlerinde kullanılan çubuk ve bilyeli mil bantları	0,5 – 5
ii. Islak öğütülmüş silis cevherlerinin aşındırma bilyelerinde	0,15 – 0,45
iii. Islak öğütülen ham çimento çamurundaki öğütücü bilyeler	0,05 – 0,15
iv. Kuru öğütülen çimento klinkerlerinde kullanılan öğütücü bilyeler	0,005 – 0,015
Düşük gerilmeli abrasiv aşınmada perlitik beyaz dökme demir	
i. Kum püskürtme nozülleri	100 – 1000
ii. Kum taşıma bantları	50 – 250
iii. Aşındırıcı mineral çözeltilerinin pompalanmasında kullanılan yükleyici vanalar	0,1 – 5
iv. Abrasiv mineral çözeltilerinde ajitasyon ve flatasyon pervaneleri	0,05 – 1
v. Kum çözeltilerinde vida tipi sınırlandırıcıların aşınan pabuçları	0,05 – 0,2

Bir malzemenin diğer bir malzeme tarafından önemli ölçüde abrasiv aşınmaya tabii tutulabilmesi için, ikinci malzemedan 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;

- i. Alaşımlamayla malzemelerin sertlikleri iyi bir şekilde artırılabilir.
- ii. Isıl işlem uygulamaları yine malzemelerin sertliklerini önemli ölçüde değiştirebilir.
- iii. Malzemelerin yüzeylerine dışarıdan müdahale ederek sert yüzey tabakası oluşturabilir.

Buna örnek olarak elektro kaplama, alev püskürtme, nitrasyon, plazma sprey, borlama ve bunun gibi birçok diğer uygulamalar örnek olarak verilebilir. Birçok yüzey işlemi aşınmayı azaltmak ve sınırlandırmak amacıyla uygulanmaktadır.

Oyuklanma ve kalkma aşınması

Bu tip aşınma temas yüzeylerinde çok küçük çukurcukların oluşması şeklinde kendini gösterir. Olay özellikle rulmanlar, dişli çarklar, 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 [33].

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. Oyuklanma ve kalkma aşınmasının diğer bir açıklama tarzı ise, çukurcukların plastik deformasyonlar nedeniyle doğrudan doğruya temas yüzeyinde meydana geldiği ve buradan malzemenin iç kısımlarına da yayıldığı ileri sürülmektedir [32, 33].

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 birçok boşluk meydana gelebilir.

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

İki türlü oyuklanma ve kalkma aşınması vardır. İlkel oyuklanma ve kalkma aşınmasında çukurcuklar çok küçük olup büyümezler ve yüzeye yayılmazlar. Tahripkâr oyuklanma ve kalkma aşınmasında ise, çukurcuklar zamanla büyür ve yayılırlar. Birinci tipteki oyuklanma ve kalkma aşınması, elamanın normal çalışmasını genellikle engellemez. Tahripkâr oyuklanma ve kalkma aşınması, 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 östenit miktarının oyuklanmayı etkilediğini göstermiştir [37].

Oyuklanma ve kalkma aşınması oluşumunda malzemelerin doğal sertliği önemi rol oynar. Doğal sertlikteki malzemelerde, örneğin çeliklerde, oyuklanma ve kalkma aşınması meydana gelir; ancak çeliğin yüzeyi sertleştirilirse oyuklanma ve kalkma aşınması meydana gelmez. Bu aşınma türü yumuşak malzemelerde görülmemektedir. Yorulma aşınmasını önlemek için en önemli tedbir temas yüzeylerinin sertleştirilmesidir.

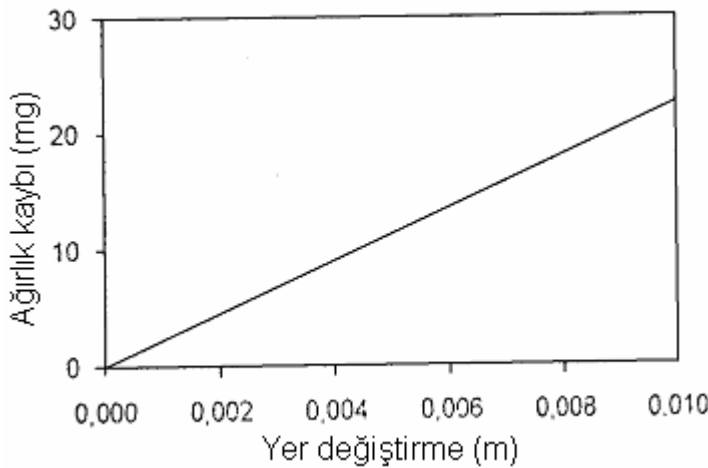
Yuvarlanma veya kayma şeklinde yüzey hareketinin yüzeyde oluşacak çatlağın yüzeyde mi, yoksa yüzeyin hemen altında mı başlayacağı hakkında bize bilgi vermektedir. Yalnızca yuvarlanma, yüzeyin hemen altında maksimum kayma gerilmesi ortaya çıkarmaktadır. Buna ilaveten yüzeye kayma işleminin uygulanması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

Kazıma aşınması (mekanik korozyon aşınması)

Kazıma, 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 [34, 35].

Bu parçalar çok küçüktür ve oksitlenmek için gerekli olan ısıya ulaşmış durumdadır. Bu oksit kalıntıları küçük hareketlerin oluşması sebebiyle uzaklaştıramazlar. 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 3.18' de yumuşak çelikte toplam ağırlık kaybının yer değiştirme mesafesi ile değişimi görülmektedir [33].



Şekil 3.18. Kazımadan kaynaklanan toplam ağırlık kaybında, toplam yer değiştirme miktarının etkisi [33]

3.2.3. Aşınma deneyleri ve ölçüm yöntemleri

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

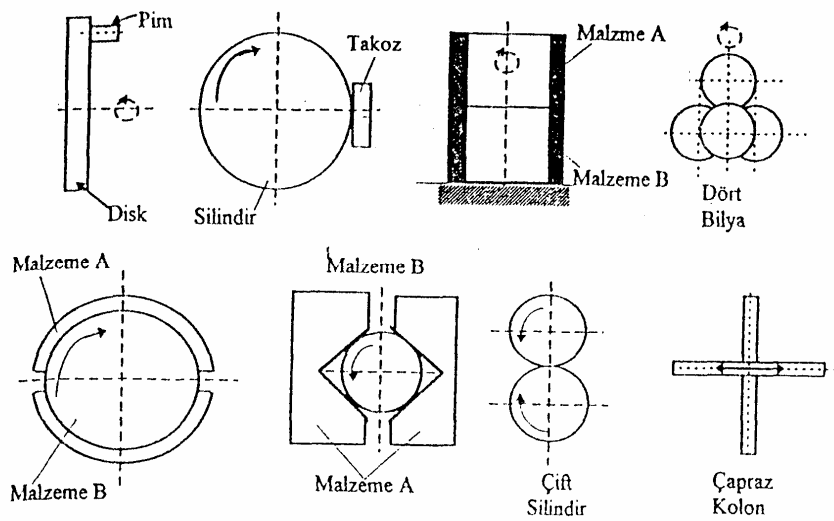
Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür.

- i. Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemelerinin adhesiv aşınma değerlerinin ölçüldüğü deneyler (Şekil 3.18).
- ii. Katı, sıvı ve gaz halindeki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü deneyler (Şekil 3.19).

Aşınma deney sistemi olarak en çok kullanılanlar Şekil 3.18 ve 3.19’ da görülmektedir. Aşınma farkı kalınlık farkı, iz değişim ve radyoizotop metotları aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

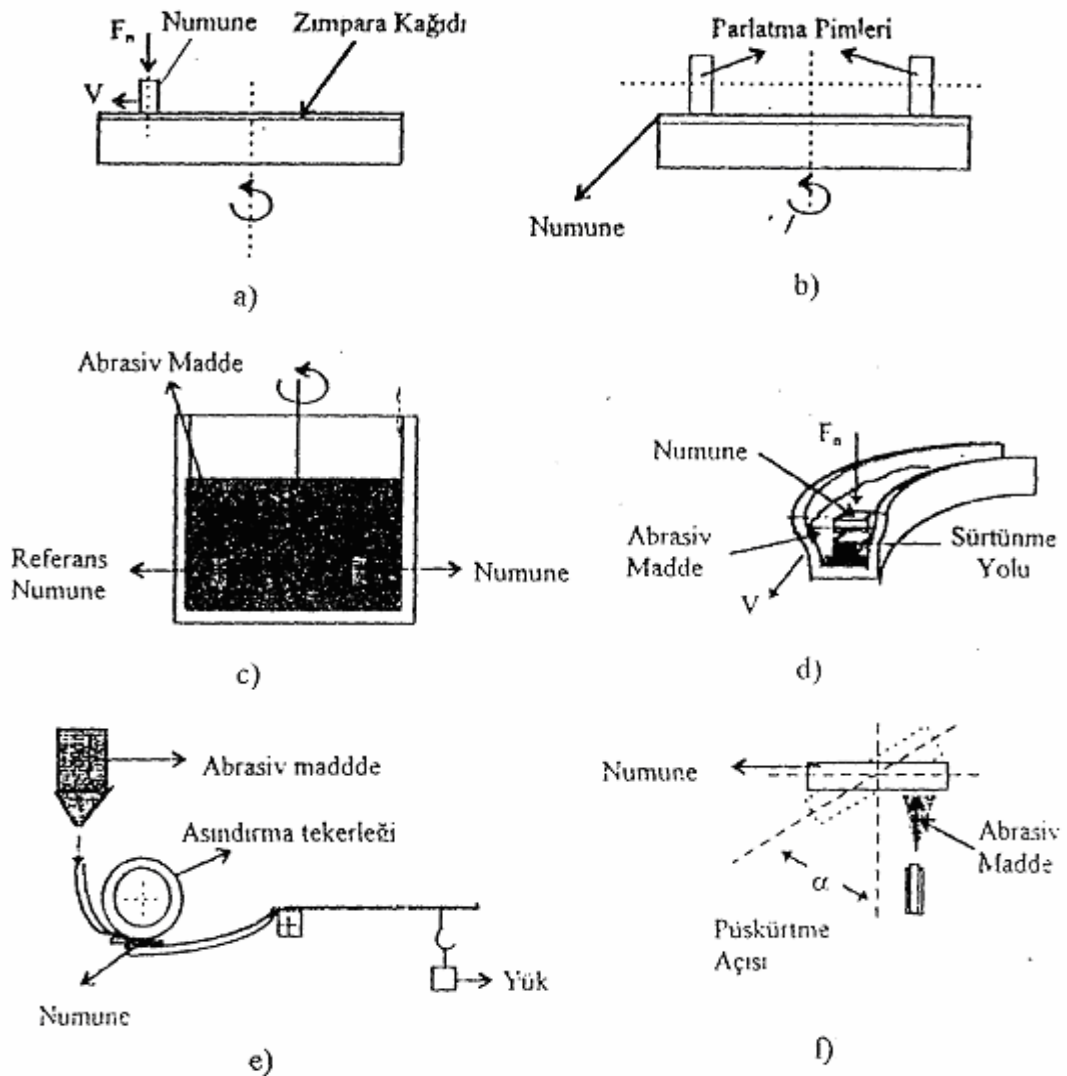
Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde olması nedeniyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçümü için numunenin çıkartılıp ölçüm yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınmaması, bu yöntemin dezavantajıdır [41].



Şekil 3.19. Yağlamalı ve yağlamasız adhesiv aşınma deney yöntemleri [41]

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 kaybından hareketle, kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından gidilerek de bulunabilir [33].



Şekil 3.20. Abrasiv aşınma deneylerinde kullanılan yöntemler [41, 42]

- a) Aşınma diski, b) Aşınma tablası, c) Aşınma kabı, d) Avery kabı, e) Aşınma tekerleği, f) Püskürtme lülesi

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

$$W_a = \frac{\Delta G}{d.M.S.} (\text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \text{ m}^{-1}) \quad (3.12)$$

Burada;

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

ΔG : Ağırlık kaybı (mg),

M : Yükleme ağırlığı (N),

S : Aşınma yolu (m),

d : Yoğunluk (gr/cm^3)

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

$$W_r = \frac{1}{W_a} (\text{N.m/mm}^{-3}) \quad (3.13)$$

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

$$W_s = \frac{10^4 \Delta G}{F.d.s} (\mu / \text{km}) \quad (3.14)$$

Burada;

V_s : Bir km aşınma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı (μm),

ΔG : Ağırlık kaybı (mg),

F : Aşınma yüzeyi (cm^2),

d : Yoğunluk (gr/cm^3),

s : Kayma yolu (km)

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

$$W_s = V_g(\text{deney numunesi}) / V_s (\text{Fe 37 çeliği}) \quad (3.15)$$

Bu orantı sayısının ters değende bağıl aşınma direnci R , olarak kullanılır.

$$R = \frac{1}{V_s} \quad (3.16)$$

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 [33].

İz değişimi metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile geometrisi belirli bir iz oluşturur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamalarda iz bırakıcı olarak en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucudur. Elmas piramit veya bilyenin bıraktığı iz boyutlarındaki değişme mikroskop vasıtasıyla ölçülerek belirlenir [33].

Radyoizotop metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya α -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 metot değildir [32, 33].

3. BOR MİNERALİ VE BOR BİLEŞİKLERİ

Bor minerali saf olduğunda kırmızı, kristal yapılı toz halinde kahverengi görünümünde çok sert bir metaldir [51]. Bor ayrı bir element olarak ilk defa 1808’de Fransa’da Gay Lussac, İngiltere’de Sir Humprey Davy tarafından aynı sıralarda varlığı ortaya konduğunda, bor bileşikleri birçok uygarlıklar tarafından asırlardır kullanılıyordu. Mısırlıların ve Mezopotamya uygarlıklarının, bazı hastalıkların tedavisinde ve ölümlerin mumyalanmasında boraks kullandıkları biliniyordu. M.Ö. 800 yıllarında Çinliler porselen cilası olarak, Himalayalar’ da Babilonlar kıymetli metallerin eritilmesinde boraks kullanmışlardır. Modern boraks endüstrisi ise 13. Yüzyılda boraksın Tibet’ten Avrupa’ya getirilmesi ile başlar [44].

Bor bileşikleri içinde ticari olarak en fazla önem taşıyanlar boratlardır. Bunlardan boraksın gerek doğada yaygın bulunuşu, gerekse endüstriyel kullanım alanının en çok oluşu nedeniyle, bor bileşikleri ile ilgili endüstri boraks endüstrisi; madenciliği de boraks madenciliği olarak bilinir[43]. Boraks madenciliği ve endüstrisi, katı boratlar kadar tuzlu göl sularından ve volkan bacalarından çıkan gazlardan elde edilen bor ürünlerini de kapsar.

Bugün bor ürünleri birçok endüstri dalının ana ham maddesidir. Kullanılan alanlarında tüketimin hızla artışı kadar, yeni kullanım alanlarının da günden güne artışı ve borun yakın gelecekte enerji üretim kaynağı olarak kullanılabilme olasılığı bu hammaddeye diğerleri arasında bir ayrıcalık kazandırır. Bilinen dünya bor rezervlerinin %65’ inden daha fazlasının Türkiye’de bulunuşu, bu hammaddenin önemini bizim açımızdan daha da arttırır [2].



Resim 4.1. Bor mineralinin görünümü [47]

4.1. Bor Mineralleri

Tuzlu su göllerinden ve volkan gazlarından elde edilenler dışında, bor ürünleri genellikle boratlardan kazanılır. Türkiye’deki borat yatakların en belirgin özelliği, söz konusu yatakların oluşum koşullarının, tipik karasal evaporit yatakların gelişmesine yol açan etmenlerden farklı olduğunu göstermektedir [45]. Çok yaygın bir kalsiyum borat olan kolemanit, Kırka dışındaki tüm borat bölgelerinde egemen mineraldir. Buna karşın Türkiye borat yataklarının ayrıntılı mineralojisi önemli derecede farklılıklar gösterir [46].

Bütün yataklarda boratların, kalsiyum karbonat tortulların çökmesini izlediğine göre ve borat geliştirecek olan çözeltilerin bileşiminde Ca zenginliğinden dolayı ilk çökelen boratlar Ca boratlardır. Çökelimin ilerlemesi ve buharlaşmanın hızlı devamı ile Na-Ca boratlar çökelmeye başlar. Ortamın uygun olduğu bazı yataklarda çözeltiler Na-Ca borat alanından, Na borat alanına, diğer yataklarda ise tersine dönerek tekrar Ca borat çökelişi verirler. Buna göre, Türkiye’deki yatakların büyük bir kısmı eksik bir çökeliş, buna karşın, Kırka yatağı tam bir borat mineralleri dizilişi çökelişini gösterir.

Batı Anadolu borat yataklarının çökelimi göz önüne alınarak genel olarak yataklar aşağıda belirtildiği gibi kabaca, sınıflandırılabilir:

- i. Ca boratları yatakları (Emet, Bigadiç, Kestelek, Sultançayırı).
- ii. Na borat yatağı (Kırka)

Genel olarak, borat mineralleri kalsit, dolomit, jips, sölestin, realgar, orpiment ve kükürt ile birlikte bulunmaktadır. Türkiye'deki yataklarda borat mineralleri, kimyasal bileşimlerine ve birbirleriyle olan mineralojik ilişkilerine göre:

- i. Kalsiyum boratlar,
- ii. Sodyum – kalsiyum boratlar,
- iii. Sodyum boratlar,
- iv. Magnezyum – kalsiyum boratlar,
- v. Magnezyum boratlar,
- vi. Stronsiyum boratlar,
- vii. Silisyum – kalsiyum boratlar,
- viii. Kompleks boratlar, şeklinde sekiz gruba bölünebilirler.

Çizelge 4.1' de ticari öneme sahip bor mineralleri tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.1. Ticari öneme sahip bor mineralleri [54]

Mineral/bileşik adı	Kimyasal formül	B ₂ O ₃ içeriği, %
Mineraller		
Tinkal	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10 H ₂ O	36.5
Tinkalkonit	Na ₂ B ₄ O ₇ · 5 H ₂ O	48.8
Kernit	Na ₂ B ₄ O ₇ · 4 H ₂ O	51.0
Kolemanit	Ca ₄ B ₆ O ₁₁ · 5 H ₂ O	50.8
Üleksit	NaCaB ₅ O ₉ · 8 H ₂ O	43.0
Probertit	NaCaB ₅ O ₉ · 5 H ₂ O	49.6
Bileşikler		
Boraks dekahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ · 10 H ₂ O	36.5
Boraks pentahidrat	Na ₂ B ₄ O ₇ · 5 H ₂ O	48.8
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	69.12
Borik Asit	H ₃ BO ₃	56.4
Sodyum Perborat tetrahidrat	NaBO ₃ · 4H ₂ O	23.45
Sodyum Perborat monohidrat	NaBO ₃ · H ₂ O	34.88
Bor Oksit	B ₂ O ₃	100.00

4.1.1. Kalsiyum boratlar

İnyoit (2CaO, 3B₂O₃, 13H₂O)

İnyoit yersel olarak, Kırka ve Bigadiç yataklarındaki ocaklardan bazılarında gözlenmektedir. Söz konusu mineral, bireysel tabuler kristaller ve kristal yığılımları olarak, renksizden beyaza kadar değişen tonlarda bulunmaktadır. Kristallerin az bir kısmı 2,5 cm veya daha büyüktür. Ancak, büyük bir bölümü mikroskobik boyutlarda olup, diyajeneze bağlı olarak değişimler gösterir [45, 46, 55].

Meyerhofferit (2CaO, 3B₂O₃, 7H₂O)

Meyerhofferit, 8 cm. çapında olabilen, küçük gri mavimsi nodüller olarak, kolemanit, inyoit ve bazen de uleksit ile birlikte bulunmaktadır. Kenar kısımlarda, killeri birlikte gelişen bir merkezden yayılan iri kristallerin nodüllerin merkezindeki oyuklar, ince iğne şeklinde ışınal kristaller kapsamakta olup söz konusu kristallerde meyerhofferittir [45, 46, 55].

Kolemanit ($Ca_2B_6OO_{11}.5H_2O$)

Kimyasal bileşimi $Ca_2B_6OO_{11}.5H_2O$ olan kolemanit monoklinal sistemde kristalleşir. Sertliği 4–4.5, özgül ağırlığı 2.42 'dir. Bor içeriği %15.7, B_2O_3 içeriği %50.8'dir. Başka bor minerallerinin egemen olduğu yataklarda olduğu kadar, kolemanit yataklarında da killer içinde ve cevher boşluklarında iri, parlak ve saydam kristal kümeleri şeklinde bulunur. Tıkız yumrular şeklinde cevher oluşturduğunda, yumrular, çekirdekten dışa doğru yayılan ışınal kristallerden oluşabilir veya düzensiz mineral kümeleri şeklinde görülebilir. Suda çok yavaş, fakat sıcak HCl içinde oldukça hızlı çözülür, soğuyan çözeltide bor, borik asit (H_3BO_3) olarak ayrılır. Kolemanit ısıtıldığında suyunu kaybederek toz şekline dönüşür [45, 46, 55].



Resim 4.2. Kolemanit mineralinin görünümü [48]

Terçit ($4CaO.5B_2O_3.2OH_2O$)

Terçit, Bigadiç yataklarında sadece bir mevkide bulunmaktadır. (Mixner, 1952). Beyaz olup çok ince lifler ihtiva etmekte, ipek gibi parlamakta ve uleksit gibi görünmektedir, Bazen toprak yapısı göstermekte ve bulunuşunun ender olması nedeniyle diğer borat mineralleri arasında tektir [45, 46, 55].

Pandermit ($4CaO.5B_2O_3.7H_2O$)

Pandermit Sultançayırı ve Bigadiç yataklarında gözlenmektedir. Bulunduğu yerin ismi verilmiştir; daha sonra Oregon, ABD’den elde edilen presitin tanımlanmasıyla pandermitin özdeşi olduğu kabul edilmiştir. Pandermitin presit ile özdeşliği kimyasal ve optikal araştırmalarla saptanmıştır. Pandermit, jips ve kil düzeylerinin altında nodüller ve bir ton ağırlığına kadar ulaşan kütleler halinde bulunmaktadır. Beyaz renkte ve yekpare olarak görülmektedir, bazen de kireçtaşına benzemektedir [45, 46, 55].



Resim 4.3. Pandermit mineralinin görünümü [48]

4.1.2. Sodyum – kalsiyum boratlar

Üleksit ($NaCaB_5O_9.8H_2O$)

Kimyasal bileşimi $NaCaB_5O_9.8H_2O$ olan uleksit monoklinal sistemde kristalleşir. Sertliği 1, özgül ağırlığı 1.65’tir. Bor içeriği %13.8, B_2O_3 içeriği %42.9’dur. Tek ve büyük kristaller şeklinde bulunmaz. Daha çok ipek gibi ince kılcal iğnecik kümelerinden oluşmuş beyaz yumrular şeklinde bulunur. Bu görünümünden dolayı pamuk yumağı veya pamuk gülü olarak adlandırılır [45, 55].



Resim 4.4. Üleksit mineralinin görünümü [48]

Probertit ($Na_2O.2CaO.5B_2O_3.10H_2O$)

Probertit, kirli beyaz ve kirli açık sarımsı renklerde olup, ışınsal veya lifimsi şekilli kristaller şeklinde gözlenir. Kristal boyutları 5mm ile 5cm arasında değişir ve genellikle ışınsal bir yapı sunarlar. Çoğunlukla kristal araları kille doldurulmuştur. Probertit, Kestelek yatağında üleksiti ornatmış ikincil mineral olarak gözlenir ve üleksit, kolemanit ve hidroborasit ile birlikte bulunur [45, 55].

4.1.3. Sodyum boratlar

Boraks ($Na_2B_4O_7.10H_2O$)

Kimyasal bileşimi $Na_2B_4O_7.10H_2O$ olan boraks monoklinal sistemde kristalleşir. Sertliği 2-2.5 arasında değişir. Özgül ağırlığı 1.7' dir. Bor içeriği %11.3, B_2O_3 içeriği %36.5'tir. özbiçimli tek kristaller veya kristal kümeleri şeklinde çamur içinde bulunabilir fakat yüksek tenörlü tıkHz cevher kütlelerinde, özgün kristal yüzeylerini görme olasılığı çok azdır. Boraks taze kırılmış yüzeylerde saydamdır. Fakat kısa zamanda 5 molekül suyunu kaybederek çok ince taneli, beyaz görünümlü tinkalkonite dönüşür. Suda kolaylıkla çözülür ve çözünürlüğü çözeltinin sıcaklığının artmasıyla artar [45, 55].



Resim 4.5. Boraks mineralinin görünümü [47]

Tinkalkonit ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)

Kimyasal bileşimi $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ olan tinkalkonit rombohedral sistemde kristalleşir. Sertliği 3 kesinlikle ölçülmez. Özgül ağırlığı 1.88'dir. Bor içeriği %14.8, B_2O_3 içeriği %47.8'dir. Tozlu tebeşir beyazı görünümündedir. Öz biçimli kristalleri bulunmaz. Kurak çöl ikliminin egemen olduğu bölgelerde, alkali su birikintilerinin kuruma yüzeylerinde bulunan bir mineraldir. Boraksın suyunu kaybetmesi veya kernitin su almasıyla oluşur [45, 55].

Kernit ($Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$)

Kimyasal bileşimi $Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$ olan kernit monoklinal sistemde kristalleşir. Sertliği 3 arasında değişir. Özgül ağırlığı 1.95'dir. Bor içeriği %15.8, B_2O_3 içeriği %50.9'dur. Özbiçimli tek kristaller California'nın Kramer yataklarında gözlenmiştir. Kolay kırılan ve ince kılcal iğneciklere ayrılan saydam bir mineraldir. Soğuk suda yavaş da olsa çözülür [45, 55].



Resim 4.6. Kernit mineralinin görünümü [48]

4.1.4. Magnezyum – kalsiyum boratlar

Hidroborasit ($CaO.MgO.3B_2O_3.6H_2O$)

Hidroborasit büyük yatakların hepsinde bulunmakta ve farklı düzeylerdeki kil tabakalarında yersel olarak gözlenmektedir. Söz konusu mineral, içlerinde, 0,5–5 cm boyundaki, bir merkezden yayılan iğne şeklindeki kristallerin rasgele yönelmiş kümeler oluşturmaktadır. Hidroborasitin bir merkezden yayılan iğne şeklindeki kristalleri birbirini keserler ve bunların grupları konik bir görünümde [45, 55].

İnderborit ($CaO.MgO.3B_2O_3.11H_2O$)

İnderborit çok nadir ve Kırka yataklarıyla sınırlı olarak bulunmaktadır. Söz konusu mineral, üleksit ve özellikle kurnakovit ile yatağın içinde birlikte büyümüş olarak bulunmaktadır [45, 55]. İnderborit uzunluğu birkaç cm ye ulaşabilen kalın prizmatik kristaller şeklinde gözlenmektedir. İnderborit kristalleri, genellikle, beyaz, yarı saydam olup yarılar yüzeylerinde camsı ya da incimsi bir parlaklık göstermektedir. Renksiz ve saydam kristalleri de bulunmaktadır [45, 55].

4.1.5. Magnezyum boratlar

İnderit ($2MgO.3B_2O_3.5H_2O$)

İnderit, genellikle kil ve kurnakovit kristalleriyle bir arada bulunan radyal ve küresel agregatlar halinde ya da ince çubuklar ve iğneler şeklinde gözlenmektedir. İnderit kristalleri 1-2cm uzunluğunda ve 1-2mm enindedir. Kristaller renksiz ve saydam olup yarıлма düzlemlerinde camsı, muntazam olmayan yüzeylerinde de donuk ve yağlı gibi bir parlaklığa sahiptir. Bazen, inderit az miktarda kil ihtiva etmesi nedeniyle, gri renkte görülmektedir [45, 55].

Kurnakovit ($2MgO.3B_2O_3.15H_2O$)

Kurnakovit Kırka yatağının üst kısmında bulunmaktadır ve ana borat gövdesinin tam üstündeki kilde süreksiz bir düzey oluşturmaktadır. Kurnakovit düzeyi genellikle 1-20cm uzunluğunda, renksiz, gri veya pembe, uzunlamasına, öz biçimli bireysel kristallerden veya kristal agregatlarından oluşmaktadır [45, 55].

4.1.6. Stronsiyum boratlar

Tunellit ($SrO.3B_2O_3.4H_2O$)

Tunellit, Emet yataklarında genellikle 1-5cm uzunluğunda, tek tek yassılaşımış kristaller ya da üleksit üzerinde çekirdekleşmiş tablamsı kristaller halinde gözlenmektedir. Saf, yassılaşımış tunellit, kristalleri renksiz ve saydam olup muskovit pullarına benzeyen ve yassılaşımış yüzeylerine paralel olan, mükemmel şekilde gelişmiş dilinimlere sahiptir [45, 46, 55].

Viçit-A ($4SrO.11B_2O_3.7H_2O$)

Söz konusu mineral, küçük (çapı 2cm'ye kadar) ve büyük (çapı 6cm'ye kadar) nodüllü, genellikle kil kapsamlı çok saf beyaz bir mineral olarak görünmektedir. Bazen çok küçük nodüller bir araya birleşmekte ve agrega benzeri bir görünüm göstermektedirler [45, 46].

4.1.7. Silisyum – kalsiyum boratlar

Havlit ($4CaO.5B_2O_3.2SO_2.5H_2O$)

Havlit kompakt nodüller kütleler halinde, iç kısmı yoğun ve yapısal olmayan ve parlatılmamış porseleni hatırlatan; bazen tebeşir gibi topraksı pul pul, düzlem yapılı şekillerde gözlenmektedir. Söz konusu mineral ince küçük parçalar halinde beyaz veya yarı saydam olup genellikle kolemanit ile birlikte bulunmaktadır [45, 55].

4.1.8. Kompleks boratlar

Terugit ($4CaO.MgO.6B_2O_3.As_2O_5.2OH_2O$)

Terugit nodüllerinin çapları 2–10 cm değişen boyutlardadır. Söz konusu mineral patates şeklindeki terugit nodülleri, yersel olarak çok küçük kahnit kürecikleri ihtiva etmektedir. İnce kesitlerde terugit kristalleri renksiz, prizmatik şekilli ve c eksenini boyunca oldukça uzundur. Söz konusu kristaller, genellikle, çok küçük ve iğne şeklinde görülmektedirler [45, 55].

4.2. Bor Minerallerinin Kullanım Alanları

Türkiye, günümüzde dünyanın en büyük bor mineralleri rezervlerine sahip ülkesi ve ikinci büyük üreticisidir. Türkiye' nin bor mineralleri üretimi hızla ABD' ye

yaklaşmakta ve dünya tüketicilerinin artan taleplerini karşılamak üzere sürekli olarak artmaktadır. Büyük bir kısmı Emet vadisinden elde edilen kolemanit ile birlikte özellikle Kırka' dan çıkarılan boraks üretiminde ilk sırayı alan Türkiye'nin dünya piyasasına egemen olması beklenmektedir [49]. Kesin ve muhtemel bütün bor minerallerinin rezervleri, üretimle orantılı olarak, çok geniştir ve en ılımlı tahminlere göre bile rezervlerden yüzlerce yıl yararlanılabileceği hesaplanmaktadır.

Bor ve bileşiklerinin sanayide çok çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Türkiye'nin büyük ölçüde ham veya yarı işlenmiş olarak ihraç ettiği, ülke içinde sabun, deterjan ve cam sanayilerinde kullandığı bor, ABD' nde uzay mekiklerinden, savaş uçaklarına ileri teknoloji isteyen pek çok alanda kullanılmaktadır. Bor ve bileşikleri cam, porselen ve seramik eşya sanayiinde, yanmaz eşya yapımında (itfaiye giysileri, elektrik kabloları, fren balataları, atom reaktörleri, vb. sistemlerde soğutucu veya ısınmayı geciktirici, yüksek enerjili yağ), cam yünü, tekstil kimyasalları, deri giysileri, fotoğraf kimyasalları, mobilya ve benzeri ahşap eşyayı koruyan sıvılar, yapay gübre katkı maddesi, kağıt sanayii ürünleri, yapıştırıcılar, böcek öldürücüler, krem, pudra ve deodorant gibi kozmetikler, diş macunu, merhem, deri ve göz hastalıkları antiseptikleri gibi ilaçların üretiminde kullanılmaktadır [49].

Yaygın kullanım alanı olduğu için, borik asit ve boraks tuzları gibi, ham ve mamul edilmiş boratlar için talep hızla artmaktadır. Türkiye'deki işlenmemiş boratların üretimi, dünyadaki arz ve talep ilişkisini nispeten etkileyecektir. İşlenmemiş ve rafine edilmiş bor ürünlerinin üretimi son yıllarda etkin bir şekilde artmaktadır ve hatta bor minerallerinin çeşitli yararları nedeniyle, ilerleyen yıllarda üretimin daha çok artacağı beklenmektedir [55]. Evlerde ve endüstride kullanılan temizleyiciler ile cam ve seramik yapımında en geniş biçimde kullanılan borların tüketimi nüfusun artması ve dayanıklı malların kullanımı ile yakından ilgilidir ve bu tüketim sürekli değişebilir.

Boraks ve borik asit en çok bilinenleri olmak üzere, birçok bileşik formlarında kullanılabilen bor, çok yönlü ve yararlı bir elementtir. Bor bileşikleri, düşük erime noktası ve mükemmel ergime özelliklerinden yararlanıldığı cam ve seramik

endüstrisinde, geniş ölçüde kullanılmaktadır. Söz konusu bileşiklerin özellikleri lehimlemede, kaynak işlerinde, kuvvetli lehimlemede ve arıtma işleminde de avantajlar sağlamaktadır [55].

Boraks ve borik asit, bakterileri öldürücü niteliği, su içinde kolay erirliği ve mükemmel su yumuşatıcı özelliği nedeniyle sabunlarda, temizleyicilerde ve deterjanlarda kullanılmaktadır. Sudaki yumuşak alkalite ve mikrop öldürücü özellikleri boraks ve borik asidi, diş macunu, gargara ve göz yıkama maddeleri hazırlamada yararlı kılmaktadır. Boraksların sulu eriyikleri tekstil boyamalarında, post ve derilerin temizlenmesinde, sıva ve boyalarda, nişastanın küflenmesini önlemek ve parlaklık vermek ve deri, tekstil ve turuncgiller üzerinde küflenmeyi önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Ziraatta borun temel bitki besleyicisi olarak temin edilmesi için gübrelere boraks ilave edilmektedir. Bor bileşikleri yabancı otları kontrol etmek amacıyla da kullanılmaktadır.

Mükemmel ergime maddeleri olmaları nedeniyle, bor bileşikleri özellikle metallerin kaynak işinde, sertliği arttırmak amacıyla çelik alaşımına ilave edilmektedir. Bazı elementer borlar, demir metalürji reaksiyonlarda bir oksijen giderici olarak alüminyum rafine işleminde tane arıtıcı olarak, atomik reaktörlerde, geç ateşlemeli sigortalar içinde, termal nötron emici olarak, radyo lambalarında ateşleyici olarak ve güneş bataryalarında örtücü bir materyal olarak kullanılmaktadır.

4.3. Bor Yataklarının Dünyadaki Dağılımı

Borat mineralleri, ekonomik değerde olmamakla birlikte dünyanın birçok yerinde gözlenmiştir. Ekonomik bor yataklarına Türkiye (Batı Anadolu), ABD (Kaliforniya), Rusya, Kanada, Arjantin, Şili, Bolivya, Peru, Tibet, Çin, Hindistan, İran, Suriye, Yeni Zelanda, Yeni Gine, İtalya, Japonya, Almanya ve Britanya adalarında rastlanılmıştır [52].

Borun yer kabuğundaki dağılımı çok az olmasına karşın, belli alanlardaki bor konsantrasyonunun çok fazla olması ve artışı ekonomik bor yataklarının oluşumuna

neden olur. ABD, Güney Amerika, Türkiye ve diğer ekonomik anlamdaki bor yatakları, volkanik aktivitelerin etkin olduğu acı ve tatlı su koşullarında oluşmuşlardır [52]. Deniz suyunda bağıl olarak yüksek oranda gözlenen bor elementi, denizel evaporitlerde yersel olarak bor minerallerini oluşturmuşlardır. Bu tür oluşuma örnek olarak, Permien yaşlı Stassfurt ve ekonomik olmayan Yorkshire yatakları gösterilebilir [55].

Güney Amerika ve Japonya'daki termal suları ile Tuscany' deki (İtalya) volkanik bölgelerin yoğun volkanik gazları önemli miktarda bor içerirler. Bor yatakları çeşitli ortamlarda ve koşullarda oluşmasına karşın, ekonomik bakımdan en önemli yataklar, Tersiyer'de gelişen karasal evaporit ortamlar ile kurak veya yarı kurak iklim koşullarında ve orojenik koşullar boyunca gelişen, andezitik-riyolitik magma ile temsil edilen geniş yayımlı genç volkanitler ile yakından ilişkilidir [52].

4.4. Türkiye Borat Yataklarının Dağılımı Ve Jeolojik Konumu

Türkiye'de ilk bor yatağının bulunması biraz rastlantısal olmuştur. Fransız mühendis Desmazures, kendisine hediye olarak verilen ve jips içinden çıkan değişik bir malzemeden yapılan küçük heykelciğin kimyasal analizi sonucu yüksek oranda boroksit içerdiğini görmüştür [53]. Türkiye'nin dünyada gerek sahip olduğu rezerv açısından, gerekse pazardaki payı açısından dünya pazarlarında söz sahibi olduğu tek maden bor mineralidir. Bu nedenle, bor madenleri Türkiye'nin petrolü olarak nitelendirilmektedir [53].

Türkiye'nin bilinen borat yatakları, doğudan batıya yaklaşık 300 km lik, kuzeyden güneye de yaklaşık 150 km lik bir alan içinde, Marmara Denizi'nin güney'inde, Batı Anadolu'da yer almaktadır [56]. Bu yataklar başlıca, aşağıda belirtilen yörelerde bulunmaktadır: Mustafa Kemal Paşa (Bursa); Susurluk ve Bigadiç (Balıkesir); Emet (Kütahya); ve Kırka (Eskişehir). Bununla beraber, bugün Türkiye'de borat işletmeciliği Emet, Kırka ve Bigadiç yörelerinde yapılmaktadır [50].

Türkiye'nin bilinen borat yatakları, Tersiyer' de başlayan ve azından Kuvaterner başlangıcına kadar devam eden volkanik aktivitelerin yer aldığı dönemlerde, Tersiyerin gölsel sedimanlarında oluşmuştur. Borat yataklarının litolojisi birbirlerinden biraz farklılıklar göstermelerine rağmen genellikle çakıltası, kumtaşı, tuf, kil, marn ve kireçtaşı ile ara katmanlıdır. Borat mineralleri, kurak veya yarı kurak iklim koşullarında, ayrı ya da birbirleriyle bağlantılı göl havzalarında depolanmışlardır.

Riyolitik, dasidik, trakitik, andezitik ve bazaltik bileşimlere sahip piroklastik ve volkanik kayalar, söz konusu gölsel tortullarla ara katmanlaşmışlardır. Tüm borat bölgelerinde volkanik kayaların bulunması borat oluşumu için volkanik aktivitenin gerekli olduğu fikrini vermektedir. Borat havzalarındaki tortulların büyük bir bölümü volkanik gereçten türemiştir [56].

Genel olarak boratlarla ara katmanlaşmış Tersiyer tortulların eğimi, hemen hemen yataydan 30° nin biraz üstünde olmak üzere değişiklikler göstermektedir, ancak söz konusu eğimler KD-GB ve KB-GD yönünde uzanan gravite fayları tarafından etkilenmişlerdir. Bu yapı, topografyada oluşturduğu basamaklarla belirlenmektedir. Egemen olan fay tipi, eğimleri 30° 'den düşeye kadar değişen normal faylardır. Halen traverten ve kükürt çökelten termal kaynaklar, yatakların bir kısmında yaygındır. Olasılıkla birbirine zincirleme bağlı göllerdeki çökeltme nedeniyle toplam Tersiyer tortul kalınlığı bir yataktan diğerine değişmektedir ve Emet yataklarında tortullar en çok 750 m ye ulaşır. Emet ve Kırka 'daki borat düzeylerinin aşırı kalın olması, söz konusu yatakların oluşumu sırasında, buralarda farklı koşulların mevcut olduğunu yansıtmaktadır. Edinilen bilgilere göre, borat yataklarının çökeldiği havzaların uzun eksenleri genellikle kuzey-güney doğrultusunda uzanmaktadır [56].

Borat yatakları ayrıntılarda birbirlerinden farklı olmalarına karşın genel olarak aşağıda belirtilen özellikleri göstermektedirler:

- i. Borat yatakları, kurak veya yarı kurak koşullar altında, denizel olmayan bir ortamda depolanmış olan Tersiyer gölsel tortullara bağlıdır.

- ii. Borat yatakları, görünüşte, borat formasyonundan önce ve sonra tatlı su kireçtaşı çökelmesinin yaygın olduğu bölgelerde sınırlı bir alana sahip olan iç havzalarda depolanmışlardır.
- iii. Belirtilen yataklar, boratın yanı sıra, çoğu volkanik kökenli olan çakıltası, kumtaşı, kil, marn ve tuf gibi kırıntılı tortul ara katkılar içerir.
- iv. Türkiye borat yataklarının tümü volkanik aktivite ile birlikte bulunur. Bunlar Aristarain ve Hurlbut tarafından volkanik aktivite ile ilgili yataklar olarak sınıflandırılmışlardır.
- v. Borat yatakları yüzeyleşmemiş (Intrüsif) ve yüzeyleşmiş (ekstrüsif) ve volkanik kayalarla birlikte bulunmaktadır; borat havzalarının çevresinde volkanik kayalar yaygındır.
- vi. Halit ve trona gibi, çok tipik evaporit mineralleri, Türkiye'deki borat yataklarında bulunmaktadır.
- vii. Pleocoğrafik görünümlü çevredeki volkanik, kireçtaşı ve temel kayalarından tortullar taşıyan, kısmen akarsular ve kısmen de termal kaynaklar tarafından beslenen sığ göllerden oluşmuş gibidir. Yöredeki yüzlek verebilen temel kayaları sınırlı yayımlı olup kapalı havzaları çevrelemektedir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada aşınmaya maruz kalan makine elemanlarında ve sürtünme sonucu aşınan parçalardaki malzeme kaybını karşılamak için yapılan sert dolgu kaynağına, değişik oranlarda ilave bor tozları ve bor bileşikleri kullanılarak, bu ilave bileşim tozların kaynaklı bölgedeki aşınmaya etkisi araştırılmıştır.

5.1. Deneyde Kullanılan Materyaller

5.1.1. Ana malzeme

Deneylerde ana malzeme olarak Ankara Organize Sanayi Bölgesinden temin edilen 150x60x10 mm ebatlarında lama malzeme kullanılmıştır. Numunelerin her biri 150 mm uzunluğunda kesilmiştir. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’ de verilmiştir. Bu malzeme, sertlik değeri ve aşınma değerinin düşük olması nedeniyle seçilmiştir.

Çizelge 5.1. Ana malzemenin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
% oran	0,21	0,55	1,60	0,027	0,024	Kalan

5.1.2. Kaynak teli

Deneylerde, SG₂ gazaltı kaynak teli kullanılmıştır. Kullanılan kaynak tellerinin çapı 1,2 mm olup kimyasal bileşimi Çizelge 5.2’ de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan SG₂ kaynak telinin kimyasal bileşimi (ağırlıkça %) [57]

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Fe
% oran	0,07–0,10	0,7–1,0	1,4–1,6	0,025	0,025	0,30	Kalan

5.1.3. Kaynak tozu

Deneyde koruyucu kaynak tozu olarak OP 1250 A sert dolgu tozu kullanılmıştır. OP 1250 A aglomere kaynak tozu, sert dolgu kaynaklarında OE-S1 teli ile birlikte kullanılmaktadır. OP 1250 A, makine dişli parçalarının, rayların, yürüyüş takımlarının destek makaralarının, hareketli makaraların, destek merdanelerinin, lokomotif tekerlerinin sert dolgu kaynaklarında yoğun olarak kullanılır [58].

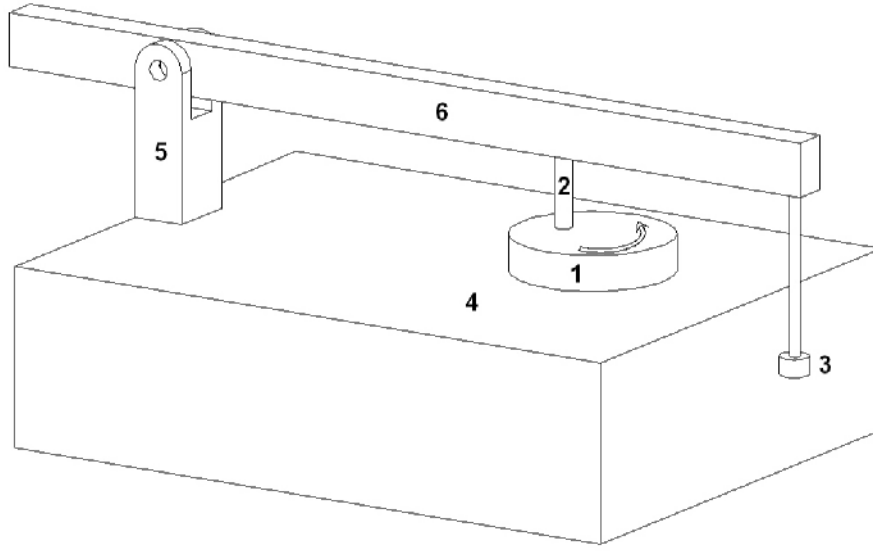
5.2. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

5.2.1. Kaynak makinesi

Deneyde tozaltı ve MİG – MAG kaynağı yapabilen 550 amperlik kaynak makinesi sistemi kullanılmıştır. Kaynak torcunun özel sistemler kullanılarak, üniversal olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Yine torcun uç kısmında kaynak koruyucu tozu deposu çıkışı bulunmaktadır.

5.2.2. Aşınma cihazı

Deneylerde, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi laboratuvarlarına ait pin-on disk tipi aşınma cihazı kullanılmıştır. Aşındırıcı olarak, döner disk üzerine sabitlenen 1200 μm ' luk zımpara kâğıdı kullanılmıştır. Aşınma cihazı şematik olarak Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Pin on Disk tipi aşınma cihazı

1. Aşındırıcı disk, 2. Numune bağlama aparatı, 3. Değiştirilebilir ağırlık,
4. Cihaz tablası, 5. Destek kolu, 6. Köprü

5.3. Metot

Deney numunelerinin yüzeyleri kaynağa uygun olacak şekilde mekanik yöntemlerle (zımpara taşı) temizlenmiştir. Numune yüzeylerinin temizliği, kaynak işlemi esnasında, dışarıdan kalıntı olarak, kaynak metaline karışmak suretiyle, kaynak metalinde istenmeyen kaynak hataları olarak ortaya çıkmasını önlemek ve numunelerin kaynak tablası üzerinde düzgün bir şekilde durmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır.

Kaynaklı dolgu işleminin yapılacağı, otomatik torç tertibatı bulunan, tozaltı kaynak makinesine, numunelerin üzerinde sabit olarak duracağı tabla tertibatı hazırlanmıştır. Torcun tabla üzerinde hareket edeceği ve kaynağın başlayacağı ve son bulacağı noktaları, tabla üzerinde tespit edilmiş olup bu başlangıç ve bitiş noktaları arası çizilerek deney numunelerinin bu çizgiler içinde kalması sağlanmıştır.

5.3.1. Deneylerde kullanılacak tozların hazırlanması

Deneylerde OP 1250 A sert dolgu tozu, bor tozu ve grafit tozu kullanılmıştır. OP 1250 A sert dolgu tozu kullanılmadan önce fırın içersinde 300 °C’ de 2 saat nem giderme işlemine tabi tutulmuştur. İşlem sonrasında toz fırından alınarak soğumaya bırakılmıştır. Toz yeteri kadar soğuduktan sonra hava almayacak şekilde muhafaza edilmiştir.

Bor tozu iri taneli olarak temin edilmiştir. Deneylerde kullanılmadan önce boyut küçültme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için dikey tip bilyeli mekanik alaşımla cihazından yararlanılmıştır. İri boyuttaki bor tozları bu cihaz içersine 100 gr. bilye için 10 gr. bor oranında ilave edilmiştir. Bor tozları cihaz içersinde 300 dev/dk. yaklaşık 25 dk. bekletilerek elde edilmiştir. Cihazın haznesinden çıkan ince taneli toz halindeki bor aralığı yaklaşık 0,5 mm olan elekten geçirilerek bor tozlarının yaklaşık olarak aynı boyutlarda olması sağlanmıştır.

Grafit tozu da bor tozu gibi iri taneden ince taneli kullanılabilir toz haline getirilmiştir. Grafit tozu boyutu, bor tozunun elenmesinde kullanılan yaklaşık 0,5 mm aralıklı elekten geçirilerek, bütün grafit tozlarında tozlarının da yaklaşık olarak aynı boyutlarda olması sağlanmıştır.

Kaynak için kullanılacak tozların karışım farklı oranlarda olup, oranları kollu terazi ile ayarlanmıştır. Tozların karışım oranları ve kaynak dikişi çekilirken ortamın durumu ile ilgili veriler Çizelge 5.3’ de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Toz karışım oranları ve kaynak ortamları

No	Toz Karışım Oranları	Kullanılan Tel	Kaynak Ortamı
1.	% 100 OP 1250 A	SG ₂	Normal ortam
2.	% 75 OP 1250 A + % 25 Bor Tozu	SG ₂	Normal ortam
3.	% 100 OP 1250 A	SG ₂	Azot gazı ilaveli
4.	% 75 OP 1250 A + % 25 Bor Tozu	SG ₂	Azot gazı ilaveli
5.	% 50 Bor Tozu + % 50 OP 1250 A	SG ₂	Normal ortam
6.	% 40 Bor + % 10 Grafit + % 50 OP 1250 A	SG ₂	Normal ortam
7.	% 50 Bor Tozu + % 50 OP 1250 A	SG ₂	Azot gazı ilaveli
8.	% 40 Bor + % 10 Grafit + % 50 OP 1250 A	SG ₂	Azot gazı ilaveli

Bor tozu ve bor, grafit tozu karışımı kullanılan deneylerde bu tozlar numune yüzeyine önceden serilmiştir. Tozlar kaynak dikişi çekilecek numuneyi 3cm kapatarak kaynak dikişi çekilmiştir. Kaynak arkının tamamen tozların altında oluşması sağlanmıştır.

Ortama dışarıdan ilave edilen azot gazı ise kaynak makinesinin torcu ile ortama ilave edilmiştir. Gazın debisi numune yüzeyindeki tozları dağıtmayacak şekilde ayarlanmış olup, tozların arasındaki boşluklardan ortama geçmesi sağlanmıştır. Böylece kaynak ortamına azot gazı ilavesi gerçekleştirilmiştir. Dışarıdan hiçbir gazın ilave edilmediği ortam çizelgedeki gibi normal ortam olarak adlandırılmıştır.

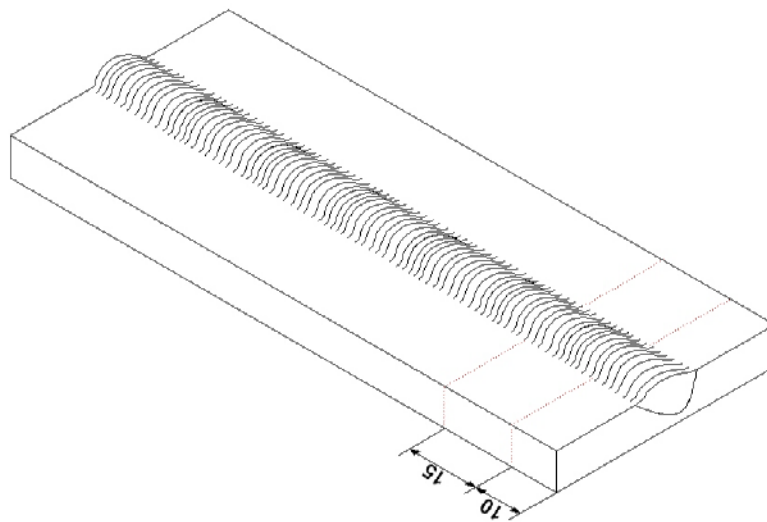
Çizelgedeki toz karışım ve ortamları sıralaması aynı zamanda, kaynaklı işlem sonrası numunelerin yüzeyine vurulan numaralarla aynı numaralardır. Numunelerin ayrımı ve inceleme kolaylığı bu numaralar yardımıyla sağlanmıştır.

sona çekilmiştir. Kaynak dikişinin, kaynak bitiminden sonra, yavaş soğumasını sağlamak amacıyla bütün deney numuneleri koruyucu toz karışımı altında 5 dakika bekletilmiştir. 5 dakika sonunda üzerindeki toz ve cürufufluk kısmı temizlenmiştir.

5.3.3. Metalografik deneyler için numune hazırlama ve metalografik inceleme

Metalografik deneyler için numune hazırlama

Numunenin bitiş noktasından başlangıç noktasına doğru 10 mm lik kısmı kesilerek atıldı. Deneylerde kullanılacak olan numune kısmı, 10 mm lik kısımdan sonra yine başlangıç noktasına doğru ikinci kez kesilen 15 mm lik kısımdan alındı (Şekil 5.3).



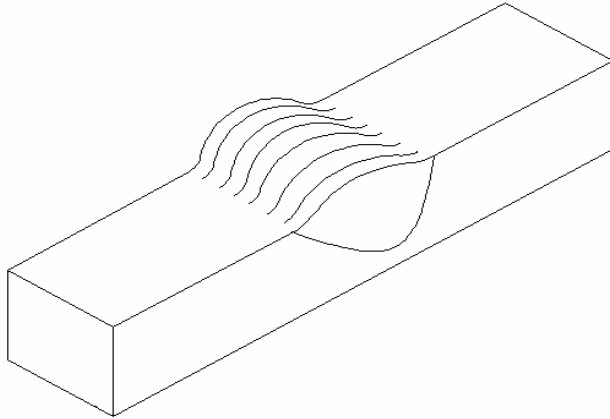
Şekil 5.3. Numune hazırlama kısımları

Numunelerin kesim işlemleri sıvı soğutmalı hidrolik testere ile yapıldı. Kesim sonrası numunelerde oluşan kesim pislikleri ve çapaklı yüzeyler iyice temizlendi. Kesim sırasında testere dişlerinden dolayı oluşan derin kesim izleri metalografik inceleme sırasında zorluk çıkaracağı için bu kısımlar ince dişli eğe ile temizlenerek düzgün bir yüzey elde edildi. Numunelerin biri birleri ile karışmaması için kesilen numunelerin uygun noktalarına numarator yardımıyla numaralar vurulmuştur.

Metalografik inceleme

Metalografik inceleme işlemi uygulanacak olan numuneler Şekil 5.3’ deki ölçülerde kesilip Şekil 5.4’ deki duruma getirildikten sonra, incelenecek olan numune yüzeyine sırasıyla 220 – 1200 μm arası zımpara kağıtları ile zımparalama işlemleri yapıldı. Numune yüzeylerinin geniş olması ve metalografik çalışmalara elverişli olması nedeniyle numunelere bakalite gömme işlemi yapılmadı. Son zımparalama işleminden sonra numune yüzeyleri, keçe üzerine dökülen 1 mikron elmas parlaticı ile parlatıldı.

Önceden hazırlanan % 2’lik Nital dağlayıcı ile numuneler dağlanarak yüzeyler mikroskop altında incelemeye hazır hale getirildi. Numune yüzeylerinde optik mikroskop ve SEM (Scanning Electron Microscope) ile inceleme esnasında gerekli görülen noktalardan görüntüler alındı.



Şekil 5.4. Deney numunesi

5.3.4. EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) analizi ve kimyasal yaş analiz

Metalografik inceleme sonrasında, malzemelerde sertliğin artışına, neden olan elementlerin belirlenmesi amacıyla enerji dağılımlı izölçer (EDS) ve kimyasal yaş analiz deneyleri numuneler uygulanmıştır. EDS analizi, numune yüzeylerinde değişik noktalarda ve mikroskopta görünen yüzeylerin tamamına uygulanmıştır.

Kimyasal yaş analiz, enerji dağılımlı izölçer (EDS) analizlerinden sonra yapılmış olup, kaynak dikişi bölgesinden yaklaşık olarak 1 gr. ağırlığında kaynak dikişi numunesi çıkarılarak uygulanmıştır. Kimyasal yaş analiz deneyleri sadece 1, 4 ve 8 nolu numuneler uygulanmıştır.

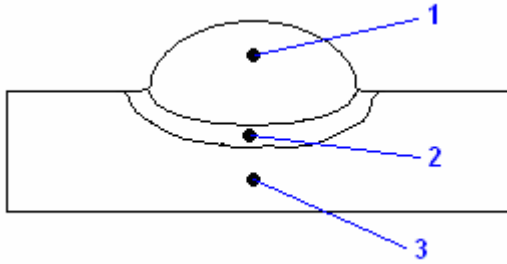
Kimyasal yaş analiz, tahribatlı muayeneler bölümüne girmektedir. Kaynak dikişinden çıkarılan numune, ölçekli cam beher kap içerisinde, hidroklorik asit ve nitrik asit ($HCl + HNO_3$) karışımında çözündürülmüştür. Asit karışımı içerisinde ayrı beher kaplarında çözündürülen numuneler, yaklaşık olarak 100 ml olacak şekilde suyla seyreltilerek kimyasal analiz işlemine geçilmiştir.

Kimyasal yaş analiz deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Bilimleri Mühendisliği Ölçüm Laboratuvarında yaptırılmıştır. Deneylerin yapımı esnasında, Çevre Bilimleri Mühendisliği Ölçüm Laboratuvarında, laboratuvar sorumlusu ile birlikte çalışılıp, ortaya çıkan sonuçlar birlikte incelenmiştir. Sonuçlar ile ilgili deneysel analiz raporları hazırlanmıştır.

5.3.5. Numune sertlik ölçümleri

Numunelerin metalografik inceleme yapılan yüzeyleri aynı zamanda sertlik ölçümleri için kullanıldı. Bu yüzeyde sertlik ölçümü yapmadan önce, yüzey keçe ile parlatılarak yüzeydeki istenmeyen lekeler giderildi. Sertlik ölçümü işlemi uygulanmadan önce numunelerin metalografik incelenme yapılmayan yüzeyleri tornalama makinesi ile düzeltilerek sertlik ölçüm işlemine geçildi.

Numunelerin sertlik ölçümleri SHIMADZU HMV-2 Model mikro sertlik ölçme cihazı ile 100 gr ağırlık kullanılarak Vickers (HV) cinsinden ölçümler yapıldı. Numune yüzeyinde Şekil 5.5' de görülen, kaynak metali, ITAB ve ana metal bölgeleri üzerinde ve bu bölgelerin her birinde üç farklı noktada sertlik ölçümü yapıldı. Sonuçlar ayrıca toplanıp ortalamaları alınarak, ilgili bölgenin sertlik değeri sonucu olarak kabul edildi.



Şekil 5.5. Sertlik ölçüm noktaları

1. Kaynak metali, 2. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB), 3. Ana metal

5.3.6. Aşınma deneyi

Metalografik incelemesi yapılan numunelere son olarak aşınma deneyi uygulandı. Aşınma deneyi Şekil 5.1’ de görülen Pin On Disk tipi aşınma cihazı ile yapıldı. Numuneler sırası ile aşınma cihazına bağlanarak aşınma miktarı verileri alındı. Aşındırıcı disk olarak 1200 numaralı zımpara kâğıdı kullanıldı. Tüm numuneler için yeni bir zımpara kâğıdı kullanıldı.

Aşınma miktarının belirlenmesinde 1/1000 gr’ lık Acculab ALC-210.4 markalı hassas terazi kullanıldı. Numunenin, cihaza bağlanmadan önceki ağırlığı miligram (mg) olarak kaydedildi. Aşınma deney işlemi bittikten sonra aynı numune ağırlığı tekrar ölçüldü ve numunedeki aşınma miktarı ağırlık kaybı olarak belirlendi. Bu işlemler bütün numuneler için ayrı ayrı uygulandı.

Aşınma deneyi 8 numuneye değişik uzunluklarda uygulandı. Bu uzunluklar 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 ve 1200 metre olarak belirlenmiş uzunluklardır. Disk devri 300 dev/dk sabit tutuldu. Ağırlık olarak yaklaşık olarak 10 kg’ lık ağırlık kullanıldı. Aşınma işlemi öncesinde numunelerin diske temas edecekleri yüzeyler düzgün ve aynı ölçülere getirildi. Böylece aşınma diskinin, numunelerde aynı yüzey alanlarına temas etmesi sağlandı.

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

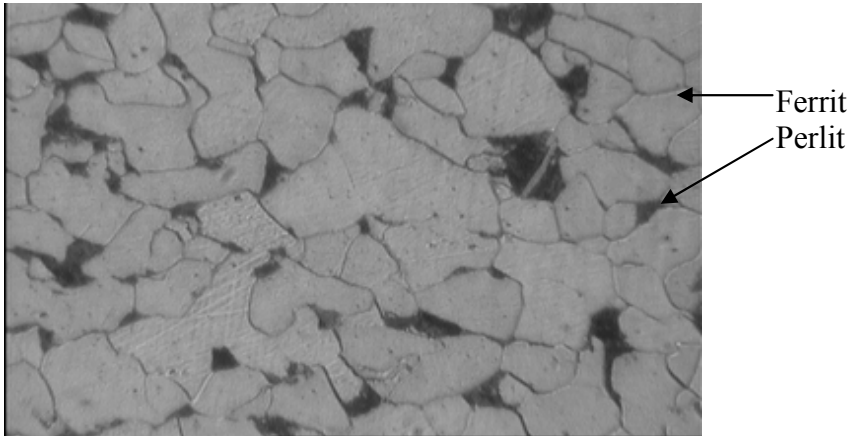
6.1. Metalografik İnceleme Sonuçları

Numunelerin metalografik işlemler için hazırlanan yüzeyi optik mikroskop ve SEM yardımıyla değişik büyütmelerde incelenmiştir. Numunelerde ilk olarak kaynak metali sonra ITAB' ın, ana metalin ve son olarak kaynak metali, ITAB ve ana metalin birleştiği noktalar, ayrı optik büyütme oranlarında görüntülenmiştir. Numune yüzeylerinin görüntülenmesi numune sırasına göre kayıtlara alındı.

6.1.1. Ana metal görüntüleri

Her numunenin ana metal mikroyapı görüntüleri alınmasına rağmen, mikroyapıların birbirleri ile benzer oldukları için tek bir ana metal mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Görüntüler optik mikroskopta 400 büyütme ile çekilmiş mikroyapılardır.

Resim 6.1' de görülen ana metal mikroyapı görüntüsü, ilk ferrit ve perlitli ötektoit altı çeliklerin mikroyapısını taşımaktadır. Ana metal mikro yapısında taneler eşeksenlidir ve yönlenme görülmemektedir. Perlit yapı kısmen ferrit tane sınırlarında oluşmuştur.



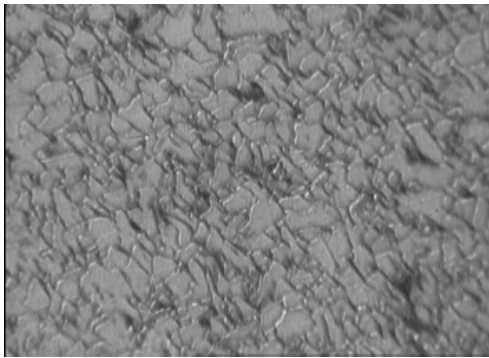
Resim 6.1. Deney numunesi ana metal görünüşü x400

6.1.2. Isı tesiri altındaki bölge (ITAB) görüntüleri

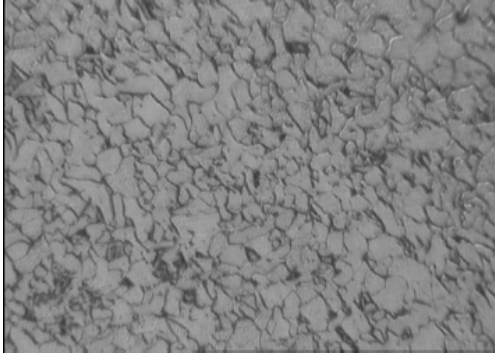
Resim 6.2 – 6.9’ a kadar ısı tesiri altındaki bölge mikroyapıları görülmektedir. 3 ve 8 nolu numunede kaynak geçiş bölgelerinde mikroyapı içersinde cüruf kalıntıları görülmektedir. 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 nolu numunede, ısı akış yönlerine göre, tanelerde belirgin biçimde yönlenme görülmektedir. Ana metal mikroyapısında görülen eş eksenli taneler yerlerini uzun yönlenmiş tanelere bırakmıştır. ITAB üzerinde yüksek ısıya maruz kalan bölgelerde (kaynak metaline en yakın bölge) tane irileşmesi görülmektedir. Bu mikroyapı değerleri, ITAB’ da oluşması beklenen değerler olarak karşımıza çıkmaktadır.

İri taneli bölgeye yakın olan bölgede taneler ince taneli yapılar olarak görülmektedir. Bunun nedeni bu bölgedeki sıcaklık iri taneli bölgeye göre daha düşük sıcaklıkta olmasından dolayı kaynaklanmaktadır. Normal kaynak ITAB’ ı içinde oluşması muhtemel mikroyapı olarak düşünülmektedir.

Ana metale yakın olan bölgede tane yapısı değişmeden kaldığı görülmüştür. Yine bu bölgelerde mikroyapı görünüşü olarak ana metal görünüşüne benzemektedir.

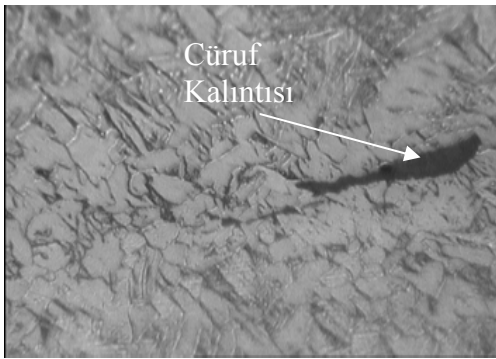


Resim 6.2. 1 Nolu numune ITAB görünüşü x400

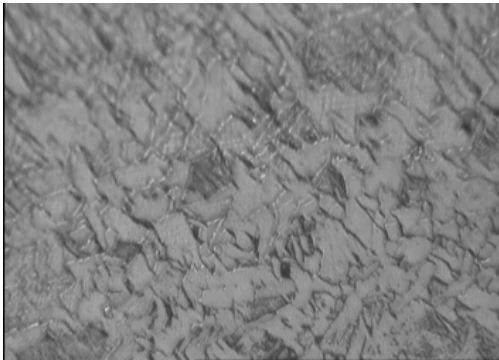


Resim 6.3. 2 Nolu numune ITAB görünüşü x400

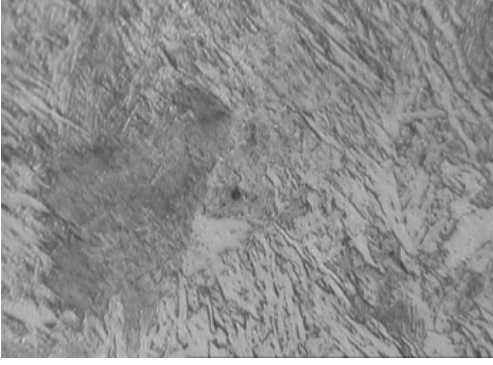
4, 7 ve 8 nolu numunede taneler sivrimsi bir şekilde görülmektedir. 1 ve 2 nolu numunede taneler ve tane sınırları belirgin bir şekilde belli olmaktadır.



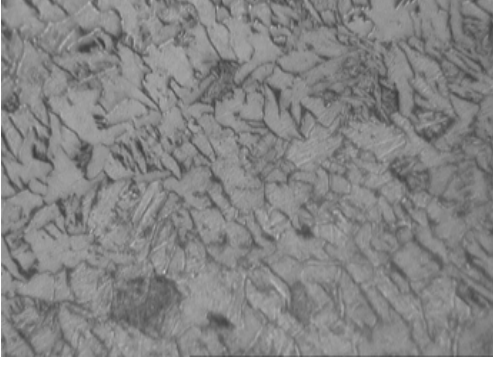
Resim 6.4. 3 Nolu numune ITAB görünüşü x400



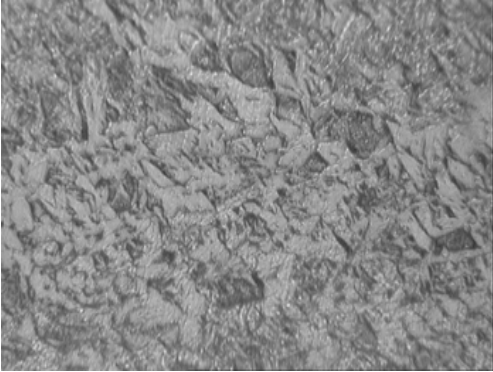
Resim 6.5. 4 Nolu numune ITAB görünüşü x400



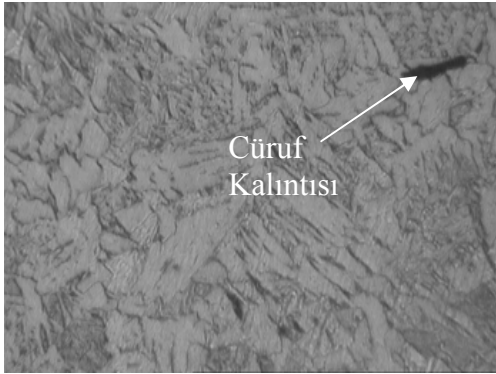
Resim 6.6. 5 Nolu numune ITAB görünüşü x400



Resim 6.7. 6 Nolu numune ITAB görünüşü x400



Resim 6.8. 7 Nolu numune ITAB görünüşü x400



Resim 6.9. 8 Nolu numune ITAB görünüşü x400

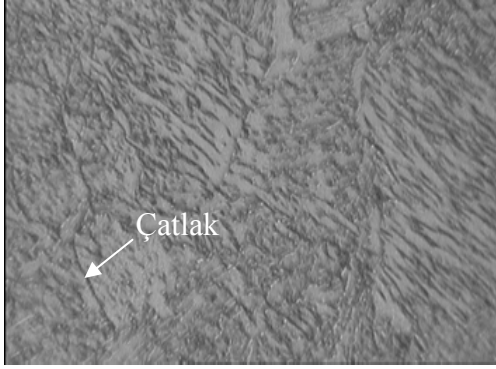
6.1.3. Kaynak metali mikroyapıları

1 nolu numune resminde normal bir kaynak metali mikroyapısı görünmektedir (Resim 6.10). Kaynak metali içersinde dentritik mikroyapılar belirgin şekilde görülmektedir.

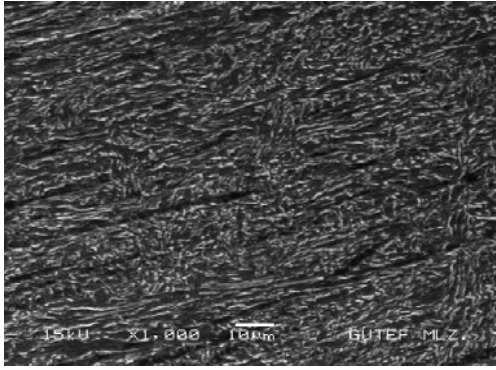
Resim 6.12’ de görülen 2 nolu numunede kaynak metalinde dentritik yapılarla birlikte kaynak metali üzerinde çatlak oluşumu görülmektedir. Benzer mikroyapıya Resim 6.16’ daki 4 nolu numunede rastlanmıştır. Bu numunelerin ortak noktası, her iki numunede % 25 oranında bor tozu kullanılmasıdır. Kaynak metali üzerinde oluşan çatlaklar bu numunede de görülmüştür. Bu numunelerde görülen ikinci bir durum, kaynak metali içersinde bazı noktalarda gözeneklilik bulunmaktadır.

Resim 6.18’ deki 5 nolu ve Resim 6.22’ deki 7 nolu numunede yüzeyde dentritik yapı oluşumu ve çatlaklar göze çarpmaktadır. 7 nolu numune mikroyapı görüntüsünde, iğnemi yapı, mikroyapıya daha hakim olarak görülmektedir.

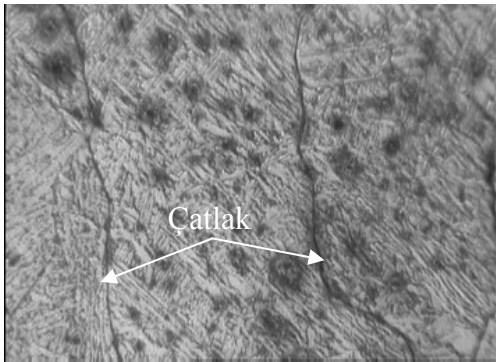
Mikroyapıları görülen numuneler içersinde tane boyutları küçük olan ve tanelerin birbirine yakın halde bulunduğu mikroyapı fotoğrafı 8 nolu numunede (Resim 6.24) görülmektedir. Yine bu numunede, kaynak metalinde gözeneklilik ve çatlak oluşumu gözlenmiştir. Fakat 8 nolu numunede çatlak oluşum miktarı diğer numunelere oranla daha az olduğu görülmektedir. 8 nolu numunenin mikroyapısında martenzit yapıya yakın bir mikroyapı oluştuğu açıkça görülmektedir.



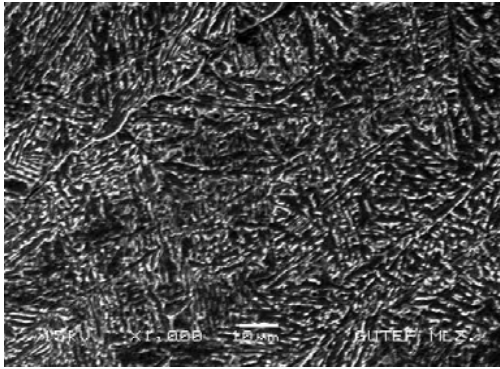
Resim 6.10. 1 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



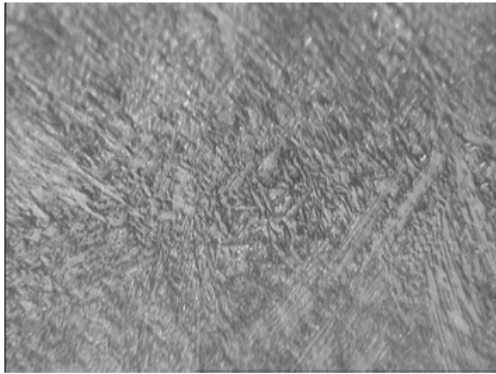
Resim 6.11. 1 Nolu numune SEM görüntüsü x1000



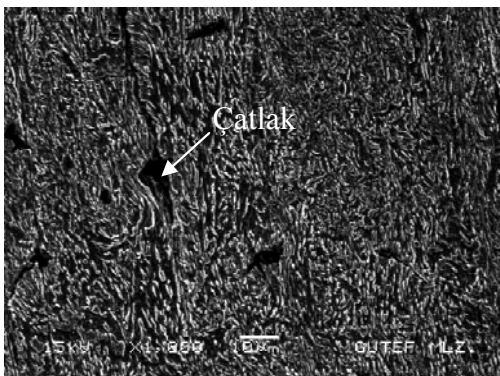
Resim 6.12. 2 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



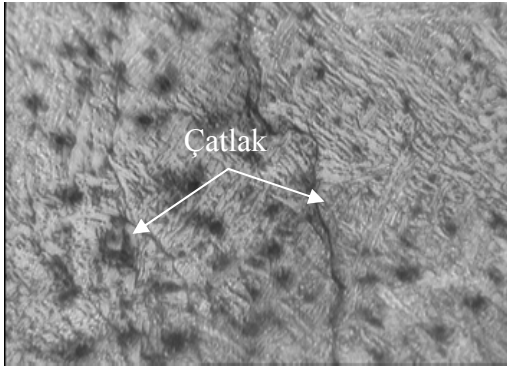
Resim 6.13. 2 Nolu numune SEM görüntüsü x1000



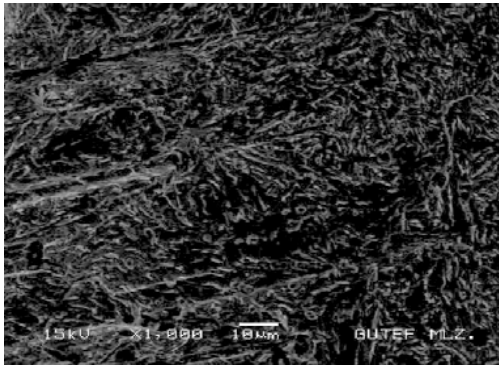
Resim 6.14. 3 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



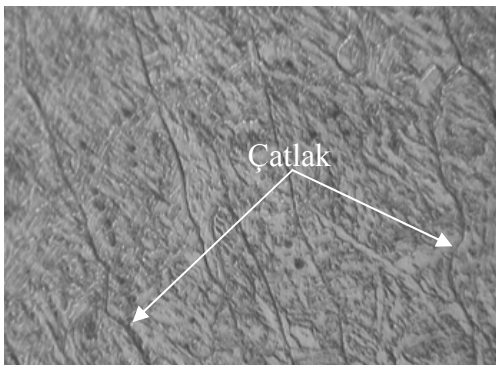
Resim 6.15. 3 Nolu numune SEM görüntüsü x1000



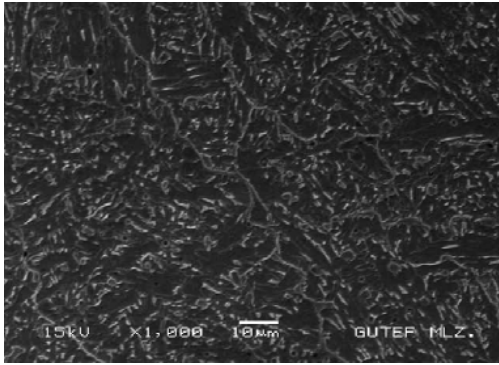
Resim 6.16. 4 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



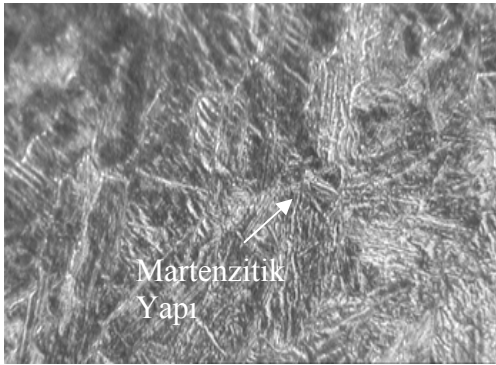
Resim 6.17. 4 Nolu numune SEM görüntüsü x1000



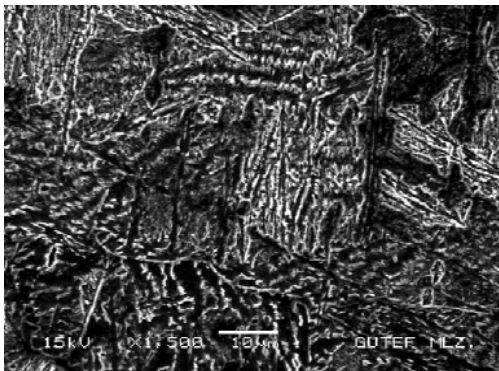
Resim 6.18. 5 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



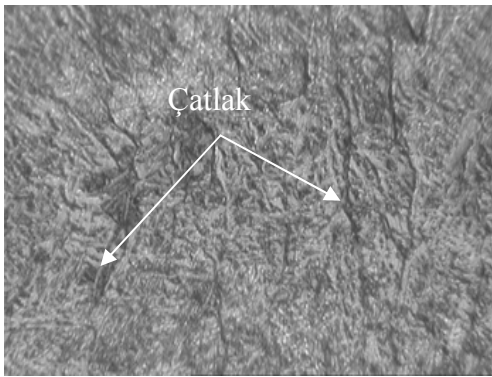
Resim 6.19. 5 Nolu numune SEM görüntüsü x1000



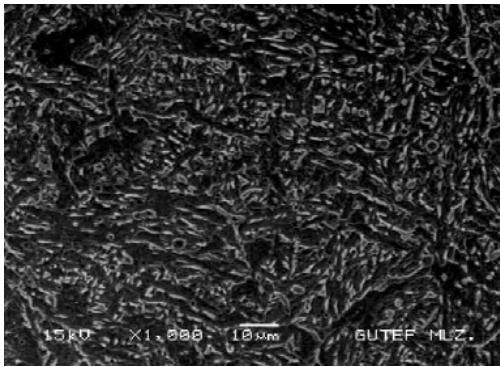
Resim 6.20. 6 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



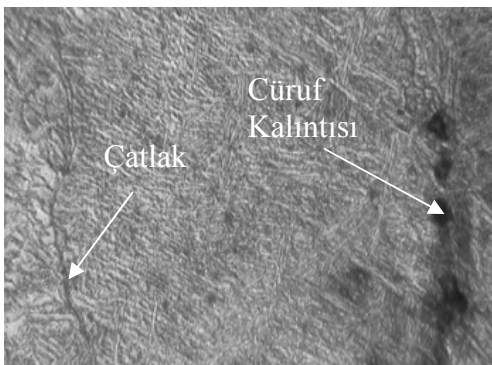
Resim 6.21. 6 Nolu numune SEM görüntüsü x1000



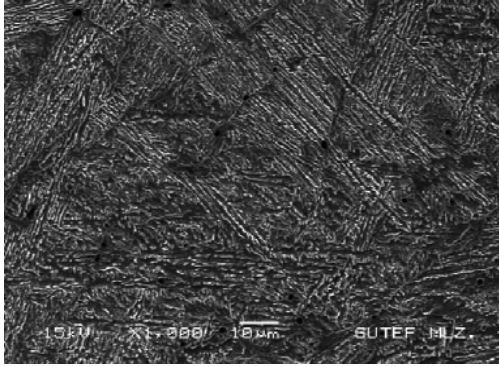
Resim 6.22. 7 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



Resim 6.23. 7 Nolu numune SEM görüntüsü x1000



Resim 6.24. 8 Nolu numune kaynak metali görünüşü x400



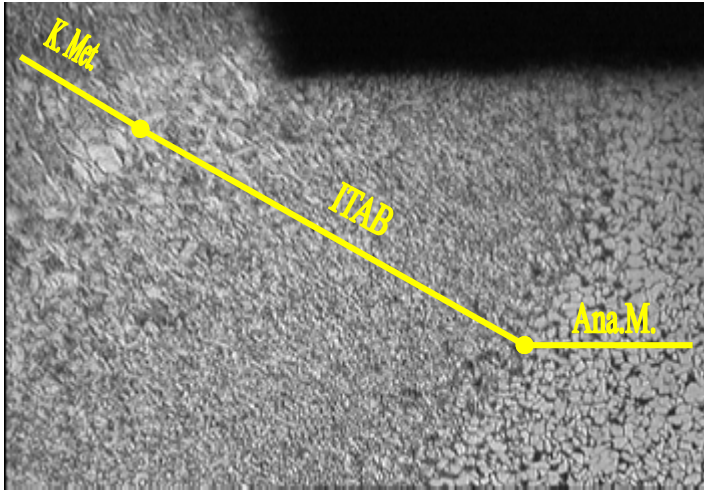
Resim 6.25. 8 Nolu numune SEM görüntüsü x1000

6 nolu numune hariç diğer numunelerin hepsinde dikiş üzerindeki çatlak oluşumu bariz olarak görülmektedir. Kaynak dikişi üzerinde tanelerin dentritik durumda oluştukları gözlenmektedir.

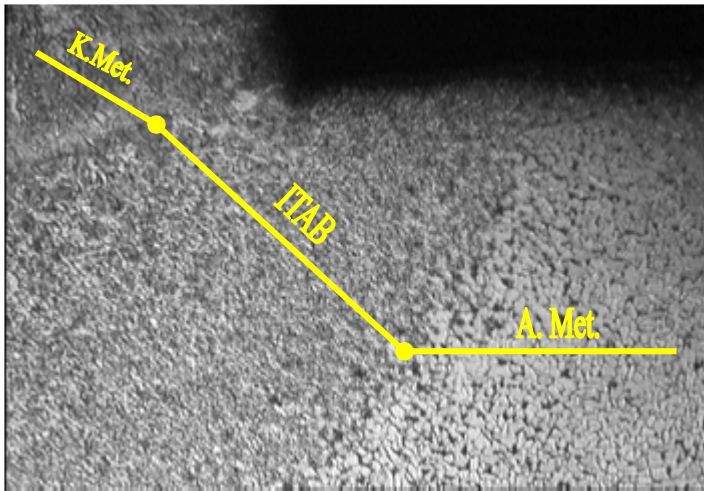
8 nolu numunede mikro yapı, beynitik ve martenzitik arası mikro yapıya benzemektedir. En belirgin mikro yapı değişimi 6 ve 8 nolu numunelerde görülmüştür. Bu yapılar martenzitik yapıyı taşımakta olup ölçülen sertlik değerleri bunu desteklemektedir.

6.1.4. Ana metal, ITAB ve kaynak dikişı birleşik görüntüler

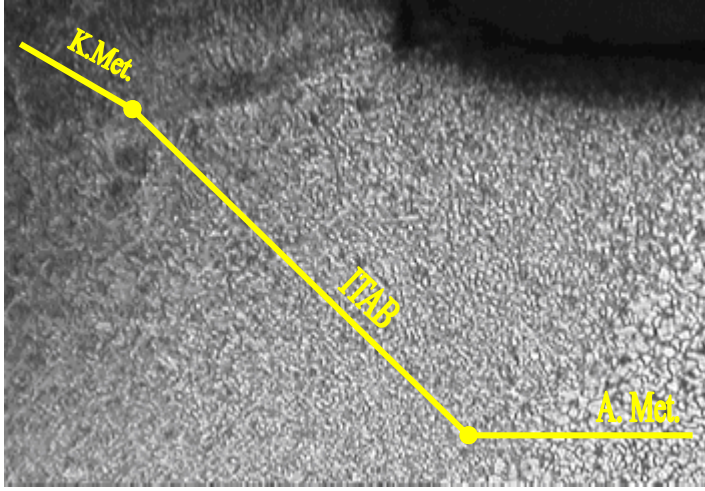
Resim 6.26 – 6.33’ e kadar görülen mikroyapı resimlerinde ana metal, ITAB ve kaynak metalinin geçiş bölgeleri birlikte görülmektedir. Görüntü optik mikroskop yardımıyla 50 büyütmede çekilmiştir. Kaynak metalinin ana metal ile birleştiği kenardan mikroyapı görüntüsü alınmıştır.



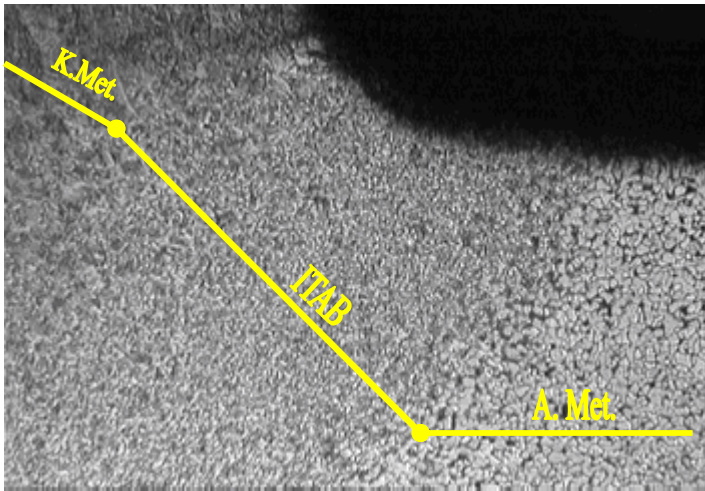
Resim 6.26. 1 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50



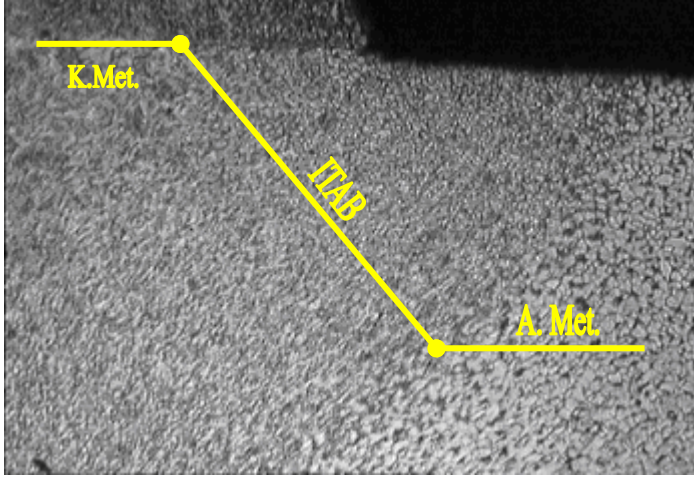
Resim 6.27. 2 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50



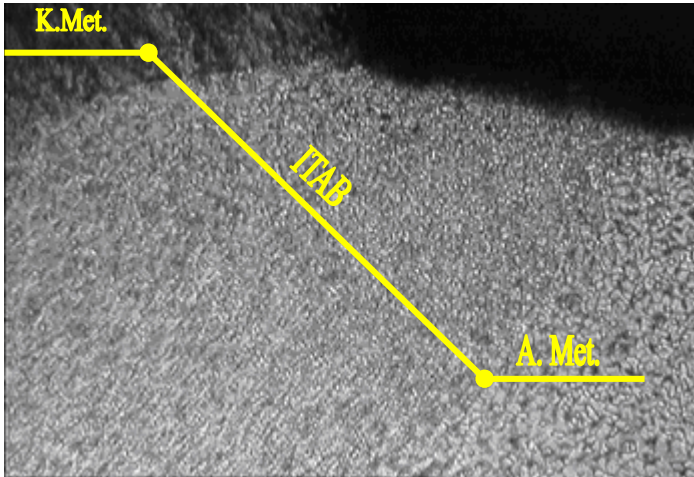
Resim 6.28. 3 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50



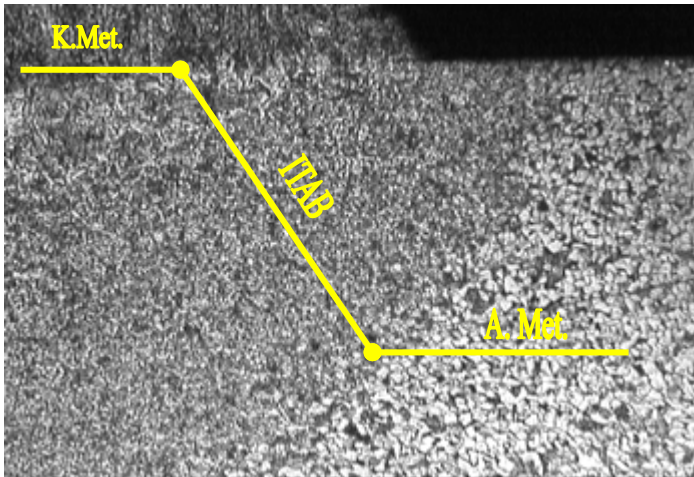
Resim 6.29. 4 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50



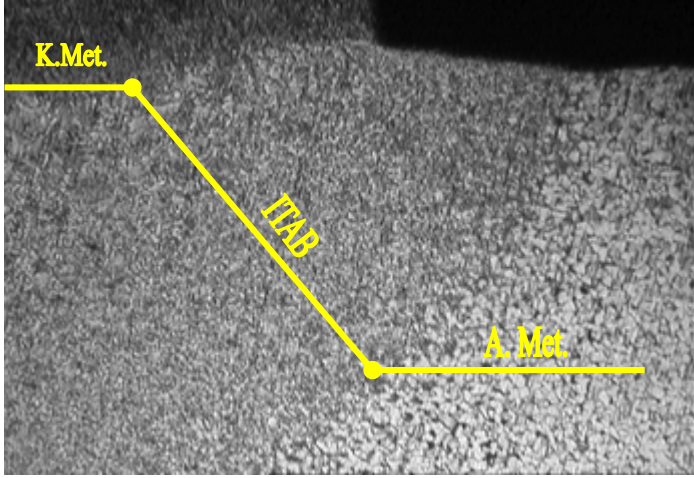
Resim 6.30. 5 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50



Resim 6.31. 6 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50



Resim 6.32. 7 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50



Resim 6.33. 8 Nolu numunenin Ana metal, ITAB ve dikiş görünüşü x50

Bu görüntülerde ana metalden, kaynak dikişine gidildikçe mikroyapı değişimi ve tane boyutlarındaki farklılık gözlenmiştir. Ana metaldeki mikroyapıya göre tane boyutları ısı tesiri altındaki bölgede küçülmüştür. Isı tesiri altındaki bölgeden, kaynak metaline doğru gidildikçe tane boyutlarının büyümeye başladığı ve kaynak metali merkezinde yapının dentritik yapı olduğu gözlenmiştir. Kaynak metali, ısı bölgesine doğru düzgün yönelmiş tanelerden oluşmuştur.

6.2. EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) Analizi ve Kimyasal Yaş Analiz Sonuçları

Numunelere uygulanan EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) Analizi sonuçları aşağıda çizelgeler ile birlikte verilmiştir.

6.2.1. EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) analizi sonuçları

Numunelerde yapılan Enerji Dispersif Spektrometresi (EDS) sonuçları oransal değerler olarak Çizelge 6.1' de verilmiştir.

EDS (Enerji Dispersif Spektrometresi) analizi her numuneye uygulanmıştır. EDS analizi ortaya çıkan sonuçlar çizelgeler halinde sunulmuştur. Numunelere EDS

analizinin uygulanmasındaki sebep, numunelerdeki sertlik artışına neden olan elementin veya elementlerin ortaya çıkarılmasıdır.

Bu çalışmada sertliği arttırmak ve aşınma özelliklerini iyileştirmek üzere bor minerali kullanıldığı için, EDS ile numunede özellikle bor minerali analizleri yapılmıştır. Her numune ayrı olarak incelendiğinde, EDS sonucuna göre bor minerali saptanamamıştır. Bunun başlıca nedeni EDS analizi yönteminde, atom numarası küçük olan elementlerin (B, H, vb.) oranının, EDS cihazının algılayabileceği değerlerden küçük olmasıdır. Bor gibi minerallerin oranı, içinde bulunduğu diğer elementlere göre en az % 2' ye yakın oranında olması bu cihazla bor mineralini tespit etmek için yeterli olacaktır.

EDS analizi ile tespit edilemeyen bor mineralini tespit etmek için, Kimyasal Yaş Analiz deneyleri uygulanmıştır. Bu deney yöntemi ile numunede 1 ppm (mg/kg) değerine kadar mineral tespiti yapmak mümkündür.

Çizelge 6.1. Deney numuneleri EDS analizi sonuçları

Bulunan Element	Numuneler ve Elementlerin % Oranları							
	1 Nolu numune	2 Nolu numune	3 Nolu numune	4 Nolu numune	5 Nolu numune	6 Nolu numune	7 Nolu numune	8 Nolu numune
Fe	97,825	97,878	98,073	95,884	98,943	95,428	95,821	94,760
Si	2,175	2,122	1,456	—	1,057	1,574	1,131	1,208
N	—	—	0,471	0,347	—	—	0,311	0,293
Mn	—	—	—	—	—	0,878	—	1,025
S	—	—	—	—	—	0,389	—	0,263
C	—	—	—	3,769	—	—	2,737	2,451
O	—	—	—	—	—	1,731	—	—

Deney numunelerine uygulanan, EDS analizleri deney sonuçlarının, çok sağlıklı sonuçlar vermediği anlaşılmıştır. Bu sebeple, aynı numunelere, diğer elementlerinde tespit edilmesi için, kimyasal yaş analiz deneylerinin uygulanmasına karar verilmiştir.

6.2.2. Kimyasal yaş analiz sonuçları

Kimyasal Yaş Analiz deneyleri sadece 1, 4 ve 8 nolu numunelere uygulanmıştır. Deney sonucunda 1 nolu numunede bor minerali saptanamamıştır. 4 nolu numunede 31,7 mg/kg değerinde bor minerali tespit edilmiştir. 8 nolu numunede ise 330 mg/kg değerinde bor minerali tespit edilmiştir. 1 nolu numunede bor mineralinin saptanamama sebebi, deneylerde bu numuneye bor tozu ilave edilmemesidir. Deney numunelerine ilave edilen bor tozu oranlarının farklılığı 4 ve 8 nolu numunelerde açıkça görülmektedir. Bor tozu ilave oranı farklılığı, bu iki numunede, tespit edilen bor oranı değerlerine olduğu gibi yansımıştır.

Asit içersinde çözüldürölerek hazırlanan 1, 4 ve 8 nolu numunelere ait kimyasal yaş analiz değlerleri aşğıdaki tabloda gösterilmiştir. Deneylerin sonuçları ayrıca Analiz raporlarında belirtilmiştir.

Çizelge 6.2. Kimyasal yaş analiz sonuçları

Numune Nosu	Element	Ölçülen Derişim (mg/kg)	Deney Raporu No
1 Nolu numune	B(Bor)	Saptanamadı	ASL.DRP.07-688b
4 Nolu numune	B(Bor)	31,7 mg/kg	ASL.DRP.07-688a
8 Nolu numune	B(Bor)	330 mg/kg	ASL.DRP.07-641-01a

Bu sonuçlar deneyde kullanılan bor tozları oranı ile yakınlık göstermektedir. 1 nolu numunede deney esnasında bor tozu kullanılmamıştır. 4 nolu numunede % 25 oranında bor tozu ve % 75 oranında OP 1250 A Tozaltı kaynak tozu kullanılmıştır. 8 nolu numunede % 40 oranında bor tozu, %10 oranında Grafit tozu ve % 50 oranında OP 1250 A Tozaltı kaynak tozu kullanılmıştır.

6.3. Sertlik Ölçümü Deney Sonuçları

Sertlik ölçümlerinin sonuçları Vickers (HV) değerinden saptanmış ve sonuçlara ait veriler Çizelge 6.3’ de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Sertlik ölçüm deneyi sonuçları

Numune No	Sertlik Değerleri Vickers(HV)		
	Kaynak Metali	Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)	Ana Metal
1.	236,07	209,11	172,47
2.	360,94	221,98	172,47
3.	381,26	212,41	172,47
4.	369,59	232,02	172,47
5.	348,60	222,72	172,47
6.	419,68	231,22	172,47
7.	355,81	227,98	172,47
8.	484,65	246,22	172,47

Ana metal sertlik ölçümleri birbirlerine yakın değerler olarak elde edilmiştir. Bütün numunelerin, ana metal sertlik ölçümleri yapılmış ve elde edilen sertlik değerlerinin ortalaması 172,47 HV (Vickers) olarak saptanmıştır.

Kaynak metali, sertlik ölçümü sonucu en yüksek olan numune, 8 nolu numune olarak saptanmıştır. 8 nolu numuneyi 6 nolu numune, sonrasında 3 nolu numune takip etmektedir. Çizelge 5.3’ e göre 8 nolu numunede bor, grafit ve OP 1250 A tozları karışımına ek olarak ortama ilave edilen azot gazının etkisi olduğu düşünülmektedir.

Çifci C, “Sade karbonlu çeliklerin borlanması borür tabakası özelliklerine karbon miktarının etkisi” isimli yüksek lisans tezinde belirttiği gibi sade karbonlu çeliklerde oluşturulan borür tabakası sertliğin artmasını sağlamaktadır [61].

8 nolu ve 6 nolu numunelerde kullanılan grafit tozları martenzitik mikroyapı oluşumunu kolaylaştırmıştır. Martenzitik mikroyapının oluşumu bu iki numunedeki sertlik artışının önemli sebepleri arasında gösterilebilmektedir.

Azot gazının ilave edilmesiyle ortaya çıkan sertlik değerleri değişikliği, Çizelge 6.3' de görülmektedir. Çizelge 6.3' deki sonuçlara göre 1 nolu numunedeki sertlik değeri ile bu numuneye benzer şartları taşıyıp sadece azot gazı ilavesi ile oluşturulan 3 nolu numunedeki sertlik değerleri arasındaki fark açıkça görülmektedir. Azot gazının etkilediği sertlik değerleri değişimleri 2 nolu numuneye göre 4 nolu numunede, 5 nolu numuneye göre 7 nolu numunede ve 6 nolu numuneye göre 8 nolu numunede de açıkça ortaya çıkmaktadır.

Isı tesiri altındaki bölgenin sertlik ölçümü değerleri sonucu en iyi değerler 5 nolu numunede görülmektedir. 8 nolu numune ve 6 nolu numune daha sonraki en iyi sertlik değerlerini göstermiştir.

Tozaltı ark kaynağında, serbest tel uzunluğunun artmasına bağlı olarak, yığılan toz miktarının artması sebebiyle yavaş soğuma olduğundan, kaynak metali ve ITAB' deki sertlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir [59].

5, 6 ve 8 nolu numunelerde diğerlerine nazaran ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) sertliği daha fazla olduğu görülmektedir.

Ana metal sertlik oranı kaynak esnasındaki mevcut ısı girdisi ve kaynak sonrası bekletilme süresine göre değişiklik arz etmektedir.

6.4. Aşınma Deneyi Sonuçları

Aşınma deneyleri için hazırlanan numuneler, sabit yük, sabit hız ve sabit aşındırıcı ile farklı uzunluklarda testlere tabi tutulmuştur. Aşınma deneyleri için 1' den 8' e kadar numaralandırılmış deney numuneleri kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan numunelerin, aşınma dirençlerinin tek bir faktöre bağlı olmayıp, numunelerin kimyasal bileşimlerdeki değişimlere, kullanılan koruyucu toz karışımlarına, kaynak işlemi sonrası değişen mikroyapılarına, aşınma deneyinde uygulanan yüke ve aşınma mesafesine de bağlı olduğu görülmüştür [65, 66].

Aşınma deneyi sonuçları, Çizelge 6.4’ de verilmiştir. Çizelge ayrıca Şekil 6.1’ de grafiksel şekillerle ifade edilmiştir. Her uzunluk sonucu elde edilen değerler sonuç olarak Çizelge 6.4’ de işlenmiştir. Çizelgede, aşınma direnci en yüksek olan numune, 8 nolu numunedir. 8 nolu numuneyi 6 nolu numune takip etmektedir. Aşınma direnci en düşük olan numune 2 nolu numunedir.

Çizelge 6.4. Aşınma deneyi sonucu numunelerdeki aşınma miktarları

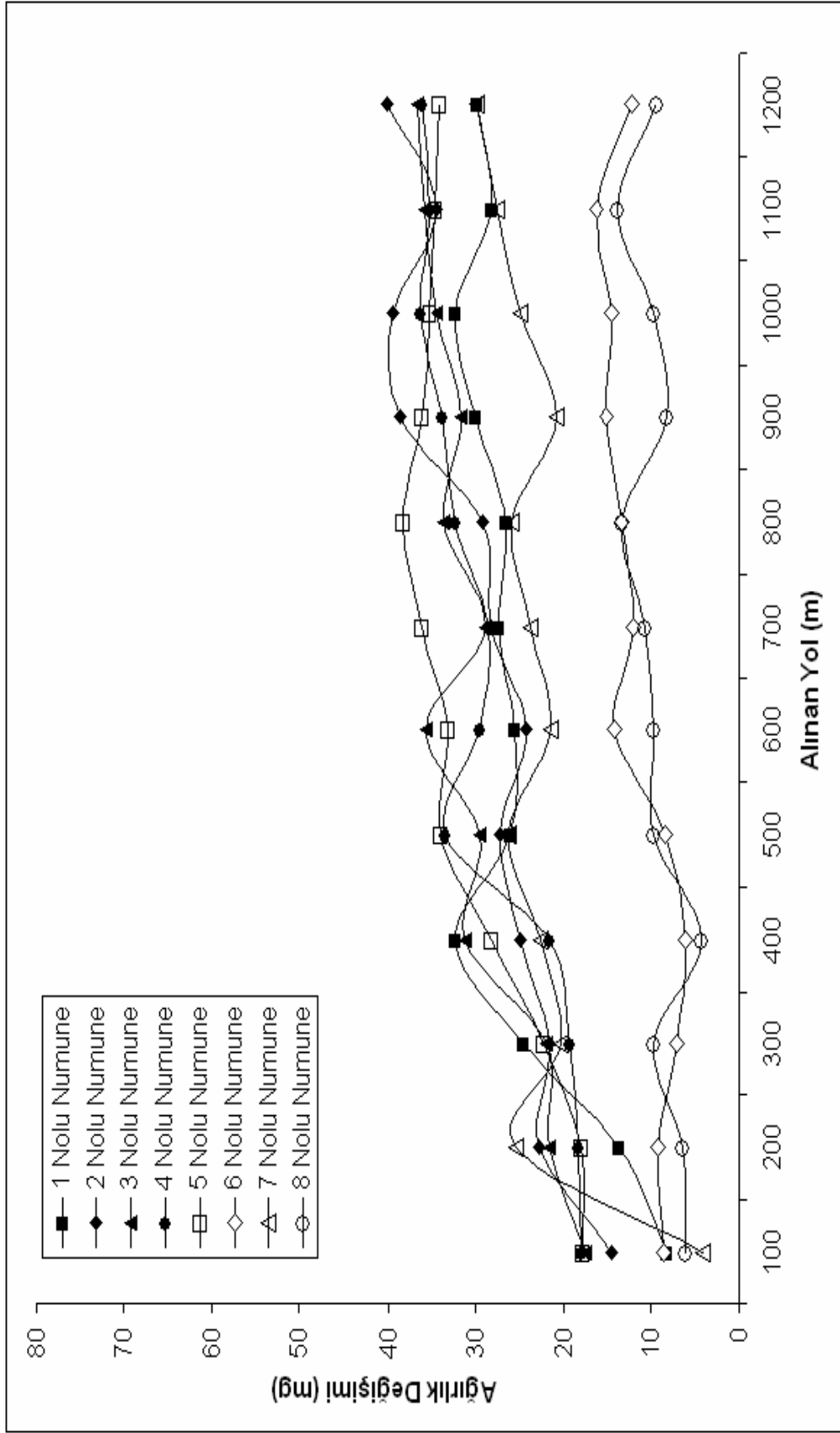
Numune No	Alınan Yol (m) ve Aşınma Miktarı (mg)											
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
1 Nolu Numune	8,1	13,5	24,6	32,2	26,0	25,5	27,3	26,5	29,9	32,3	28,2	29,7
2 Nolu Numune	14,4	22,8	21,6	24,9	27,2	24,2	28,2	29,1	38,6	39,4	34,4	40,1
3 Nolu Numune	17,5	21,6	22,0	31,1	29,4	35,6	28,8	33,6	31,5	34,3	35,9	36,7
4 Nolu Numune	18,0	18,4	19,3	21,6	33,4	29,5	28,4	32,2	33,7	36,4	35,2	36,2
5 Nolu Numune	17,8	18,0	22,3	28,2	33,9	33,1	36,1	38,3	36,2	35,2	34,5	34,1
6 Nolu Numune	8,5	9,1	7,0	6,0	8,4	14,1	12,0	13,3	15,1	14,4	16,2	12,1
7 Nolu Numune	4,1	25,4	20,3	22,5	26,2	21,4	23,7	25,8	20,7	24,8	27,5	29,7
8 Nolu Numune	6,0	6,4	9,6	4,3	9,7	9,6	10,6	13,2	8,1	9,6	13,7	9,3

Numunelere ilave edilen bor tozu oranının artması ile birlikte aşınma direncinin arttığı grafiklerde açıkça görülmektedir. Kaynak ortamına ilave edilen azot gazının sertlik ve aşınma direncini arttırdığı yine aynı grafiklerden açıkça anlaşılmaktadır.

Karataşoğlu F. ve ark. (1998) yayınladıkları çalışma “Monoblok tekerlerin aşınan kısımlarının MAG kaynağı ile yapılan dolgu metalin aşınma davranışının incelenmesi” de belirtildiği gibi aşınma direncini etkileyen en önemli faktörlerin

başında sertlik gelir ve sertlik artışıyla birlikte aşınma dayanımında artış gösterir [60].

Aşınma deneyi sırasında, bazı numunelerde alınan yol arttıkça aşınma miktarının arttığı görülmüştür. Şekil 6.1’de numunelerde alınan yola göre ağırlık kaybı değişimi ilişkisi görülmektedir.



Şekil 6.1. Deney numuneleri aşınma deneyi sonuçları

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

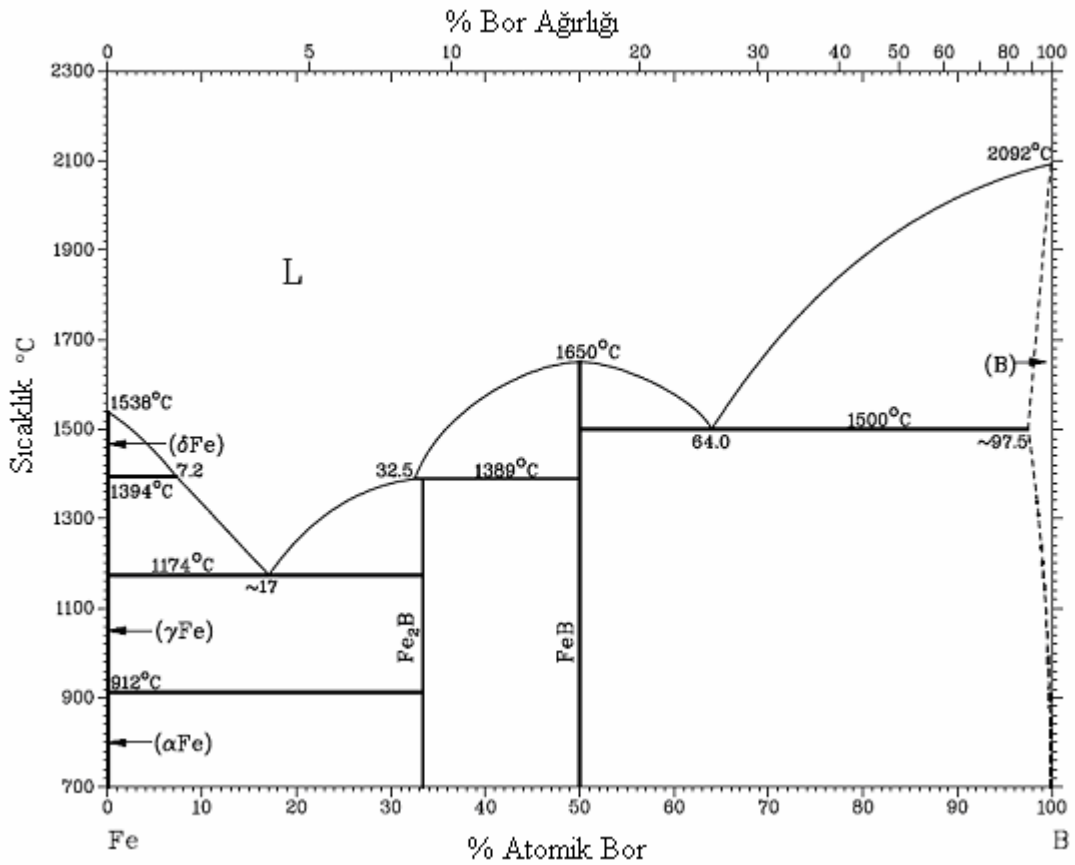
Yapımı gerçekleştirilen bu yüksek lisans çalışması sonunda elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmaktadır.

1. Deneylerde kullanılan bor tozlarının, malzemede sertliği arttırarak, aşınmaya karşı direncide belirgin ölçüde arttırdığı saptanmıştır. Bu sonuç, *Yıldızlı K, ve arkadaşlarının* “Borlanmış AISI çeliğinin eroziv aşınma davranışının incelenmesi” yayınındaki, numunelerin aşınmaya karşı gösterdiği dirençte oluşan bor tabakasının derinliğinin ve bor tabakasının sertliğinin önemli etkileri vardır, sonucunu da desteklemektedir [62].
2. Yapılan deneylerde aşınmaya karşı en iyi dayanımı % 50 OP 1250 A + % 40 Bor + % 10 Grafit tozlarının karışımı ve Azot gazı ilaveli ortam, tel olarak da SG₂ teli kullanımı vermektedir.
3. Sertliği, ana metal sertlik değerinden fazla olan 2, 4, 5, 7 ve 8 nolu numunelerde kaynak dikişi üzerinde belirgin, optik mikroskopla daha da belirgin, çatlak oluşumu görülmüştür.
4. Deneylerde kullanılan bor tozu miktarı arttıkça sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir. *Eti Holding A.Ş. Genel Müdürlüğü Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığının yayını olan* “Ferro bor ön fizibilite etüdüne” göre, Bor, çeliğin sertliğini karbür oluşturmak suretiyle arttırır. Diğer karbür yapan elementlerle kıyaslandığında, çeliğe aynı derecede sertlik kazandırmak için çok az bor gerekir [63].
5. EDS analiz deneyleri sonuçlarında elde edilen Fe(Demir) ve C(Karbon), Kimyasal yaş analiz deneyleri sonucunda da elde edilen B(Bor) elementlerinin, kaynak işlemi sırasında ortaya çıkan ısı ile FeB, Fe₂B ve B₄C gibi bileşikler oluşturduğu düşünülmektedir.

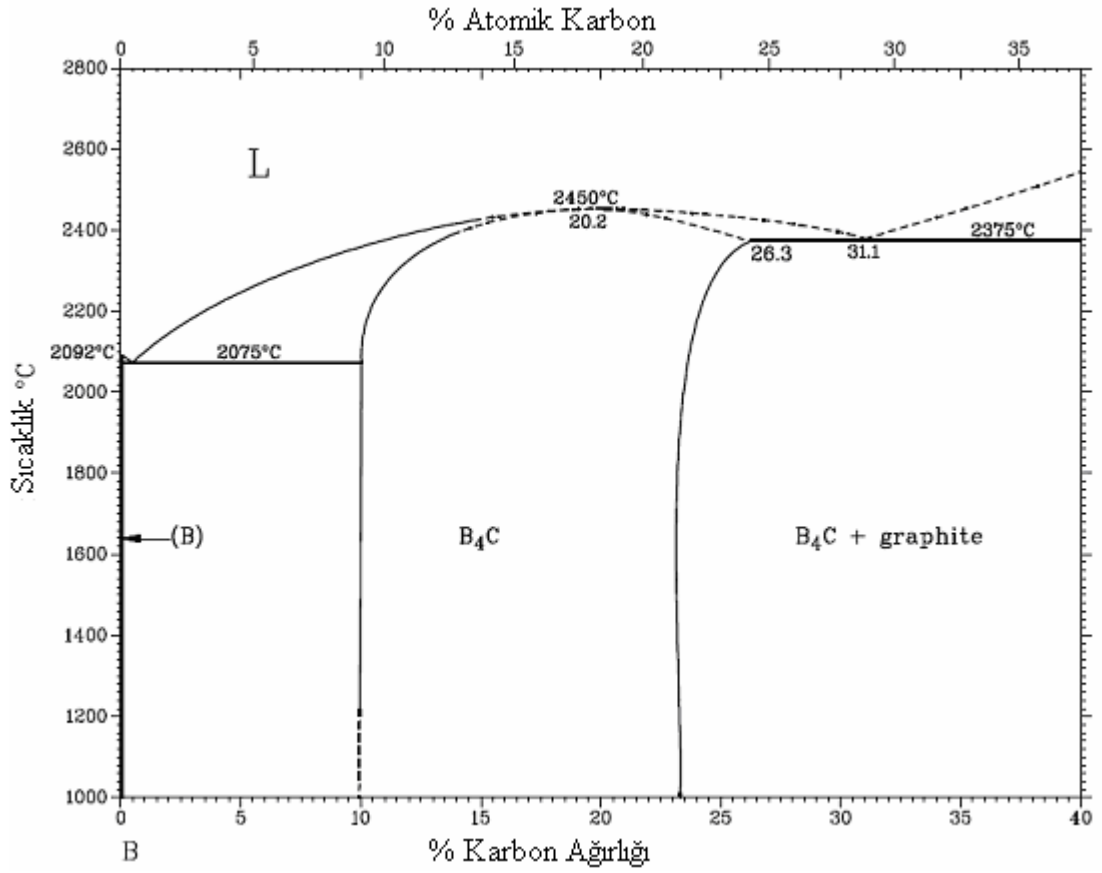
6. FeB, Fe₂B ve B₄C gibi bileşiklerin oluşum sıcaklıkları 1600 – 2500 °C arasındadır. Bu oluşum Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’ de görülen, ikili faz diyagramları olan Fe-B ve B-C diyagramları ile desteklenmiştir [64].

7. Numunelerde kaynak dikişi işlemleri sırasında ortaya çıkan ısı ile birlikte Bor mineralinin Fe(Demir) veya C(Karbon) ile bileşik oluşturarak çelik içersinde sertliğin artmasını sağladığı düşünülmektedir.

8. Ortama ilave edilen azot gazının sertlik ve aşınma değerlerini olumlu yönde etkilediği, bu sayede sertlik ve aşınma değerlerinin arttığı düşünülmektedir.



Şekil 7.1. Fe-B ikili faz diyagramı [64]



Şekil 7.2. B-C ikili faz diyagramı [64]

Yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar ışığında bu konuda bundan sonra yapılacak olan araştırmalar için şu öneriler yapılabilir.

1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin, Elektron Işınli Mikro Analiz Cihazı (EPMA) ile element analizi yapıp, numuneyle ilgili element haritası çıkarılarak hangi elementlerin sertliğe ve aşınma dayanımına etki ettiği ve hangi bileşiklerin oluştuğu daha da belirgin şekilde tespit edilebilir.
2. Numunelerde sertlik artışına neden olan bileşiklerin belirlenmesi amacı ile daha detaylı kimyasal çalışmalar ve incelemeler yapılabilir.

3. Aşınma deneylerinin yapımı esnasında, değişen aşınma değerlerinin her ölçümünde, aşınan yüzeylerin optik mikroskop altında incelenmesi olumlu sonuçlar doğurabilir.
4. Bu çalışmada yapılan deneylerde kullanılan tozların boyutları olabildiğince sabit tutulmaya çalışılmıştır. Aynı deneysel işlemler farklı büyüklüklerde toz boyutları ile yeniden yapılarak elde edilen sonuçların kıyaslanması yoluna gidilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü “Bor Elementi”
<http://www.boren.gov.tr/element.htm> (2003).
2. Çalık, A., “Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlanma Özelliklerinin İncelenmesi”, *Mühendis ve Makine*, 508:99-100 (2003).
3. Külahlı, E., “Kaynak Bilimi”, *Oerlikon Yayını*, 2:4-5 (1998).
4. Anık, S., “Kaynak Teknolojisi Makine Mühendisliği El Kitabı Üretim ve Tasarım”, 2 (170): 175.
5. Külahlı, E., “Tozaltı Kaynak Yöntemi”, *Oerlikon Yayını*, İstanbul, 3:11-14 (1998).
6. Ergenç, A., “Modern Kaynak Yöntemleri ve Maliyeti”, *Kaynak Dünyası*, İstanbul, 2:56 (1997).
7. Yavuz, N., Özcan, R., Polat, F., “Tozaltı Kaynak Bağlantısının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Termal ve Mekanik Analizi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 10 (2):12 (2005).
8. Külahlı, E., “Tozaltı Kaynak Yöntemi”, *Oerlikon Yayını*, İstanbul, 2:82 (1985).
9. Damkaş, R., “Tozaltı Kaynağında Kaynak Ağzı Açmadan ve Kaynak Ağzı Açarak Ulaşılabilecek Nüfuziyet Derinliğinin Tespit Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 8-13 (2003).
10. Anık, S., “Kaynak Tekniği El Kitabı”, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 61-63 (1991).
11. “Kaynak Sarf Malzemeleri – Tozaltı Ark Kaynağı İçin Tozlar – Sınıflandırma”, TS EN 760/Kasım 1998, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 12 (1998).
12. “Kaynak Sarf Malzemeleri – Alaşımsız ve İnce Daneli Çeliklerin Tozaltı Ark Kaynağı İçin Tel Elektrotlar ve Tel Toz Kombinasyonları – Sınıflandırma”, TS 5387 EN 756/Aralık 1997, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 11-12 (1997).
13. “The Procedure Handbook Of Arc Welding Design & Praticce”, Lincoln Electric, *Cleveland, Ohio*, Eleventh Edition, 276-280 (1964).
14. Oğuz, B., “Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları”, *Oerlikon Yayınları*, İstanbul 5-8 (1993).
15. Cavcar, Melike, M., “Sert Dolgu Alaşımları ve Sert Dolgu Rehberi”, *Oerlikon Yayınları*, İstanbul, 2-3 (1995).

16. “Oerlikon Fontargen”, **Oerlikon Yayınları**, İstanbul, 1-2 (1996).
17. Cavcar, M., “Sert Dolgu Malzemelerine Genel Bir Bakış – Bölüm 1” **Oerlikon Yayınları**, İstanbul, 3-5 (1996).
18. Gültiken, N., “Kaynak Bilimi”, **Oerlikon Yayınları**, İstanbul, 3:8-18 (1988).
19. Cavcar, M., “Demir Bazlı Sert Dolgu Malzemelerin Metalurjik Seçimi”, **Oerlikon Yayınları**, İstanbul, 3-6 (1996).
20. Cary, H. B., “Modern Welding Tecnology”, **AWS**, U.S.A., 137 (1979).
21. Akkurt, M., “Makine Elemanları I”, **Birsen Yayınevi**, İstanbul, 103-105 (1990).
22. Demiral, M., Yaşar, M., “95200 – 95300 Cu-Al-Fe Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, **Teknoloji**, 9 (1) 17-26 (2006).
23. Koç, E., “Makine Elemanları Cilt 2”, **Nobel Kitabevi**, Adana, 202-208 (2004).
24. Stachowiak, G. W., “Engineering Tribology”, **Butterworth Heinemann**, 2nd. Ed. 171-177 (2000).
25. Boz, M., “Seramik takviyeli bronz esaslı toz metal fren balata üretimi ve sürtünme aşınma özelliklerini araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 15-16 (2003).
26. Kılınç, Y., “Yağlı sürtünme şartlarında çelik ince zırlı yataklarda üretim tekniklerinin aşınmaya etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 16-17 (1993).
27. Yılmaz, F., “Sürtünme ve Aşınma”, **9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 229-247 (1997).
28. Topbaş, M. A., “Endüstri Malzemeleri”, **Yıldız Teknik Üniversitesi**, İstanbul, 2:220-223 (1993).
29. Stolarski, T., A., “Tribology in Machine Design”, **Butterworth Heinemann**, 18-20 (1990).
30. Selçuk, B., “Borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 3-10 (1994).
31. Moore, D. F., “Principples and Aplication Tribology”, **Pergamon Pres**, Oxford, 109-156 (1975).

32. Öztürk, A. A., “Motor krank mili muylularına dolgu kaynağı yapılması ve aşınma karakteristiklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 29-30 (2004).
33. Karataş, F., “Demir yollarında çalışan Monoblok tekerlerin çalışmaları esnasında aşınan kısımların MİG-MAG kaynağı ile değişik elektrot kompozisyonlarında yapılan dolgu kaynağının aşınma özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 36-74 (1997).
34. Oğuz, B., “Dolgu Kaynağı El Kitabı”, **Oerlikon Yayınları**, İstanbul, 4-72 (1976).
35. Ashby, M. F., Jones, D. R. H., “Engineering Materials 1-2nd. Ed.” **Butterworth Heinemann**, 295 (1996).
36. Harsha, A. P., Tewari, U. S., “Two-Body and Three-Body Abrasive Wear Behaviour of Polyaryletherketone Composites”, **Polymer Testing**, 403-418 (2003).
37. Eryürek, İ. B., “Hasar Analizi”, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, **Birsen Yayınevi**, İstanbul, 160-164 (1993).
38. Ohtani, T., Kamasaki T. C., “On Abrasive Wear Property During Three-Body Abrasion of Wood”, **Wear**, 60-66 (2003).
39. Joseph, H., Tylczak, O. A., “Abrasive Wear”, **ASM Handbook**, 18:184-185 (1992).
40. Pintaude, G., Tanaka, D. K., Sinatora, A., “The Effects of Abrasive Particle Size on The Sliding Friction Coefficient of Steel Using a Spiral Pin-On-Disk Apparatus”, **Wear**, 55-59 (2003).
41. Demirci, A. H., “Teknik kuru sürtünmeli bir aşınma deney düzeneği tasarım ve imalatı”, **Makine ve Mühendis Dergisi**, 29 (330):25-27 (1987).
42. Değerli, B., “Aşınma deneylerinde kullanılan deney düzenekleri”, **Makine ve Mühendis Dergisi**, 37 (432):36-38 (1996).
43. Karahan, S., “Bor adsorpsiyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 18-20 (2004).
44. “Bor Raporu”, **TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası**, Ankara, 1-2 (2003).
45. “Kimya Sanayi Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu”, **T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı**, Yayın No: DPT:2414-ÖİK:474, 3-8 (1995).

46. Görgülü, A. O., Arslan, M., “Alternatif Bor Bileşikleri”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 43-49 (2003).
47. İnternet: Maden Tetkik Arama Kurumu, “Bor Mineralleri”, <http://www.mta.gov.tr/mineraller/boraks.html> (2003).
48. İnternet: Balıkesir Üniversitesi, “Bor Elementi, Bileşikleri Ve Mineralleri İle İlgili Genel Bilgiler”, <http://bor.balikesir.edu.tr/bor.html> (2003).
49. İnternet: T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı, “Bor Madeni ve Türkiye İçin Önemi”, <http://www.foreigntrade.gov.tr/ead/bor/BOR%20VE%20TORYUM.doc> (2001).
50. Soydan, A. B., “Türk kolemanitlerinin termal elektrolizi ile kalsiyum hekzaborür eldesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 6-12 (1985).
51. Yaşar, H., “Özellik ve Uygulamalarla Malzeme”, *KOSGEB*, Küçük ve Orta Ölçekli Sanayi Geliştirme ve Destekleme İdaresi Başkanlığı, Ankara, 266-267 (2001).
52. Arslan, İ. H., “Türkiye ve dünyada bor”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-8 (1997).
53. Erdoğan, S., “Geleceğin Petrolü: Bor”, *Kimya Teknolojileri*, 39:7-8 (2004).
54. Kalafatoğlu, İ. E., Örs, S. N., “21. Yüzyılda Bor Teknolojileri ve Uygulamaları”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 66 (2003).
55. Özay, P., “Bor’un sıvı-sıvı ekstraksiyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 8-10 (2004).
56. Helvacı, C., “Türkiye Borat Yatakları”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14-16 (2003).
57. İnternet: Arctech Web Sayfası, “Az Alaşımlı MİG-MAG Teli SG₂”, <http://www.arctech.com.tr/sg2.htm> (1999).
58. Oerlikon Ürün Kataloğu, “Sert Dolgu Tozları”, *Oerlikon A.Ş.*, 1:75 (1997).
59. Durgutlu, A., Kahraman, N., Gülenç, B., “Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18(3):473-480 (2005).

60. Karataşoğlu, F., Gülenç, B., Türker, M., Kurt, A., “Monoblok tekerlerin aşınan kısımların, MAG kaynağı ile yapılan dolgu metalinin aşınma davranışlarının incelenmesi”, *IWTS’98*, İstanbul, 8 (1998).
61. Çifci, C., “Sade karbonlu çeliklerin borlanması, borür tabakası özelliklerine karbon miktarının etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 81 (1999).
62. Yıldızlı, K., Odabaş, D., Nair, F., *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 138-139 (2003).
63. Angın, M. H., “Ferro Bor Ön Fizibilite Etüdü”, *Eti Holding A.Ş. Genel Müdürlüğü Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı*, Ankara, 7 (2003).
64. Okamoto, H., Liao, P. K., Spear, K. E., “Binary Alloy Phase Diagrams”, *ASM Handbook*, 3(2):80-81 (1992).
65. Çetinkaya, C., “Yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemelerin Al_2O_3 ile aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 6 (3): 559-567 (2003).
66. Çetinkaya, C., “Yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemelerin SiC aşındırıcı karşısındaki aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 6 (4): 661-669 (2003).

EKLER

EK-1 Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü analiz raporu 1



01/10/2007

ANALİZ RAPORU

Deney raporu no : ASL.DRP.07- 688b
 Müşteri : Serkan APAY
 Adres: : Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. ANKARA
 Numune Bilgileri
 Alındığı Yer/Tarih : Atölye / 08.10.2007
 Kabul Tarihi : 08.10.2007
 Numune No : 07/688-01b
 Sayısı/miktarı : 1 adet (~ 1 gram)
 Numuneyi Alan : Serkan Apay
 Numune Şekli : Mühürsüz
 Numune Türü : Kaynak Dikişi
 Numune Özelliği : Anlık

Analiz Sonuçları Aşağıdaki Tablo'da verilmiştir.

Yük. Kimyager Cemile YÜCEL Analizi Yapan
 Dr. Kimyager Zihni YILMAZ Atıksu Lab. Sorumlusu

TABLO : Kaynak Dikişi Numunesinin Analiz Sonuçları;

KİRLETİCİLER	ÖLÇÜLEN DERİŞİM		Analiz Yöntemi
Bor (B)	Saptanamadı (< 0.1 mg/kg)	< % 0.00	Asitte Parçalama ve SM 4500 – B B

Rapor DEÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nün izni olmadan kopyalanamaz.

Adres: D.E.Ü. Mühendislik Fak. Çevre Müh. Böl. Tınaztepe Kampüsü 35160 BUCA / İZMİR

Tel: 0 232 412 71 00 ; Fax: 0 232 453 11 43

EK-2 Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü analiz raporu 2



01/10/2007

ANALİZ RAPORU

Deney raporu no : ASL.DRP.07- 688a
 Müşteri : Serkan APAY
 Adres: : Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. ANKARA
 Numune Bilgileri
 Alındığı Yer/Tarih : Atölye / 08.10.2007
 Kabul Tarihi : 08.10.2007
 Numune No : 07/688-01a
 Sayısı/miktarı : 1 adet (~ 1 gram)
 Numuneyi Alan : Serkan Apay
 Numune Şekli : Mühürsüz
 Numune Türü : Kaynak Dikişi
 Numune Özelliği : Anlık

Analiz Sonuçları Aşağıdaki Tablo'da verilmiştir.

Yök.Kimyager Cemile YÜCEL / Dr. Kimyager Zihni YILMAZ
 Analizi Yapan Atıksu Lab.Sorumlusu

TABLO : Kaynak Dikişi Numunesinin Analiz Sonuçları;

KİRLETİCİLER	ÖLÇÜLEN DERİŞİM		Analiz Yöntemi
Bor (B)	31.7 mg/kg	% 0.0032	Asitte Parçalama ve SM 4500 – B B

Rapor DEÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nün izni olmadan kopyalanamaz.

Adres: D.E.Ü. Mühendislik Fak. Çevre Müh. Böl. Tınaztepe Kampüsü 35160 BUCA / İZMİR
 Tel: 0 232 412 71 00 ; Fax: 0 232 453 11 43

EK-3 Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü analiz raporu 3



01/10/2007

ANALİZ RAPORU

Deney raporu no : ASL.DRP.07- 641-01a
 Müşteri : Serkan APAY
 Adres: : Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. ANKARA
 Numune Bilgileri
 Alındığı Yer/Tarih : Atölye / 18.09.2007
 Kabul Tarihi : 21.09.2007
 Numune No : 07/641-01a
 Sayısı/miktarı : 1 adet (~ 1 gram)
 Numuneyi Alan : Serkan Apay
 Numune Şekli : Mühürsüz
 Numune Türü : Kaynak Dikişi
 Numune Özelliği : Anlık

Analiz Sonuçları Aşağıdaki Tablo'da verilmiştir.

Yük.Kimyager Cemile YÜCEL, Dr. Kimyager Zihni YILMAZ
 Analizi Yapan Atıksu Lab.Sorumlusu

TABLO : Atık Yağ Numunesinin Analiz Sonuçları;

KİRLLETİCİLER	ÖLÇÜLEN DERİŞİM		Analiz Yöntemi
Bor (B)	330 mg/kg	% 0.033	Asitte Parçalama ve SM 4500 – B B

Rapor DEÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nün izni olmadan kopyalanamaz.

Adres: D.E.Ü. Mühendislik Fak. Çevre Müh. Böl. Tınaztepe Kampüsü 35160 BUCA / İZMİR
 Tel: 0 232 412 71 00 ; Fax: 0 232 453 11 43

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : APAY, Serkan
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.05.1980 İzmir
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (232) 478 48 87
 Cep : 0 (505) 306 04 49
 e-mail : serkanapay2000@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Metal Eğitimi	----
Lisans	Gazi Üniversitesi/Metal Öğretmenliği	2004
Ön lisans	Celal Bayar Üni./M.Y.O./Kaynak Tek.	2001
Lise	İzmir Mersinli Endüstri Meslek Lisesi	1997

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005–2007	İzmir Başaran Kazan	Kalite Kontrol Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Sinema, Bilgisayar teknolojileri, Futbol, Bilardo, Basketbol