

REFRAKTER HARMAN KARIŞTIRICI BIÇAKLARINDA
AŞINMAYA DAYANIKLI KAPLAMALARIN
(CrC, WC Tel, WC Plaka) BIÇAK ÖMRÜNE
ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Barkın MİNEZ

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak - 2015

REFRAKTER HARMAN KARIŞTIRICI BIÇAKLARINDA AŞINMAYA DAYANIKLI
KAPLAMALARIN (CrC, WC Tel, WC Plaka) BIÇAK ÖMRÜNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI

Barkın MİNEZ

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

DanıŐman: Prof. Dr. Ramazan KÖSE
Ortak DanıŐman: Prof. Dr. Serdar SALMAN

Ocak - 2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Barkın Minez'in doktora tezi olarak hazırladığı "Refrakter Harman Karıştırıcı Bıçaklarında Aşınmaya Dayanıklı Kaplamaların (CrC, WC Tel, WC Plaka) Bıçak Ömrüne Etkilerinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

15/01/2015

Üye : Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Üye : Prof. Dr. Rasim İPEK

Üye : Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL

Üye : Doç. Dr. İsmet ÇELİK

Üye : Doç. Dr. Özkan GÜLSOY

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../2015 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**REFRAKTER HARMAN KARIŞTIRICI BIÇAKLARINDA AŞINMAYA DAYANIKLI
KAPLAMALARIN (CrC, WC Tel, WC Plaka) BIÇAK ÖMRÜNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Barkın MİNEZ

Makine Mühendisliği, Doktora Tezi, 2015

Tez DanıŐmanı: Prof. Dr. Ramazan KÖSE

ÖZET

Bu çalışmada, endüstriyel bir problemin çözümü amaçlanmıştır. Refrakter sanayinde kullanılan harman hazırlama karıŐtırıcılarının bıçaklarındaki Şiddetli aşınma sorununun önüne geçmek ve ömürlerini uzatmak için 3 tip kaplama denenmiŐtır.

“Kütahya Manyezit İŞletmeleri Refrakter Fabrikasında” alıŐan bir harman karıŐtırıcısına, aynı anda çalışmak üzere “CrC, WC Tel, WC Plaka” kaplı bıçaklar yerleştirilmiştir. Bu bıçaklar yaklaşık 1 yıl gözlenmiŐ ve aşınan parçaların mikroyapıları incelenmiştir.

En uzun ömür, toz metalürjisi ile üretilmiş WC plakada sağlanmış olup, 3.780 \$ masraf ile yapılan kaplama, 1 karıştırıcının yılda 510.000 \$ değerindeki üretim kaybını engellemiŐtir.

Bir aşınma probleminde, aşınan-aşındıran-aşınma ortamı gibi konuların doğru değerlendirilmesi için, Kaizen ve 6 Sigma metotlarının kullanımı ile ilgili bir örnek uygulamaya da yer verilmiştir. Bu tür metodolojilerin kullanılması, çözüme en kısa yoldan ulaşmak için büyük önem arz etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Abrasif aşınma, Manyezit, Refrakter , Harman hazırlama mikseri, CrC kaplama, WC kaplama.

**RESEARCH ON THE EFFECTS OF THE ABRASION RESISTANT COATING (CrC,
WC Wire, WC Plate) OF REFRACTORY MONOLITHIC MIXER BEATERS TO
BEATER LIFE**

Barkın MİNEZ

Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis, 2015

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Ramazan KÖSE

SUMMARY

By this study, it is aimed to solve an industrial problem. Three different types of coatings were tried and tested to prevent the severe abrasion problems of the refractory monolithic mixer beaters used for material preparation in refractory industry and to extend their lifetime.

"CrC, WC Wire, and WC Plate" coated blades were installed together in a batch monolithic mixer to run simultaneously, at the Factory of Kütahya Magnesite Refractory Corporation. These blades (beaters) have been observed for about one year and the microstructures of the wearing parts were analyzed.

The longest lifetime of all is reached with the WC Plate coating which is provided through powder metallurgy, furthermore a typical production loss of \$510.000 per year for one mixer were prevented by the coating cost of \$3.780.

A sample application about the uses of Kaizen and 6-Sigma methods, in order to reach correct evaluations about wearing parts – abrasive effects - abrasion conditions at an abrasion problem, is also included in this study. The use of these types of methodologies is of great importance to achieve the shortest path to the solution.

Keywords: Abrasion wear, Magnesite, Refractory, Monolithic mixer, CrC coating, WC coating.

TEŞEKKÜR

Tezimi yöneten, değerli bilgileriyle ve tavsiyeleriyle sürekli beni doğru bir çalışma ortaya koyabilmem için titizlikle yönlendiren sayın hocalarım Prof. Dr. Ramazan KÖSE ve Prof. Dr. Serdar SALMAN'a teşekkür ederim.

Fabrikadaki yoğun çalışma şartlarıma anlayış gösteren, bu nedenle akşamları çok geç saatlere kadar ders yapmaya katlanan sayın hocam Prof. Dr. Mustafa YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Beni her daim yüreklendiren, adının sonuna kadar hakkını veren Sn. Mevlana Celaleddin Rumi GÖKÇEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Büyük KÜMAŞ okulunun iki büyük öğretmeni ve yöneticilerim Sn. Hüseyin GÜRCAN ve Sn. Nurettin AKÇAKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu yola çıkmama vesile olan dostum araştırmacı yazar Serdar Atabay'a, yardımlarını esirgemeyen KÜMAŞ Kalite Müdürü Sn. Mustafa ÇAVAÇ ve Paşabahçe mühendislerinden Selim TAŞCI'ya, birlikte çalışmaktan zevk ve onur duyduğum KÜMAŞ Mühendislik Müdürlüğü ekibime teşekkür ederim.

Hayır dualarını eksik etmeyen, yaşam koçum ve kadim dostum mühendis Sn. Mustafa YENİPAZAR'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Öğrencileri gibi beni de tomurcuk açma derdinde yetiştiren; anne ve babamım saygıyla ellerinden öper ve bu yolda bana örnek olan kardeşim Dr. Berk MİNEZ'e teşekkür ederim.

6 yıl boyunca, yoğun fabrika yaşamıyla beraber doktora çalışmalarımı yürütmekte bana sabırla destek olan hayat arkadaşım, eşim Zeynep MİNEZ'e ve kendi zamanlarından bana verirken, kapının ardında sessiz durmaya çalışan evlatlarım Bilge ve Onur'a teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. MANYEZİT ESASLI REFRAKTER TUĞLA ÜRETİMİ	3
2.1. Kırma, Eleme, Öğütme	3
2.1.1. Kırma	3
2.1.2. Eleme	5
2.1.3. Öğütme.....	6
2.2. Harmanların Hazırlanması	8
2.2.1. Mikserler	8
2.2.2. Sıcak operasyon mikseri	10
2.2.3. Soğuk operasyon mikseri	10
2.2.4. Kollerganglar	10
2.3. Şekillendirme	11
2.3.1. Preslerde şekillendirme	11
2.3.2. El ile şekillendirme	13
2.4. Pişirme Ve Temperleme	13
2.4.1. Pişirme	13
2.4.2. Temperleme.....	15
2.4.3. Emprenye	16
2.5. Refrakterlerin Kullanıldığı Yerler	17
2.5.1. Demir – çelik sanayi	17
2.5.2. Çimento sanayi.....	19
2.5.3. Kireç sanayi	20
2.5.4. Cam sanayi.....	21
2.5.5. Bakır sanayi	21
2.5.6. Bakır ve demir dışı metallere.....	21
3. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI.....	23

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.1. Aşınma Safhaları	25
3.1.1. Başlangıç aşınması	25
3.1.2. Asıl (kararlı) aşınma safhası	25
3.1.3. Aşırı (şiddetli) aşınma safhası	26
3.1.4. Tribo sistemler	26
3.2. Aşınma Mekanizmaları	26
3.2.1. Adhesif aşınma	28
3.2.2. Abrasif aşınma	29
3.2.2.1. İki elemanlı abrasyon	30
3.2.2.2. Üç elemanlı abrasyon	31
3.2.3. Eroziyon aşınma	32
3.2.4. Korozif aşınma	33
3.2.5. Yorulma aşınması	34
3.2.6. Termik aşınma	35
3.2.7. Kaviteleşme aşınması	36
3.3. Aşınma İle İlgili Literatür Çalışmaları	37
3.4. Aşınma Deneyleri Hakkında Literatür Bilgisi	43
3.4.1. Aşınma ölçüm yöntemleri	43
3.4.2. Aşınma deney yöntemleri	44
3.4.3. Aşınma deneylerinde kullanılan bazı aşınma deney cihazları	45
3.4.4. Taramalı elektron mikroskopu	48
3.4.5. EDX analizi	50
3.5. Uygun Aşınma Önleminin Kullanılması İçin Yararlanılabilecek Metodolojiler	52
3.5.1. 6 Sigma metodu	52
3.5.2. Kaizen metodu	54
4. YÜZEY KAPLAMA İŞLEMLERİ	56
4.1. Mühendislik Amaçlı Kaplamalar	56
4.2. Korozyondan Korunmak Amaçlı Kaplamalar	67
4.2.1. Dekoratif kaplamalar	67
4.3. Metalik Kaplamalar	67
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	79
5.1. Deneyde Kullanılan Ekipman Ve Malzemeler	79
5.1.1. Kuru karıştırıcının taban (Ana) malzemesi	79
5.1.2. Kullanılan kaplamalar	79
5.1.2.1. CrC elektrod dolgu	79
5.1.2.2. WC tel ile dolgu (oksi asetilen)	80
5.1.2.3. WC plaka kaplama	80

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2. Aşınma Deneyi.....	80
5.2.1. Laboratuar ortamında yapılan deneysel işlemler	80
5.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ve Sertlik İncelemeleri	83
5.3.1. Abrasiv aşınma deneylerinin yapılması	83
5.4. SEM İncelemeleri Ve EDX Çalışmaları.....	86
6.DENEY SONUÇLARI	89
6.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	89
6.2. Aşınma Deney Sonuçları.....	91
6.3. Mikroyapı İncelemeleri.....	95
6.3.1.SEM analizleri	95
6.3.1.1. WC tel kaplamanın SEM analizi.....	95
6.3.1.2. CrC elektrod kaplamanın SEM analizi (aşınma sonrası)	97
6.3.1.3. WC plaka kaplamanın SEM analizi (aşınma sonrası).....	98
6.3.2. EDX analizleri	99
6.3.2.1. WC Tel kaplamanın EDX analizleri.....	99
6.3.2.2. CrC Elektrod kaplamanın EDX analizi.....	107
6.3.2.3. WC Plaka kaplamanın EDX analizi.....	111
6.4. Servis Şartlarında Aşınma Davranışı	116
6.4.1. Numunenin hazırlanması	116
7. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ.....	118
7.1. Genel Değerlendirme	118
7.2. Sonuç.....	130
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	132

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Konik kırıcı.....	3
2.2. Konik kırıcı temsili kesit görüntüsü.....	4
2.3. Titreşimli elek şekli	5
2.4. Konsantre cevher eleği.....	6
2.5. Bilyalı değirmen temsili şekli	7
2.6. Sinter manyezit öğütme değirmeni.....	7
2.7. Kuru karıştırıcı temsili şekli.....	9
2.8. KÜMAŞ Harman hazırlama mikseri.....	9
2.9. Hidrolik pres temsili şekli.....	11
2.10. Hidrolik şekillendirme presi ve robotu.....	12
2.11. Tünel fırın temsili resmi.....	14
2.12. Refrakter tünel fırını.....	15
2.13. Refrakter temperleme fırını.....	16
2.14. Refrakter zift emprenye fırını.....	17
2.15. Manyezit ark ocağı ve potası.....	18
2.16. KÜMAŞ Ark ocağı refrakter ürünleri.....	18
2.17. KÜMAŞ Döner fırın III – devreye alma esnasında.....	19
2.18. KÜMAŞ Döner fırın refrakter dizayn örneği.....	19
2.19. Kireç fırını refrakter dizayn örneği.....	20
2.20. Bakır fırını.....	22
2.21. KÜMAŞ Örnek nikel ocağı refrakter dizaynı.....	22
3.1. Mekanik ekipmanların kullanılamaz hale gelme nedenleri.....	23
3.2. Aşınma sisteminin temel bileşenleri.....	24
3.3. Triboloji konuları.....	24
3.4. Aşınma safhaları.....	25
3.5. Aşınma mekanizmalarından en yaygın olanları.....	27
3.6. Aşınma tiplerinin rastlanma sıklığı.....	28
3.7. Adhesif aşınma mekanizması.....	29
3.8. Abrasif aşınma mekanizması.....	30
3.9. Kontrol valfinde erozyon aşınması	33
3.10. Korozyon aşınması	34
3.11. Yorulma aşınması	35

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.12. Wöhler eğrisi	35
3.13. Termik aşınma	36
3.14. Kavitasyon aşınması	36
3.15. ASTM G65-94 Deneş düzeneği.....	46
3.16. Pin on flat düzeneği.....	46
3.17. Ball on flat düzeneği	47
3.18. Ball on disk düzeneği	48
3.19. 1940 yılında SEM mikroskobu (solda) , 2014 yılında SEM (sağda)	49
3.20 Atom numarasına bağlı kontrast farkı	50
3.21. Elementlerin enerji karakteristikleri.....	51
3.22. Kaizen israfla mücadele başlıkları	55
4.1. TIG Kaynağı gösterimi.	58
4.2. MIG Gösterimi.....	58
4.3. Plazma ark kaynağı gösterimi.	59
4.4. Sert lehimleme fırını.	60
4.5. Sıcak daldırma ile galvaniz kaplama.....	69
4.6. Akımsız nikel kaplama gösterimi.....	69
4.7. PVD fırını.....	73
4.8. Plazma püskürtme	76
4.9. Hipersonik püskürtme	77
5.1. a) Tel erozyon yöntemi ile kesim yapılan AISI 1010 çeliği örneği, b) Tel erozyon yöntemi ile kesilerek elde edilen 12 mm ayrıtlara sahip küp numune.....	81
5.2. a) Tel erozyon yöntemi ile kesim yapılan Citodur V1000 elektrot kaplama örneği, b) Tel erozyon yöntemi ile kesilerek elde edilen 12 mm ayrıtlara sahip küp numune.....	82
5.3. a,b Tel erozyon yöntemi ile kesim yapılan WC plaka kaplama örnekleri.....	82
5.4. a) Görüntü analiz sistemi, b) Sertlik ölçüm cihazı, c) Hassas terazi, d) Struers Tegrapol-21 zımpara ve parlatma cihazı	84
5.5. Aşınma testinde kullanılan cihazın elemanlarının gösterilmesi	85
5.6. Aşınma testinde numune ve karşı malzemenin yerleştirilmesi	86
5.7. Servis şartlarında çalışmak üzere hazırlanan numuneler.....	87
5.8. Analizlerde kullanılan Carl Zeiss Supra 50 VP SEM&EDX cihazı.....	87
5.9. Numuneler üzerinde analiz yapılırken bir görüntü	88
6.1. WC Plaka sertlik grafik ve denklemi.	90

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.2. CrC Dolgu sertlik grafik ve denklemi.	91
6.3. AISI 1010 çeliğinin 42 N yükte SiC aşındırıcı zımpara kağıdı karşısındaki ağırlık kaybı. .	92
6.4. Citodur V1000 elektrot kaplama katının 42 N yükte SiC aşındırıcı zımpara kağıdı.....	92
6.5. WC plaka ile kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 42 N yükte SiC aşındırıcı zımpara kağıdı karşısındaki ağırlık kaybı.....	93
6.6. Karşılaştırmalı aşınma grafiği.	94
6.7. Karşılaştırmalı aşınma grafiği.	94
6.8. WC Tel kaplama optik SEM (300 X) – Numune ön yüzeyi.....	95
6.9. WC tel kaplama ara kat görüntüsü (kaplama katı) – yan yüzey.	95
6.10. CrC kaplama SEM a) 300 X (ön yüzey) b) 150 X arakat (yan yüzey).	97
6.11. WC plaka kaplama ara kat görüntüsü a) 300 X (ön yüzey) b) 150 X arakat (yan yüzey). 98	
6.12. WC Tel kaplama EDX çizgi analizi.	100
6.13. WC tel kaplama ara kat EDX içerik analizi (kaplama tarafı).....	102
6.14. WC Tel ara kat EDX içerik analizi (taban tarafı).	103
6.15. WC Tel kaplama EDX analizi (ortalama).	104
6.16. WC Tel kaplama, (Beyaz) W bölgesi nokta EDX analizi.	105
6.17. WC Tel kaplama EDX çizgi analizi.	106
6.18. CrC Kaplama EDX çizgi analizi.	107
6.19. CrC Kaplama EDX ortalama içerik analizi.....	109
6.20. CrC Kaplama ara kesit EDX analizi.	110
6.21. WC Plaka kaplama ara kat EDX analizi.	111
6.22. WC Plaka kaplama EDX ortalama içerik analizi.	112
6.23. WC Plaka kaplama EDX nokta analizi.	113
6.24. WC Plaka arakat EDX analizi (sert lehimleme katı).....	114
6.25. WC Plaka kaplama ara kat EDX analizi.	115
6.26. Servis şartları için hazırlanmış test numune seti (408 saat sonunda aşınarak testten çıkan CrC numune işaretlenmiş olarak).....	117
7.1. Servis şartları için hazırlanan karıştırıcı bıçak takımı.	122
7.2. Karıştırıcı erken dönem gözlem fotoğrafları (a:23 Haziran ve b:28 Temmuz 2013).	123
7.3. Çalışma saati: 2939 Karıştırıcının durumu (aşınma başlangıçları).	124
7.4. Çalışma saati:4186 WC kaplı bıçak uçlarında aşınma.	125
7.5. Çalışma saati: 4765 , WC Tel kaplamanın aşındığını gösteren görüntü.....	126
7.6. Çalışma saati:7267 – WC plakaların aşınma durumu (bıçak uçlarında aşınma belirtileri).127	

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.7. Çalışma saati 7700 – WC plakaların aşınma durumu.	128
7.8. "8111 saat sonunda, WC Plakaların aşındığını gösteren görüntüler.	129

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Volframın birleştirilmesinde kullanılan birçok ilave metaller ve saf metaller .	66
5.1. "1020 Çeliği" Mekanik özellikleri.	79
5.2. CrC Kaplama için elektrot özellikleri	79
5.3. WC Tel özellikleri.	80
5.4. Kaynak kaplama işleminde kullanılan işlem parametreleri ve kaplamanın kimyasal bileşimi.	81
5.5. Tel erozyon yöntemi ile kesme işleminde kullanılan işlem parametreleri.	83
6.1. Volfram karbür plaka kaplama sertlik deney sonuçları üst yüzeyden uzaklık.	89
6.2. Krom karbür dolgu kaynağı kaplaması sertlik deney sonuçları üst yüzeyden uzaklık.	90
6.3. Numunelerin aşındırma testi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri.	91
7.1. Numunelerin çalışma saatleri.	119
7.2. Kaplama maliyetleri.	119
7.3. Kaplama türüne göre üretim kayıpları.	120
7.4. Karıştırıcı örnek üretim ekran görüntüsü (1 günde karıştırıcının hazırladığı 63 harmanı göstermektedir – 22.05.2014 günü saat 00:58 – 22:45 arası).	121
7.5. Aşınmaya karşı önlem için 6 Sigma ile uygulama seçimi.	131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
C	Karbon
°C	Derece santigrat
µm	Mikrometre
A	Akım şiddeti (I)
AIISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
cm ³	Santimetreküp
CrC	Krom Karbür
Cu	Bakır
dak	Dakika
Fe	Demir
gr	Gram
HRc	Rockwell sertlik değeri
HV	Vickers sertlik değeri
ISO	Uluslararası Standartlar Enstitüsü
m	Metre
mbar	Milibar
mm	Milimetre
mm ²	Milimetrekafe
mm ³	Milimetrekafe
MPa	Megapaskal
N	Newton
Ra	Ortalama pürüz yüksekliği
Rq	Standart sapma pürüzlülük değeri
Rz	Maksimum pürüz yüksekliği
s	Saniye
sa	Saat
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiC	Silisyum karbür
TIG	Gaz tungsten ark kaynağı
v	Hız
V	Volt
WC	Volfram karbür

1. GİRİŞ

Tekerleğin icadından önce, ağır yükleri silindirik kalaslar üzerinde kaydırarak bir yerden bir yere taşıyan insanlık, bu kalasları ıslatarak sürtünmenin ve aşınmanın önüne geçme konusunda ilk adımları atmıştır.

Tekerleğin M.Ö. 3000'li yıllarda Sümerler tarafından keşfiyle beraber insanlık dönel elemanların yataklanması ve bu yataklardaki aşınma problemleriyle tanışmış ve bunlara hal çareleri aramaya koyulmuştur.

Tekerleğin icadından sonra, ilk motorlu ve tekerlekli aracın icat edilmesi, yaklaşık 4750 yıl almıştır.

Elektrikle ilgili ilk çalışmalar, M.Ö. 600 lü yıllarda başlamışken, Alexander Graham Bell 'in telefonu icadı ve Edison'un karbon flamanlı akkor lambayı icad etmesi, bundan ancak 2500 yıl sonra olabilmıştır.

İlk Uçağın uçurulması ise, ilk arabadan sadece 15 yıl sonra, ilk savaş uçağının uçurulması, sadece 30 yıl sonra olmuştur.

Hızla gelişen teknolojiye paralel olarak, bugün başlı başına bir bilim dalı olan "Triboloji",

- Sürtünme
- Aşınma
- Yağlama

konularını inceleyen bilim ve teknoloji dalıdır.

Triboloji bilim dalının bugüne kadar yapmış olduğu çalışmaları ve metodolojisini inceleyerek, fabrikalarımızda ülke ekonomisine ciddi katkılarda bulunmak mümkündür.

Metal dışı toprak türü mineral aşındırıcı ortamlarda çalışan pek çok endüstriyel kuruluştta, makine mühendislerinin en büyük mücadele konularının başlarında "abrasiv aşınma" gelir.

Gerek mineral malzemenin doğrudan temas ettiği transfer noktalarında, kırma-eleme öğütme makinelerinde, gerekse tozundan etkilenen yataklama vb. elemanlarda, abrasiv aşınmadan ciddi şekilde etkilenir.

Metal metale sürtünmeyi konu alan adhasiv aşınmaya göre, abrasiv aşınma üzerine bilgiye daha az rastlanmaktadır. Özellikle doğrudan endüstriyel işletmelerde çalışan mühendisler, aşınma önlemleri üzerine çoğu zaman yeterli bilgiye sahip olamamaktadır. Öyle ki, yüzey sertliği ile aşınma direnci arasındaki ilişki , çoğu zaman tam açıklanamamaktadır. Bu durum, gereksiz yere tekrarlanan onarımlar, bu esnada önemli üretim kayıpları, bakım maliyetlerinin yükselmesi, kısaca ülke ekonomisine zarar ile sonuçlanmaktadır.

KÜMAŞ Fabrikası 1976 yılında üretime başlamış, ancak 1990 yılına kadar yarı mamul sayılan “Sinter Manyezit” üretmiştir. 1990 yılında, ağırlıklı olarak Almanya yapımı makinelerle “Refrakter Üretim Tesisi” kurulmuştur. İlk yıllarda bakım işçilik süreleri ve maliyetleri oldukça düşük olmasına karşın, birkaç yıl sonra hızla artmaya başlamıştır. Bunun nedeni ise, aşınma önlemi alınmış parçaların yerine, ya sıradan malzemelerin ya da aşınma direnci düşük nitelikli malzemelerin kullanılmasıdır. En çarpıcı örneklerden biri, bilyalı değirmen üzerinde bulunan aşınma astarları, işletme devreye girdikten tam 10 yıl sonra bozulmuş ve yenilenmiştir. Ancak yurt içinden uygun özellikte olmayan astarlar kullandığı için, astar değiştirme süresi (üreticiye göre) 1 yıla kadar düşmüştür.

Bu konulara çözüm bulunabilmesi için, triboloji bilimi hakkında bilgi sahibi olmak gerekmektedir.

KÜMAŞ refrakter tuğla prosesinde kapasiteyi etkileyen en önemli faktörlerden biri, şekillendirme preslerinin kesintisiz olarak beslenmesidir. Preslere beslenecek malzeme, kuru tip diye anılan harman mikserlerinde hazırlanır. Manyezitin aşındırıcı bir maden olması ve özellikle döner fırınlarda sinterlendikten sonra bu özelliğinin artması sebebiyle, mikser karıştırıcı bıçaklarında şiddetli bir abrasif aşınma meydana gelir. Bu mikserlerde aşınan bıçakların değişimi için 1 vardiya temizlik ve 1 vardiya mekanik değişim süresi gerekmekte olup, bu esnada (2 vardiyada) 30.000 \$ değerinde refrakter tuğla üretimi kayıp olmaktadır. Bu da 1 yılın sonunda toplam 510.000 \$ değerinde üretim kaybına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, özellikle manyezit ve benzeri aşındırıcı maden proseslerine yönelik, hem üretim kayıplarını azaltacak hem de bakım maliyetlerini düşürecek aşınmaya dayanıklı kaplama katları üzerine çalışılmıştır. Bununla beraber, aşınma ve önlemlerinin mekanizmaları açıklanılmaya çalışılmıştır. Bu sayede, abrasif aşınmanın meydana geldiği pek çok nokta için çözüm üretilebilmesi amaçlanmıştır.

2. MANYEZİT ESASLI REFRAKTER TUĞLA ÜRETİMİ

Tüm refrakter malzemelerin üretiminde uygulanan operasyonlar ve prosesler birbirinin benzeridir. Refrakterlerin üretiminde, aşağıda belirtilen operasyonlar ve prosesler bir sıra dahilinde uygulanır.

2.1. Kırma, Eleme, Öğütme

Refrakterlerin üretiminde, hammaddelerin belirli boyutlarda kullanılması gerekir. Genelde tüm refrakterlerin üretiminde, 0-4mm, 0-6mm ve 0-8mm boyutuna kırılmış hammaddeler, belirli elek fraksiyonlarında karıştırılarak kullanılırlar. Bu operasyonun amacı üretilen tuğla ve harç'ta istenilen hacim ağırlığı (Bulk Dansite) ve poroziteyi yakalamaktır. Bu tuğla ve harç üretiminde kullanılan tane fraksiyonları, her üreticinin reçetesine göre değişmektedir.



Şekil 2.1. Konik kırıcı (Dış görünüm).

2.1.1. Kırma

Boyut küçültmede kullanılan makinelere “kırıcı” adı verilir. Refrakter endüstrisinde kullanılan kırıcılar çok çeşitlidir. Kırıcı seçiminde aranan özellik, hammaddenin istenilen tane boyutlarına kırılabilmesidir. Kırma sonrası istenmeyen tane fraksiyonları oluşursa değerlendirilemez ve zayıt oluşur, bunun sonucunda da maliyetler yükselir. Kırma

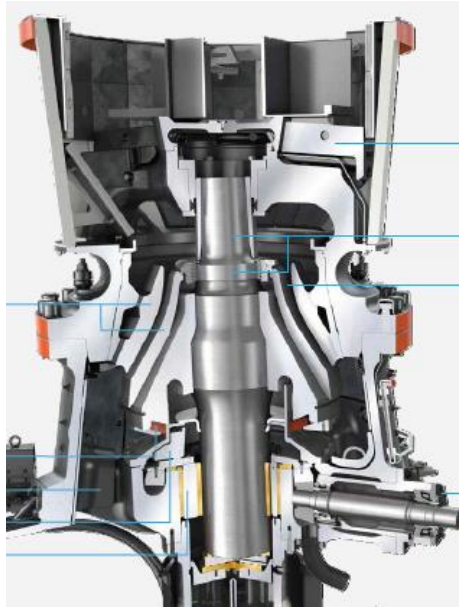
operasyonunda istenen boyuta ulaşmak için birkaç kırıcı seri halde kullanılabilir. Bu durumda istenmeyen fraksiyonlar oluşmaz.

Kırma operasyonunda, 100-200 mm boyutlarındaki ham maddelerin 0-4 mm ve 0-6 mm'ye indirilebilmeleri için iki değişik kırıcı kullanmak gerekir. İlk kırma işlemlerinde genelde çeneli kırıcılar kullanılır. Çeneli kırıcılar malzemeleri 1/3 oranında küçültürler. Örneğin 300mm boyutundaki malzemeler 100 mm. boyuna indirilir. Çeneli kırıcıdan sonra ikinci kırma işlemleri, konik kırıcılar, impak kırıcılar ve çekiçli kırıcılardır. Bu kırıcılarda boyut küçültme oranı biraz daha yüksektir. Örneğin çekiçli kırıcılarda bu oran 1/5'e yükselebilir. Fakat kırma sırasında fazla tozlanma meydana gelir.

Refrakter Sanayinde en çok çeneli ve konik kırıcılar kullanılır.

Kırma işleminde %100 verim almak istiyorsak, kırıcı sisteminin "Kapalı Devre" çalıştırılması gerekir. Aksi halde kırılan malzemenin %100'ünü istediğimiz boyuta indiremeyiz.

Kırıcıda kırılan malzeme bir titreşimli eleğe verilir. Bu eleğin boyutu istenen tane boyutu sınırdır. Örneğin 0-4 mm istenirse, eleğin üstünü 4mm'lik elek teli ile kaplanır. -4 mm malzeme ürün olur, +4 mm ise kırıcıya kırılmak üzere tekrar geri gider. Refrakter sanayinde ikinci kırıcıların (Secondary Crushers) muhakkak kapalı devre çalıştırılması gerekir. Aksi halde tuğla ve harç harmanlarında boyut problemi yaşanır (Gürcan, 2010) .



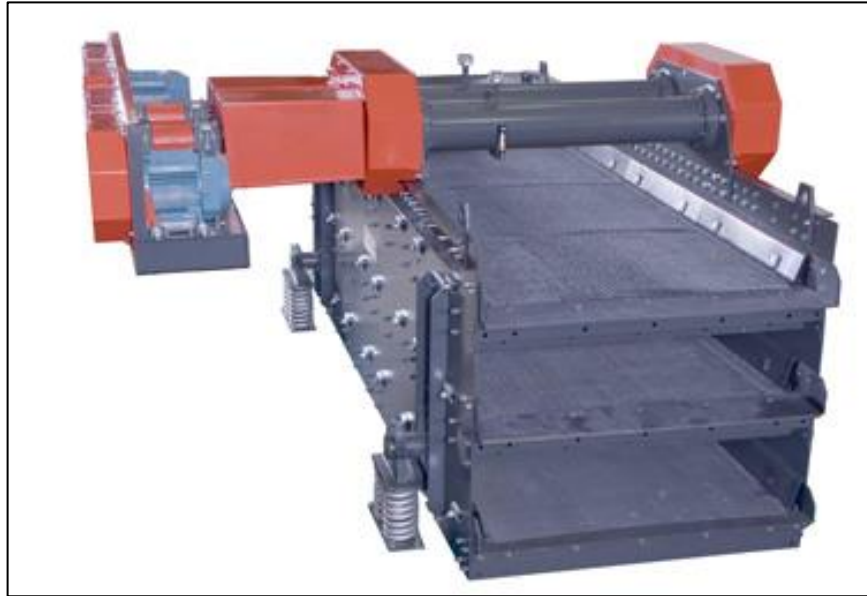
Şekil 2.2. Konik kırıcı temsili kesit görüntüsü (<http://www.mining.sandvik.com>).

2.1.2. Eleme

Kırıcılarda kırılan hammaddeler, silolara gönderilirken tuğla harmanında istenilen boyutlara elenerek gönderilir. Örneğin 0-4 mm fraksiyonunda bir harman yapmak gerekiyorsa, malzeme 0-1, 1-2 , 2-4 mm olacak şekilde ayrılabilir. Malzemeler ne kadar çok fraksiyonlara ayrılırsa yapılan harmanların elek dağılımı, her harmanda aynı olur. Fakat bu işlem pratik olmadığından masraflıdır.

Eleme, elek denilen ekipmanlarla yapılır. Eleklere eleme verimini arttırmak için hareket verilir. Bu hareketler, titreşim ve ileri geri sallamadır. Genelde titreşimli elekler kullanılır. Elek makinesi üzerinde elek telleri bir katlı olabileceği gibi 2-3 katlı da olabilir. Yani bir elek makinesi ile iki üç fraksiyon elde edilebilir.

Elek makinelerinde, elenen malzemenin eleği terk etmesi için bir miktar eğim vardır.



Şekil 2.3. Titreşimli elek şekli (<http://www.mining.sandvik.com>).

Bu eğimin olması eleğin randımanını da etkiler. Elek kapasitesi ile elek yüzeyinin uygun olması gerekir. Aksi takdirde eleme verimi iyi olmaz. Dolayısı ile elek fraksiyonlarında istenmeyen boyutlar oluşur. Örneğin 2-4 mm fraksiyonunda eleme iyi olmazsa 2 mm'nin altına geçecek malzeme 2-4 mm arasında kalır.



Şekil 2.4. Konsantre cevher eleği.

Elek boyutları uluslararası standardize edilmiştir. Elek boyutunu aynı dilden konuşabilmek için bir elektteki elek açıklığı ile bir sonraki elek açıklığı arasında bir oran belirlenmiştir. Bu birbirini izleyen iki eleğe ait delik alanlarını benzer büyüklükleri arasında $\frac{1}{\sqrt{2}}$ orana sahip olması gerekir. Mesh, bir elektteki 1 inch'e tekabül eden delik sayısıdır. Standartlarda mesh karşılığı açıklıklar mm olarak verilmiştir. En çok kullanılan elek standartları ASTM ve DIN standartlarıdır.

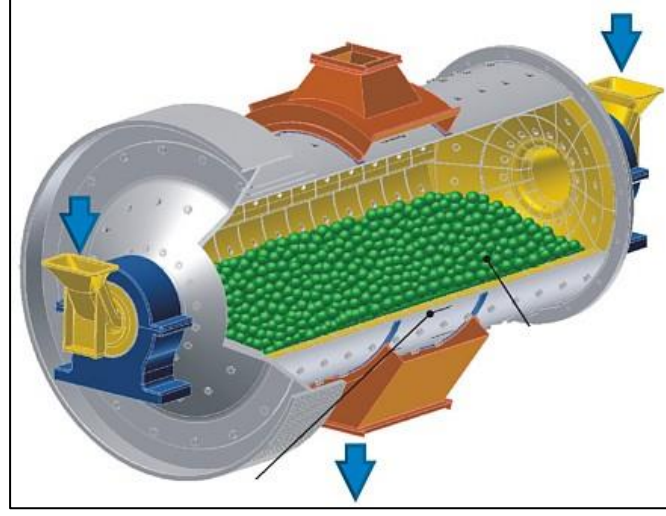
Refrakter endüstrisinde elenen hammaddeler, elek fraksiyonlarına göre ayrı ayrı silolarına gönderilir. Bir fabrikadaki silolarda elek analizleri bellidir ve tuğla formülleri bu analizlere göre yapılır (Gürcan, 2010).

2.1.3. Öğütme

Bir refrakter malzemenin üretimi sırasında ürün tuğla ise, istenilen hacim ağırlığı ve yoğunluğu yakalamak için hammaddelerin bir kısmı 100 mikron altına öğütülür. Bu 100 mikron içersinde 1 mikrona kadar dağılım vardır. Bu tane fraksiyonuna “pudra” adı verilir. Pudra tuğlanın matrisini teşkil eder. Matris yapısı tuğlada çok önemlidir.

Refrakter endüstrisinde birçok değirmen çeşitleri vardır. Bunlar;

- Bilyalı Değirmen
- Çubuklu Değirmen
- Çekiçli Değirmen
- Döner Toplu Değirmen



Şekil 2.5. Bilyalı değirmen temsili şekli (<http://www.gpse.de/>).

Bunların içersinde en çok kullanılanı bilyalı değirmenlerdir. Fakat bilyalı değirmenlerin elektrik enerjisi sarfiyatları yüksektir. Değirmenlerde öğütülen malzemeler havalı seperatör denilen aletlerden geçirilerek, pudra olmayanlar değirmene geri gönderilir. Dolayısı ile değirmenler de kapalı devre çalışırlar.

Bilyalı değirmenlerde öğütmeyi bilyalar sağlar. Bilyalar 10mm'den 100mm'ye kadar çapta yapılabilirler. Genelde çelik bilyalar kullanılır. Fakat demir kirleticiliği istenmezse seramik bilyalar da kullanılır. Refrakter sektöründe değirmenler kuru çalıştırılır. Döner toplu değirmenlerde ise pudra edilen malzeme değirmen ortamından vakumla çekilerek ayrılır.



Şekil 2.6. Sinter manyezit öğütme değirmeni.

Değirmenlerde öğütülen pudralar silolara hava akımı ile gönderilir. Buna pnömatik iletim de denir. Buralarda kullanılan havanın kuru hava olması gerekir. Hava içinde rutubet varsa silolarda kesekleşmelere (bir çeşit topaklanma) neden olur. Ayrıca nem istenmeyen tuğla üretiminde kullanılırsa (örneğin dolomit) tuğlaların hasara uğramasına neden olur.

Çubuklu değirmenlerde, bilya yerine çelik çubuklar kullanılır. Bu değirmenlerde öğütme çok ince olmaz. Çubuklu değirmenler genelde, tane boyunda sınıflandırma yapar. Bu nedenle, bazı fabrikalarda bilyalı değirmen öncesi kullanılarak, ara fraksiyonların oluşması sağlanır (Çavaç, 2008) .

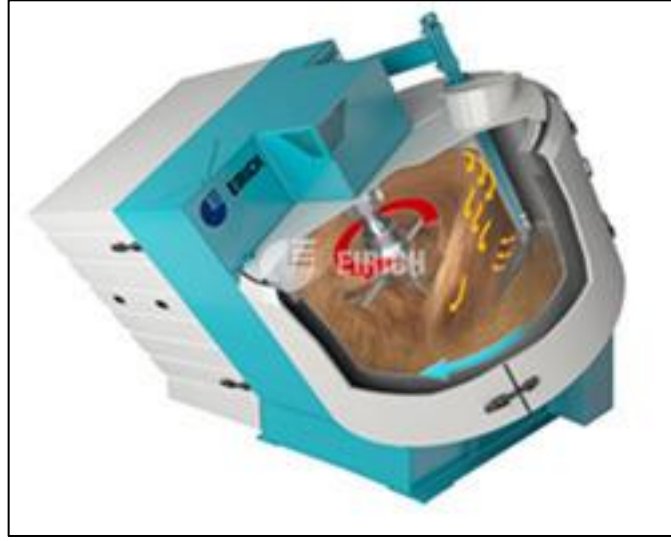
2.2. Harmanların Hazırlanması

Kırılan ve istenilen boyutlara getirilen hammaddeler silolara alınmıştır. Üretilecek tuğla formülüne göre gerekli fraksiyonlar silolardan tartılarak alınır. Hammaddeler genelde 1 ve 1.5 ton kapasitede hazırlanırlar.

Hammaddeler silolardan sabit veya gezici kantarlarla tartılarak alınır. Bazı fabrikalarda silo altında ray üzerinde bir kantar gezer ve malzemeyi tartarak bir kaba alır. Tüm malzemeler alındıktan sonra mikserlere gönderilmek üzere küçük silolara aktarılır. Bazı fabrikalarda ise silolar altında sabit kantarlar vardır. Malzemeler silodan bu kantara alınır ve direkt olarak mikserlere gönderilir.

2.2.1. Mikserler

Mikserler üretilecek tuğlaların cinsine göre sıcak ve soğuk olarak çalıştırılırlar. Sıcak mikserlerde, miksere giren harmanlar bir ısıtıcıda ısıtılır. Sıcak mikserlerde karışım sıcaklığı 80-100 °C'dir.



Şekil 2.7. Kuru karıştırıcı temsili şekli (<http://www.eirich.com/en/mixers>).

Harman fraksiyonları 0-1, 1-4, 4-6 ve pudra ise, 0-1, 1-4 ve 4-6mm malzemeler bir tamburda 150-200 °C arasında ısıtılır ve miksera verilir. Bağlayıcı 0-6mm fraksiyonundaki taneciklerin yüzeyini ıslatarak aktif hale getirir. Daha sonra pudra malzeme ve toz bağlayıcılar miksera verilerek, ıslanan yüzeylere tozların yapışması sağlanır ve homojen bir karışım elde edilir.



Şekil 2.8. KÜMAŞ Harman hazırlama mikseri.

Soğuk karıştırmada ise kullanılan bağlayıcılar sıvı olarak veya toz ise suyla birlikte miksera verilir. Soğuk karışımında da ilk önce iri fraksiyonları (0-6mm) miksera verilir ve daha sonra bağlayıcı ve pudra ilave edilir.

Mikserler çeşitli fonksiyonlarda yapılır. Önemli olan harmanın bağlayıcı ile homojen bir şekilde karışmasıdır. Aksi takdirde şekillendirme sırasında birçok sorun yaşanır. (Çavaç, 2008)

2.2.2. Sıcak operasyon mikseri

Yukarıda görüldüğü üzere, Mikser kabı, Yıldız karıştırıcı ve Çatal Karıştırıcı ayrı ayrı devirlerde dönerek harmanı karıştırırlar. Sıcak proseste, Zift ve Reçine bağlı Mag-Karbon ve dolomit tuğlaların harmanları hazırlanır. Zift ve Reçine 100 °C'nin üzerinde sıvılaştığı için harmanlar da bu sıcaklıkta hazırlanır.

2.2.3. Soğuk operasyon mikseri

Burada da mikser kabı ile karıştırıcı ters yönde dönerek harman hazırlanır. Sıyırıcılar çepelere yapışan harmanları sıyırlar.

2.2.4. Kollerganglar

Bazı hallerde hazırlanan harmanlarda karışma yeterli olmaz ve karışmanın yoğurulması gerekir. Kollergang denilen bu aletler harmanı ezerek yoğururlar. Genelde grafitli harmanlarda kollerganglara ihtiyaç duyulur. Yoğurma ile (malzeme + bağlayıcı + ilave maddeler) yoğrulmuş, karışımın iyi olması sağlanır.

Kollerganlı Mikserlerde de, mikser kabı, kollergang, ana mil ve tekerlekler ayrı ayrı dönmektedir. Mikserlerde Harman Hazırlanırken dikkat edilecek hususlar:

Harmanlar tespit edilen "Karıştırma Zamanı"na göre hazırlanmalıdır. Çok fazla karıştırma, bağlayıcıların ve varsa suyun buharlaşmalarına neden olur. Harmanlar kurur ve şekillendirme iyi olmaz.

Az karıştırmada ise, bağlayıcıların tüm harmana yayılması gerçekleşmez ve harmanların bazı kesimlerinde bağlayıcı olmadığından tuğlalar şekillenemez.

Harmanlar hazırlanırken mikserlere verilme sırasına ve zamanına uyulmalıdır. Bilhassa sıcak karışımlarda iri malzemedden sonra bağlayıcıyı vermemek tane yüzeylerinin ıslanmasını önler ve harman iyi olmaz.

Sıcak proseste harman hazırlarken, mikser sıcaklıkları ve malzeme sıcaklıkları sabit olmalıdır. Aksi halde şekillenen tuğlalarda farklı sonuçlar ortaya çıkar.

Harman hazırlama sırasında fazla bağlayıcı kullanmak, tuğlaların çatlamasına, az bağlayıcı kullanmak ise tuğlalarda laminasyona neden olur.

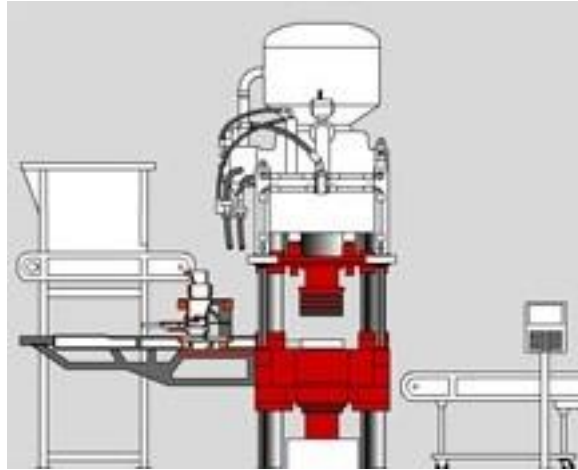
2.3. Şekillendirme

Refrakter tuğlalar iki yolla şekillendirilirler:

- Hidrolik pres ile,
- El ile.

2.3.1. Preslerde şekillendirme

Presler, tuğla üzerine uygulanan basıncın, hidrolik ve mekanik yolla elde edildiği makinelerdir. Son yıllarda, friksiyon mekanik presler yerlerini hidrolik preslere bırakmışlardır. Hidrolik preslerde, hidrolik yağ sıkıştırılarak istenilen basınca ulaşılır. Presler otomatik çalışan makinelerdir. Mikserlerden pres bunkerine gelen harmanlar, otomatik olarak presteki tuğla kalıp boşluğuna dolar, pres pistonu inerek tuğlayı şekillendirir ve şekillenen tuğlalar, otomatik tuğla tutucular ile pres önüne bırakılırlar.



Şekil 2.9. Hidrolik pres temsili şekli (<http://www.laeis.eu/>).

Preslerde, tuğla cins ve kalitelerine göre tuğla yüzeyine uygulanan basınçlar değişir. Bu basınçlar $1000-2000 \text{ kg/cm}^2$ olarak uygulanır. Pişmiş tuğla şekillendirmelerinde $1000-1250 \text{ kg/cm}^2$, Magnazya-Karbon, Alümina-Karbon tuğlalarda ise 2000 kg/cm^2 'dir. Preslerin piston gücüne (uygulayabileceği maksimum güç) ve tuğla yüzeyine göre şekillendirme yapılır. Piston gücü yeterse, preslerde 1 tuğla yerine 2-3 ve daha fazla tuğla bir defada basılabilir.

Bilindiği üzere, tuğla şekil ve boyutları standardize edilmiştir. Bu standart tuğla ölçüleri, her yerde aynı adlandırılır ve uygulanır. Preslerde pres gücüne ve tuğla ölçülerine göre şöyle yapılır:



Şekil 2.10. Hidrolik şekillendirme presi ve robotu.

Preslerde şekillendirme yapılırken, pres basıncının maksimumu bir defa uygulanmaz. Pres basıncı, yine tuğla cinsine ve kalitesine göre kademeli olarak uygulanmalıdır. Aksi halde, tuğla harmanı içerisinde bulunan hava, ani sıkıştırma ile atılamayınca, tuğla yapıldıktan sonra tuğlaya zarar verir. Bu durumda tuğla çatlar, dağılır içinde hava boşlukları kalır. Bunu önlemek için tuğla basıncı harman içerisindeki bazı fiziksel özellikler (örneğin; porozite, hacim ağırlık, soğukta basınca mukavemet gibi) presleme sırasında tuğlaya kazandırılır.

Tuğla şekillendirilmesinde kullanılan kalıplar, özel paslanmaz çeliklerden imal edilirler. Bu çeliklere imalatında 60 Rocwell sertlik kazandırılır ve yüzeyler üç üçgen olacak şekilde taşlanır. Bir tuğla kalıbıyla, 15.000-20.000 adet tuğla basılabilir, daha sonra bu kalıp yüzeyleri taşlanmalıdır. Kalıp ölçüleri, tuğlanın piyasada istenilen ölçülerine göre ayarlanmalıdır. Pişmiş tuğlalar, pişirildikten sonra bir miktar boyutlarında küçülme olur. Bu nedenle şekillenme sırasında tuğlalara, küçülme veya büyüme olasılıklarına göre toleranslar verilmelidir.

Üretilen tuğlalarda, aranan ölçü toleransları, 100 mm'ye kadar ± 2 , 100 mm'den sonra $\pm \%2$ dir. Fakat kalınlık gibi bazı boyutlarda tolerans sıfır veya maksimum 1mm olmaktadır. Tuğla ölçüleri, örüm sırasında yapılacak dizaynlarda ve tuğla sayısı hesaplamalarında önemlidir. Ayrıca tuğlanın çalışma sırasında uzun ömürlü olması için boyut toleranslarının uygun olması gerekir. Aksi takdirde örümler sağlıklı olmayacağı için tuğla aralarına malzeme girebilir ve tuğla ömürleri düşük olur.

Tuğla kalıp imalinde 1.2080 ve 1.2714 çelikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. 1.2714 malzemesi, tuğla yüzeylerini sıkıştıran pistonun ayak imalinde kullanılır.

Presleme sırasında, harmanlar tuğla cinsine bağlı olarak kalıplara yapışarak şekillendirmede sorun oluştururlar. Bunlar oluştuğunda presleme sırasında temizlenir fakat bu işlem üretimi aksatır. Bu nedenle yapışmayı önleyici ve preslemeyi kolaylaştırıcı bazı ajanlar harmanlara ilave edilir (Çakır, 2009).

2.3.2. El ile şekillendirme

Refrakter Tuğlaların kullanım yerlerinde, standart tuğla boyutlarında olan veya olmayan refrakter ihtiyaçları olabilir. Bu refrakterlerin preslerde şekillendirilmesi mümkün olmayabilir veya ekonomik değildir. Bu durumlarda tuğlalar, yine daha ucuz kalıplar içerisinde (Tahta, alüminyum vb.) el ile şekillendirilirler.

El ile şekillendirmede kullanılan harmanlar daha fazla nem içerirken, preslerdeki harmanlarda %2-3 olan nem, el ile şekillendirmede %6-8'lere yükselmelidir. Genelde plastik özelliği fazla olan tuğlalar, el ile şekillendirilirler. El ile şekillenen tuğlalardaki özellikler, preslerde şekillenen tuğlalara göre farklıdır. Bu tuğlaların yüksek sıcaklıkta kullanımları başarılı olmaz. Dolayısıyla düşük sıcaklıktaki bölgelerde el ile şekillendirilen tuğlaların kullanımı daha fazladır.

Son yıllarda, el ile şekillendirmenin mahsurlarını ortadan kaldırmak için preslerde şekillenen büyük tuğla yüzeyleri, kesilerek istenilen tuğlalar elde edilmektedir.

El ile şekillendirmede, harman, tuğla kalıbı içerisine dövülerek sıkıştırılır. Bu işlem havalı tokmaklar ve şişler yardımıyla yapılır. Ayrıca bazı hallerde harmanlar kalıp içerisine vibrasyon yapılarak sıkıştırılır. Vibrasyonla sıkıştırılan tuğlalarda genelde hidrolik bağ vardır. Harman nemleri % 15-20 arasında olur.

El ile şekillendirilmesi yapılan tuğlalar, pişirilme öncesi, ihtiva ettiği nemi hızlı şekilde atmamalıdır. Aksi halde tuğlalarda çatlama oluşur (Baltacıoğlu, 1991).

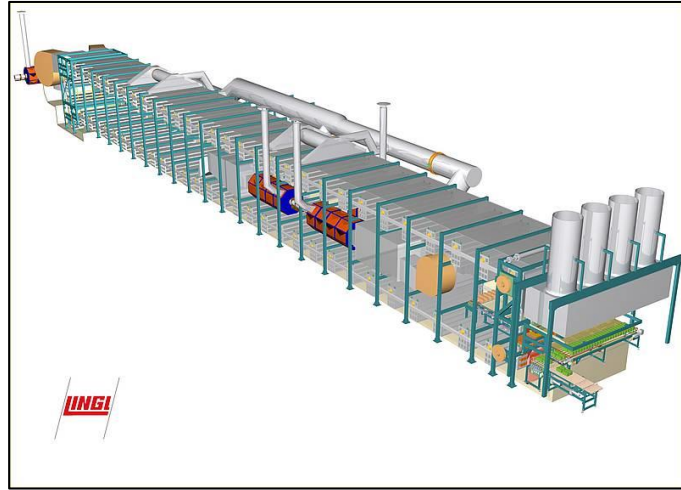
2.4. Pişirme Ve Temperleme

Preslerde veya elde şekillendirilen tuğlalar, satışa sunulmadan önce, cinsine ve kalitesine göre, kurutma, pişme ve temperleme işlemlerine tabii tutulurlar.

2.4.1. Pişirme

Pişmiş olarak kullanılan tuğlalar, genelde tünel ve şatıl fırın denilen pişirme fırınlarında, 1300 °C - 1800 °C'ler arasında pişirilirlir. Tünel fırınlar 60-120 metre boylarında, tamamen tuğlayla örülmüş sabit tünel şeklindedirler. Pişirilecek tuğlalar, üzerleri refrakter ile kaplanmış tünel fırın arabalarına istiflenirlir. Bu tünel fırın arabaları, tünel fırının içerisindeki ray üzerinde hareket ederler. Tünel fırın içerisinde uzunluğuna uygun araba sayısı vardır. Örneğin 80 metrelik bir fırında 33 araba bulunabilmektedir. Arabalar fırın pişirme rejimine uygun olarak tünel fırın girişinden makine ile itilirlir. Fırından 1 araba çıktığında girişten 1 araba içeri itilir.

Tünel fırınlar, fuel-oil, LPG ve doğal gaz ile ısıtılırlar. Fırının her iki tarafında brülör adı verilen aygıtlarla yakıt tünel fırın içerisine püskürtülür ve yanma sağlanır. Tünel fırınlar genelde otomasyon ile çalışırlar. Brülörler bulunduğu bölgenin sıcaklığı, rejim sıcaklığına ulaştığında yakıtı keser, sıcaklık düştüğünde yakıtı tekrar verir. Bu şekilde fırın uzunluğu boyunca istenilen pişme eğrisine uygun pişirme sağlanmış olur.



Şekil 2.11. Tünel fırın temsili resmi (<http://www.lingi.com/>).

Her fırının önünde, kurutucular vardır. Kurutucular, arabaların üzerindeki istifli tuğlaların nemden kurtulmasını sağlar. Kuruyan tuğlalar tünel fırına girer. Kurutucular, tünel fırından alınan atık gazlarla ısıtılırlar. Tünel fırınların tavanları iki şekilde yapılır. Kemer şeklindeki tavanlarda tuğlalar kemer şeklinde örülerek fırın tavanını oluştururlar. Bazı tünel fırınlarda tavanlar, tuğlaların asılmasıyla oluşturulmuştur. Böyle tavanlara “asma tavan” adı verilir. Asma tavanların örümü ve tamirata daha kolaydır.

Tünel fırında kullanılan refrakterlerin genleşmelerinin ve ısı iletkenliklerinin düşük olması istenir. Bu nedenle sıcaklığa uygun olarak, alümina-Silikat ve yüksek alümina tuğlalardan yapılırlar. Pişme bölgesinde %99 Al_2O_3 içeren korundum'dan tuğlalar bulunmaktadır.

Pişirme prosesinde kullanılan diğer fırın çeşidi de “şatıl fırınlar”dır. Şatıl fırınlar tünel fırınlara göre düşük kapasitedirler. Pişme hacimleri 30-40m³ civarındadır. İçerisine 4-10 araba alır. Pişme sıfırdan başlar ve tuğlalar piştiğinde fırın soğutularak tuğlalar dışarı alınır. Dolayısı ile tünel fırınlar gibi devamlı çalışmazlar. Bu fırınlar, özel ve miktarı az olan tuğlaların pişirilmesi için kullanılır. Şatıl fırınlarda, birim yakıt sarfları tünel fırınlara göre yüksektir.



Şekil 2.12. Refrakter tünel fırını.

Tünel fırınlar çok hassas çalıştırılmalıdır. Hızlı ısıtma ve soğutma gibi operasyonlarda fırınlar tahrip olurlar. Bu nedenle tünel fırınların ısıtma ve soğutmaları $10-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ / saat yapılması gerekir. Çalışmaya başlayan bir tünel fırın ancak çalışamaz duruma geldiğinde durdurulur. Tünel fırınlarda, durmadan çalışma ömürleri 7 – 12 yıl arasında değişir (Akçakaya, 1995).

2.4.2. Temperleme

Çelik üretiminde kullanılan zift ve reçine bağlı MgO-C , $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-C}$ ve dolomit tuğlalar şekillendirildikten sonra $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lerde kavurma işlemine tabi tutulurlar. Buna "Temperleme" adı verilir. Temperleme sırasında zift ve reçinenin uçucuları uçarak, sadece karbonları tuğla içerisinde kalır. Temperleme sonrası tuğla bünyesinde C-C bağları oluşur ve tuğlanın dayanımı artar.

Temperleme fırınları çelik sac'tan imal edilirler. Yakıt, bir hücrede yanar ve yanma gazları fırın içerisinde dolaşır. Bazı fırınlarda, yanma gazları, havayı ısıtır ve ısınmış hava temperlemede kullanılır. Direkt yanma gazlarının kullanılmasında, yanma gazlarındaki bazı gazların, tuğla ile reaksiyona girme olasılığı vardır.

Temper fırınlarında da ray üzerinde yürüyen arabalar vardır. Tuğlalar araba üzerine aralıklı olarak istiflenir ve fırın içerisine verilir. Temperleme süresi tuğla kalitesine göre değişmekle birlikte 12-16 saat arasında değişir. Dolomit tuğlaların temperlenmesinde, tuğlaların su buharından korunmaları gerekir (Kuzu, 1998).



Şekil 2.13. Refrakter temperleme fırını.

2.4.3. Emprenye

Tuğlaların kullanıldıkları yerlerde, ıslatmazlıklarının ve porozitelerinin çok küçük olması istenir. Bu nedenle, genelde pişmiş tuğlalara uygulanan “Karbon” emdirme işine “emprenye” adı verilir. Emprenye için zift ve reçine kullanılır. Zift ve reçine vakum altında tuğla por’larına emdirildiğinde %16-18 oranındaki poroziteleri %2-4'lere iner. Emprenye işleminden sonra tuğlalar temperlemeye tabii tutulur ve uçucular uçurulur. Tuğlanın porlarında kalıcı karbon kalarak porozite %3-6 arasına yükselir.

Emprenye işlemi, çelik üretiminde döküm deliği refrakterlerinde ve sürgülü plakalarda uygulanır. Bu refrakterlerde sıvı çeliğin ve cürufun kesinlikle refrakter porlarına girmemesi önemlidir.

Bazı hallerde, porozitelerini en aza indirmek için karbonlu tuğlalarda da emprenye işlemi yapılmaktadır (Çavaç, 2008).



Şekil 2.14. Refrakter zift emprenye fırını.

2.5. Refrakterlerin Kullanıldığı Yerler

Refrakterler, yüksek sıcaklıkların uygulandığı üretim proseslerinde kullanılmaktadır. Demir-çelik, çimento, kireç, cam, seramik, bakır ve demir dışı metallerin üretildiği fırınların iç kısımları refrakter tuğla ve harçlarla kaplanmaktadır.

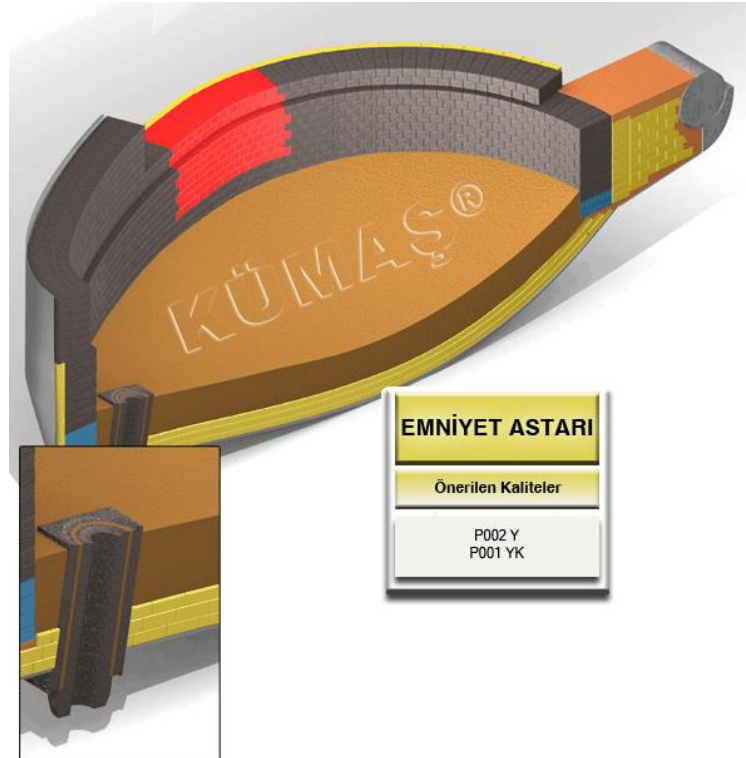
2.5.1. Demir – çelik sanayi

Demir ve çelik tanımları genelde birbiriyle karıştırılmaktadır. Fakat gerçekte demir ile çelik farklı malzemelerdir. Çelik denilen malzeme, demir'in tasfiyesi ile ortaya çıkmaktadır.

Demir, demir minerallerinin “Yüksek Fırın” adı verilen fırınlarda kok kömürü ile indirgenmesiyle elde edilir. Buna “PİK” ismi de verilmektedir. Yüksek fırında pik'in üretiminden sonra, çelik ocaklarında pik'in içerisindeki C, Si, P, S, O₂ gibi safsızlık elementlerinin uzaklaştırılmasıyla veya çelik kompozisyonunda istenilen değerlere getirilmesiyle çelik üretilmektedir (Taşçı, 2002).



Şekil 2.15. Manyezit ark ocağı ve potası.



Şekil 2.16. KÜMAŞ Ark ocağı refrakter ürünleri.

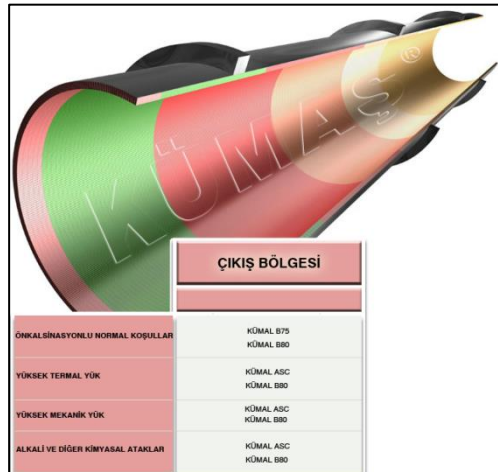
2.5.2. Çimento sanayi

Portland Çimentosu, Joseph Aspdin isimli bir duvarcı ustası tarafından 1824 yılında bulunmuştur. Bu çimentodan yapılan betonun rengi Portland adasında bulunan bir taşın rengine benzediği için bu isim verilmiştir.



Şekil 2.17. KÜMAŞ Döner fırın III – devreye alma esnasında.

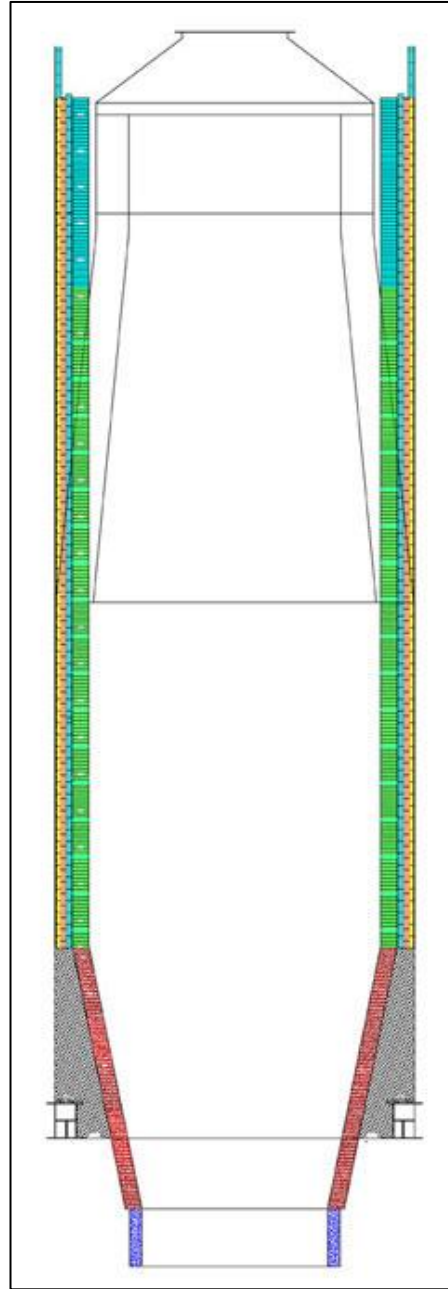
Portland çimentosunun hammaddeleri, kalker, kil ve demir oksit mineralleridir. Bu hammaddeler, belirli oranlarda karıştırılarak büyük değirmenlerde öğütülür ve farin ismini alır. Farin 1500 °C'lerde döner fırınlarda pişirilerek klinker adı verilen malzeme elde edilir. Klinker'in öğütüldükten sonra içersine %3-5 alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ilave edilerek çimento üretilir. Çimento yapımında, klinker içersine %30 oranında flux adı verilen, kalsiyum silikat yapısında, demir-çelik ve kömür cürufu da katılır. Bu cürufların ilavesi ile çimentonun bağlama özellikleri de artar (Taşçı, 2002).



Şekil 2.18. KÜMAŞ Döner fırın refrakter dizayn örneği.

2.5.3. Kireç sanayi

Kireç, kalker ve kalsit içeren CaCO_3 kayaçlarının döner ve dikey fırınlarda 900-1.000 $^{\circ}\text{C}$ 'lerde kalsine edilmesi ile üretilir. Dikey fırınlara bağlanan kireç taşlarının tane boyu 30-100 mm, döner fırınlarda ise 5-40 mm'dir. Bazı dikey fırınlarda, kireç taşı ile kok kömürü harman edilerek fırına verilir. Kok kömürü oranı %30 civarındadır (Taşçı, 2002).



Şekil 2.19. Kireç fırını refrakter dizayn örneği.

2.5.4. Cam sanayi

Cam sanayii fırınlarında, fırın ısıtıldığı regeneratör denilen bölgelerde Magnezya, Magnezya-Krom, camın ergitildiği kısımlarda Silika ve Yüksek Alümina tuğlalar kullanılmaktadır. Cam sanayii fırınlarında refrakter ömürleri 7 yıl'dan fazla olmaktadır.

Rejenaratör bölgesindeki denetleyicilerde, tuğlalar gazların geçmesi için aralıklı olarak örülmektedir. Buradaki tuğlalarda sıcak gazların aşındırma etkisi ön plandadır.

2.5.5. Bakır sanayi

Metalik bakır üretiminde, çelik üretimi gibi cevherden ve hurdadan giderek yapılmaktadır. Cevherden bakır üretiminde flotasyonla zenginleştirilen bakır cevherleri konverter denilen döner fırınlarda indirgen maddeler kullanılarak metalik bakır üretilmektedir. Bakır üretimi sırasında cüruf oluşumu vardır. Cüruf tuğla aşınmasında yine başrolü oynamaktadır. Ayrıca konverterde, safsızlık elementlerini cürufa geçirmek ve bakır sülfürden, bakırı indirgemek için tüyere denilen deliklerden oksijen üflenir. Hurdadan bakır üretiminde ise Thomas adı verilen döner fırınlar kullanılmaktadır. Fırınlar doldur ve boşalt sistemi ile çalışmaktadırlar. Hurdadaki bakır, yine indirgen maddeler kullanılarak elde edilmektedir.

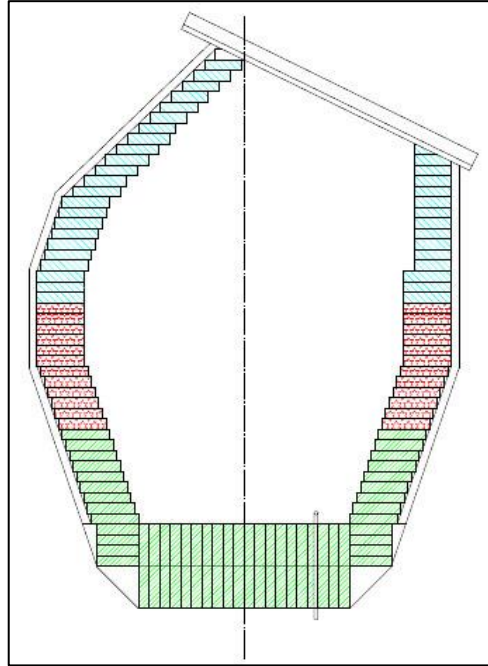
Bakır fırınlarında, magnezya-krom ve magnezya-krom spinel tuğlalar kullanılmaktadır. Bu tuğlalardaki kromoksit miktarı %20- 30 arasında değişmektedir.

2.5.6. Bakır ve demir dışı metaller

Demir dışı metallerin metalurjik üretimlerinde de, bakır üretimine benzer prosesler vardır. Örneğin kurşun, antimon gibi metaller Thomas fırınlarında üretilmektedir buralarda kullanılan refrakterlerde magnezya-krom ve spinelleridir (Taşçı, 2002).



Şekil 2.20. Bakır fırını (www.sarkuysan.com).



Şekil 2.21. KÜMAŞ Örnek nikel ocağı refrakter dizaynı.

3. AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI

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 (Kahraman, 2009).

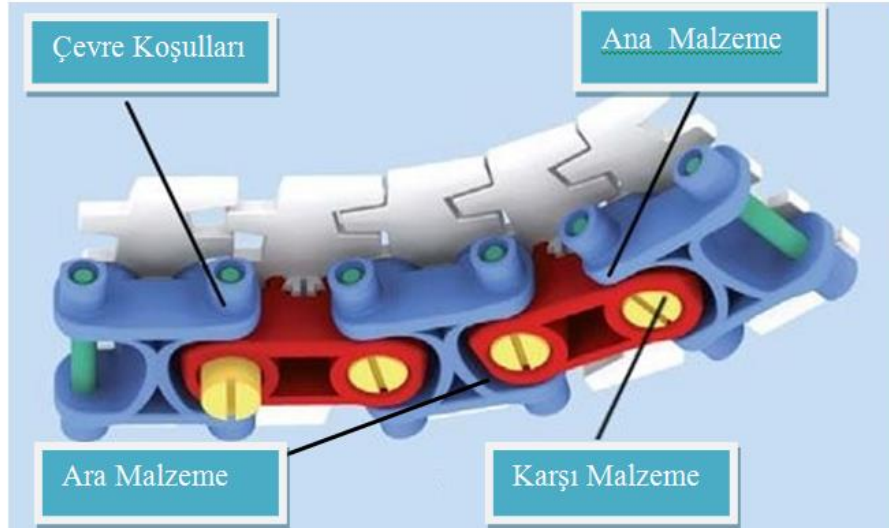


Şekil 3.1. Mekanik ekipmanların kullanılamaz hale gelme nedenleri (<http://reliabilityweb.com>).

Bir aşınma sisteminde;

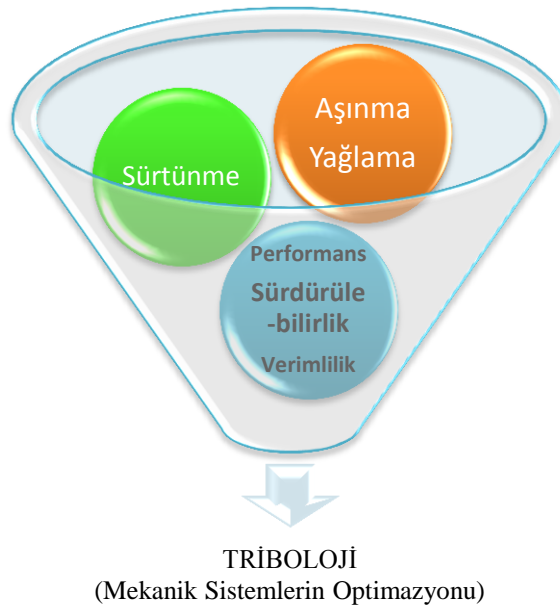
- i. Temel eleman (aşınan),
- ii. Karşı eleman (aşındıran),
- iii. Ara madde,
- iv. Yük (P) ve
- v. Hareket

temel unsurlar olarak sayılabilir. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılır ve Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de böyle bir sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2. Aşınma sisteminin temel bileşenleri (DuPont tarafından geliştirilmiş özel bir zincir - <http://www2.dupont.com>).

Aşınan ve aşındıran malzeme birlikte “aşınma çifti” olarak tanımlanır. Aşınma çifti arasındaki “ara malzeme” sert taneli, sıvı, gaz ve buhar halinde olabilir. Aşınma parçacıkları da ara malzeme gibi etki yaparak aşınma olayına katılırlar. Aşınma çifti ile ara malzemeye birlikte “aşınma kombinasyonu” denilir. Aşınma çifti arasındaki rölatif hareket aşınmanın cinsini belirler. Yük; statik, dinamik veya darbe şeklinde olabilir (İpek, 2007).



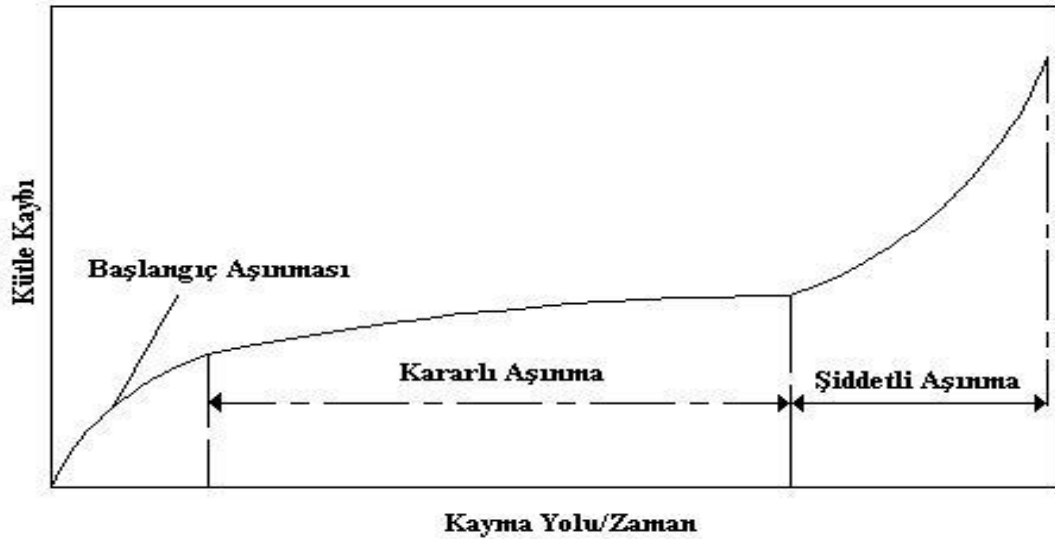
Şekil 3.3. Triboloji konuları (<http://www.tribocoating.de/>).

3.1. Aşınma Safhaları

Aşınma, oluşma hızı ve biçimi açısından zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere ikiye ayrılır. Zamanla gelişen aşınmada makine elemanı üç aşamada aşınır ve normal çalışma ömrünü tamamlar. Zamanla gelişen aşınmanın kademeleri şu şekildedir:

3.1.1. Başlangıç aşınması

Zamanla gelişen aşınmanın ilk safhası makine elemanlarının alışma safhasıdır. Bu safhada hızlı ve şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu ilk aşınmaya başlangıç aşınması denir.



Şekil 3.4. Aşınma safhaları (Kahraman, 2009).

Makine elemanlarının ömürlerinin uzun olması için başlangıç aşınması mümkün olan en kısa zamanda, en az yükte ve normal hızdan daha düşük hızlarda tamamlanmalıdır. Bunu sağlamak için makine elemanları başlangıç için özel üretilmiş özel katkılı yağlayıcılarla yağlanırlar.

3.1.2. Asıl (kararlı) aşınma safhası

Başlangıçtan sonraki aşama, makine elemanının ömrünü belirleyen asıl aşınma safhasıdır. Bu safhada aşınma hızı çok azdır. Rodaj ne kadar uygun yapılmışsa bu aşama, dolayısıyla makine elemanı ömrü o kadar uzun olur.

3.1.3. Aşırı (şiddetli) aşınma safhası

Makine elemanı önceden belirlenen bir aşınma sınırına kadar aşındığı zaman normal çalışma ömrünü tamamlamış demektir. Bu aşınma safhasında aşınma hızı oldukça artmıştır ve makine elemanı değiştirilmelidir. Aniden meydana gelen aşınma, parçalar üzerinde olaydan önce herhangi bir aşınma yokken; yanlış malzeme seçimi, yağlamanın uygun yapılamaması, sürtünme dolayısıyla meydana çıkan ısıl enerjinin dış ortama aktarılamaması gibi sebeplerden dolayı aşınmanın aniden ortaya çıkmasıdır. Birbiriyle eş çalışan makine elemanları bu durumda kilitlenebilirler ve çalışamaz duruma gelirler. Yatak sarması bu olaya örnek gösterilebilir (Şafak, 2008).

3.1.4. Tribo sistemler

Tribolojinin sözlük anlamı birbiri ile temas eden yüzeyler arasındaki etkileşimi inceleyen bilim ve teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Tribolojik araştırmaların amacı yüzey sürtünmelerinin ve aşınmadan kaynaklanan kayıpları azaltmak ve gidermektir. Aşınma tiplerinin çok çeşitli olması ve birçok farklı durumda aşınma probleminin ortaya çıkması, çok sayıda tribotestin gelişmesine neden olmuştur. Genel olarak aşınma araştırmaları şu amaçlarla yapılır;

- a. Sistemlerin ya da sistem elemanlarının verimliliği, ömrü, güvenirliliği, performansı, fonksiyonu, bakım yapılabilirliğinin değerlendirilmesi
- b. Sistem elemanlarının kalite kontrolü
- c. Malzemelerin ve yağlayıcıların tribolojik davranışlarının karakterize edilmesi
- d. Aşınmanın neden olduğu malzeme kayıplarının araştırılması.

3.2. Aşınma Mekanizmaları

Sürtünen yüzeylerin özelliklerini kapsayan aşınma sınıflandırması aşağıdaki gibidir;

- Metal- Metal
- Metal- Metal dışı
- Metal- Sıvı.

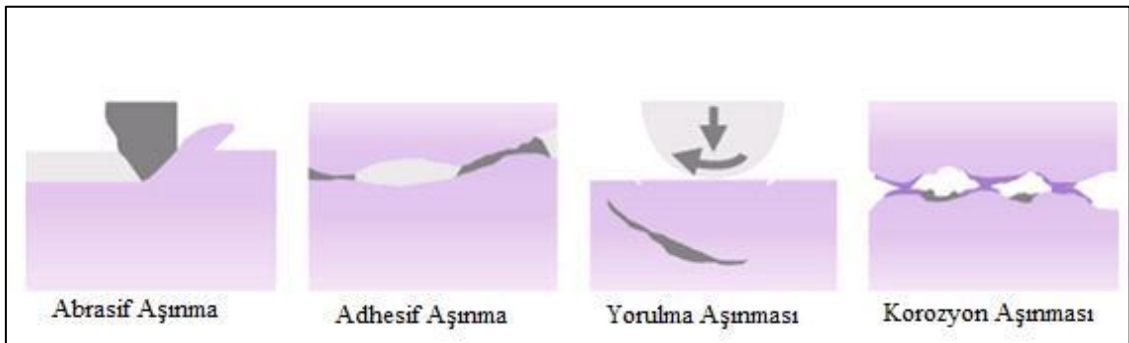
Bu sınıflandırma, yağlamanın olduğu veya olmadığı durumlar, kayma veya yuvarlanma sürtünmesi nedeniyle oluşan aşınma gibi çeşitlere de ayrılması gerekmektedir. Ayrıca şartları değişebilir ve önceden metal-metal olan durum, metal-metal dışı haline dönüşebilir veya

başlangıçta yeterli olan yağlama sonradan yetersiz olabilir. Bu yüzden yaygın olan terimlerle sınıflandırma tercih edilmelidir.

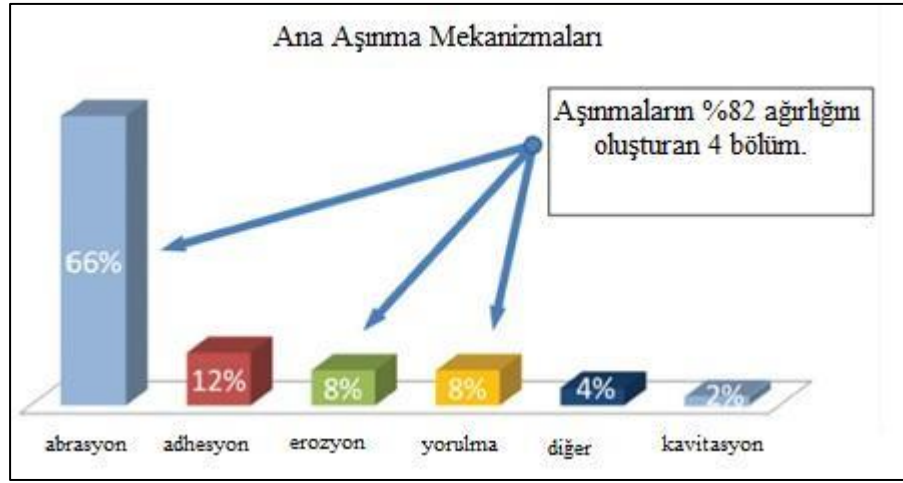
Böylece sınıflandırmayı tekrar yaparsak;

1. Adhesif Aşınma
2. Abrasif Aşınma
3. Yorulma Aşınması
4. Erozyon Aşınması
5. Korozyon Aşınması
6. Termik Aşınma
7. Kavitasyon Aşınması

şeklinde olur (Kahraman, 2009).



Şekil 3.5. Aşınma mekanizmalarından en yaygın olanları (<http://www.uctcoatings.com>).

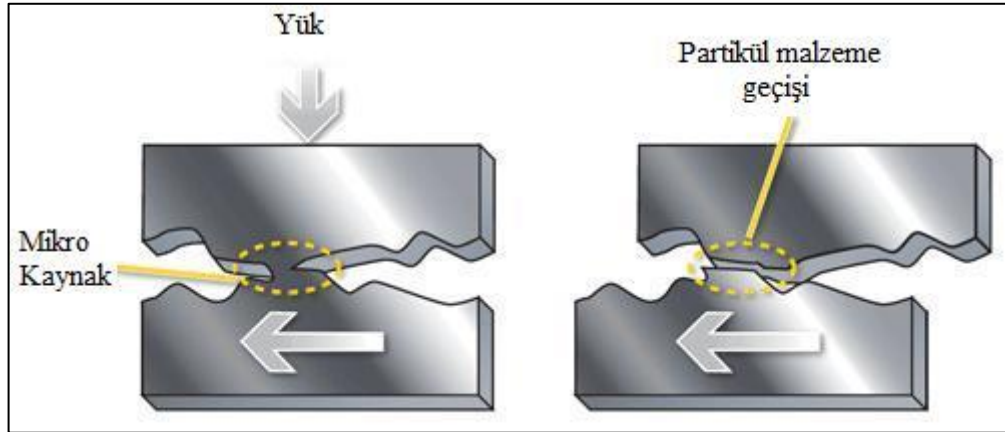


Şekil 3.6 Aşınma tiplerinin rastlanma sıklığı (<http://www.uctcoatings.com>).

3.2.1. Adhesif aşınma

Kayma aşınması da denilmektedir. Temas halinde olan ve birbirine göre bağlı hareket yapan kuru kayma yüzeylerinde daima mevcut olan bir aşınma türüdür (Şekil 3.7).

Aşınma, kayma ara yüzeylerinde metal-metal temas noktalarının soğuk kaynak oluşturması nedeniyle oluşur. Kaynak olmuş temas noktası tamamen veya kısmen parçalandığında malzeme aşınma ürünü haline gelir ve kopan parçacıklar serbestçe düşebilir veya yüzeyler arasında kalarak abrasif aşınmaya neden olabilirler. Bu oluşumda yüzeylerin karşılıklı fiziksel ve kimyasal etkileşimleri önemli ölçüde rol oynamaktadır. Kayma halinde yüksek basınçlara ilaveten, temas noktalarında ayrıca aşırı sıcaklık artışlarının da olması, kaynak bağlarının oluşumunu kolaylaştırır. Oluşan bağ, malzeme yüzeyleri ne kadar temiz ise, o oranda kuvvetli olmaktadır. Rutubet, absorbe gazlar ve yağlayıcı maddelerin varlığı bağ kuvvetini ve dolayısıyla aşınmayı azaltır (Karaoğlu, 2006).



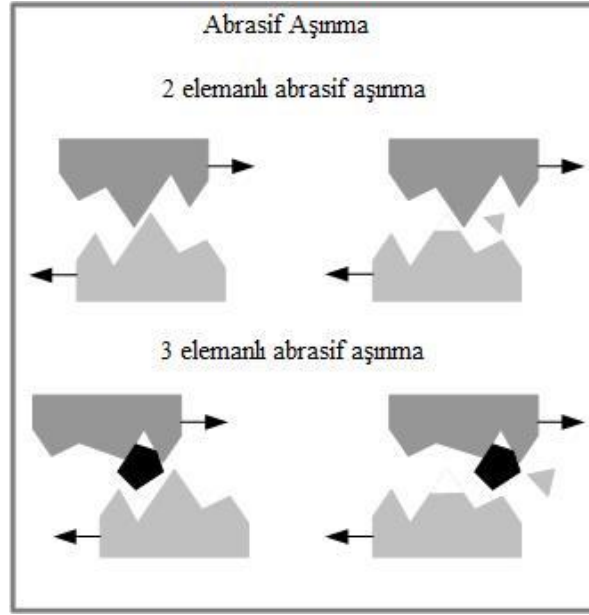
Şekil 3.7. Adhesif aşınma mekanizması (<http://www.machinerylubrication.com>).

Malzemenin temas eden yüzeyleri ne kadar hassas işlenirse işlensin yüzeyde mikroskobik girinti ve çıkıntılar olduğu bir gerçektir. Bu bakımdan temas halinde olan iki yüzey bu çıkıntılar vasıtasıyla temas eder. Bu çıkıntılar arasındaki girintiler ise temas alanının dışında kalır. Rabinowicz ve Tabor aşınma ve yağlayıcılar üzerine bazı çalışmalar yapmışlar ve yüzeylerde yağlayıcı olmazsa yüzeye dik olan yükün artmasına bağlı olarak aşınmanın da lineer olarak arttığını bulmuşlardır. Yüzeğe yağlayıcı uygulanması durumunda ise, malzeme kaybının azalması kadar, sürtünme katsayısının da düşürüldüğünü gözlemlemişlerdir (Yılmaz, 1997)

Araştırmalar ve deneyler sonucunda uygulamaların faydalı olduğu görülmüştür. Malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olmalıdır. Roach, Goadzeit ve Hunnicut adhesiv yapışmada alaşımlamanın çok etkili bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması gerekmektedir. Genellikle sert metaller çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler (Yılmaz, 1997).

3.2.2. Abrasif aşınma

Sürtünen sert yüzeylerin daha yumuşak malzemeleri kesmesi şeklinde meydana gelen aşınma türüdür. Sert parçacıklar ya dışarıdan sisteme girerler ya da adhesif aşınma ürünleri olarak sistemin içinde meydana gelirler. Sert yüzey pürüzleri kesici takım gibi işlev görerek daha yumuşak malzemelerden malzeme koparır.



Şekil 3.8. Abrasif aşınma mekanizması (www.substech.com).

Aşınmadan dolayı kopan parçacıklar yabancı maddeler gibi davranır ve aktif olarak olaya karışır. Abrasif aşınma mekanizmasında etkili olan temel faktörler, sertlik, aşındırıcı, tane veya pürüzün boyutu ve şekli, uygulanan normal yük ve kayma hızı olarak sayılabilir. Şekil 3.8’de abrasif aşınma mekanizması gösterilmektedir.

3.2.2.1. İki elemanlı abrasiyon

Sürtünen yüzey çiftlerinden sert ve pürüzlü olanının veya yüzeylerden birisine gömülmüş sert bir partikülün diğer yüzeyi kazınması iki elemanlı abrasiyon olarak adlandırılır (Şekil 3.8). İki yüzeyle abrasif aşınma, adeshiv aşınma ile birlikte meydana gelmektedir ve bu sebeple üç yüzeyle abrasif aşınmaya göre kat kat daha fazla aşınma meydana gelmektedir. Abrasif aşınma mekanizmaları genel olarak malzemenin cinsine ve yüzey yapısına bağlı olarak dört başlıkta toplanabilir. Bunlar; kesme, çatlama, kazıma(sürtme), kopma olarak sınıflandırılır (Stachowiak, 2001)

Kesme aşınmasında keskin şekilli veya yüksek sertlikli abrasif uç veya parçacıklar kendine göre daha yumuşak olan yüzeyden talaş halinde malzeme kaldırır. Aşınan malzemenin kırılma yapısında olması durumunda (seramik vb.) ise çatlama meydana gelir. Eğer aşındırılan malzeme yumuşak bir malzemeyse ve keskin köşeli olmayan aşındırıcılarla aşındırılıyorsa, kesme olayı gerçekleşmez ve aşınma yüzeyi defalarca deforme olur. Bu durum

kazıma ya da sürtme olarak adlandırılır ve bu durumda aşınma atığı metal yorulması sonucu oluşur.

Bu mekanizma daha çok taneler arasındaki sınırların zayıf olduğu ve tane boyutlarının büyük olduğu seramiklerde görülür ve kopan tane aşınma atığını oluşturur (Stachowiak, 2001)

Pek çok maden prosesinde, aşınma noktalarına kauçuk kaplamalar yapılır. Bu kaplamaların oldukça yumuşak olmasına karşın, özellikle iri malzemelerde uzun ömür vermesi, yukarıda anlatılan “kesme olayının gerçekleşmemesi” nedeniyledir.

3.2.2.2. Üç elemanlı abrazyon

Sürtünen yüzey çiftlerinin dışında üçüncü bir elemanın serbest aşındırıcı olarak yüzeylerin arasında bulunması ve kazıyıcı etki yapması üç elemanlı abrazyon olarak adlandırılır (Şekil 3.8).

Abrasif aşınma dayanımı sertlikle doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu sebeple abrasif aşınma dayanımını arttırmanın en etkili ve ekonomik yolu, uygun yüzey sertleştirme tekniklerinin kullanılmasıdır.

Nottingham Üniversitesinde yapılan bir çalışma, aşınmaya katılan 3. eleman ve aşınmaya koruyucu kaplama özellikleri ilgili önemli bilgiler vermektedir.

Çalışmada konudan şöyle bahsedilmektedir;

Materyallerin abrazyon aşınma davranışı bir dizi test yöntemi kullanılarak değerlendirilebilir ve materyallerin nispi performansı kullanılan test prosedürüne bağlı olma eğiliminde olacaktır. Bu çalışmada iki sermet türü kaplama incelenmiştir, yani

(i) $\sim 0.3-5\mu\text{m}$ arasında karbür boyutuna sahip konvansiyonel tungsten karbür-kobalt termal olarak spreyleneş kaplama, ve

(ii) Çap olarak $\sim 50-140\mu\text{m}$ aralığında geniş küresel karbürler ile bir tungsten karbür-nikel alaşım kaynak kaplama (DuraStell).

Bu iki malzemenin aşınma davranışı iki abrazyon testinin kullanımı ile incelenmiştir, yani hem silis hem de alümina abrazyon testleri (genelde $2-10\mu\text{m}$ boyutunda) kullanılarak mikro ölçekli abrazyon testi, ve yine hem silis hem de alümina abrazyon testleri ile (genelde $180-300\mu\text{m}$ boyutunda) kuru kum-kauçuk kaplı tekerlek testi (ASTM 65). Abrazyon partükülleri aynı ölçekli olduğunda veya sert haldeki partüküller arasındaki ara kat oluşumu daha büyük olduğunda,

matris halinin sert haller ile iyi korunduğu tespit edilmiştir. Alümina abrazyon testleri ile test (her iki test türünde) hem termal olarak spreylenmiş kaplamada hem de kaynak kaplamada; hem sert karbür hallerinin hem de matris hallerinin aşınması sonucunu vermiştir ve termal olarak spreylenmiş kaplama daha düşük aşınma oranı göstermiştir. Mikro ölçekli abrazyon testinde matrisin abrazyon etkiden etkin korumasına bağlı olarak, termal olarak spreylenmiş kaplama kaynak kaplamaya göre, ince takviye partikül boyutu nedeniyle ince abrazyon ile daha düşük bir aşınma oranı göstermiştir. Bunun aksine kuru kum – kauçuk kaplı tekerlek testinde daha iri taneli silis abrazyon ile büyük karbürlere sahip kaynak kaplama düşük aşınma oranı ile matris koruması sağlayabilmektedir. Oysa ki termal olarak spreylenmiş kaplama daha hassas mikro yapının çatlaması ile aşınmıştır. Bu bulgular materyallerin servis ortamlarındaki davranışını simüle etmek için uygun laboratuvar test prosedürlerinin ve abrazyon testlerinin seçiminin önemini göstermektedir (Kamdi, 2010).

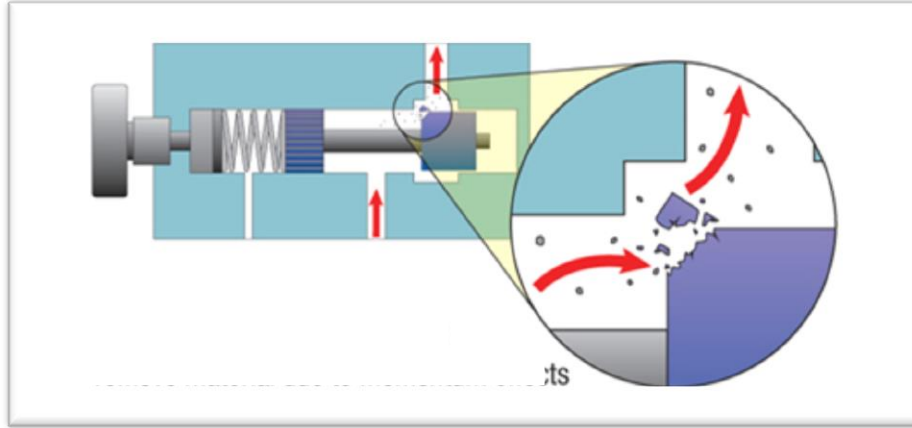
Bu çalışmada büyük/küçük abrazyon partikülleri ve yumuşak/sert abrazyon partikülleri ile abrazyona karşı iki farklı aşınmaya dirençli sert kaplamanın davranışı incelenmiştir. Materyaldeki tüm hallerin sertliğinin sünek çentikleme ve oyuklama ile aşınmayı önlediği ve beher partikül için uygulanan yüklerin kaplamada herhangi bir ölçekte çatlamaya neden olacak kadar yeterli olmadığı mikro ölçekli abrazyon testinde tungsten karbür kaplamanın silis ile abrazyona maruz kalması hali hariçtir.

Bu gibi kompozit materyallerin aşınma davranışının bir dizi özellik ile kontrol edildiği tespit edilmiştir. Aşınma davranışı aynı zamanda abrazyon sertliği ile de kontrol edilir; sert alümina abrazyon testinde her iki abrazyon testinde her iki materyalin de aşınmasına neden olmuştur, materyali karbürlere plastik deformasyon ve (bazı durumlarda) çatlak ile çıkarmıştır. Silis abrazyon ile “Kuru Kum - Kauçuk Kaplı Tekerlek” testinde DuraStell kaplamadaki karbürler matrise yeterli koruma sağlayabilmektedir. Ayrıca karbürler abrazyondan daha serttir ve bir bütün olarak mikro yapı (karbürlere dahil) partiküllerin abrazyon edimi altında hassasiyet göstermemiştir. Zıt olarak tungsten karbür kaplama sert olduğu halde hassas çatlak ile abrazyon göstermiştir ve DuraStell kaplamanın iki katı abrazyon oranına sahip olmuştur. Bu itibarla abrazyonda aşınmanın meydana gelebileceği tüm mekanizmaları dikkate almak ve istenmeyen hata mekanizmalarını en iyi şekilde önleyecek şekilde kaplamaları seçmek önemlidir (Kamdi, 2010).

3.2.3. Erozyon aşınma

Erozyon aşınma, abrazyon aşınmayla birçok yönden benzerlikler göstermektedir. Erozyon aşınmanın abrazyon aşınmadan temel farkı, aşınmanın, sert parçacıkların yüzeyi kazınmasından

ziyade yüzeye çarpması sonucunda oluşmasıdır. Buna örnek olarak gaz türbinlerinin nozul ve kanatçıklarının yanma ürünleri içerisindeki katı parçacıklar tarafından aşındırılması verilebilir. Sert parçacıkların bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma, abrasif erozyon olarak adlandırılır. Sert parçacıkların bağıl hareketleri yüzeye dik olduğunda aşınma, çarpma erozyonu olarak adlandırılır. Eroziyon aşınmayı etkileyen temel faktörler, aşındırıcı parçacığın özellikleri (aşındırıcı boyutu, şekli, sertliği), aşınmaya maruz kalan elemanın özellikleri (elemanın sertliği ve yüzey kalitesi) ve ortamın özellikleri (partikülün çarpma veya yalama hızı, çarpma açısı ve birim zamanda çarpan parçacık miktarı) olarak üç ana grup altında incelenebilir. Erozyon aşınması; malzeme türü, çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık büyüklüğüne bağlı olarak farklı mekanizmalarla ortaya çıkar (Şekil 3.9).

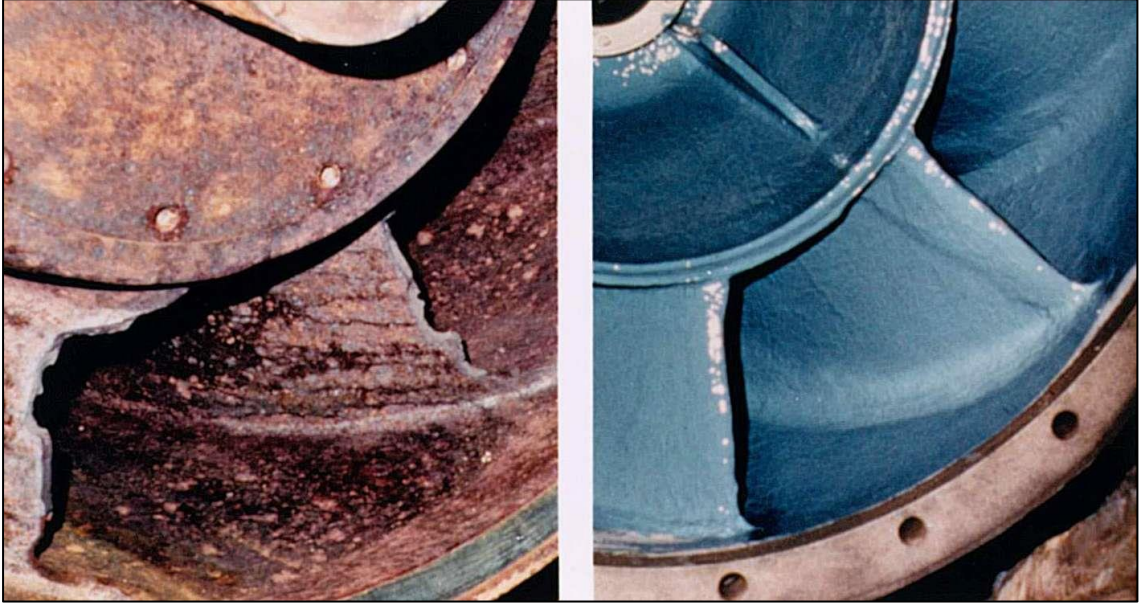


Şekil 3.9. Kontrol valfinde erozyon aşınması (<http://www.pall.de/>).

3.2.4. Koroziyon aşınma

Kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan ve özellikle metallerde etkili olan bir aşınma türüdür. Korozyon, diğer aşınma mekanizmalarından farklı olarak, kimyasal korozyon, elektrokimyasal korozyon ve sürtünme oksidasyonu gibi farklı şekillerde karşımıza çıkmaktadır. Koroziyon aşınma genellikle aşınmanın hafif bir şeklidir, fakat yüksek sıcaklıklarda ve nemli ortam içerisinde aşırı bir hal alabilir. Malzemelerin yüksek sıcaklık ve gaz ortam içerisinde oksitlenmesi kimyasal korozyon, çözelti ortamlarında meydana gelen oksitlenme ise elektrokimyasal korozyon olarak adlandırılır. Demir esaslı malzemelerde daha çok gözlenen korozyon ise oksidasyondur. Sürtünme oksidasyonu mekanik aşınma ile koroziyon aşınmanın bir bileşimini teşkil etmektedir. Sürtünme oksidasyonu, aralarında çok küçük bağıl hareket olan ve oksitlenmeye elverişli bütün malzeme türlerinde meydana gelebilmektedir. Özellikle ambalajlanmış bir şekilde uzun süre bekleyen makinelerin rulmanlı yataklarında ve

mil-göbek gibi geçme olan yerlerinde, nakliyat sırasında meydana gelecek küçük sarsıntı ve titreşimler sürtünme oksidasyonunun oluşmasına neden olabilirler (Çöğür, 2007).

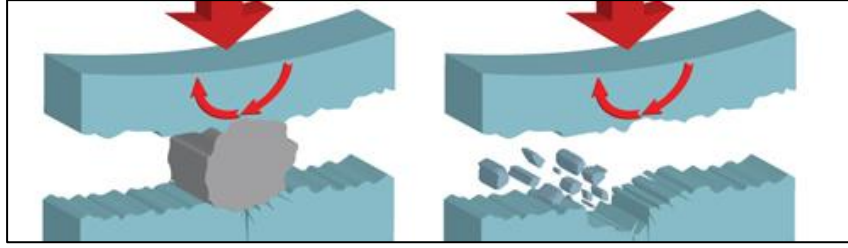


Şekil 3.10. Korozyon aşınması (<http://news.thomasnet.com>).

Korozyon aşınmasını önlemek için malzeme yüzeylerine ısıtma işlemi uygulanır ve oksidasyon önleyici özel yağlayıcı maddeler kullanılır.

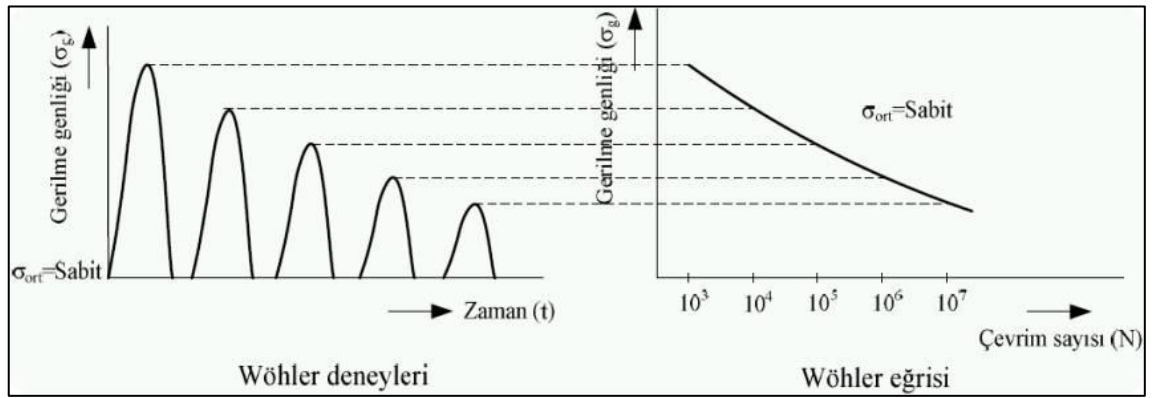
3.2.5. Yorulma aşınması

Değişik yüklemeler etkisi altında meydana gelen bir aşınma türüdür. Böyle bir aşınma çok sayıda yükleme periyodundan sonra meydana gelmektedir. Yüzey bölgesi, titreşimli değişken zorlanmaya maruz kaldığı zaman malzeme yüzeyinin hemen altında mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlakların yüzeyde oluşması sonucunda pulcuk kalkması meydana gelir ve yüzeyden büyük parçacıklar koparak çukur ve oyukların oluşmasına neden olur. Genellikle dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda, demiryolu raylarında, soğuk veya sıcak haddeleme işlemlerinde görülmektedir.



Şekil 3.11. Yorulma aşınması (<http://www.pall.com/>).

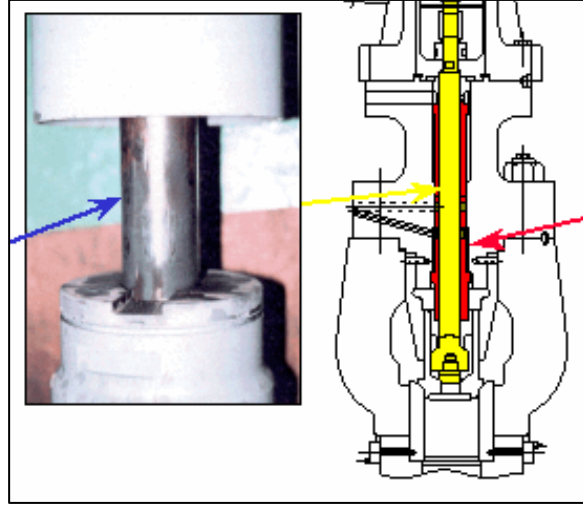
Yorulma deneyleri, sabit bir ortalama gerilme için farklı gerilme genlikleri alınarak yapılır ve yorulma kırılmasının görüldüğü kırılma çevrim sayıları saptanır. Deneyler sonucunda Wöhler eğrisi çizilir. Yorulma eğrisi ortalama gerilmenin sıfır olduğu değişken gerilme genliğinde çizilmektedir yani $R=-1$ (tam değişken yükleme) (Şahin, 2013).



Şekil 3.12. Wöhler eğrisi (Şahin, 2013).

3.2.6. Termik aşınma

Yüksek sıcaklığın etkisiyle hızlanan atomik hareketler malzemenin yumuşaması, hatta ergimesine sebep olurlar. Bunun yanı sıra darbe ve gazların da etkisiyle ısı altında termik aşınma meydana gelir. Aşınma sistemi şematik olarak Şekil 3.13.'de görülmektedir. Bu aşınmanın oluştuğu hadde silindirleri, buhar ve gaz vanaları örnek olarak verilebilir (Hurreeram, 1998).



Şekil 3.13. Termik aşınma (Buhar vanası - <http://www3.toshiba.co.jp>).

3.2.7. Kavitezyon aşınması

Akış halindeki sıvılarda ani basınç düşmesi sonucu kabarcıkların ve boşlukların oluşması olayına Kavitezyon adı verilir. Hareket halindeki sıvı, darbe ile bu boşlukları kapatır. İçerisinde bulunan kum gibi abrasiv etki yapan maddelerin de etkisiyle malzeme yüzeylerinde çukurlaşmalar, plastik deformasyonlar gibi hasarlara yol açabilirler. Oluşan bu aşınma şekli “kavitezyon aşınması” olarak adlandırılır. Genellikle su türbini çark kanatları, deniz taşıtı pervaneleri (uskur çarkları), keskin dönüşlerin olduğu boru dirsekleri gibi yerlerde görülür (Çögür, 2007).



Şekil 3.14. Kavitezyon aşınması (<http://www.mtfca.com>).

3.3. Aşınma İle İlgili Literatür Çalışmaları

Literatür incelendiğinde, abrasiv aşınmaya karşı pek çok farklı yöntemin denendiği görülmektedir.

A. Oğur ve C. Gürses; çimento fabrikalarında karşılaşılan aşınma problemlerinin önüne geçme amacıyla makine parçalarının üzerine kaynak yöntemlerinden elektrik ark kaynağı, gazaltı kaynağı ve oksitlen kaynağı kullanılarak kaplama yapmış ve ömür artışlarını incelemiştir. Merdaneler için yaptıkları WC ve CrC kaplama çalışmalarında, ömür artışları 2 ila 4 kat arası değişim göstermiştir. Yeni merdane maliyetleri göz önüne alındığında yaklaşık %50 fiyatlarına yapılan kaplama işlemlerinin 2 ila 4 kat ömür artışı göstermesi çimento fabrikalarının merdanelerdeki maliyetlerinde 4 ila 8 kat kârâ geçtiklerini kanıtlamıştır. Kazıyıcılarda sahada yapılan çalışmalarda ömür artışları 3 ila 6 kat arası değişim göstermiştir. Yaptıkları çözüm ile yeni kazıyıcı maliyetinin 6 kat olmasına rağmen ömür artışının da 6 kat olması ve tesisin her duruş maliyeti göz önüne alındığı zaman çimento fabrikalarının kazıyıcılardaki maliyetlerini 40 kat azalttığı tespit etmişlerdir (Oğur, Gürses, 2013).

Nejat Y. Sarı ve Muharrem Yılmaz; aşınma direnci üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. AISI 1050 çeliğinin aşınma direncini arttırmak için Ni-esaslı tozlar kullanılarak alev püskürtme, alev püskürtme + ergitme, yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) püskürtme + ergitme şeklinde bir seri ısıl püskürtme yöntemleri ile kaplama tabakası oluşturmuşlardır. Ni-esaslı tozlar ile yapılan kaplama tabakalarının aşınma direncine WC sert fazı ilavesinin ve ısıl püskürtme yönteminin etkisi incelenmiştir. Altlık malzemesi olarak kimyasal bileşimi AISI 1050 çeliği kullanılmıştır. WC ilaveli Ni-esaslı kaplama tozu ile yüksek hızlı oksit-yakıt püskürtme (HVOF) işlemi kullanılarak kaplama tabakası oluşturulduktan sonra ayrıca ergitme işlemi de uygulamışlardır. Alev püskürtme işlemi ile hem Ni-esaslı hemde WC+ Ni-esaslı olmak üzere 2 değişik toz ile kaplama tabakası oluşturulmuş buna ek olarak sadece Ni-esaslı toz ile de ayrıca alev püskürtme ve sonrasında ergitme işlemi şeklinde bir diğer kaplama tabakası daha oluşturulmuştur. Isıl püskürtme yöntemi ile kaplama tabakası oluşturulmuş numunelerin tamamı AISI 1050 çeliğinden daha düşük aşınma miktarı gösterdiğini söylemişlerdir. AISI 1050 çeliğinin aşınma miktarını azaltmada en etkili yöntem olan yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) olduğunu belirtmişlerdir. Ni-esaslı toza WC ilavesi aşınma miktarını %3.36 oranında azaltmıştır. Alev püskürtülmüş Ni-esaslı kaplama tozu ile AISI 1050 çeliğinin aşınma miktarı %59 oranında azalırken aynı toza püskürtme işlemi takiben ergitme işlemi uygulandığında bu oran %69'a yükselmiştir. AISI 1050 çeliğinin aşınma miktarını % 80 oranında azaltan en etkili yöntem, WC ilaveli Ni-esaslı kaplama tozu kullanılarak yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) işlemi takiben

yapılan ergitme işlemi olduğunu söylemişlerdir (Sarı, Yılmaz, 2005).

Başka bir deneysel çalışma yapan S. Buytoz ve M. Ulutan, AISI 4340 çeliğinin yüzeyini, gaz tungsten ark (TIG veya GTA) tekniği kullanılarak WC tozu ile modifiye etmişlerdir. Kaplanan malzemelerin mikro yapılarında üretim parametrelerine bağlı olarak, farklı biçim ve oranlarda WC, W_2C fazlarıyla birlikte, ötektik katılaşma ürünü tespit etmişlerdir. Sertlik değerlerinin, yapıdaki mevcut faz ve karbürlerin varlığından dolayı önemli ölçüde yükseldiğini söylemişlerdir. Mikro sertlik değerleri üst tabaka kalınlığı boyunca 1000-1200 HV arasında değişim gösterirken ara yüzeye doğru gidildikçe sertlik değerlerinde bir azalma (650-800 HV) görmüşlerdir. TIG yöntemi kullanılarak yapılan WC ile yüzey modifikasyonunda; farklı üretim parametrelerinde WC tozlarıyla modifiye edilen malzemenin mikro yapısında farklı biçim ve oranlarda faz ve karbürlere rastlanılmıştır. Bunlar, üretim hızının düşük ve enerji girdisinin yüksek olması durumunda düzenli bir şekilde dağılmış M_7C_3 , $M_{23}C_6$, W_2C ve Fe_3W_3C karbürleriyle birlikte γ -FeCrNiW fazlarıdır. Bunlardan başka, üretim hızının değişmesiyle modifikasyon katmanının mikro yapısında WC, W_2C , M_7C_3 karbürleriyle birlikte ötektik altı yapı oluşmuştur. Ancak üretim hızının çok yüksek ve toz miktarının düşük olması durumunda W konsantrasyonu yönünden fakir dendrit ve dendritler arası ötektik meydana gelmiştir. Üretim hızının nispeten yüksek olması nedeniyle modifikasyon katmanının düzenli katılaşma göstermemesi ve yapıda çözünmeden kalan WC partiküllerinin bulunması nedeniyle bazı numunelerde sertlik değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir (Buytoz, Ulutan, 2005).

Yapılan kaplamalarda uygulama parametrelerinin ne denli önemli olduğu, Gül Tosun tarafından yapılan şu deneysel çalışmada görülebilmektedir. Yapılan çalışmada, Plazma Transfer Ark (PTA) kaynak yöntemi kullanılarak AISI 1010 çeliğinin yüzeyi Ni/WC toz karışımı ile kaplanmıştır. Kaplanmış numuneler üzerinde meydana gelen mikro yapı değişimleri incelenmiştir. Altlık malzemesi olarak 1010 çeliği, kaplama malzemesi olarak ise ağırlıkça %95 Ni ve %5 WC oranında toz karışımı kullanılmıştır. Akım miktarının artışıyla, kaynak metali ve ısı tesiri altında kalan bölgenin mikro yapısında fazların cinsi ve miktarı açısından değişimin olduğu gözlenmiştir. Düşük ısı girişi ve yüksek soğutma hızından dolayı kaplama tabakası iğnesel şekil ve kaplama tabakasındaki alaşım elementlerin varlığından dolayı dendritik yapıların oluşmaya başladığı tespit edilmiştir. Oluşan dendritik yapıların kaynak yönüne dik bir şekilde meydana geldiği belirtilmektedir. Isı girdisi arttığı zaman seyrelme oranı ve de dolayısı ile ısı tesiri altında kalan bölgenin genişlediği, Ni/WC alaşımının azaldığı anlatılmıştır. Ayrıca, WF (tungsten florit) miktarında azalmalar gözlemlenirken, iğnesel şekilli Ni/WC alaşımı küresel şekilli bir hal almaya başladığı, kaplamanın tane yapısında incelme oluşumundan söz edilmiştir. Kaplama tarafındaki dendritlerde azalmalar meydana gelmiş ve tanelerde

yönlenmelerin oluşmadığı görülmüştür. Akım miktarının artması ile altlık malzemesi ve ısı tesiri altında kalan bölgedeki fazların kabalaştığı görülmüştür. Kaplamada bulunan WC“lerden ısı tesiri altında kalan bölgesine daha çok karbon geçişi meydana gelmiş, daha düzgün dağılmış martenzit adacıklarının oluşumuna ve beynit miktarında artışa neden olduğu söylenmiştir (Tosun, 2011).

Aşındırıcı mineraller ile çalışmak durumunda olan mühendislerin bilmesi gereken başka bir noktayı, Adnan Güven ve M. Tunç Özcan şu şekilde ortaya koymuştur. Yaptıkları deneysel çalışmalarda, düşük karbonlu çeliklerin çeşitli ısıl işlem metotları ile sertliklerini arttırmışlardır. Daha sonra değişik mineraller ve değişik tane boyutlarında, aşınma testleri yapmışlardır. Bunların sonucunda yapılan tespitler şöyle olmuştur; “Aşındırıcı malzeme boyutu arttıkça, aşınma miktarı azalmaktadır. Aşındırıcı malzeme sertliği arttıkça, aşınma miktarı artmaktadır.” Aşınma malzemesi sertliği, aşınma miktarında önemli rol oynamış olup, aşınma malzemesi sertliği arttıkça, aşınma miktarı azalmaktadır. Aynı çalışmada, pratik uygulaması olabilecek başka bir sonuç daha elde edilmiştir. Aşınma malzemesi sertlik indeksi, aşınma malzemesi sertliğinin denklemde (HB) olarak yazılmasıyla elde edilen bir değerdir. Aşınma malzemesi sertliğinin artmasıyla, aşınma miktarında azalma görüleceği literatürde de belirtilmekle beraber, bu etkinin bu denklem sonucunda sayısal büyüklüğüyle verilmesi, aşınma miktarının önceden tahmin edilebilmesine fayda sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamına giren sade karbonlu çeliklerden, sertliği bilinen bir örnekle (örneğin Ç1010) yapılacak aşınma testi sonrası oluşan aşınma miktarı ile, oluşacak aşınma miktarı tahmin edilecek malzemenin bu denklemle elde edilen sertlik indeks değerinin çarpımı, aşınma malzemesine ait oluşacak yaklaşık aşınma miktarını vereceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca, farklı sertlikteki sade karbonlu çelikler için elde edilen değerler ile, oluşacak aşınmayı önceden tahmin edebilmek için kıyaslama yapılabileceğini söylemişlerdir (Güven ve Özcan, 2005).

Aşınma ve aşınma önlemlerine bakış açısını genişletmek için, alternatif yöntemleri de incelemek gerekmektedir. Bu konuda yapılmış bazı çalışmalardan şu sonuçlara rastlanmıştır.

Polat Topuz ve Serdar Salman tarafından yapılan çalışmada, borlamanın malzemeler üzerinde olumlu bir aşınma dayanımı kazandırdığını ve uygulama parametrelerinin etkilerini deneysel bir çalışma ile anlatılmıştır. Aşınma direncinin artması için, malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının daha düşük olması gerekliliğinden ve borlama ile malzeme yüzeylerinde teflona yakın sürtünme katsayısı elde edilebildiğinden bahsetmiştir. Deneysel çalışmada, endirekt (radiant) ısıtım akışkan yataklı fırın kullanılarak 850,950 ve 1050°C sıcaklıklarda ve 1,2 ve 4 saat sürelerle farklı alaşıma sahip 7 adet çelik malzemeye borlama

işlemi uygulanmıştır. 7 adet çelik malzemedan 5 tanesi takım çeliği, 1 tanesi ostenitik paslanmaz çelik ve 1 tanesi de nitrasyon çeliğidir. Akışkan yataklı fırın tiplerinden indirekt ısıtmalı dıştan rezistanslı akışkan yataklı fırın kullanılmıştır. Bu çalışmanın neticesinde, çalışma sıcaklığının ve alaşım etkilerini araştırmacı şöyle özetlemiştir. Her malzeme de farklı farklı kalınlıkta oluşan borür tabakalarının homojen bir yapıya sahip olduğu, bu borür yapılarının çoğunlukla FeB ve Fe₂B'den oluşmuş ikili bir faz yapısı sergilediği, sıcaklık ve zamanın artışına bağlı olarak tabaka kalınlıkları ve sertliklerin arttığı tespit edilmiştir. Fe₂B fazına uygulanan kırılma tokluğu testlerinde sıcaklığın artışıyla beraber düşüşler meydana gelmiştir. Borlanma işlemleri hep aynı koşullarda gerçekleştirilmiş olan bu 7 farklı alaşımdaki malzemede tabaka kalınlıkları arasındaki bu farklılıkların, içerlerinde barındırdıkları alaşım elementlerinden kaynaklanmaktadır. Örneğin yüksek krom ve nikel içeriği borür tabakalarının hem morfolojisini hem de kalınlıklarını etkilemektedir. DIN 1.4301 kalite paslanmaz çelikte yüksek oranda nikel ve krom bulunmaktadır ve bu da oluşan borür tabakalarının kalınlıklarının diğer malzemelerden daha az olmasını sağlamıştır. Kromca yüksek bir orana sahip DIN 1.2080 kalite soğuk iş takım çeliğinde ise tabaka kalınlıkları paslanmaz çeliğe yakın değerlerde çıkmıştır ki bu da kromun tabaka kalınlığı üstündeki etkisini bir kez daha ortaya koymuştur. Genel olarak bakıldığında burada kullanılan DIN 1.2080 ile 1.2842 kalite çelikler arasında yer alan soğuk iş takım çelikleri için en uygun borlama sıcaklığının 850°C olduğu söylenebilir. DIN 1.2842 kalite soğuk iş takım çeliğinde 950 ve 1050°C'lerde tabakalar arasındaki ayrılmalar çok büyük boyutlu olmuştur. Bu ayrılmaların parçanın sertleştirme sıcaklığının üzerinde bir borlama sıcaklığı kullanılmasından veya alaşım elementlerinden mangan içeriğinin yüksek olmasından kaynaklandığı yaklaşımını güçlendirmiştir. DIN 1.2550 kalite soğuk iş takım çeliği malzemede de tabakalar arasında ayrılmalar büyük boyutlu olmuştur, bu da alaşım elementleri içinde tungsten varlığının yüksek olmasından dolayı olduğunu söylemiştir (Topuz, Salman, 2009).

Başka bir borlama çalışmasında R. İpek , B. Dursun, S. Karaolu; çok kısa süreli borlama ile yüzeyi sertleştirilen AISI 1050 sade karbonlu çeliğinin yüzey sertliği ve gerçek çalışma şartları altında aşınma performansını incelemiştir. Katı ortamda yapılan borlama işlemini, 850°C ve 950°C sıcaklıklarda 10 dakika ve 30 dakika gibi çok kısa sürelerde gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar malzemenin işlem görmemiş ve yağda sertleştirilmiş numunelerinin performansları ile kıyaslanmıştır. Bu çalışma sonunda, kısa süreli borlanmış AISI 1050 çeliğinin işlem görmemiş haline göre yüzey sertliği ve aşınma dirençlerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Borlama süresi ve sıcaklığın artışı ile (950 °C de 30 dakika) yağda sertleştirilmiş olandan bile daha yüksek aşınma direncine ulaşılabildiğini söylemişlerdir (İpek, Karaoğlu, Dursun, 2011).

Madencilik, refrakter, çimento gibi sanayilerde, yaygın kullanımı nedeniyle aspirin gibi kullanılan aşınmaya dayanıklı hazır endüstriyel levhalarla ilgili, M. Türkmen, R. Yılmaz, F. Fıçıcı, kayma hızlarının malzemenin abrasiv aşınma davranışlarına etkisini incelemiştir. Aşınma ortamının şiddetinin artışına bağlı olarak (Hardox 500 olarak anılan) malzemenin aşınma oranı -1 değerlerinde önemli bir miktarda artış gözlenmiştir. Aşınma esnasında 0,5 ms 'e kadar olan kayma hızlarında aşınma oranları hemen hemen aynı değerler civarında iken, kayma hızı 0,7 ms olduğunda aşınma oranında % 135 civarında artış olduğu işaret edilmiştir. Kayma hızı daha da artarak 1 ms olduğunda ise bu değerlerdeki artış oranı % 175'e çıktığı tespit edilmiştir. Düşük kayma hızlarında kazıma sonucu plastik deformasyon meydana geldiği, aynı zamanda abrazyonun sonucu malzeme yüzeyinde çalışma sertleşmesi de olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla sertliği artan yüzeyin aşınmaya karşı direnci de artmaktadır. Kazıma, plastik deformasyon ve çalışma sertleşmesi oluşan bölgelerde zamanla malzeme yorulmasına bağlı olarak sert yüzeylerin hemen altında çatlaklar oluşmaktadır. şiddetli aşınma deneylerinde yavaş geliştiğinden düşük aşınma oranı değerleri elde edilmektedir. Kayma hızı arttıkça aşınan malzeme yüzeyinde kazınan bölgelerin arttığı gözlenmektedir. Malzemenin aşındırıcıya teması ile başlayan süreçte aşındırıcı partiküller malzemeye battığını ve yüzeyini kazıdığını ve sürtünme süresince devam eden kazıma ile enerji harcanması olduğunu söylemişlerdir. Kayma hızı artırıldığında aşındırıcı boyutu aşınma ortamının şiddetine bağlı olarak belirli bir süre sonra parçalanarak ufalandığını ve aşındırıcı ile malzeme arasında kalarak ortamı terk ettiğini ifade etmişlerdir. Bu süre içerisinde şiddetin etkisi ile boyutu daha da küçülerek malzeme yüzeyinde yoğun kazıma izlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Ancak kayma şiddetine bağlı olarak ortamın sıcaklığı artmakta ve malzemenin yüzeyinin oksitlenmesine neden olmaktadır. Aşınma şiddetinin artması ile yüzeyin oksitlendiği gösterilmektedir. Bu olay malzemenin aşınma mekanizmasını etkilemektedir. Yüzeyde oluşan oksit tabakası malzemenin aşındırıcı yüzeyinde sürtünme miktarını azaltarak daha kolay kaymasını ve dolayısıyla daha düşük aşınma oranlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu mekanizmanın meydana geldiğini düşünmüşlerdir. Ancak yüksek hızlarda gerçekleştirilen aşınmada birkaç aşınma mekanizmasının bir arada olduğu anlaşılmaktadır. Böylece aşınma oranı artmaktadır. Aşınma ortamı şiddeti arttıkça aşınan yüzeyden mikro kesilmeler sonucu gerçekleşen yoğun kopmalar ısı sonucu oluşan oksit tabakalarını da parçalayarak aşınma miktarını arttırdığını ve malzemenin aşınma direncinin düşmesine neden olduğunu söylemişlerdir. Bu tespitlerin, endüstriyel ortamda malzeme seçimi noktasında faydalı sonuçlar ortaya koyduğu düşünülmüştür (Türkmen, Yılmaz, Fıçıcı, 2012).

Madencilik endüstrisine veri oluşturabilecek başka bir çalışmada, M. Nalbant ve A. T. Palalı, pulluk uç demirindeki kaplama katmanının toprak işleme sırasında aşınması araştırmışlardır. Pulluklarda yaygın olarak kullanılan DIN EN 10083 (30 MnB₅) çeliğinden üretilmiş uç demirlerinin, aşınmaya karşı dirençlerini artırmak amacıyla elektroliz yöntemiyle 20 µm kalınlığında sert kromla, kimyasal işlemlerle 20 µm kalınlığında akımsız nikel ve fiziksel buhar biriktirme yöntemiyle 4 µm kalınlığında titanyum nitrit ile kaplanmıştır. Kaplanmış uç demirleri ile kaplanmamış uç demirinin aşınma özelliklerini ölçmek için pulluk test cihazı üzerine monte edilmiş ve 5.8 km h⁻¹ hızda kumlu killi tınlı toprakta ve her 1.18 km'de kaplama kalınlığı ve aşınan kütle kaybı ölçülerek tüm kaplamaların aşındığı 10.6 km'ye kadar toprak işleme yapılmıştır. Pulluk uç demirleri toprak işlemeden önce ve sonra tarama elektron mikroskobu kullanılarak metalografik olarak analiz edilmiş ve bunların enerji dağılım spektrumu belirlenmiştir. Uç demirleri, toprakta abrasiv aşınmaya maruz kalmıştır. Kaplamasız ve kaplamalı pulluk uç demirleri, toprak kanalında yapılan 10 km'lik toprak işleme uzunluğunda birbirine yakın değerlerde aşınmıştır. Bu mesafede tüm kaplama katmanları aşınmış, aynı zamanda uç demiri ana malzemesi de aşınmıştır. Akımsız nikel kaplamanın aşınma mesafesi, diğerlerinden daha uzun olmuştur. Bununla birlikte titanyum nitrit kaplamanın, akımsız nikel kaplama ve sert krom kaplamadan daha yüksek aşınma direncine sahip olduğunu söylemişlerdir (Nalbant, Palalı, 2009).

Son yıllarda endüstride aşınma önlemi olarak sıkça kullanılan "Akımsız Nikel Kaplama" üzerine, Y. Yazıcıoğlu ve S. Salman şöyle bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada değişik kalınlıklarda kaplamalar deneysel olarak yapılmış ve genel olarak şu sonuçlara erişilmiştir. Akımsız nikel kaplamalar büyük oranda yumuşak çelikler, alaşımlı çelikler, plastik, sfero ve dökme demirlerin kaplanmasında kullanılırlar. Takım çelikleri veya paslanmaz çeliklerin kaplanmasının payı ise işlem hacmi içerisinde düşük oranlardadır. Son yıllarda ise özellikle alüminyum ve alaşımlarının kaplanması çok önem kazanmıştır. Akımsız nikel kaplama reaksiyonu otokatalitik bir reaksiyondur. Kabul edilebilir kaplama için gerekli olan sıcaklık 65°C'dir. Bu sıcaklıktan sonra kaplama işleminin başlamasına rağmen istenilen optimum bir kaplama 85-90°C aralığında gerçekleşir. Akımsız nikel kaplamalarda pH kontrolü kaplama prosesinin en önemli kontrol mekanizmalarındandır. pH değeri devamlı sabit ve kontrol altında tutulmalıdır. Kaplama esnasında pH=4,4-5 arasında olmalıdır. Fakat en iyi kaplama hızı 4,6 – 5.0 pH değeri arasında elde edilir. Bu çalışmada pH değeri 4,8 olarak kaplama yapılmıştır. pH değeri arttıkça kaplama hızı artar ve fosfor miktarı ise azalır. Kaplamaların, kaplama sonrası sertlik değeri 495-590 HV arasında olup, bu hali ile endüstride kullanılmazlar ve sertliğini arttırmak için kaplama sonrası ısıtma işlemi uygulanmaktadır tabakasının sertliği arasında 1 saat

uygulanan ısı işlem ile kaplama kadar arttırılmaktadır. Böylece sert krom kaplamanın sertliğine eşdeğer bir sertlik elde edilir. Bu kaplamaların sürtünme özelliği mükemmeldir. Kaplamada nikel yanında bulunan P ve B gibi elementlerin doğal bir kaydırıcılık özelliği vardır. Çeliğe karşı sürtünme katsayısı yağlama yapılan koşulda 0,13 yağlamasız ortamda ise 0,4 civarındadır. Bu kaplamaların endüstride tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden birisi aşınma direncinin yüksek olmasıdır. Kaplanmış durumda ağırlık kaybı 18-25 mg/1000 çevrim ısı işlem sonunda ağırlık kaybı 12-15 mg/1000 çevrim arasındadır. Buna karşılık sert krom'un ağırlık kaybı ise 23mg/1000 çevrim gibi tipik bir sonuca sahiptir. Akımsız nikel tabakalarının karşı mukavemetleri korozyon ortamına, tabaka cinsine, kaplama şartlarına ve ön işlemlere bağlı olarak değişir. Sertlik değerini arttırmak için yapılan ısı işlem bu kaplamaların korozyon direncinde azalmaya yol açar. Bunun sebebi ise, ısı işlem esnasında amorf yapının kristal yapıya dönüşmesidir. Parçanın çalışacağı koşullara bağlı olarak istenen sertlik değerine ve korozyon direncine bağlı olarak ısı işlem prosesi düzenlenebilir. Kompozit akımsız nikel kaplamalarda hiç krom kullanılmaz. Bu sayede, kaplama ve krom kullanımı sebebiyle oluşan çevresel problemlerin önüne geçilir (Yazıcıoğlu, 2007) .

3.4. Aşınma Deneyleri Hakkında Literatür Bilgisi

3.4.1. Aşınma ölçüm yöntemleri

Ağırlık farkı yöntemi

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesinde bulunması sebebi ile en çok kullanılan ölçüm metodudur. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-4} veya 10^{-5} gr hassasiyetinde oldukça duyarlı terazi ile yapılır.

Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilmiş ise, alınan yol metre veya kilometre olarak tespit edilmiş bulunan kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade edilir. Ağırlık kaybı birim alanı için hesap edilecekse (gr/cm^2) gibi bir birim ile ifade olunabilir (Karabaşoğlu, 2008).

Kalınlık farkı yöntemi

Aşınma esnasında meydana gelecek boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması sureti ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile $1\mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülebilir. Boyutsal değişimin ölçülmesinde sistemin durdurulması gerekmez. Bunun için mekanik (mikrometre), optik (mikroskop), elektronik (lineer deplasman ölçer) yöntemlerde kullanılabilir.

İz değişimi yöntemi

Sürtünme yüzeyi bölgesi geometrisi belirli bir iz, plastik deformasyon ile oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun değişimi ölçülür. Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletidir. Bilya veya elmas pramitin bıraktığı iz çapındaki değişme mikroskop yardımıyla ölçülmesi suretiyle değişim incelenir.

Radyoizotoplar ile ölçme

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü atom parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle özel problemlerin çözümü dışında yaygın bir yöntem değildir. Bu yöntemlerde aşınma ve aşınma değişkenlerine ait veriler, esas itibarı ile pim disk aşınma test mekanizmasına ilave edilen uygun sensörler vasıtası ile belirlenmektedir. Aşınma kayıpları ve sürtünme katsayısı verileri bilgisayara A/D-D/A kartlar üzerinden aktararak işlenir. Bu veriler, bir paket programla grafik formlara dönüştürülebilir, istatistiksel analizlere tabi tutulabilir ve diğer hesaplamalarda kullanılabilir. Sistemin duyarlılığı, kullanılan sensörlerin ve kontrol kartının voltaj değerindeki lineer sapmaya bağlıdır (Karabaşoğlu, 2008).

3.4.2. Aşınma deney yöntemleri

Aşınma çalışmalarında birçok değişik deneysel düzenekler kullanılmaktadır. Aşınma için yapılan laboratuvar araştırmaları, genellikle hem oluşan aşınma mekanizmalarının incelenmesini hem de pratik uygulamaların benzeşiminin yapılması ve aşınma oranları ile sürtünme katsayıları için kullanışlı dizayn verilerinin elde edilmesini ortaya çıkarmaktadır. Her iki amaç için de aşınmayı etkileyebilen tüm değişkenlerin kontrol ve ölçümü oldukça önemlidir.

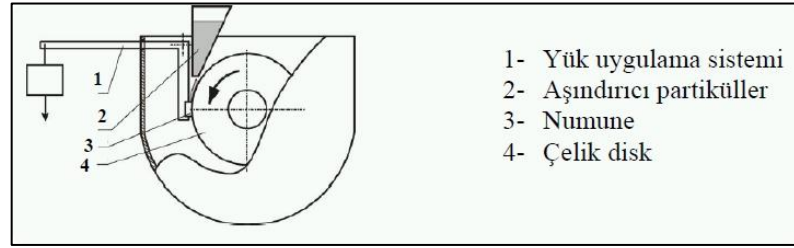
Bazı aşınma test metotları ulusal standartların konusudur. Örneğin bilezik üzeri blok (ASTM G77), çapraz silindir (ASTM G83), disk üstü pim (ASTM G99), disk üstü küre (DIN 50324) ve düz yüzey üzeri döner pim (ASTM G98). Kayma şartları altındaki aşınma, kayma aralığına ayrıca kayma hızı ve test süresinin her ikisinin birden büyüklüğüne bağlıdır. Kayma hızı sürtünme enerjisinin dağılma oranını ve böylece iç yüzeydeki sıcaklık oranını etkiler. Bir aşınma testinin sonuçları ile bu aşınma testinin yarı süresi, iki kat hız ile elde edilen bir başka aşınma testinin sonuçlarının aynı olması düşünülemez. Kayma hızı değişken aşınma mekanizması ve oranında ani geçişler olabilir. Aşınma ayrıca kayma yüzeyleri arasındaki nominal temas basıncına da bağlıdır. Temas basıncındaki değişmelerin oluşturduğu geçişleri de

içerir. Temas basıncından bağımsız olarak numunenin lineer boyutları da önemlidir. Uzun bir numunenin kenarına yakın bir yerdeki aşınma hasarı, temas bölgesinden geçişi esnasında kısa bir numunedeki aşınma hasarına göre daha etkilidir. Normal yük, temas alanı, kayma hızı ve test süresindeki büyük değişikliklerden başka diğer çeşitli faktörlerde aşınma testinde hesaba katılmalı ve izlenmelidir. Test sıcaklığı malzemenin mekanik özellikleri üzerine ve sıcaklığın harekete geçirdiği işlemler üzerinde etkisinden dolayı önemlidir. Yağlı sistemlerde yağ viskozitesi üzerine olan etkisinden dolayı test sıcaklığı önemlidir. Atmosferik bileşenler de önemlidir. Su buharı ve oksijen gibi reaktif bileşenler tüm malzemelerde aşınma oranını ve mekanizmasını kuvvetli bir şekilde etkiler. Yağlı sistemlerde, yağ filmlerindeki basınç dağılımı ve bunun sonucu film kalınlığı ve yağlayıcı maddenin miktarı da önemli faktörlerdir. Bu etkilerin geniş listesi, bir pratik uygulamanın laboratuvar benzeşimi kurmanın mümkün olmadığı ve sadece aşınma testinin bir servis deneyi olduğu akla gelebilir. Fakat çıkan sonuçların benzeşimi yapılan gerçek şartlardan çok uzak olduğu bilinmelidir. Temas gerilmeleri, temas şartları, kayma hızları ve kimyasal ortam herhangi bir aşınma testinde çok önemli bileşenlerdir. Sürtünmenin ölçülmesi ile ve testten sonra aşınan yüzeylerin ve aşınma hasarının son muayenesi ile bu önem daha iyi fark edilir. Aşınma mekanizması, servis uygulamalarına olduğu gibi testte de aynıdır. Bir laboratuvar testinin sonuçları güvenle pratik bir probleme uygulanabilir (Karabaşoğlu, 2008).

3.4.3. Aşınma deneylerinde kullanılan bazı aşınma deney cihazları

H. Klaasen ve J. Kübarsepp, bazı karpit bileşiklerinin aşınma performansı hakkında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aşınma deneyi için Şekil 3.15’ de şematik olarak gösterilen lastik (kauçuk) tekerli abrasyon (ASTM G65-94) deney cihazını kullanmışlardır. Bu deney cihazı üç partiküllü abrasif aşınma deneyleri için ideal bir tasarım olmakla birlikte disk üstü blok deneyi içinde rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca abrasif aşınma deneyleri ASTM standartlarına göre;

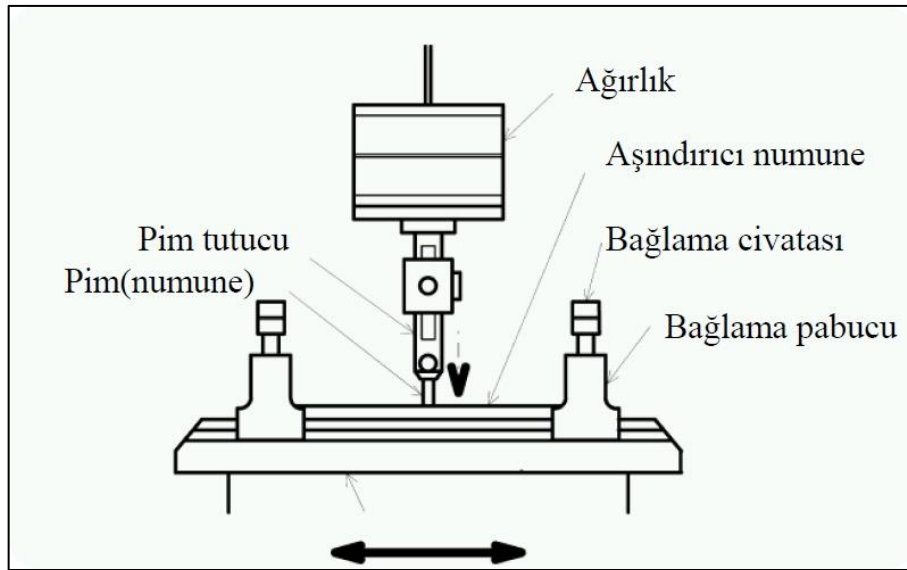
- G65 Lastik tekerli abrasyon testi(aşındırıcı kuru kum)
- G 105 Lastik tekerli abrasyon testi(aşındırıcı ıslak kum)
- B 611 Yüksek gerilmenin olduğu yerlerde çelik teker kullanılır.



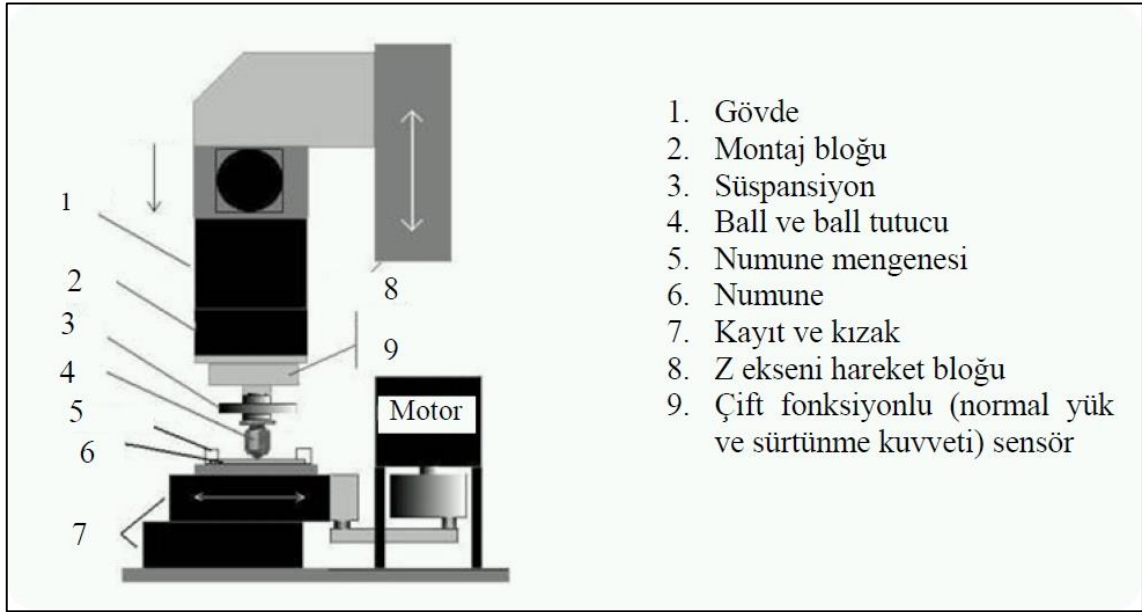
Şekil 3.15. ASTM G65-94 deney düzeneği.

Düzlem üzeri çubuk(pin on flat) deney cihazı

Düzlem üzerinde çubuk aparatında, sabit duran çubuk üzerinde bir düzlem git-gel hareketi yapar. Bazı durumlarda düzlem sabit ve çubuk hareketlidir. Çubuk, bir bilye, yarım küre uçlu bir ilave veya düz uçlu bir silindir olabilir. Yüksek frekansta küçük bir titreşim genliği kullanarak aşınma testleri yapılabilir (Karabaşoğlu, 2008).



Şekil 3.16. Pin on flat düzeneği.



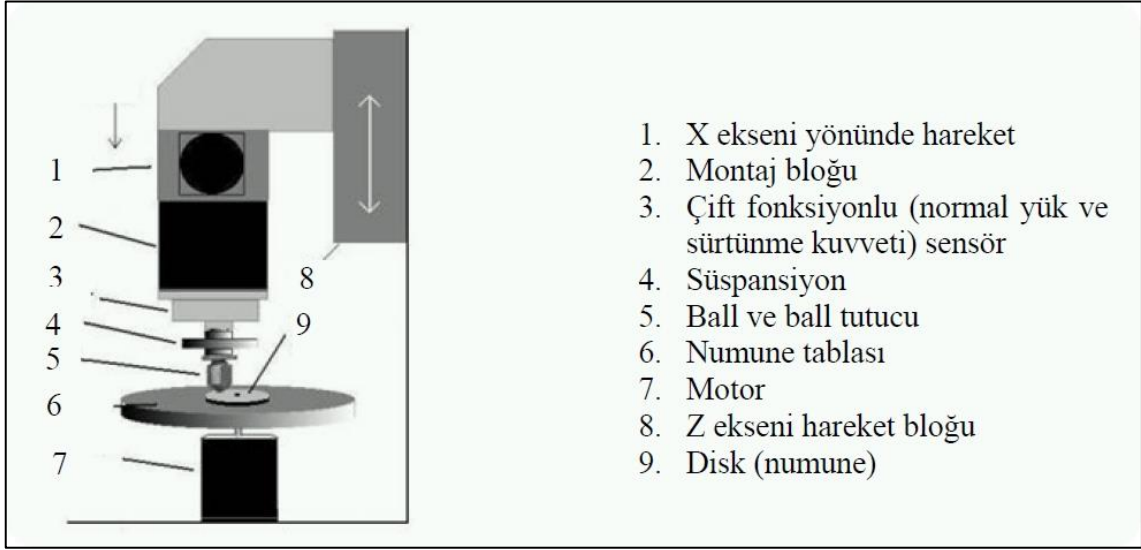
Şekil 3.17. Ball on flat düzeneği.

Ball on flat aşınma deney cihazı

Bu deney lineer olarak ileri geri hareket eden düz bir numune yüzeyine belirli bir yük ile temas ettirilen kürenin kayması esasına dayanmaktadır. Ayrıca aşınma deneyi ile birlikte sürtünme kuvveti deneyleri de yapılabilmektedir. Bu deney cihazının çalışma prensibi motordan alınan dairesel hareket ile kızak üzerinde bulunan kayıt lineer olarak ileri geri hareket ettirilmektedir. Kayıt üzerine bağlama aparatları ile bağlanan numune yüzeyine belirli ölçülerdeki bir kürenin belirlenen yük ile temasına dayanmaktadır. Bu deneydeki önemli parametreler; uygulanan yük, numunenin hareket uzunluğu, hareket sıklığı ve hızı, test sıcaklığı, ve test süresidir (Şekil 3.17).

Ball on disk deney cihazı

Ball on disk deney cihazı ile pin on disk deney cihazının çalışma prensipleri birbirilerine benzerler. Ball on disk deneyinde numune (disk) yüzeyine bir küre belirlenen yük ile temas ettirilmesi ile aşınma gerçekleştirilir. Motordan alınan dairesel hareket ile diskin kendi ekseninde dönmesi sağlanır. Küre, bağlama aparatları ile montaj bloğuna bağlanır. Ayrıca kürenin x veya y ekseninde hareket etmesi gereklidir (Karabaşoğlu, 2008).



Şekil 3.18. Ball on disk düzeneği.

3.4.4. Taramalı elektron mikroskobu

Temel olarak Taramalı elektron mikroskobu, Tungsten, Lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu (FEG) gun'dan ortaya çıkan elektronların kullanımı incelenecek malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşimlerden yararlanılması esasına dayanır. SEM'ler genel olarak bu elektron enerjisi 200-300 eV dan 100 keV a kadar değişebilir. Bu amaçla, yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercekle (condenser lense) toplanan, objektif mercekle odaklanan elektron demeti, yine elektromanyetik saptırıcı bobinlerle örnek yüzeyinde tarama işlemini (scanning) gerçekleştirir. Bir taramalı elektron mikroskobunda görüntü oluşumu temel olarak; elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşimlerin (elastik, elastik olmayan çarpışmalar ve diğerleri) sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi prensibine dayanır.



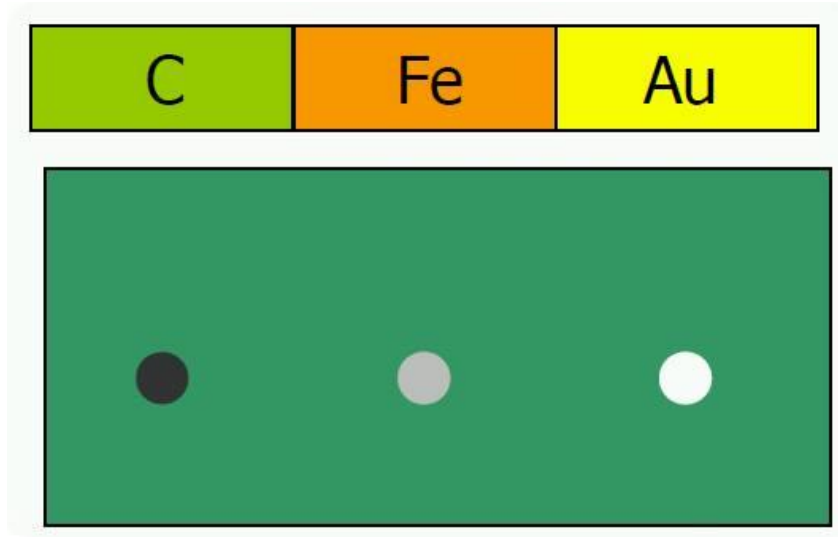
Şekil 3.19. 1940 yılında SEM mikroskobu (solda) , 2014 yılında SEM (sağda) (Uslu, 2013).

Bunlardan ilki, gelen elektron demetindeki elektronların, malzemedeki atomlarla yapmış olduğu elastik olmayan çarpışma sonucu (yani, örnek yüzeyindeki atomlardaki elektronlara enerjilerini transfer ederek) ortaya çıkan ikincil elektronlardır (secondary electrons). Bu elektronlar örnek yüzeyinin yaklaşık 10 nm'lik bir derinliğinden ortaya çıkarlar ve bunların tipik enerjileri en fazla 50 eV civarındadır. İkincil elektronlar fotoçoğaltıcı tüp yardımıyla toplanıp, örneğin tarama sinyali konumuyla ilişkilendirilerek yüzey görüntüsü elde edilir.

Elektron demeti ile incelenen örnek yüzeyindeki malzeme arasındaki etkileşimde ortaya çıkan diğer bir elektron grubu ise geri saçılma elektronları (backscattered electrons) adı verilen elektronlardır (bu elektronlar, yüzeye gelen elektron demeti ile yaklaşık 180^0 açı yapacak biçimde saçılırlar). Geri saçılma elektronları, yüzeyin derin bölgelerinden (yaklaşık 300 nm'ye kadar) gelen daha yüksek enerjili elektronlardır. Bu enerjideki elektronlar bir foto çoğaltıcı tüp tarafından tespit edilemeyecek kadar yüksek enerjiye sahip olduklarından, genellikle quadrant foto dedektörlerle (yani katı hal dedektörleri) yardımıyla tespit edilir. Bilindiği üzere bu tür dedektörler üzerine gelen elektronların indüklediği elektrik akımın şiddetine göre çıkış sinyali verirler (kısaca hatırlatmak gerekirse, incelenecek örnekteki yüksek atom numarasına sahip bir atomdan saçılan elektronun enerjisi küçük atom numaralı bir atomdan saçılana göre daha yüksektir). Sonuç olarak ikincil elektronlar incelenen örneğin kompozisyonu hakkında bilgi verir.

Gelen elektron demetinin incelenen örnek yüzeyi ile yapmış olduğu diğer bir etkileşme ise (yaklaşık 1000 nm derinlik civarında), karakteristik X ışınlarının çıktığı durumdur (enerjileri keV mertebesinde). Buna göre örneğe çarpan elektron, örnekteki atomun iç yörüngesinden bir elektron kopmasına neden olunca, enerji dengelenmesi gereği bir üst yörüngedeki elektron bu seviyeye geçer ve geçerken de ortama bir X ışını yayar ve buna da karakteristik X ışını adı verilir. Bu X ışını mesela 10 mm² çapındaki bir silikon lityum dedektörle algılanır, ortaya çıkan sinyal yükselticiye, oradan çok kanallı analizöre ve daha sonra da SEM sistemin bilgisayarına gönderilir. Sonuçta ortaya çıkan karakteristik X ışını (ki bu ışının enerjisi her atoma özeldir), SEM’de incelenen malzemenin element bakımından muhtevasının nitel ve nicel olarak tespit edilmesine yardımcı olur (Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, 2014).

Geri saçılan elektronlar ile elde edilen görüntüler, incelenen numunedeki atomların atom numaraları hakkında bilgi verir. Atomik numarası küçük olan elementler daha az sayıda elastik elektron yansıtır (düşük parlaklık) ve atom numarası büyüdükçe elastik bir şekilde yansıtılan elektronların sayısı artar (yüksek parlaklık). Atom numarasına bağlı olarak ortaya çıkan bu durum SEM fotoğrafında Şekil 3.20 ‘deki gibi bir kontrast meydana getirir (C:6 , Fe: 26 , Au:79) (Hitit, 2010).



Şekil 3.20 Atom numarasına bağlı kontrast farkı.

3.4.5. EDX analizi

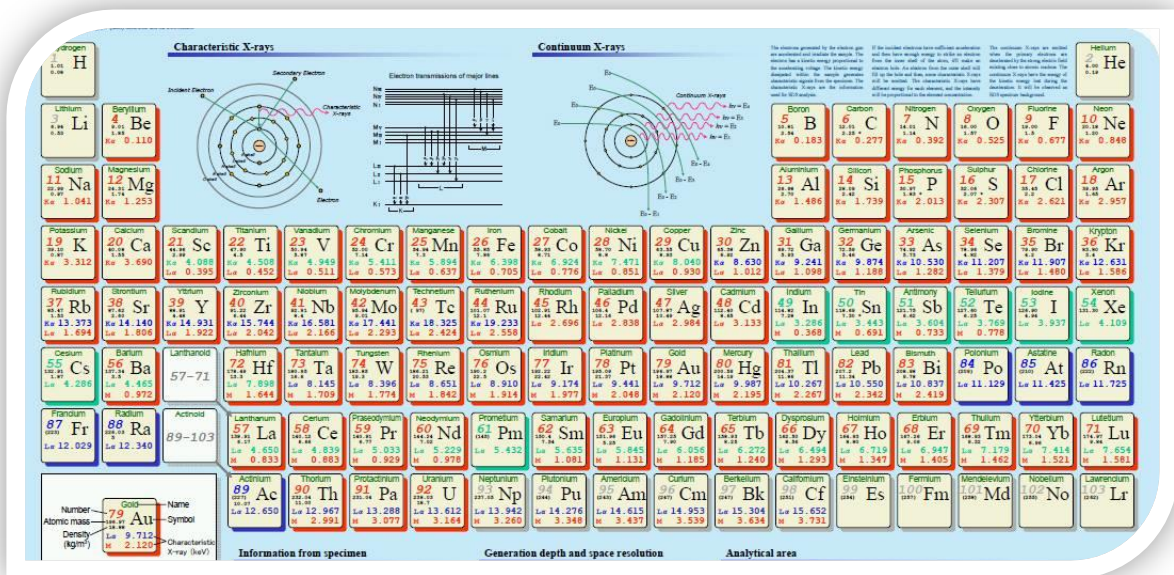
EDX analizi, incelenmek istenen bölgenin noktasal elementel analizinin yapılması için kullanılmaktadır.

Analiz yöntemi incelenmek istenen bölgeye yüksek enerjili elektronların gönderilmesi ve bu bölgedeki atomlardan kopan elektronların tekrar kararlı hale geçmesi esnasında x-ışınları şeklinde ortaya çıkan enerjinin detektörler aracılığıyla algılanmasına dayanmaktadır.

Her atom için karakteristik olan x-ışınları dalga boyuna ve şiddetine göre analiz yapılmaktadır. Numune içerisindeki elementlerin yüzdesi, element piklerinin altındaki alanla orantılıdır. Yüzde hesaplama bu alanın büyüklüğünün oranlanması ile yapılmaktadır.

Taramalı elektron mikroskopunda elde edilen görüntüye göre analiz edilmek istenen bölgeye gönderilen yüksek enerjili elektronların atomdan kopardığı elektronlardan yansıyan x-ışınları ile bölgenin elementel analizi elde edilebilmektedir. Bu şekilde noktasal ve/vaya bölgesel olarak elementel farklılıklar analiz edilebilmektedir. Taramalı elektron mikroskopunda görünen bölgenin, seçilen elementin x-ışınlarına göre, haritası çıkarılmakta kimyasal değişim analiz edilebilmektedir.

Her elementin kendine has doğal karakteristiği ve Şekil 3.21’de görülen enerjisi bulunmakta olup, buna bağlı olarak oluşan doğal pikleri bilinmektedir. Bu bilgiler ışığında, kimyasal içerik çıkarılabilmektedir (Çavaç, 2006).



Şekil 3.21. Elementlerin enerji karakteristikleri (<http://www.jeol.co.jp/en/>).

3.5. Uygun Aşınma Önleminin Kullanılması İçin Yararlanılabilecek Metodolojiler

3.5.1. 6 Sigma metodu



Altı sigma, 1970'lerde bir Japon şirketi olan Matsushita'ya, Amerikan şirketi olan Motorola'nın Quasar adlı televizyon şirketini, çok fazla hata oranının getirdiği verimsizlikten dolayı satması ve bunun üzerine Matsushita fabrikanın çalışmasında hızlı ve etkili değişikliklere gidip buradaki hata oranını %150'den %3'e düşürmesiyle başlamıştır. Japonların bu başarısının nedenlerini inceleyen Motorola uzmanları, ürün kalitesinden daha çok ürünün süreç kalitesiyle ilgili olduğunun anladıktan sonra 1980'lerin başında Motorola yönetim kurulu başkanı olan Robert Galvin'in liderliğiyle Motorola'da performansta gelişme için mücadeleye başlanmıştır.

Altı Sigma, operasyonlarda mükemmelliğin sağlanması amacıyla işletmelerde süreçlerin Tanımlanması,

- Ölçülmesi,
- Analiz edilmesi,
- İyileştirilmesi
- Kontrolü

için kolay ve etkili istatistik araçlarının kullanıldığı bir yönetim stratejisidir.

Adımları;

Tanımlama

Bu aşamada projenin amaç ve kapsamı tanımlanır. Süreç ve müşteri hakkında bilgi toplanır. Seçilen ve tanımlanan projenin daha yüksek bir kalite yaratma ve maliyetleri azaltma olasılığının yüksek olması önemlidir.

Bu aşamanın çıktısı: Planlanan iyileştirmenin ayrıntılı tanımı, müşteri için önemli olan faktörlerin listesi, üzerinde çalışılacak sürecin akış diyagramı yardımı ile detaylı gösterimidir.

Ölçme

Bu aşamada mevcut durumu tüm yönleriyle açıklayan bilgiler toplanır. Ölçme aşamasının amacı, var olan proses durum ve problemlerinin gerçeklere dayanan bir anlayış içinde oluşturulması ile problemlerin kaynak veya yerlerinin işaret edilmesidir. Bu bilgi analiz safhasında araştırmamız gereken potansiyel nedenlerin alanlarını daraltmamız konusunda bize yardımcı olur. Geçerli ve doğru ölçümler olmaksızın sürecin mevcut performansını ve yapılan iyileştirmelerin etkilerini belirlemek mümkün değildir.

Bu aşamanın çıktısı: Sürecin mevcut performansı, problemi ya da problemin oluşumunu açıklayan veriler, problemin daha özel ve detaylı bir tanımıdır.

Analiz

Ölçme safhası sürecin temel performans değerlerini ortaya koymuştur. Analiz safhasında problemlerin temel nedenleri hakkında teoriler geliştirilecek, bu teoriler verilerle doğrulanacak ve son olarak problemlerin temel nedenleri tanımlanacaktır. Doğruluğu kanıtlanan neden veya nedenler bir sonraki safhada tartışılacak çözümlerin oluşturulması için temel teşkil edecektir.

Bu aşamanın amacı problemin asıl nedenlerini tanımlamak ve bunların nedenlerini doğrulamaktır. Dolayısıyla bu aşamanın çıktısı test edilen ve doğrulanan bir hipotez olacaktır. Bu aşamada doğrulanan neden/nedenler bir sonraki aşamanın girdisini oluşturur.

İyileştirme

Geliştirme safhasında nedenleri ortadan kaldırmayı hedefleyen çözümler geliştirilir, uygulanır ve değerlendirilir. Bu çözümler daha iyi bir tahmini, daha iyi bir programlamayı, daha iyi bir prosedürü ya da daha iyi bir ekipmanı içerebilir.

Amaç, verileri kullanarak, ortaya konulan çözümün problemi çözdüğü ve gelişme için öncülük ettiğini göstermektir.

Bu aşamada ayrıca sonuçların bir sonraki aşamada nasıl değerlendirileceğini açıklayan bir plan oluşturulmalıdır.

Kontrol

Geliştirme safhası sonucunda ortaya konulan çözümler ve uygulamaları kalıcı kılmak ve sürekli kontrol altında tutmak için uygulanan bir safhadır.

Bu aşamanın amacı uygulanan iyileştirme planını ve elde edilen sonuçları değerlendirmek ve elde edilen kazançların sürdürülmesi ve arttırılması için yapılması gerekenleri ortaya koymaktır.

Kontrol safhası sonucunda zamanla yeni metotların geliştirilmesi sağlanabilir (DuPont, 2013)

3.5.2. Kaizen metodu



Kaizen teriminin anlamı “ Sürekli İyileştirme” dir ve Japoncadan gelmektedir.

Kai = Değişim

Zen= Daha iyisi için

- Kaizen’ in amacı problem ve israfları önlemektir,
- Büyük değişimler gerektirmez,
- Küçük adımlı iyileşmeler birleşerek büyük kazançlar sağlar.

Çalışma adımları şöyledir;

- 1) Problemi tanımla.
- 2) Mevcut durumu tanımla
- 3) Hedefleri Belirle.

- 4) Kök neden analizi.
- 5) Aksiyonları tanımla.
- 6) Aksiyonları planla.
- 7) Sonuçların gözden geçirilmesi.
- 8) Yaygınlaştır & Standartlaştır.

Özellikle 7 konu başlığı ile ilgilenir.

Aşınma, hata/hurda kategorisinde incelenir (DuPont, 2013).



şekil 3.22. Kaizen israfla mücadele başlıkları.

4. YÜZEY KAPLAMA İŞLEMLERİ

Kaplama işlemi esasen bir malzemenin başka bir malzeme üzerinde istenen kalınlıkta bir tabaka olarak biriktirilmesidir. Bütün kaplama işlemlerinin temel amacı biriktirildiği yüzeyin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesidir.

Kaplama işlemlerinin uygulama alanları baz alınır dört ana grup karşımıza çıkmaktadır (Keskin, 2006).

4.1. Mühendislik Amaçlı Kaplamalar

Mühendislik amaçlı kaplamalar üç grupta incelenebilir. Bunlar;

- Tribolojik amaçlı kaplamalar
- Elektrik-elektronik amaçlı kaplamalar
- Optik amaçlı kaplamalar (Keskin, 2006)

Tribolojik amaçlı Ergitme Esaslı Kaplama Yöntemleri

Kaynak, aynı veya benzer türden iki malzemeyi ısı, basınç veya her ikisini birden kullanmak suretiyle, ilave bir malzeme katarak veya katmadan yapılan birleştirme işlemidir ve özelliği itibarı ile bölgesel bir döküm işlemi olarak da düşünülebilir.

Bir iş parçasının genel olarak dış yüzeyinin sert ve iç kısmının ise yeterince mukavemetli ve sünek bir yapıda olması istenir. Böylece dış tabakanın aşınma ve korozyon gibi etkilere dayanıklı olması sağlanırken, parçanın iç kısmı gelen yüklere karşı mukavemetli olmaktadır. Malzeme yüzeyinde böyle bir tabakanın elde edilmesi için pek çok yüzey sertleştirme yöntemi geliştirilmiştir. Yukarıda sıralanan bu amaç için kullanılan yöntemlerden çoğu, istenen özelliklere uygun kaplama yapılmasına imkan vermemektedir. Bu yöntemlerle oluşan yüzey tabakaları bazen çok ince olmakta ve aşırı sertlikleri nedeniyle çalışma şartlarında gelen darbelere, çarpma ve vurma etkilerine karşı dayanıksızlık göstermektedir. Diğer yandan yöntemlerden bazılarının ilk yatırım veya uygulama maliyetleri oldukça yüksektir. Bazı yöntemlerin büyük boyutlu parçalar için yetersiz kalmaları da ayrı bir dezavantaj oluşturabilir. Kaplamaların yapılmasında en önemli etkenler ısı kaynağı ve kaplama malzemesi olarak düşünülebilir. Bu nedenle geleneksel olarak kullanılan kaynak yöntemlerinin kaplama işleminde bir ısı kaynağının kullanılması, ilave metal ve alaşımlarla malzeme yüzeyinin kaplanması fikri ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerle malzeme yüzeyine ilave sert tabakalar oluşturulabilmekte, mevcut yüzey değiştirilerek özellikleri geliştirilmekte ve aşınmış bir

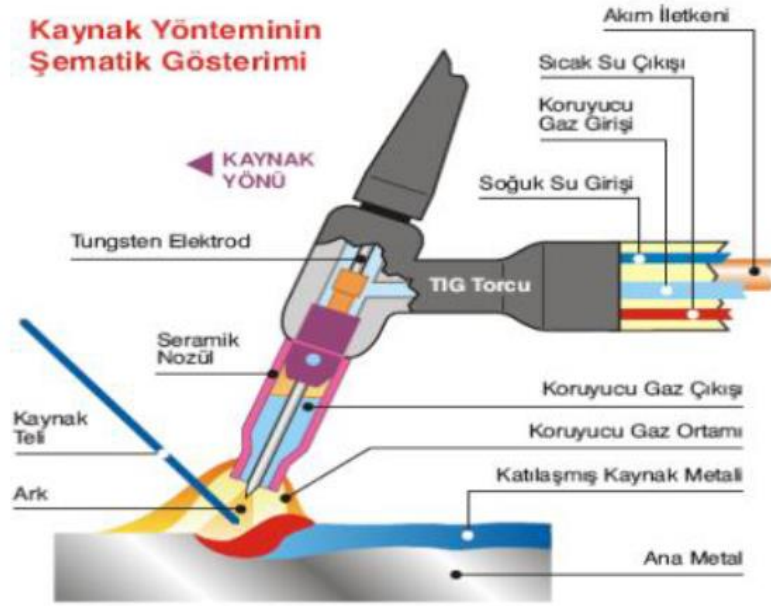
bölgenin tamiri yapılırken daha da güçlendirilebilmesi söz konusu olabilmektedir. Malzeme yüzeyinde bu şekilde ilaveler yapılması için klasik kaynak tekniklerinden olan elektrik ark; modern kaynak tekniklerinden de tozaltı, gazaltı ve plazma ark kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. İlk yatırım maliyetleri ve uygulamaları pahalı olmasına karşın, lazer ışını ve elektron ışını kaynak teknikleri de kaplama uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle uygulanan kaplamalarda genel olarak malzemede kısmen bozulma ve çarpılmalar, yüzey hassasiyetlerinin düzeltilmesi için talaşlı imalat ihtiyacının oluşması gibi dezavantajlar mevcuttur. Her şeye rağmen bu yöntemlerle diğer ergitme yöntemlerine göre daha kullanışlı mikroyapı ve mekanik özelliklere sahip bir kaplama tabakası (aşınma, korozyon ve erozyon direnci gösteren bir kompozit yapılı tabaka) oluşturulabilmektedir. Bu alanlarda birçok başka çalışmalar da yapılmış olup, bu yöntemlerin yüzey modifikasyonunda verimli olduğu ve başarılı bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

Elektrik ark kaynak yönteminin kullanılmasıyla oluşturulan kaplama yüzeyi; diğer gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) ve tozaltı kaynak yöntemlerine göre seramik matris karışımı şeklinde, aşınmaya dirençli, sertliği yüksek ve mikroyapısı daha ince taneli olmaktadır.

Ergitme esaslı kaplama yöntemleri lazerle yüzey kaplama, elektron ışını ile kaplama, tozaltı kaynağı ile kaplama, plazma transferli ark kaynağı ile kaplama, gaz tungsten ark (GTAW veya TIG) kaynağı ile kaplama ve elektrik ark kaynağı ile kaplama olmak üzere altı farklı şekilde yapılmaktadır. Ayrıca bunların yanı sıra sert lehimleme teknikleriyle de kaplama ve yapıştırma işlemleri yapılabilmektedir (Baykal, 2013).

TIG Kaynağı (Tungsten Inert Gas)

TIG kaynak yönteminde kaynak arkı erimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında teşekkül etmekte ark, elektrot ve erimiş banyo havanın tesirinden bir argon veya helyum atmosferi ile korunmaktadır. Koruyucu gazın soy bir gaz olması dolayısıyla oksidasyon ve nitrür teşekkülü gibi, istenmeyen haller önlenmektedir. Kaynak işlemi için bir kaynak ilave metaline (kaynak teli veya çubuğuna) ihtiyaç vardır (Bozkurt, 2008).



Şekil 4.1. TIG Kaynağı gösterimi (<http://izmitemlmetal.com>).

MIG Kaynağı (Metal Inert Gas)

MIG kaynağında genel olarak argon atmosferi altında kaynak yapılmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemelerin kaynağı için MIG kaynağı TIG kaynak yönteminden arkın kaynak yerine otomatik olarak gelen ilave metal ile iş parçası arasında teşekkül etmesiyle ayrılır.



Şekil 4.2. MIG Gösterimi (www.castolin.com.tr).

Elektron Işın Kaynağı

Elektron ışın kaynak prosesi, magnetik lens ile bir anota odaklanan elektronları hızlandırmak amacıyla pozitif bir gerilim gradyanı kullanılır. Metal yüzeyine çarparak ısı ve enerji oluşturan elektronlar kaynak işlemi için kullanılır. Güç yoğunluğu, TIG kaynak yöntemine nazaran daha yüksektir ve derin dar kaynak elde edilir.

Lazer Işın Kaynağı

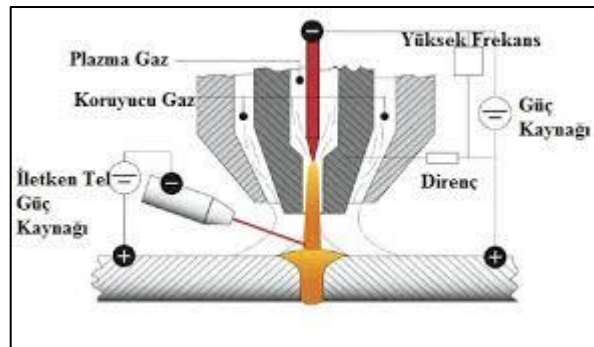
Bir kaç mikron mertebesindeki bölgelere odaklanabilme kabiliyeti ve 10^8W/cm^2 'nin üzerindeki yüksek güç yoğunluğu sebebiyle, tungsten gibi yüksek ergime sıcaklığı ($3400 \text{ }^\circ\text{C}$) olan metaller kendiliğinden erirler ve ısıya duyarlı civar bölgeler üzerindeki etki minimuma iner.

Direnç Kaynağı

İş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak tekniğidir.

Plazma Kaynağı

Plazma arki, serbestçe yanan bir arkta farklı olarak, çok iyi şekilde su ile soğutulan bir bakır memenin içinde daralan bir arktır. Ark genellikle erimeyen bir elektrot ile parça arasında yanar. Plazma memesi akımsızdır. Meme deliğinin içinden, ark içinde yüksek sıcaklığa erişen, soy bir gaz (genellikle argon) akar (Bozkurt, 2008).



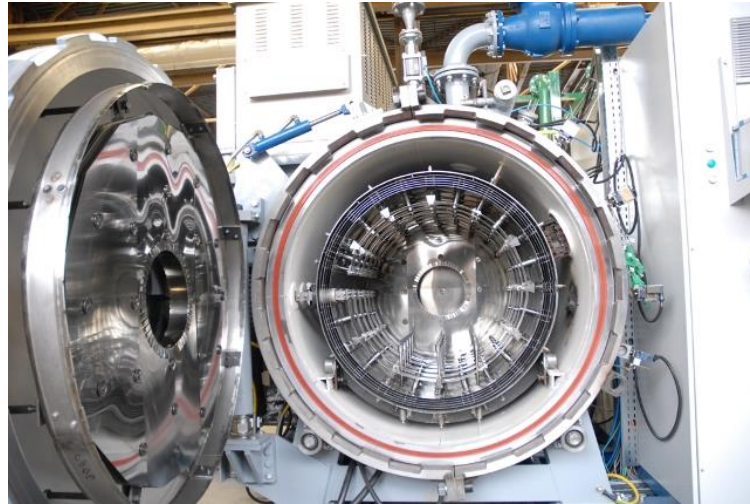
Şekil 4.3. Plazma ark kaynağı gösterimi (www.castolin.com.tr).

Vakumla Fırında Sert Lehimleme İle Yüzey Kaplama

Ergitmeli kaynak tekniklerinin aksine, lehimlemede ana metalin ergimesi gerekmez.

İki metalik malzeme kendileri erimeden erime derecesi daha düşük olan bir ilave malzemenin (lehim alaşımının) eritilmesiyle birleştirme işlemi gerçekleşir (Bozkurt, 2008).

Amerikan Kaynak Topluluğu (AWS) sert lehimleme işlemi; uygun sıcaklığa ısıtarak, 450 °C'nin üzerinde ergiyen ve taban metalinin katılma sıcaklığının altında katılma sıcaklığına sahip olan dolgu metali kullanılıp malzemelerin birleşimini sağlayan bir kaynak süreçleri grubu olarak tanımlar. Dolgu metali bağlantının uyumlu yüzeyleri arasında kılcal çekim sayesinde yayılır. Sert lehimlemenin oluşması için aşağıdaki üç kriter sağlanmalıdır:



Şekil 4.4. Sert lehimleme fırını (<http://www.sistemteknikfirin.com>).

Parçalar taban metalini ergitmeden birleştirilmelidir.

Sert lehimleme dolgu metali (SLDM) 450 °C'nin üzerinde bir ergime sıcaklığına sahip olmalıdır.

Sert lehimleme dolgu metali taban metalinin yüzeylerini ıslatmalıdır ve kılcal çekim ile tutulmalıdır (Kowalewski, 2006).

Fırında sert lehimleme, bağlayıcı malzeme olarak ferritik olmayan dolgu metali ve ısı kaynağı olarak fırın kullanarak küçük montajların elemanlarını metalurjik bir bağ ile birleştirilmesini sağlayan bir seri üretim işlemidir. Fırında sert lehimleme teknolojisi öncelikle kimyasal dekapan ihtiyacı gerektirmeyen, bu sayede dekapanın yarattığı problemi ortadan kaldıran bir sert lehimleme elde etmek için 1920'lerde başlatıldı ve ilk olarak yaklaşık

1930'larda ticari olarak kullanıldı. Sert lehimleme halen çeşitli endüstrilerde yaygın olarak uygulanmaktadır. İşlemin temel otomatik yapısı ve uzmanlık gerektirmeyen kullanımı yaygın olmasının sebepleridir (ASM International - Welding Brazing ve Soldering, 1993) .

Sert lehimleme işleminde ergiyik dolgu metali için önemli bir ön şart altlık malzemeyi ıslatabilmesidir, yani iki bileşen arasında direkt metalik temas kurulmasıdır. Teknik metal yüzeyler her zaman başlangıçta temizlenmesi gereken hemen hemen belirgin oksit tabakalar ve yüzey kirleticileri taşırlar. Bunlar fırın sert lehimleme işleminde uygun koruyucu gaz (örneğin argon, hidrojen veya azot-hidrojen karışımları) veya basınç aralığı 10^{-2} 'den 10^{-5} mbar'a kadar olan vakum sayesinde parçalanırlar. Koruyucu gaz veya vakum altında fırında yapılan sert lehimleme yöntemi ile toplu üretimde esasen Al, Cu ve Ni dolgu metalleri kullanılır.

Herhangi bir sert lehimleme yöntemi kullanarak iyi bir bağlantı elde etmek için aşağıdaki şartlar karşılanmalıdır:

- Parçalar sert lehimlemeden önce uygun şekilde temizlenmelidir.
- Parçalar ısıtma süreci sırasında oksitlenmeyi engellemek için dekapen veya atmosfer ile korunmalıdır.
- Parçalar kılcal çekimi karşılayacak şekilde boşluk payı bırakılarak tasarlanmalıdır (Kowalewski, 2006).

Fırında sert lehimleme işleminde; temizlenmiş parçalar ve sert lehimleme dolgu metali birleştirilir, bir fırın içine yerleştirilir ve sert lehimleme sıcaklığına kadar ısıtılır. Sert lehimleme; eğer dolgu metali bağlantı yerine işlemden önce yerleştirilebiliyor ve işlem sırasında aynı pozisyonda tutulabiliyor ise pratiktir. Isıtma hızı, sert lehimleme sıcaklığı ve zamanı ve soğutma hızı ayarlanabilir. Ayrıca birçok durumda sert lehimleme işlemi indirgeyici, asal veya vakum kontrollü atmosferlerden birinde yapılır (ASM International, Welding Brazing ve Soldering, 1993).

Fırında sert lehimlemenin avantajları ve kısıtlamaları

Fırında sert lehimlemenin avantajları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır (ASM International - Welding Brazing ve Soldering, 1993).

Tüm sert lehimleme prosedürleri tam olarak yapılırsa neredeyse tecrübesiz operatörler bile her gün üretim işlemi gerçekleştirebilir.

İşlemin tekrarlanabildiği ve yüksek kaliteli bağlantı sağlamak için birçok değişkenin kolaylıkla kontrol edilebildiği bir yöntemdir. Isıtma ve soğutma hızları gibi sert lehimleme sıcaklığı ve işlem süreci de kontrol edilip izlenebilir. Buna ek olarak, sert lehimleme atmosferi kolaylıkla ayarlanabilir.

Dekapanın yarattığı sıkıntıların olmayışı bağlantı tasarımında esnekliğe izin vermektedir. Fırın ve sert lehimlenen parça işlem sonrası temizlik gerektirmemektedir.

Parçaların çarpılma riski en aza indirgenir veya ortadan kaldırılır, çünkü montajın tümü dengeli olarak ısıtılır. Bazı durumlarda parçanın ısı işlemi de sert lehimleme döngüsüne dahil edilebilir.

Bir sert lehimleme döngüsünde bir iş parçasında birden fazla bağlantı noktası lehimlenebilir. Aynı sert lehimleme koşullarını gerektiren bir çok farklı montajlar da aynı anda sert lehimlenebilir.

Fırında sert lehimlemenin kısıtlamaları aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır (ASM International, Welding Brazing ve Soldering, 1993).

Fırında sert lehimleme ekipmanının ilk yatırım maliyeti nispeten yüksektir. Ekipmanın bakımı çok önemlidir ve diğer sert lehimleme yöntemlerinden daha pahalı olabilir. Özel koruyucu gaz atmosferinin maliyeti de hesaba katılmalıdır.

Tüm montajın ısıtılması sebebi ile ısıtma maliyeti diğer sert lehimleme işlemlerini geçmektedir. Buna ilaveten, sert lehimleme sıcaklığına ve lehimlenen malzemeye bağlı olarak taban metalinde mikro yapı değişiklikleri meydana gelebilir.

Sert lehimlemenin fırın içerisinde gerçekleştirilmesi sebebi ile bağlantı tasarımı önemlidir. Lehimlenecek bir montajı tutan kısımlar üretim maliyetini arttıran ekstra ısı miktarına ihtiyaç duyar.

Vakumla fırında sert lehimleme işlemi

Vakumla sert lehimleme genellikle yüksek sıcaklıkta (927 °C – 1232 °C), nikel veya bakır esaslı ve nadiren değerli dolgu metali kullanan dekapansız bir işlemdir. Vakum şartları altında sert lehimleme yapmanın avantajlarından bazıları şunlardır:

Atmosferin (vakum) saflık derecesi tam olarak kontrol edilebilir. Normal fırın atmosferinden çok daha saf atmosferler elde edilebilir, bunun faydası; iş parçasını kirletecek daha az kalıntı oksijenin olmasıdır.

Çarpılma en aza indirilir. Çünkü tüm parçalar hassas kontrollü ısıtma/soğutma hızlarında düzgün dağılımlı olarak ısıtılır ve soğutulur (Kowalewski, 2006).

Vakumla sert lehimleme fırınının verileri genelde mikroişlemci ile bilgisayar ortamına aktarılır. Programlanabilir mikroişlemci tüm lehimleme değişkenlerini kontrol eder. Bu değişkenler ısıtma hızı, sert lehimleme sıcaklığı ve süresi, soğutma hızı ve koruyucu gaz girişidir.

Vakum fırınları çok yönlü kullanıma uygundur, çünkü mikroişlemcinin hafızasında bir çok farklı lehimleme çevrimlerinin parametreleri saklanabilir. Ayrıca, lehimleme işlemini tehlikeye sokacak anormalliklerin tespiti için mikroişlemciye bir alarm sistemi kurulabilir (ASM International - Welding Brazing ve Soldering, 1993).

Ayrıca endüstride mevcut vakum fırınları ısıtma bölgesinin yapımında kullanılan malzemeye göre de iki tiptir. Isıtma bölgesinin konstrüksiyonunun (ısıtma elemanları ve yalıtım) seçimi vakum seviyesi ihtiyacına, taban metali ve sert lehim dolgu metali ile uygunluğuna, sıcaklık gereksinimlerine ve soğutma hızına bağlıdır.

Yalıtım ve ısıtma elemanları için en çok tercih edilen grafit ve molibden gibi bir refrakter metaldir. Molibden nemi emmez, daha hızlı ısıtır ve özellikle havacılık endüstrisinde titanyum, alüminyum veya bu elementleri yüksek oranda içeren malzemeler için tavsiye edilir. Grafit düşük bakım ihtiyaçları olan daha ekonomik bir malzemedir. Grafit malzemesinin saflığı son birkaç yılda geliştirilmiştir ve şimdi birçok vakum sert lehimleme işlemleri için göz önünde bulundurulmaktadır.

Vakumla sert lehimleme işleminde bağlantı aralığının bağlantının mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkisi vardır. Vakum sert lehimlemesine uygun gümüş, altın, bakır ve nikel sert lehimleme dolgu metalleri için sert lehimleme sıcaklığındaki bağlantı aralığı yaklaşık 0,01 mm'den 0,1 mm'ye kadardır. Belirli bir taban ve dolgu metali için tasarlanan bağlantı aralığının hesaplanmasında vakum faktörünün etkisi vardır. Vakum sert lehimlemesi, bağlantı noktasında optimum mukavemeti elde etmek için, atmosferik tip sert lehimlemeden daha düşük açıklıklar gerektirir. Dikey bağlantının vakumla fırında sert lehiminde eğer açıklık 0,05 mm'yi aşıyor ise serbest akan sert lehim dolgusu bağlantının dışına akar. Büyük açıklıklar uygun ergime özelliklerine sahip dolgularla doldurulabilir. Açıklığın oda sıcaklığında mı yoksa sert lehimleme sıcaklığında mı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Yaklaşık olarak aynı kütledeki benzer metallerde oda sıcaklığı uygundur.

Ayrıca eş kalitede sağlam sert lehimlenmiş bağlantılar sağlamak için temiz, oksitsiz yüzeyler zorunludur. Dengeli bir kılcal çekim etkisi sadece tüm gres, yağ, kir ve oksitlerin hem dolgu metalinden hem de taban metalinden işlem öncesi temizlendiği durumda elde edilebilir. Temizleme işleminin seçimi aşağıdakilere bağlıdır:

- Kirlenmenin yapısı,
- Temizlenecek taban metali,
- Sert lehimleme için gerekli temizlik seviyesi,
- Parça görünümü,
- Çıkarılması gereken veya kaplama için engel koyulması gereken bazı istenmeyen elementler (Al, Ti, N₂ gibi) (Kowalewski, 2006).

Fırında vakum altında lehimlemenin diğer uygulamaları lehim bağlantı kalitesinin ve lehimlenmiş montajın ölçü kontrolünün çok önemli olduğu jet motoru endüstrisinde görülebilir. Vakumla fırında sert lehimleme işlemi jet motoru parçalarının üretiminde kullanılan yaygın bir sistemdir (ASM International - Welding Brazing ve Soldering, 1993).

Sert Lehimleme Dolgu Metalinin Seçimi

Gerçek koşullar altında tatminkar bir kullanım için dolgu metali aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

- Kullanıldığı taban metalini ıslatma kabiliyeti,
- Uygun hazırlanmış bağlantılarda kılcal çekim etkisi ile dağılmaya izin vermesi için uygun ergime ve akma özellikleri,
- Kullanıldığı taban metali ile güçlü ve sağlam metalurjik bağ yapma kabiliyeti,
- Sert lehimleme şartları altında karşılaşılan sıvılaşıp ayrışmayı en aza indirmek için yeterli homojenliğin ve kararlılığın kimyasal bileşimine sahip olmalı ve sert lehimleme dolgu metalinin altlık malzeme ile uyumlu olması sağlanmalı,
- Sert lehimleme dolgu metali belirlenmiş çalışma ihtiyaçlarını karşılayacak lehim bağlantısını sağlayabilmelidir. Örneğin sert lehimlenen malzeme; mukavemet, ısıl çevrim ve yorulma, korozyon direnci, çalışma sıcaklığına, titreşimlere ve darbelere dayanabilmelidir (Kowalewski, 2006).

Volfram metalinin sert lehimlenmesi

Volfram, molibden, tantal ve niyobyum 2200 °C' nin üstünde ergirler ve dolayısıyla refrakter metal olarak nitelenirler. Uzay ve nükleer endüstride yüksek sıcaklıklara dayanan malzemeye olan talep, bu metalleri laboratuardan mühendislik alanına taşımıştır.

Pres ve sinterlenmiş, ark, döküm ve dövme şekillerinde üretilebilen volfram, bilinen metallerin en yüksek ergime sıcaklığına sahip olanıdır: 3482 °C. Özgül ağırlığı 19,3 gr/cm³ olup, yüksek elastisite modülü (young modülü) ve molibdeninkine yaklaşık olarak eşit ısı genleşme katsayısına sahip bu ağır metal; yüksek ergime noktası ile birlikte yüksek sıcaklık mukavemeti sayesinde, yüksek sıcaklık uygulamalarında çok kullanılır. Oldukça yüksek gevrek geçiş sıcaklığına (260-371 °C) sahip volframın oda sıcaklığında işlenmesi olanaksızdır. Rekrizalizasyon tavından sonra bu metal yüksek sıcaklıklarda azalan bir mukavemet ve süneklik özelliği gösterir (Bozkurt, 2008).

Gerçekten volfram oda sıcaklığında gevrek olup çalışılması güçtür. Tane sınırının mukavemeti ana kütlenin mukavemetinden önemli oranda daha azdır. Bu nedenle rekrizalizasyon sonrası volfram tane sınırından kopma gösterir. Tane boyutu ile şekillendirme ve saflık derecesine göre 100 °C ile 500 °C arasında bir sıcaklığın üstünde, tokluk derecesi hızla artar (Oğuz, 1988).

Uygun tekniklerin kullanılması halinde volfram volframla veya volfram diğer metallerle sert lehim yapılarak birleştirilebilir.

Son derece yüksek ergime noktası, alçak buhar basıncı ve ark altında az malzeme kaybı eğilimi sayesinde, volfram elektrik kontakt uygulamalarında; örneğin otomobil voltaj kontrol kontaktlarında, rölelerde ve devre kesicilerinde kullanılır. Aynı şekilde bu metal direnç kaynağı elektrotu olarak da kullanılmaktadır. Son yıllarda volfram, uzay endüstrisinde çok önem kazanmıştır.

Volframın birleştirilmesinde kullanılacak ilave metaller, tasarlanan özel uygulamaya göre seçilecektir. Çizelge 4.1'de volframın birleştirilmesinde kullanılan birçok ilave metal ve saf metal verilmiştir, ilave metal alaşımlarının likidus sıcaklıkları 650 °C ile 1927 °C arasında değişmektedir (Oğuz, 1988).

Çizelge 4.1. Volframın birleştirilmesinde kullanılan birçok ilave metaller ve saf metaller (Oğuz, 1988).

İlave Metal	Likidus Sıcaklığı (°C)	İlave Metal	Likidus Sıcaklığı (°C)
Cb	2416	Co – Cr – Si – Ni	1899
Ta	2996	Co – Cr – W – Ni	1427
Ag	960	Mo - Ru	1899
Cu	1052	Mo - B	1899
Ni	1454	Cu - Mn	871
Pd – Mo	1571	Cb - Ni	1191
Pt – Mo	1774	Pd – Ag – Mo	1316
Ag – Cu – Zn – Cd - Mo	618 – 702	Pd – Al	1177
Ag – Cu – Zn - Mo	718 – 788	Pd – Ni	1204
Ag – Cu – Mo	779	Pd – Cu	1204
Ag - Mn	971	Pd – Ag	1316
Ni – Cr - B	1066	Pd - Fe	1316
Ni – Cr – Fe – Si - C	1066	Au – Cu	885
Ni – Cr – Mo – Mn - Si	1149	Au – Ni	949
Ni – Ti	1288	Au – Ni - Cr	1038
Ni – Cr – Mo – Fe – W	1304	V – Ta – Cb	1816 – 1927
Ni – Cu	1349	V – Ta – Ti	1760 – 1843
Ni – Cr – Fe	1427	Ti – V – Be	1249
Ni – Cr – Si	1121	Zr – Cb – Be	1049
Mn – Ni - Co	1021	Zr – Ti - Be	999

Volfram; asal gaz, redükleyici atmosfer veya vakum atmosferli ocak, üfleç, direnç ve endüktif ısıtma kullanılarak sert lehimlenebilir. Parçaların ölçülerinin endüksiyon ve direnç sert lehimlemelerine uygun olamayacağı kadar büyük olmaları halinde ocak birleştirmesine başvurulur.

Volfram ya bir asal gaz (helyum, argon) atmosferinde, ya redükleyici atmosferde (hidrojen) ya da vakum ortamında sert lehimlenir. Vakum altında sert lehim işleminde iki önlem alınır. Bunlardan ilki, ilave metalleri oluşturan alaşım elementlerinin buhar basınçlarının kullanılan sıcaklık ve basınçlara uygun seçilmesi gereğidir. İkincisi ise, gaz çıkışının ana metal ve ilave metalin nitelikleri üzerinde hangi etkilere sahip olduğunun belirlenmesidir (Oğuz, 1988).

4.2. Korozyondan Korunmak Amaçlı Kaplamalar

Bu tür kaplamalar malzemeleri korozyondan korumak amaçlı yapılırlar. Korozyon, metalik malzeme kullanılan her alanda beklenen tabii bir olaydır. Sebep olduğu maddi kayıplar yanında çevreyi kirleten, insan hayatını tehlikeye sokan bir değişimdir. Bu değişimi en aza indirebilmek için malzeme yüzeyinin özellikleri değiştirilir ve korozyondan korunmaya çalışılır (Keskin, 2006).

4.2.1. Dekoratif kaplamalar

Söz konusu yüzey kaplama türlerini kaplama malzemesi açısından aşağıdaki gruplarda toplayabiliriz (Keskin, 2006);

- Metalik Kaplamalar
- Sıcak Daldırma
- Sıcak Püskürtme
- Elektrolitik Metal Kaplama
- Akımsız Metal Kaplama
- Yayınma İle Kaplama
- Vakum Kaplama
- İyon Kaplama
- İyon Aşılama
- Organik Kaplamalar
- Boyalar ve Cilalar
- İnorganik Kaplamalar

4.3. Metalik Kaplamalar

Metalik kaplamaları, metal ve alaşım kaplamaları şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Bu kaplamalar temelde mühendislik amaçlı ve malzemenin korozyona karşı korunması için uygulanmasına karşın dekoratif görünüm de temel amaçlardan biridir. Metalik kaplamalar;

- Fiziksel metodlar,
- Mekanik metodlar,
- Kimyasal metodlar ve
- Elektrokimyasal metodlar

olmak üzere endüstride dört ana şekilde uygulanmaktadır.

1. Fiziksel Metodlar: Sıcak daldırma, yayınma ile kaplama, vakum kaplama, katodik saçınım, iyon kaplama, iyon aşılama

2. Mekanik Metodlar: Metal giydirmeye, sıcak püskürtme

3. Kimyasal Metodlar:

a) Yüksek sıcaklıkta uygulanan metodlar: Değişimle, kimyasal indirgeme ile, ısıl ayrışım ile,

b) Düşük sıcaklıkta uygulanan metodlar: Kimyasal indirgeme, sementasyon, akımsız kaplama

4. Elektrokimyasal Kaplamalar: Elektrolitik kaplamalar.

Sıcak daldırma

Kaplanacak metal ile kaplama metali arasındaki reaksiyonun alaşım tabakaları oluşturması sonucu kaplama metali ile taban metal arasında fiziksel bir bağlantı sağlanması prensibine dayanan bu yöntem yaygın ve ucuz bir metal kaplama yöntemi olup genelde çelik malzemeler üzerine çinko, alüminyum, bakıra da kalay kaplamada kullanılır.

Sıcak püskürtme

Sıcak metalin zerrecikler halinde metale püskürtülerek orada donması ve zemine mekanik olarak bağlanması prensibine dayanan bu yöntemle, çinko ve alüminyum başta olmak üzere kurşun, kalay, bakır ve paslanmaz çelik kaplanır.

Elektrolitik metal kaplama

Yüzeyi metal kaplanacak olan parçanın uygun bir çözeltide katot yapılarak, buraya ulaşan metal iyonlarının elektron alarak indirgenmesi ve metal haline geçerek taban malzeme üzerinde tabaka oluşturması esasına dayanır.



Şekil 4.5. Sıcak daldırma ile galvaniz kaplama (<http://www.bdr galvaniz.com.tr>).

Akımsız metal kaplama

Kaplanacak metal iyonlarını ve bir indirgeyici içeren çözeltiye daldırılan metalin yüzeyinde indirgenme reaksiyonu meydana gelmesi ve bu şekilde metalin kaplanması esasına dayanır. Bu yöntemle özellikle nikel, bakır, kobalt, kalay ve gümüş kaplanmaktadır.



Şekil 4.6. Akımsız nikel kaplama gösterimi (<http://www.turmosan.com>).

Yayınma ile kaplama

Kaplanacak metalin tozunun, ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta kaplanacak metal ile temas ettirilmesi sonucu, metalin kaplanacak metale yayınması ile malzeme yüzeyi kaplanır.

Vakum kaplama

Ergitilmiş metalin vakum ortamında kaplanmak istenilen soğuk yüzeyle temas ettirilmesi sonucu, metal yüzeyinin her tarafı kaplanır. Yöntem hem metalik hem de metalik olmayan yüzeylerin kaplanmasında kullanılabilir.

İyon kaplama

Kaplama işlemi vakum ortamında yapılır. Yüksek enerjili iyon bombardımanı altında yüzey hem temizlenir hem de kaplanır.

İyon aşılama

Vakum altında yapılan bir başka kaplama türüdür. İyonize edilmiş partiküllerin metal yüzeyinin fiziksel ve kimyasal özelliğini değiştirmesi esasına dayanır.

Organik kaplamalar

Organik kaplamaları temelde dört ana gruba ayırmak mümkündür.

- a) Boyalar ve cilalar
- b) Vernikler ve fırınlanmış emayeler
- c) Ziftli kaplamalar
- d) Plastik kaplamalar

Organik kaplamalar genel olarak dekoratif ve korozyondan koruma amacıyla kullanılırlar. Ayrıca özellikle polimer kaplamalar tribolojik özellikleri geliştirmek amacıyla kullanılırlar. Polimerler iyi aşınma ve korozyon dirençlerinin yanı sıra kendinden yağlama, düşük ses emisyonu ve ucuz üretim maliyeti ile stratejik öneme sahip tribolojik malzemelerdir.

İnorganik kaplamalar

İnorganik kaplamaları, seramik kaplamalar, camlar, değişim kaplamalar (anodik oksidasyon, kromatlama gibi), camsı emayeler gibi çeşitli gruplara ayırmak mümkündür.

Bu türler içerisinde iyonik kaplama yöntemi ile üretilen seramik kaplamalar grubu içinde yer alan ince film sert seramik kaplamalar yüksek aşınma dirençleri ve sürtünme özelliklerinin yanında iyi yapışma ve kolay üretilebilirlikleri gibi faktörlere bağlı olarak endüstri de kullanılan kesici ve delici takımların kaplanmasında ön plana çıkmışlardır.

Sert seramik kaplamaların üretiminde buhar fazından, vakum altında yapılan kaplamalar sahip oldukları özellikleri ile yoğun şekilde tercih edilmektedirler. Bu özellikler şöyle sıralanabilir;

- Vakum sistemleri ile beraber üretimlerinde düşük maliyet,
- Çok ince ve yüksek saflıkta kaplanabilmeleri,
- İyi yapışma özelliği göstermeleri ve
- Kaplama malzemesinin tercih sayısının yüksek oluşudur.

Buhar fazında yapılan kaplamalar üç ana grupta toplanabilir ;

- a) Fiziksel buhar biriktirme
- b) Kimyasal buhar biriktirme
- c) Fiziksel-kimyasal buhar biriktirme

Fiziksel buhar biriktirme (FBB)

Yüksek vakum altında (10^{-6} Pa) malzemenin buharlaştırılarak karşı malzeme üzerinde biriktirilmesidir. Fiziksel buharlaştırma yöntemi buharın oluşturulması şekline göre buharlaştırma ve sıçratma olarak ikiye ayrılır. Buharlaştırma yönteminde termal, ark ve iyon demeti gibi ısı kaynakları yardımıyla malzeme buhar haline getirilmektedir. Sıçratmada ise, malzeme pozitif iyonlarla bombardımana tutulur ve yüzeiden atom koparılır dolayısıyla buhar kaynağı olarak kullanılmış olur. Fiziksel buhar biriktirme genelde tüm malzemelere uygulanabilirliği, biriktirme hızının ve tabaka kalınlığının kontrol edilebilirliği gibi özellikleri sayesinde tercih edilen bir yöntemdir. Kesici takımlar için FBB pazarı hızla büyümektedir. Teknolojik gelişmelere paralel olarak, kesici takım yüzeylerinin fiziksel ve tribolojik özelliklerinin iyileştirilmesine, takım ömrü ve performansı artırılarak maliyetlerinin azaltılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Fiziksel buhar biriktirme belli başlı 3 tekniği kapsamaktadır (Keskin, 2006).

- Buharlaştırma yöntemi (evaporation)
- Sıçratma yöntemi (Sputtering)
- İyon kaplama yöntemi (Ion plating)

Buharlaştırma yöntemi

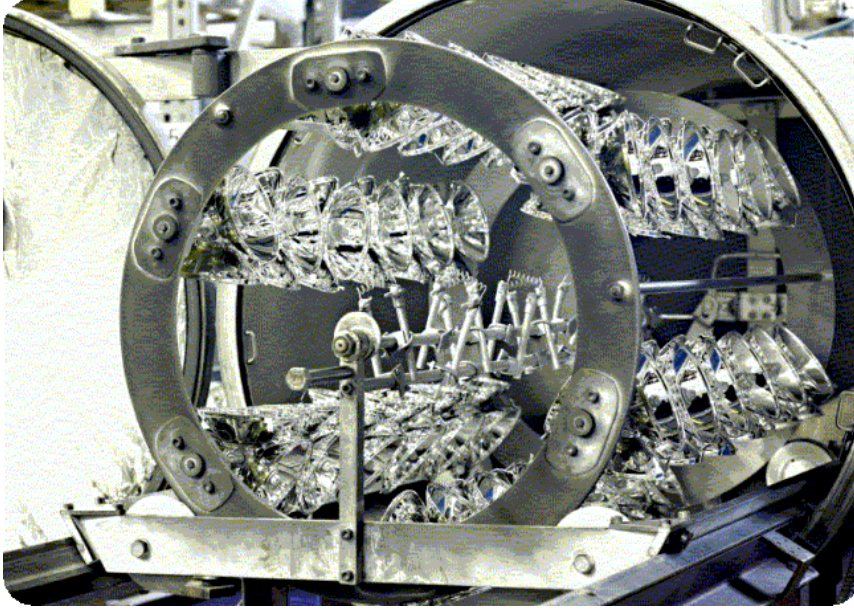
FBB yöntemleri içerisinde en eskisi ve en kolay uygulananıdır. Yöntemin esası oldukça basittir. Vakum altında ısıl olarak veya elektron demeti ile ısıtılarak ergitilen malzeme buharlaşarak kaplanacak malzemenin üzerine çöker. Buharlaşan malzemenin buhar fazındaki atomlarının enerjisi oldukça düşüktür (0,2-0,6 eV). Bu nedenle kaplama yoğunluğu düşüktür ve kaplanacak malzemeye yapışması zayıftır.

Sıçratma yöntemi

Kaplama malzemesinin enerji yüklü parçacıklarla (genellikle iyonlarla) bombardımanı sonucu sıçratılan atomların, kaplanacak metal yüzeyine birikmesi esasına dayanır. Bu yöntemde atomların enerjileri 4-20 eV civarındadır.

İyon kaplama

Diğer yöntemlerden temel farkı, kaplanacak malzeme atomlarının iyonize edilmesi ve kaplanacak malzemeye uygulanan potansiyel sayesinde (BIAS voltajı) hızlandırılmalarıdır. İyonize olan atomların kaplanacak malzeme yüzeyine doğru hızlandırılıp çarptırılmaları ile aynı zamanda malzemenin ısıtılması ve temizlenmesi sağlanır. Isıtma özellikle kaplamanın yüzeye yapışma özelliğini geliştirir. İyon kaplama yöntemi PVD teknikleri içerisinde en yüksek enerjili parçacıkların kaplama işleminde kullanıldıkları (70-80 eV) en hızlı ve en yoğun kaplama tabakası elde edilen yöntemdir. PVD tekniğine sert ince film tekniği de denmesinin nedeni kaplama tabaka kalınlığının 1-5 mikron arasında yapılması ve bu kalınlıklarda tabakanın bazı fiziksel özelliklerinin kaplanacak malzemenin fiziksel özelliklerini almasıdır. Mesela ana malzeme kaplanacak malzemenin ısıl genleşme katsayısını almaktadır. PVD tekniği ile TiN (titanyum nitrür), TiC (titanyum karbür), TiO₂ (titanyum oksit), ZrN (Zirkonyum nitrür), ZrC (Zirkonyum karbür), CrN (krom nitrür), CrC (krom karbür), AlN (alüminyum nitrür), Al₂O₃ (alüminyum oksit), Ti(CN) (titanyum karbonitrür), (TiAl)N (titan alüminyum nitrür), gibi kaplamalar yapılabilmektedir (Keskin, 2006).



Şekil 4.7. PVD fırını (<http://www.aygersan.com.tr/>).

Kimyasal buhar biriktirme (KBB)

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi (CVD: Chemical Vapor Deposition) vakum altında (65 Pa - 0.1 MPa) uygulanabilen, malzemenin bir reaksiyon hücresi içine buhar olarak gönderilmesi ve karşı malzeme üzerinde biriktirilmesi esasına dayanır. Fiziksel buhar biriktirme teknikleriyle kıyaslandığında en dezavantajı çok yüksek sıcaklıklarda (1000 – 1200 °C) uygulanabilmesidir. Dolayısıyla kullanım alanı WC-Co sert metal malzemelerle sınırlı kalmaktadır.

Kimyasal buhar çöktürme tekniği gaz karbürizasyonuna ve karbonitrürasyona benzer. Bu teknikte buhar fazında kararlı katı reaksiyon ürünleri kimyasal çözünme veya kimyasal reaksiyonla kaplanacak malzeme üzerinde çekirdeklenir ve gelişir. Reaksiyon ve reaksiyon ürünlerinin bir çoğu 700-1200 °C gibi yüksek (PVD' ye göre) sıcaklıklarda gerçekleşir. KBB tekniğiyle TiC, TiN, TiCN, Al₂O₃, Cr₇C₃ gibi kaplamalar 1-10 mikrometre kaplama kalınlıkları en çok uygulananlarıdır. Bu ince film kaplama tekniğinde TiCl₄ 'ün reaktif gaz atmosferinde H₂ , N₂ , CH₄ ,CO gibi gazlarla işlem odasına gönderilmesi sonucu işlem odasında kaplanacak malzeme üzerinde çözünüp çökmesiyle kaplama gerçekleşir. Serbest kalan gazlarda işlem odasından uzaklaştırılır. KBB de kullanılan reaktif atmosferler; kloridler, floridler, bromitler, karboniller, organometalik bileşenler, hidritler ve hidrokarbonlardır. Reaktif atmosfer kaplanacak malzemeye ulaşmaya kadar kararlıdır.

Kaplanacak malzemede reaksiyon reaktifin yeterince değişimi ile oluşur. Gaz atmosferi sağlamak için bazen reaktifi ısıtmak gerekir. Hidrojende çoğunlukla indirgen madde olarak dahil edilir.

KBB tekniğinde kaplama malzemesinin, kaplanacak malzemenin sıcaklık ve basınçla ilgili kimyasal ,mekanik ve fiziksel özelliklerinin uyumu önemlidir. Kullanılan basınç düşük veya yüksek basınç şeklinde olmakta, değeri de 1-1000 mbar değerinde olduğu gibi 10^{-4} - 10^{-1} mbar değerlerinde de olabilmektedir. KBB tekniğinde sıcaklık aralığı (çeşitli kaplamalar göz önüne alındığında) genelde 700-1200⁰C şeklinde literatürde verilmesine rağmen son zamanlarda 300-600⁰C sıcaklıklar arasında W₂C gibi kaplamalar çelik malzeme üzerine kaplanmaktadır. Fakat bunların özellikleri TiC kadar iyi değildir. Bu yöntemde tek kademeli kaplama yapılacağı gibi kullanım yerine göre çok kademeli kaplamalar da yapılabilmektedir. Sadece aşınma dirençli ve korozyon dirençli kaplamaların yanı sıra çok kademeli olarak aşınma artı korozyon dirençli kaplamalar da elde edilebilmektedir.

Fiziksel-Kimyasal Buhar Biriktirme (FKBB)

Söz konusu her iki tekniğin karışımı olup kimyasal buhar biriktirme işlemini harekete geçirmek için plazmanın (glow discharge) şerare etkisinden faydalanılır (Keskin, 2006).

Sol jel tekniği

Sol-Jel seramik kaplama prosesinde 4 kademe mevcuttur;

- a) Sol'un hazırlanması.
- b) Kaplanacak yüzeye solun tatbik edilmesi (mesela püskürterek)
- c) Jel oluşumu için solun kurutulması,
- d) Kuvvetli bir bağlanma özelliğine sahip bir kaplama eldesi için pişirme işlemi,

Sol hazırlamada iki yol vardır. Birinci yol hidroliz ve hidrolizi takip eden polimerizasyondur. İkinci yol ise çökeltme ve onu takip eden peptizasyon işlemidir. Silikanın, zirkonyanın, titanyumoksitin, seryumoksitin, alüminanın solları yanında Si₃N₄, AlN gibi nitrürlü sollarla hazırlanabilecektedir (Salman, 1995).

Elde edilen solun kaplanacak malzemeye uygulanması kaplanacak malzemenin sola daldırılması, kaplanacak malzemeye solun püskürtülmesi gibi tekniklerle olur. Solun

uygulanacağı malzeme yüzeyi solun uygulama şeklini belirler. Kaplanacak, malzeme yüzeyi temiz, yüzey işlemi görmüş olmalıdır.

Soldan jele dönüşüme dikkat edilmelidir. Kurutma hızı yavaş olmalıdır. Hızlı kurutmalarda jel çatlama oluşabilir. Bu durumda işlem geri döndürülebilir olduğundan jelden sola dönüşüm için su gibi ilaveler yapmak gerekebilir. Solun kaplanacak malzemeye uygulanması ve jel oluşumu için kurutulmasından sonra iyi bir kaplama eldesi için jel yüksek sıcaklıklara (440-1200°C) pişirilir. Sinterleşmenin oluşması için gerekli olan bu yüksek sıcaklığa çıkarma süresi kısa olmalıdır. Genellikle bu, süre 15 dakikadır. Tek kademede sol uygulanması solun viskozite, plastiklik, elastiklik gibi akışkanlık özelliklerinin ve ilave edilen katkıların kontrolüyle kaplama kalınlığı 0,1-2 mikrometre arasında değişir (Salman, 1995) .

Detonasyon tabancası (DG -Detonation Gun) tekniği

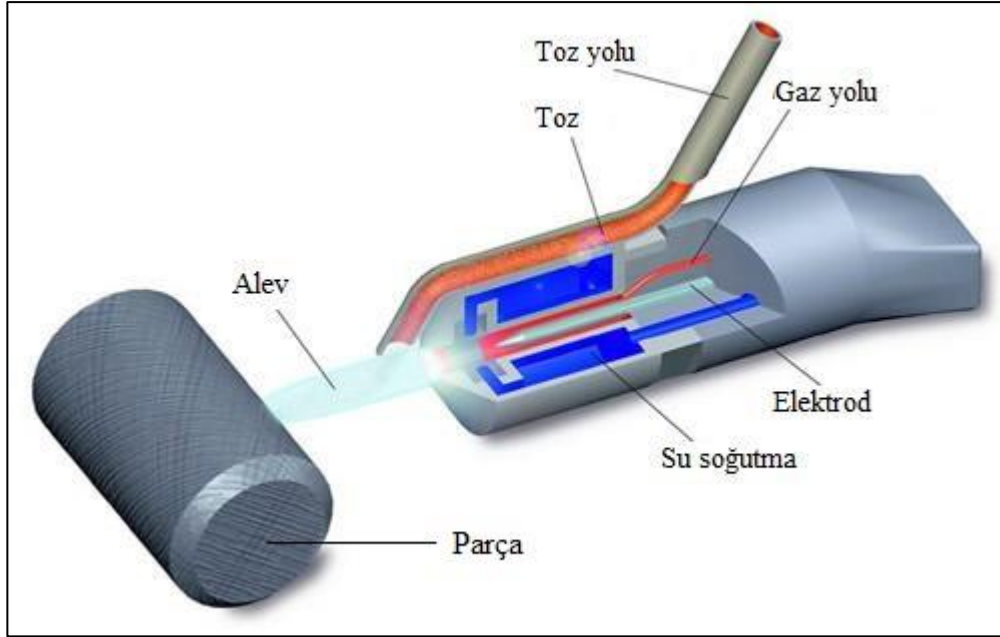
Bir ısı püskürtme tekniği olan detonasyon tabancası tekniğinde kaplanacak toz taneleri yanma odasında oksijen asetilen karışımının infilak ettirilmesi ile ergime sıcaklığına kadar ısınır ve kaplanacak malzeme üzerine sevk ettirilerek kaplama yapılır.

Literatürde D-gun tekniği adıyla anılan tekniğin hızı 900 m/sn'ye kadar çıkar. Sıcaklık 4000°C ye kadar çıkabilir ve oksijenasetilen karışımıyla oluşan infilak saniyede 4-8 kez tekrarlanır. Her infilak arasında N₂ ile temizlenir. Yüksek sıcaklıklara çıkmak söz konusu olduğundan su soğutma sistemi de bulunur.

Detonasyon tabancası belli iç çapa sahip uzun bir borunun geliştirilmiş halidir. Union Carbide şirketi 1983 yılında 2.5 cm iç çapında 1 m uzunluğunda su soğutmalı bir namluyu geliştirmişti. D-gun tekniği 1960'lı yıllardan itibaren halen gelişme içindedir. Her bir detonasyonda 25 mm.'lik dairesel bir kaplama oluşur ve bu kaplamaların kalınlığı bir kaç mikron olup üst üste bindirmeyle optimum kalınlığa ulaşır (Salman, 1995).

Plazma püskürtme tekniği

Bu tekniğe adını veren plazma, malzemenin buharının normal gaz halinden daha yüksek bir enerji seviyesine yükseldiği hali ifade eder. Normal (adi) gazlar ayrı moleküllerden ibarettir. Plazmada parçalanmış ve ayrılmış aynı gazlardan oluşur; öyle ki, elektriksel olarak yüklü partiküllerinin bir kısmı ayrılmıştır. Adi gazlar ısıtıldıklarında klasik fizik ve termodinamik kanunlarını takip ederler; plazma bu eski klasik kanunlara uymaz ve bundan dolayı maddenin dördüncü hali olarak vasıflandırılır.



Şekil 4.8. Plazma püskürtme (<http://www.stellite.co.uk/>).

Atomik seviyede, plazma çekirdeğinde 2 pozitif yükü ve yörüngesinde 2 negatif yükü (elektron) olan nötr bir atomun elektronlarından birinin yeterince yüksek bir enerji ile yörüngeden atılıp atomun pozitif yüklü bir iyon haline geçmesiyle ilgilidir. Böylece biri iyonize edilmiş atom ve diğeri serbest elektronlardan ibaret iki partikül elde edilmiş olur.

Nötr bir atomdan bir elektronu uzaklaştırmak için gerekli enerji ise iyonizasyon enerjisi olarak adlandırılır. Plazma pozitif yüklü iyonlarla negatif yüklü elektronlardan ibaret bir gazdır ve elektriksel olarak nötrdür, Adi gazlara göre plazma 2 büyük avantaj sağlar;

- a) Daha yüksek sıcaklık,
- b) Diğer cisimlerle daha iyi ısı transferi.

Kısaca; kaplama malzemesinin plazma gazı içersinden geçirilerek ergimiş halde kaplanacak malzeme üzerine püskürtülmesi , plazma püskürtme tekniği adını alır.

Plazma püskürtme tekniğinde, kaplanacak toz bir gaz eşliğinde gönderilmektedir. Plazma püskürtme tekniğinin ortaya çıkışı, 1950'li yılların sonlarına doğru başlamıştır. Isıl püskürtme endüstrisinin gelişimi 1950'nin sonlarına doğru yavaş fakat istikrarlıydı. 1957'ye gelindiğinde Thermal Dynamics ve Giannini Scientific adlı Amerikan şirketlerinin plazma püskürtme tabancalarını ısı püskürtme endüstrisi ile tanıştırmaları, ısı püskürtme endüstrilerinin. gelişimini hızlandırdı. Metco şirketi 1960'da plazma püskürtme tekniğiyle ilgili

Thermal Dynamics'de bulunan benzeri bir üniteyi kurdu. Mesela NASA 1960'lı yılların başında 100'ün üzerinde plazma püskürtme sistemi satın almıştı. Plazma püskürtme alanında teknolojik gelişmeler halen devam etmektedir.

Plazma püskürtme tekniğinde elektrotlar arasında oluşturulan ark içinden geçirilen inert bir gaza enerji depolanır (Salman, 1995).

Alevle püskürtme tekniği

Alevle püskürtme tabancasıyla seramikler püskürtüldüğü gibi çeşitli alaşımlar, sermetler ve oksidasyona dirençli alaşımlarda püskürtülebilmektedir.

Seramik malzeme toz veya çubuk şeklinde alevin içinden geçirilir, Böylece seramik ergiyerek kaplanacak yüzeye püskürtülür. Tel formunda metal malzemelerde alevle püskürtme tekniğinde ergitilerek püskürtülebilmektedir. Yakıcı gaz olan oksijenin yanında kullanılan yanıcı gazlar asetilen, propan veya hidrojenidir (Salman, 1995).

Diğer bazı seramik kaplama teknikleri

Yüzey tekniklerinden biri olan seramiklerin ısı püskürtülmesi, diğer yüzey tekniklerine göre avantajla nedeniyle çeşitli sahalarda artarak gelişmektedir. Kaynak tekniğinde olduğu gibi ısı püskürtme tekniği birçok bilimsel alanla ilişkilidir. Bu nedenle yeni tekniklerde, cihazlarda ve malzemelerdeki son zamanlardaki gelişmeler bazı seramik kaplama tekniklerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu teknikler hala gelişmelerini sürdürmektedirler.



Şekil 4.9. Hipersonik püskürtme (<http://hvof.gts-ev.de/>).

Bu tekniklerden bilinenleri jet kote (HVOF – High Velocity Oxy Fuel) veya hipersonik püskürtme, lazer ısıl püskürtme, düşük basınçta plazma püskürtme (vakum altında plazma püskürtme), ileri plazma püskürtme sistemi, gaz plazma püskürtme sayılabilir.

Bu sistemde yanma odasında yanıcı gaz oksijenle yanarak yüksek basınç altında alev oluşturur. Yanıcı gazlar olarak bilinen hidrojen, propilen, propan, metilasetilen-propadien kullanılır. Püskürtülecek tozlar jet içine nitrojen gazı ile taşınır. Kullanılan nozülün boyunun uzun oluşu dar ve homojen bir alev sağlar. Jet kote yönteminin diğer avantajları da yüksek kinetik enerjili partiküllerin (taneciklerin) püskürtülebilmesi ve çok aşırı olmayan yanma sıcaklığı sayılabilir.

Lazer ışını, metal ve seramiklerin ısıl püskürtülebilmesi için kolaylıkla uygulanabilmektedir. Lazer ısıl püskürtme olarak bilinen bu metot da, lazer ışınının yüksek enerji yoğunluğundan istifade edilir. Püskürtülecek kaplama malzemesi yüksek sıcaklığa kolaylıkla ısıtılır ve etkili bir şekilde ergitilir (Salman, 1995).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneyde Kullanılan Ekipman Ve Malzemeler

5.1.1. Kuru karıştırıcının taban (Ana) malzemesi

Çizelge 5.1. "1020 Çeliği" Mekanik özellikleri (<http://bilgecelik.com.tr>).

%C	%Si	%Mn	%P max	% S max
0.18-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	0.045	0.045

5.1.2. Kullanılan kaplamalar

5.1.2.1. CrC elektrod dolgu

Yüksek alaşımlı, kalın örtülü ve %160 verimli rutil tip sert dolgu elektrodudur. Yüksek sertliğe sahip kaynak metalinin mineral aşındırmasına ve korozyona karşı direnci yüksektir. Dikişte meydana gelen enine çatlaklar aşınmaya karşı bir mahzur oluşturmaz, ancak darbeli çalışmaya karşı hassasiyeti arttırır. Kaynak metali yalnız taşlanarak işlenebilir.

Tipik uygulama alanları: Özellikle mineral aşınmasına maruz konveyörlerin, helezonların, karıştırıcı kanatların, çimento ve beton pompalarının, mineral kırma ve öğütme makinelerinin çeşitli parçalarının, korozyon ve yüksek sıcaklık aşınmasına maruz petro-kimya endüstrisindeki aşınan çeşitli parçaların sert dolgu işlerinde kullanılır.

Kaynak Metalinin Tipik Kimyasal Analizi (%) ve Mekanik Özellikleri

Çizelge 5.2. CrC Kaplama için elektrot özellikleri (www.oerlikon.com.tr/oerlikon_kutuphanesi.html)

%C	%Cr	%Mn	%Fe
2.90	35.00	1.10	Kalan
Test Şekli		Sertlik (HRc)	
Kaynak Sonrası		60	

5.1.2.2. WC tel ile dolgu (oksi asetilen)

Castolin Ultimium 8811 kaynak telinin, oksii asetilen alevi ile eritilmesiyle yapılan dolgudur (tampon dolgu Castolin N102 üzerine).

WC yapı oluşturan içerikli bir teldir. Firmanın verdiği özellikler;

Çizelge 5.3. WC Tel özellikleri (www.castolin.com/tr-TR/literatur).

Karbür tane sertlikleri	(HV₅₀)	2.500 – 3.000
Matris sertliği	(HV₅₀)	350

5.1.2.3. WC plaka kaplama

Karıştırıcı imalatçısı Eiricih firmasından, orijinal yedek parça kapsamında alınmakta olup, firma çok fazla teknik detay bilgi vermemektedir.

Alınabilen temel bilgi şöyledir; yüksek oranda (%84-90) Wolfram ve Kobalt malzemelerinden, toz metalurjisi prosesiyle üretilen plakalar, 65Cu35Zn pirinç alaşımı kullanılarak sert lehimleme ile birleştirilmektedir (KÜMAŞ, 2014).

5.2. Aşınma Deneyi

5.2.1. Laboratuvar ortamında yapılan deneysel işlemler

AISI 1010 çeliğinden hazırlanan numunelere belirtilen sıraya göre aşağıdaki işlemler uygulanmıştır:

Deney numunelerinin hazırlanması,

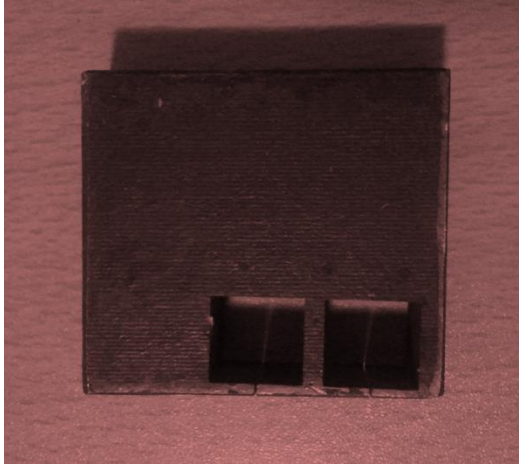
Deney numunelerinin kesileceği örnekler için 50X50 mm ebatlarda ve 16 mm kalınlıkta AISI 1010 çeliğinden taban malzemesi hazırlanmıştır. Kimyasal analizi Çizelge 'de verilen AISI 1010 çeliğinin yüzeyi kaplama öncesinde kir ve pas gibi zararlı artıklardan temizlenmiştir.

Dolgu kaynağı kaplama işleminde, örtülü elektrot elektrik ark kaynak yöntemi kullanılmıştır. 50X50X16 ölçülerindeki AISI 1010 çeliğinin üzerine Oerlikon Citodur V1000 krom karbür elektrotla 3 mm kalınlığında tek paso halinde kaplama amaçlı dolgu kaynağı çekilmiştir. Kullanılan kaynak parametreleri ve Citodur V1000 elektrotun özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Kaynak kaplama işleminde kullanılan işlem parametreleri ve kaplamanın kimyasal bileşimi.

Akım Şiddeti I (A)	156						
Elektrot Çapı (mm)	3,25						
İlerleme Hızı (numune boyunca)	1,72 mm/s						
Elektrot	Citodur V1000 (Oerlikon)						
Elektrot kimyasal bileşim (% ağı.)	%% C	%% Mn	%% Si	% %Cr	% %Ti	% %Ni	%% S
	20,2	00.61	00.48	14.0	0.07	0.04	0,04
Sertlik Değerleri	52-55 HRc 560-610 HV						

Aşınma deneyleri, sertlik ölçümleri ve diğer metalografik incelemelerde kullanılacak ikişer takım numune; 16 mm kalınlık ve 50X50 mm ebatlara sahip AISI 1010 çeliğinin kaplanmamış hali ve iki ayrı tip kaplama katı uygulanmış halinden tel erozyon kesme metodu ile elde edilmiştir. Numuneler 12,7x12,7x12,7 mm³ boyutlarında küp şeklinde kesilerek oluşturulmuş olup, Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

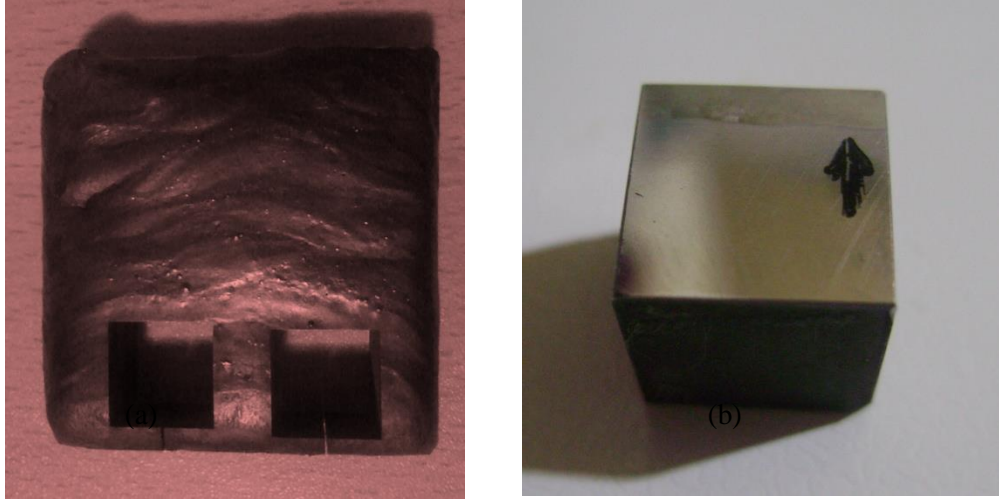


(a)

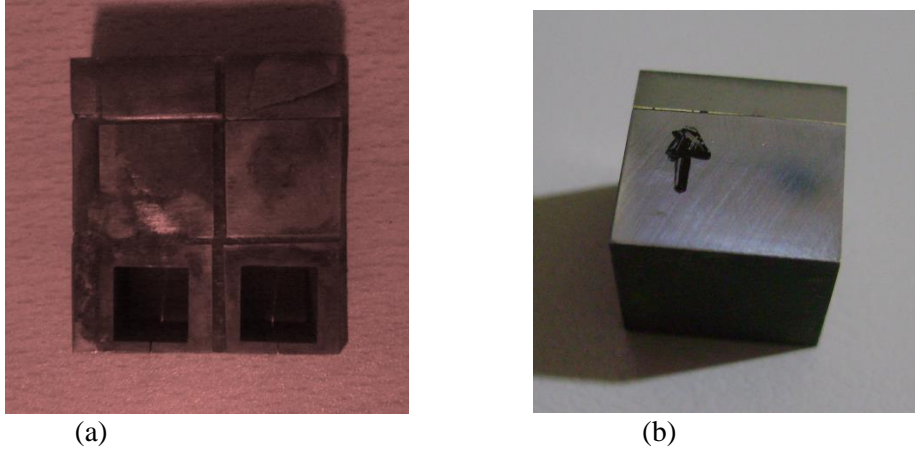


(b)

Şekil 5.1. a) Tel erozyon yöntemi ile kesim yapılan AISI 1010 çeliği örneği, b) Tel erozyon yöntemi ile kesilerek elde edilen 12 mm ayrıtlara sahip küp numune.



Şekil 5.2. a) Tel erozyon yöntemi ile kesim yapılan Citodur V1000 elektrot kaplama örneği,
b) Tel erozyon yöntemi ile kesilerek elde edilen 12 mm ayrıtlara sahip küp numune.



Şekil 5.3. a,b Tel erozyon yöntemi ile kesim yapılan WC plaka kaplama örnekleri.

Tel erozyon kesme işlemi Fanuc marka tel erozyon cihazında yapılmış olup, kesme parametreleri Çizelge 5.'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. Tel erozyon yöntemi ile kesme işleminde kullanılan işlem parametreleri.

Kullanılan Tel Tipi	0,25 mm kalınlığında Pirinç Tel
Uygulanan Elektrik Gerilimi (V)	7 Volt
Oluşan Yeniden Biçimlenme (Recast) Tabakası Kalınlığı (mm)	Pirinç telin temas ettiği kesme yüzeylerinde 0,635 mm kalınlığında recast tabakası oluşmaktadır.

Tel erozyonla kesme işlemi sırasında kesme işlemini yapan elektrik yüklü pirinç telin temas ettiği numune yüzeylerinde 0,635 mm kalınlığında recast tabakası, yani özelliğini kaybetmiş yüzey oluşmaktadır. Ölçüden de anlaşılacağı üzere çok ince olan bu tabaka laboratuvar ortamında yapılacak incelemeler öncesinde Struers Tegrapol-21 marka zımpara ve parlatma cihazı kullanılarak uygulanan zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri ile yok edilmiştir.

5.3. Yüzey Pürüzlülüğü Ve Sertlik İncelemeleri

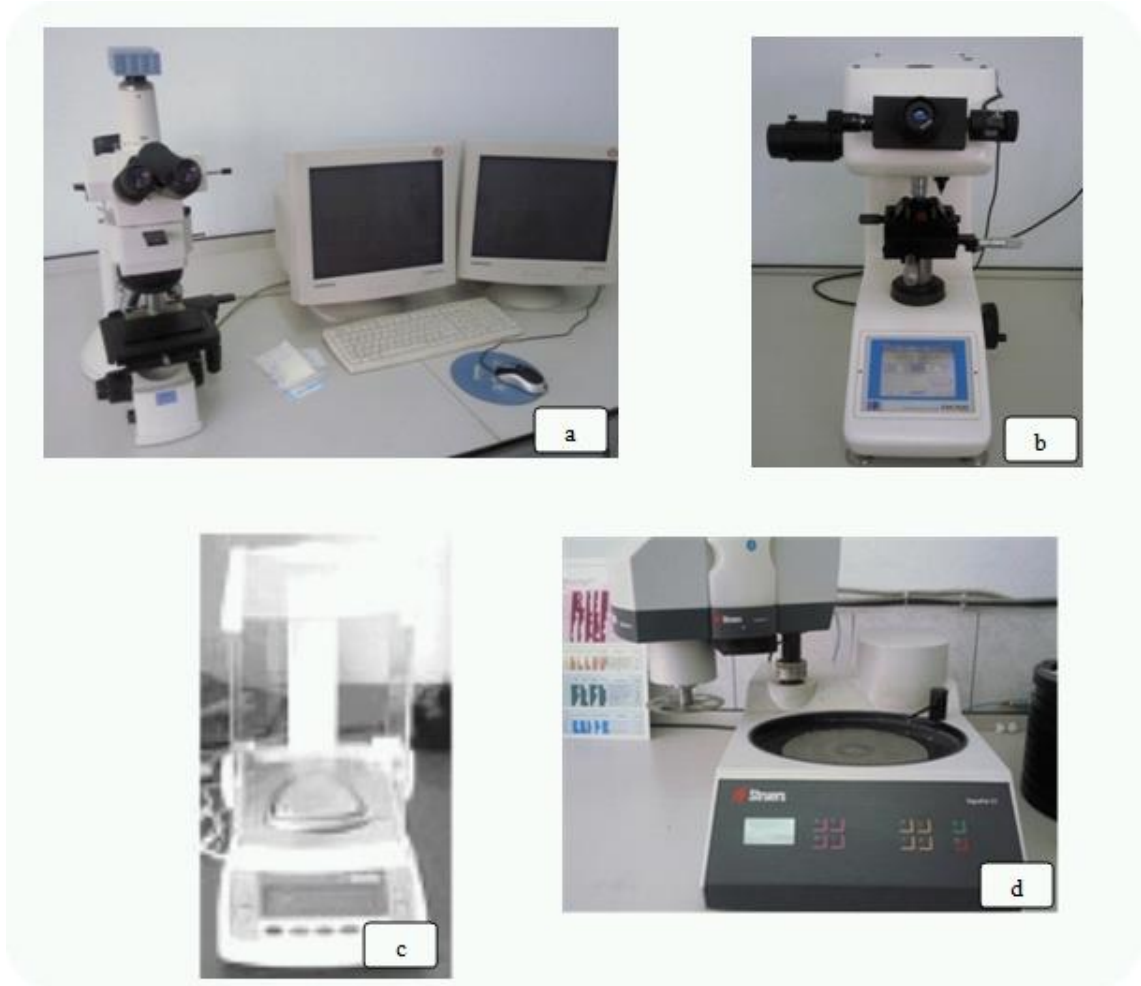
Numuneler Nikon-Eclipse L150 marka görüntü alma sisteminde, şekil 5.4 (a) optik mikroskopla incelenmiştir. Mikrosertlik ölçümleri Future-tech FM-700 marka mikrosertlik ölçüm cihazında, Şekil 5.4. (c), Vickers tekniğiyle elmas uç kullanılarak 100 gr yük altında 10 s beklemek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Tüm numunelerde yüzeyden ana malzemeye doğru bir çizgi boyunca sertlik ölçümü yapılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Malzeme ve Triboloji Laboratuvarı'nda bulunan Mitutoyo SJ 400 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazla ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), maksimum yüzey pürüzlülüğü (Rz) ve standart sapma pürüzlülük (Rq) değeri ölçümü yapılmıştır. Deneylerde örnekleme aralığı değeri 0.8 mm alınmış olup, toplam ölçüm mesafesi 4 mm'dir. Deneyler sırasında ISO 97 standardı, Gauss filtreleme ve R profil değerleri kullanılmıştır.

5.3.1. Abrasiv aşınma deneylerinin yapılması

Numunelerin abrasiv aşınma deneyleri, fotoğrafları Şekil 5.5'de görülen Plint TE53 marka sürtünme ve aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılacak kaplama yapılmış numuneler, tel erozyonla kesme yöntemi kullanılarak cihazın yuvasına oturacak şekilde 12,7x12,7x12,7 mm³ boyutlarında küp şekline getirilmiştir. Tel erozyonla kesme işlemi parametreleri Çizelge 5.4'de verilmiştir.

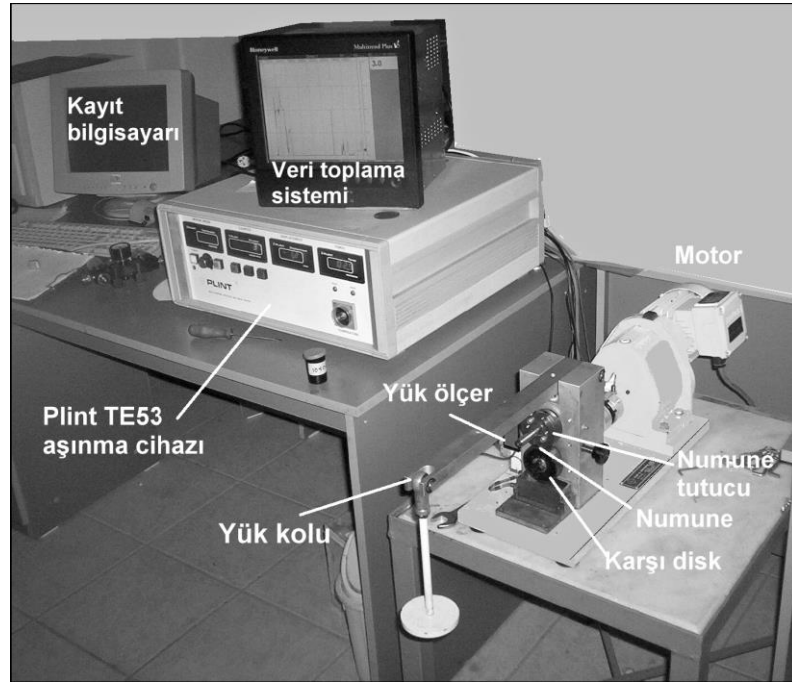
Tüm numuneler aşınma deneyi öncesi yüzeyinde herhangi bir kalıntı olmaması ve yüzeyin karşı malzemeye tam temas gerçekleştirmesi için 1200 grit zımparaya tutularak, yüzeyleri alkolle silinmiştir. Ayrıca aşındırma testi öncesi numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ortalama Ra: 0,2 μm , Rz: 2,0 μm ve Rq: 0,2 μm olarak eşitlenmiştir. Aşındırıcı karşıt cisim olarak silisyum karbürü (SiC) 400 gritlik Struers marka zımpara kağıdı kullanılmıştır. Cihazın aşındırıcı metal diski, çift taraflı 3M yapışkan bant kullanılarak zımpara kağıtları ile kaplanmış ve her numune için yeni bir zımpara kağıdı kullanılmıştır. Üzeri zımpara kağıdı kaplı aşındırıcı diskin çapı 60 mm.'dir. Aşındırma işleminden önce numunelerin ilk ağırlıklarının ölçümü 10^{-4} gr duyarlıktaki hassas terazi ile yapılmıştır. (Şekil 5.4b) Aşındırma işlemi sonrası numunelerin ağırlıklarında meydana gelen değişimler yine aynı terazi ile ölçülmüştür.



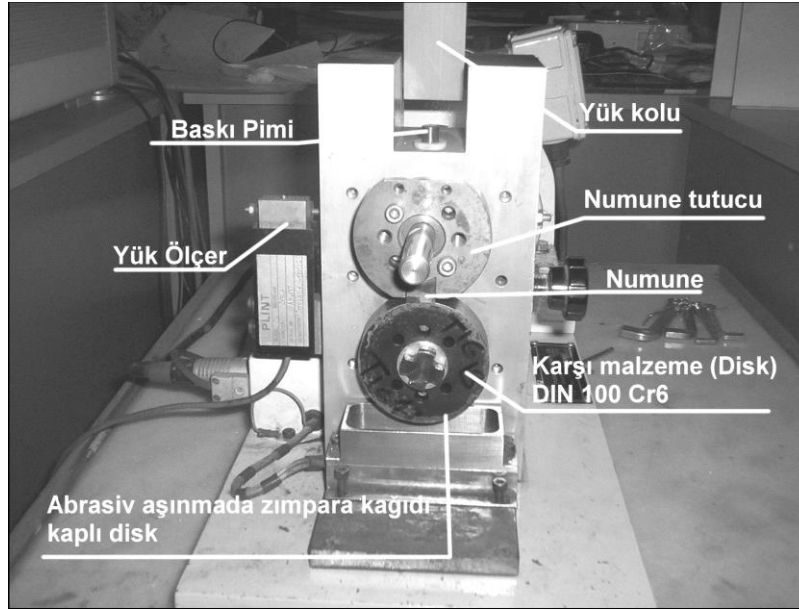
Şekil 5.4. a) Görüntü analiz sistemi, b) Sertlik ölçüm cihazı, c) Hassas terazi, d) Struers Tegrapol-21 zımpara ve parlatma cihazı.

Numune abrasiv aşındırıcı cihazın diskinin alt tarafındaki bölmeye “Şekil 5.6” de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Yan tarafındaki vida ile sıkıştırılarak numunenin hareket etmesi önlenmiştir. Aşınma deneylerinde aşındırıcı zımpara kağıdı kaplı disk ile numune yüzeyi arasındaki temas 42 N sabit yük ile sağlanmıştır. Tüm aşınma deneylerinde diskin dönme hızı 200 devir/dk seçilmiş ve aşınma hızı $v = 0.63$ m/s olarak alınmıştır. Çapı 60 mm olan aşındırıcı diskin çevresi 0,1891 m olup, 100 m’de 529 tam tur dönmektedir. Deneyler sırasında 100, 200, 300, 400 ve deney sonu olan 500 m aşınma mesafelerinde deney durdurularak tartım işlemi yapılmıştır. Toplam ağırlık kayıpları, deney başlangıcındaki ilk ağırlıktan son ağırlığın çıkarılması sureti ile tanımlanmıştır.

Tüm aşınma testleri sonrasında elde edilen ağırlık kayıpları tartılıp tespit edilerek numunelerin aşınma oranları hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler yardımıyla ağırlık kayıplarının aşınma mesafesine bağlı grafikleri çizilmiştir.



Şekil 5.5. Aşınma testinde kullanılan cihazın elemanlarının gösterilmesi.



Şekil 5.6. Aşınma testinde numune ve karşı malzemenin yerleştirilmesi.

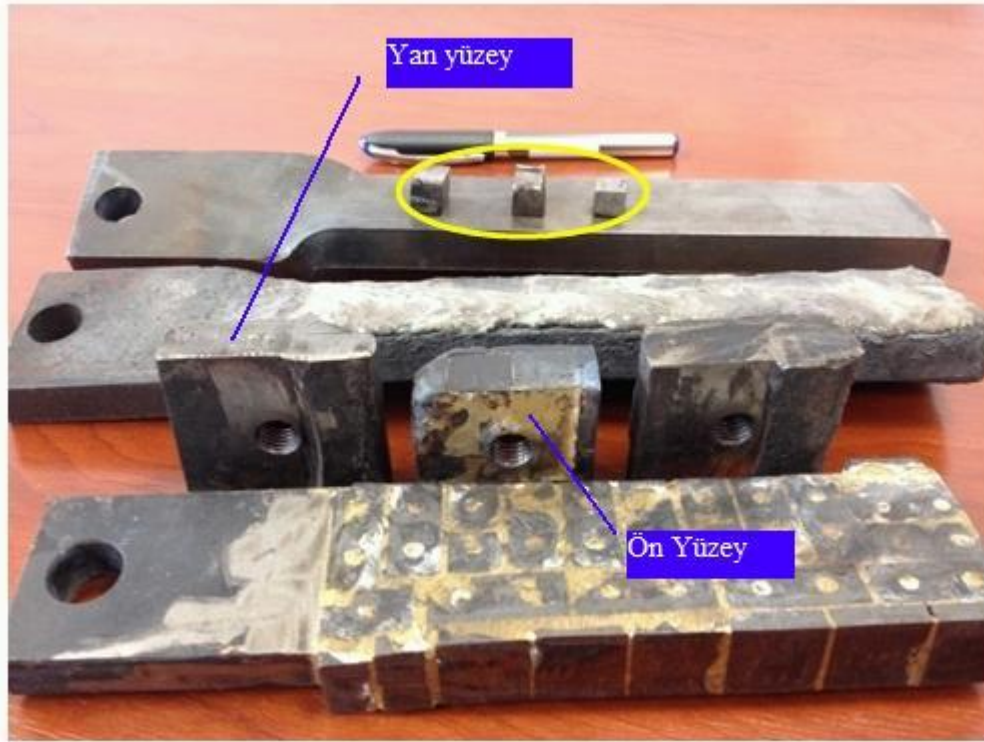
5.4. SEM İncelemeleri Ve EDX Çalışmaları

Analizler, Eskişehir Seramik Araştırma Merkezinde yapılmıştır. Merkezde, Carl Zeiss firmasının SUPRA 50 VP model cihaz kullanılmaktadır.

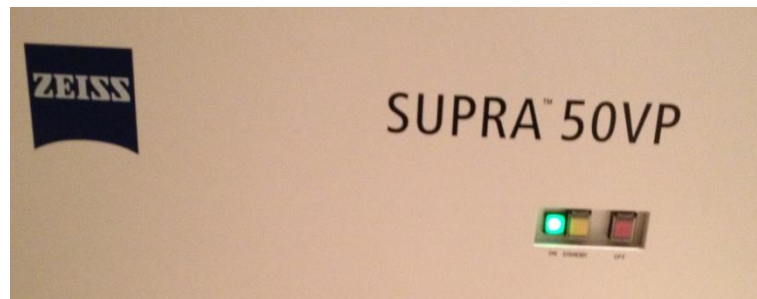
Ayrıntılı bilgi web sitesinde bulunmaktadır:

http://www.zeiss.com/microscopy/en_us/products/scanning-electron-microscopes/supra-materials.html#introduction

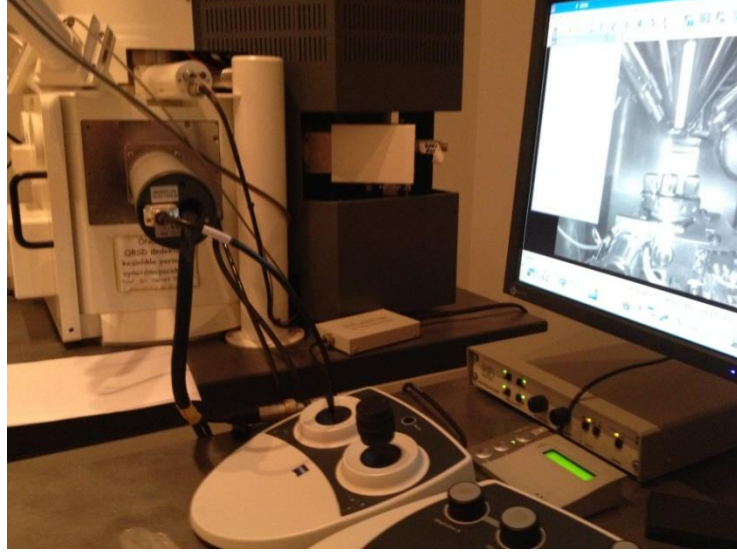
Numuneler, servis şartlarına (KÜMAŞ Manyezit İşletmeleri karıştırıcısında çalışıp alındıktan sonra) aşağıda görüldüğü üzere, 10X10 mm. boyutlarında hazırlanmış ve kullanılmıştır.



Şekil 5.7. Servis şartlarında çalışmak üzere hazırlanan numuneler.



Şekil 5.8. Analizlerde kullanılan Carl Zeiss Supra 50 VP SEM&EDX cihazı.



Şekil 5.9. Numuneler üzerinde analiz yapılırken bir görüntü.

6. DENEY SONUÇLARI

6.1. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Kaplama uygulanmamış AISI 1010 çeliği, volfram karbür plaka ile kaplanmış hali ve krom karbür elektrot ile dolgu kaynağı kaplaması yapılmış hali olmak üzere üç numuneye abrasiv aşındırma işlemi sonrası mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Ölçümler tüm numuneler için; 100 g yük altında ve bekleme süresi 10 s olmak üzere, ilk ölçüm yüzeyden 100 μm içeriden olacak şekilde ve 150 μm aralıklarla yapılmıştır.

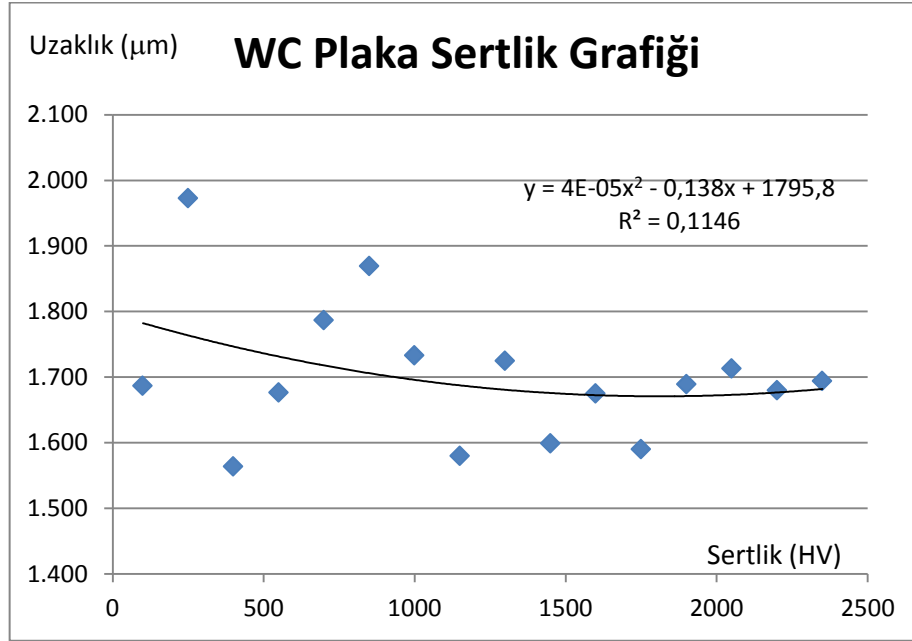
Belirtilen bu şartlar altında AISI 1010 çeliğinin kaplamasız halinin sertliği yapılan beş ölçüm izi ortalamasından 162.1 HV olarak elde edilmiştir.

Çizelge 6.1. Volfram karbür plaka kaplama sertlik deney sonuçları üst yüzeyden uzaklık.

Uzaklık μm	Sertlik HV	Uzaklık μm	Sertlik HV
100	1.687	1300	1.725
250	1.973	1450	1.599
400	1.564	1600	1.675
550	1.677	1750	1.590
700	1.787	1900	1.689
850	1.869	2050	1.713
1000	1.733	2200	1.680
1150	1.580	2350	1.694

*: Kaplama katından pirinç bağlayıcı malzeme tabakasına geçişte sertlik değeri 481.5 HV olarak ölçülmüştür. Pirinç ara malzemenin sertlik değeri 127.2 HV olarak alınmıştır.

Plakalarda en sert noktaların üst yüzeyden 250 μm uzaklıkta bulunduğu daha sonra sertliğin biraz düştüğü ilk 100 μm derinliktekine yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür. Bunun da sinterleme sırasında yüzeyden 250 μm uzaklıkta volfram karbür taneciklerinin daha sıkı ve yoğun bir şekilde toplanmalarından ileri geldiği düşünülmektedir.



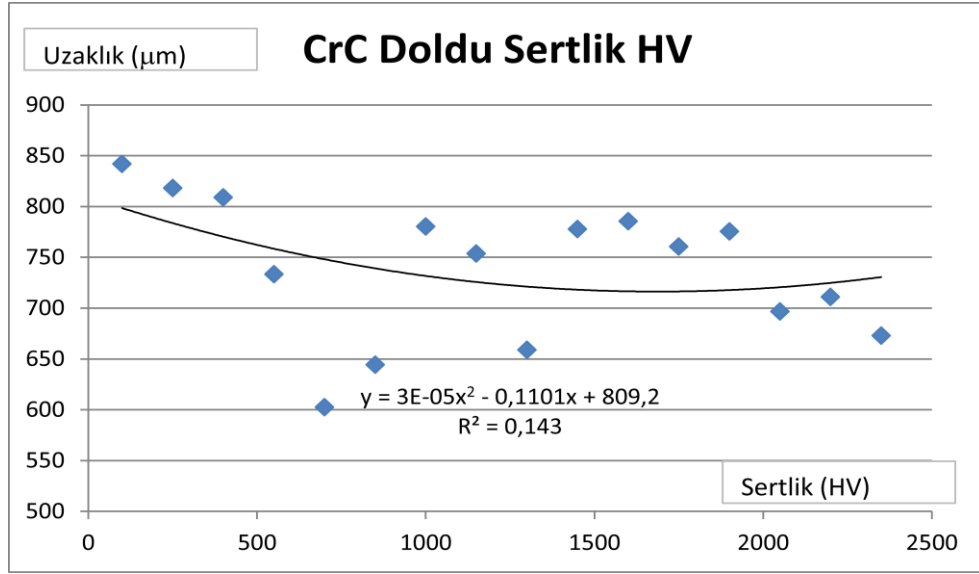
Şekil 6.1. WC Plaka sertlik grafik ve denklemleri.

Çizelge 6.2. Krom karbür dolgu kaynağı kaplaması sertlik deney sonuçları üst yüzeyden uzaklık.

Uzaklık μm	Sertlik HV	Uzaklık μm	Sertlik HV
100	842.0	1600	785.5
250	818.2	1750	760.5
400	809.0	1900	775.4
550	733.5	2050	696.7
700	602.4	2200	711.0
850	644.3	2350	673.0
1000	780.4	2500	188.1
1150	753.8	2650	218.1
1300	659.0	2800	174.5
1450	777.9		

*: Yukarıda verilen son üç ölçümde belirgin olarak görülen ani sertlik değeri düşüşü elektrot dolgu kaynağı ile yapılan kaplama katının aşıldığını ifade etmektedir.

Kromla kaplanan yüzeylerde; ilk mikro sertlik değerleri 840-850 HV iken, yüzeyden uzaklaştıkça ölçülen mikrosertlik değerleri gittikçe azalmakta, 2350 μm uzaklıktan sonra sertlik değeri aniden düşüş göstermektedir.



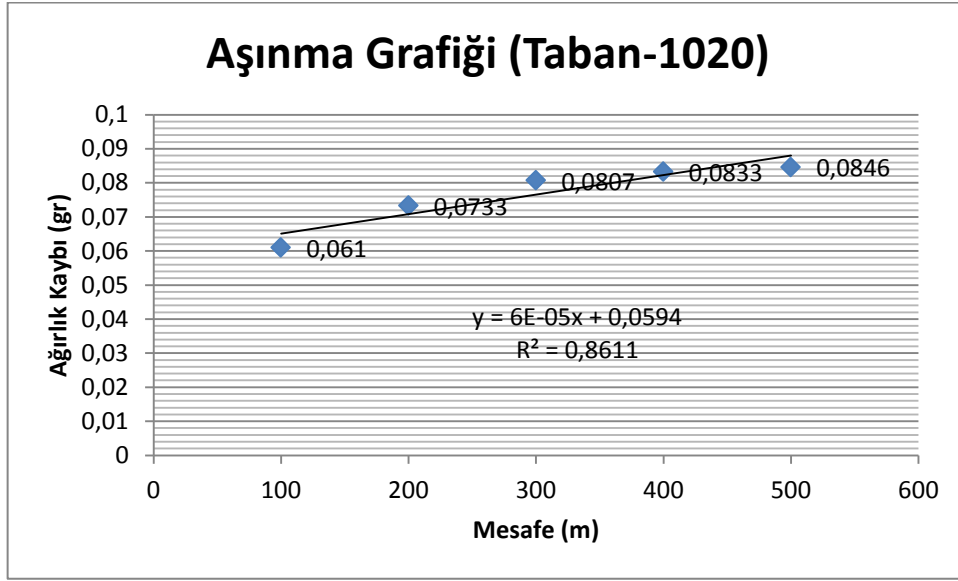
Şekil 6.2. CrC Dolgu sertlik grafik ve denklemi.

6.2. Aşınma Deney Sonuçları

Daha önceki bölümde bahsedildiği üzere; aşındırma testi öncesi numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ortalama Ra: 0,2 μm , Rz: 2,0 μm ve Rq: 0,2 μm olarak eşitlenmiştir. Aşındırma testi sonrasında belirtilen değerler aşınan numuneler üzerinden tekrar ölçülmüş ve numunelerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), maksimum yüzey pürüzlülüğü (Rz) ve standart sapma pürüzlülük (Rq) değerleri “Çizelge 6.3” de verilmiştir.

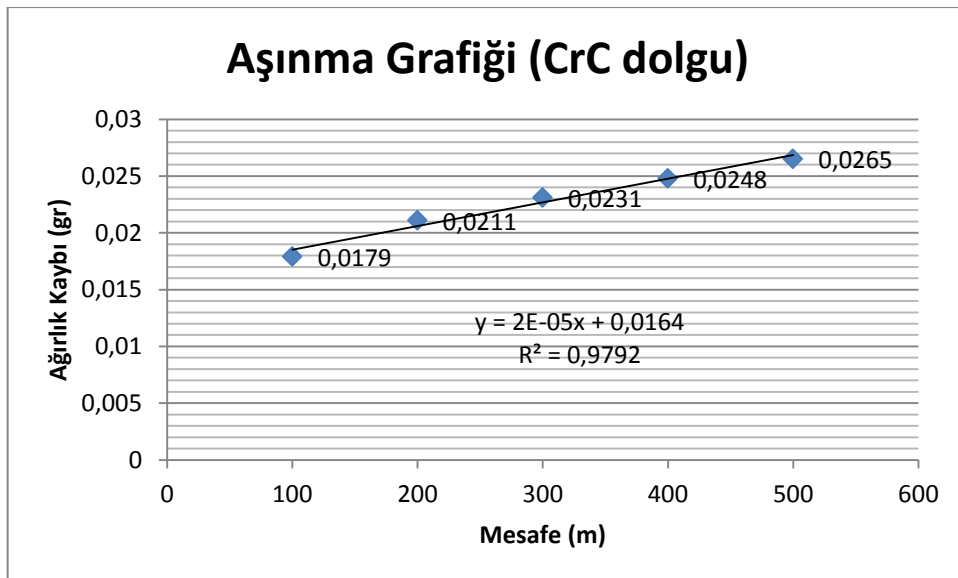
Çizelge 6.3. Numunelerin aşındırma testi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri.

	Ra (μm)	Rz (μm)	Rq (μm)
AISI 1010 Çeliği	0,33	2,8	0,43
Citodur V1000 Elektrot Kaplama	0,37	8,3	1,61
WC Kaplama	0,23	2,1	0,3



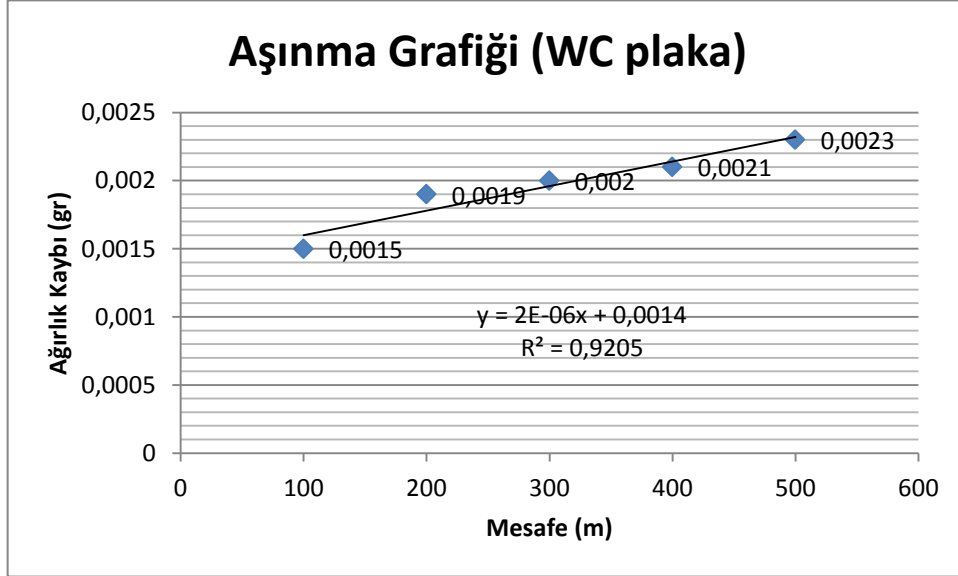
Şekil 6.3. AISI 1010 çeliğinin 42 N yükte SiC aşındırıcı zımpara kağıdı karşısındaki ağırlık kaybı.

Şekil 6.3'de AISI 1010 çeliğinin SiC zımpara kağıdı ile yapılan abrasiv aşınma deneyinde, ilk 100 metrelik aşınma yolu içerisinde yüzeydeki pürüzlerin kırılması ve kopması sonucunda çok hızlı bir aşınma kaybı olmuştur.



Şekil 6.4. Citodur V1000 elektrot kaplama katının 42 N yükte SiC aşındırıcı zımpara kağıdı.

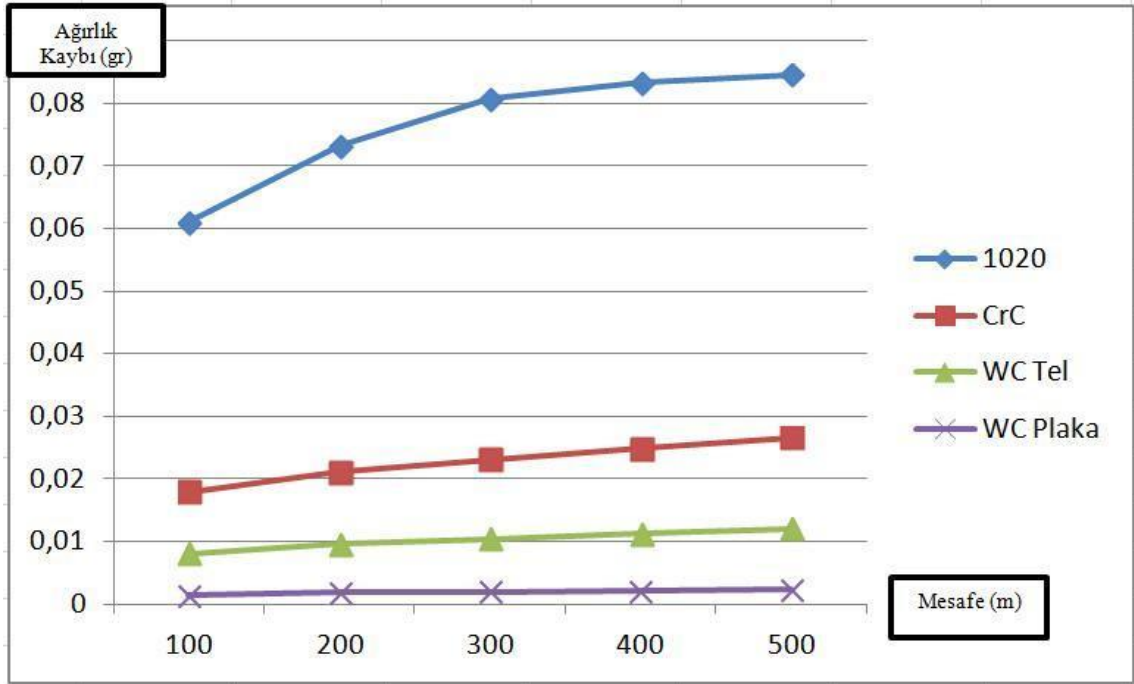
Şekil 6.4’de Citodur V1000 elektrodun SiC zımpara kağıdı ile yapılan abrasiv aşınma deneyinde, ilk 100 metrelik aşınma yolu içerisinde yüzeydeki kaba pürüzlerin kırılması ve kopması sonucunda çok hızlı bir aşınma kaybı olmuştur.



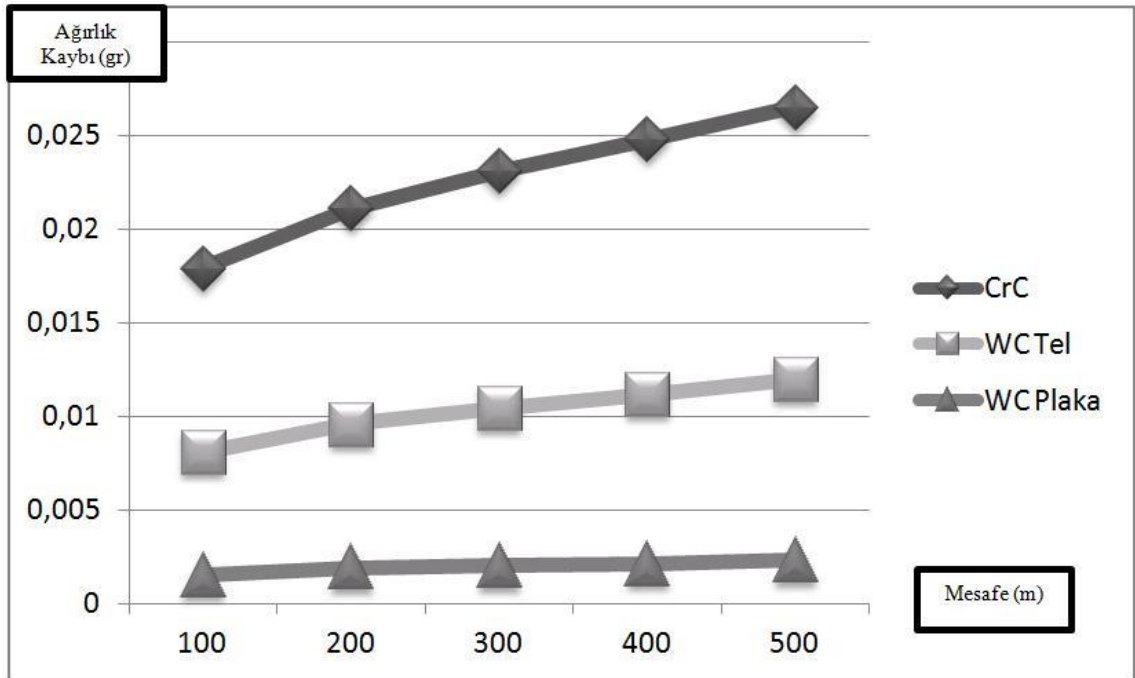
Şekil 6.5. WC plaka ile kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 42 N yükte SiC aşındırıcı zımpara kağıdı karşısındaki ağırlık kaybı.

Şekil 6.5’de WC kaplama plakalarının SiC zımpara kağıdı ile yapılan abrasiv aşınma deneyinde, yaklaşık ilk 50 metrelik aşınma yolu içerisinde yüzeydeki kaba pürüzlerin kırılması ve kopması sonucunda bir aşınma kaybı olmuş ancak yüzey düzgünlüğü nedeniyle nispeten diğer test numunelerine göre daha yavaş gerçekleşmiştir.

Şekil 6.6’da, karşılaştırmalı aşınma grafiği verilmiştir. Benzer olarak, Şekil 6.7’de de bir karşılaştırma grafiği verilmiş, ancak kaplamaları karşılaştırmak için bu grafikte taban malzemesine yer verilmemiştir.



Şekil 6.6. Karşılaştırmalı aşınma grafiği.

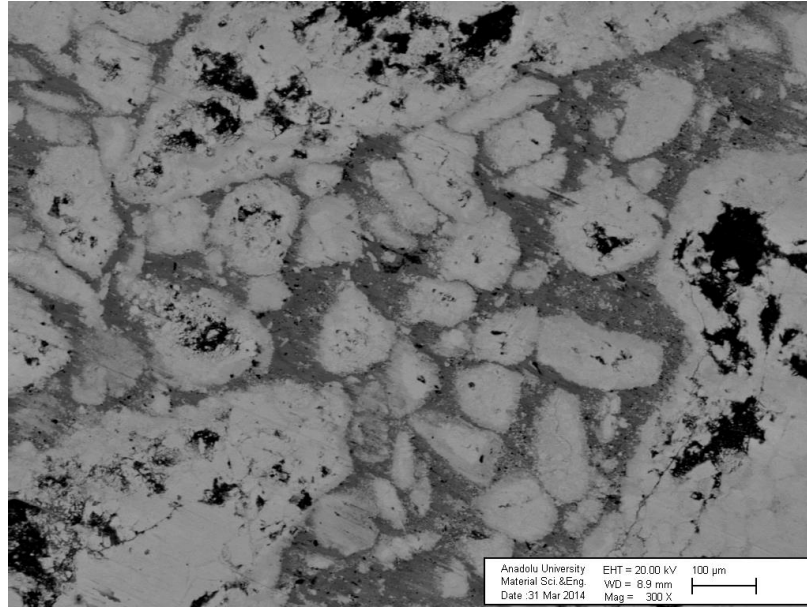


Şekil 6.7. Karşılaştırmalı aşınma grafiği (Taban malzemesi hariç).

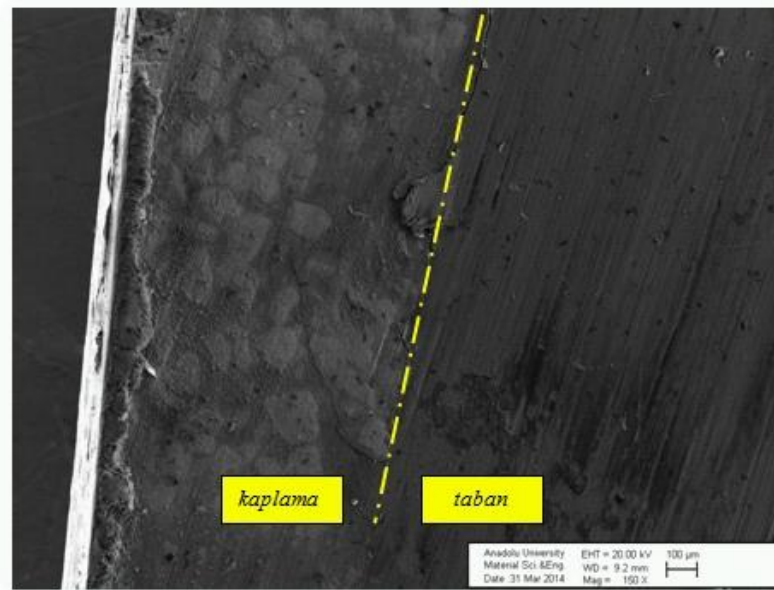
6.3. Mikroyapı İncelemeleri

6.3.1. SEM analizleri

6.3.1.1. WC tel kaplamının SEM analizi



Şekil 6.8. WC Tel kaplama optik SEM (300 X) – Numune ön yüzeyi.



Şekil 6.9. WC Tel kaplama ara kat görüntüsü (kaplama katı) – yan yüzey.

Şekil 6.8

SEM görüntüsündeki beyaz kısımlar Wolfram (Tungsten, atom numarası: 74) bölümlerdir. Gri kısımlarda ise Ni görünmektedir. Daha koyu olan kısımlarda da Cr görünmektedir.

Şekil 6.9

Numunenin (yandan) ara kat görüntüsünde, açık renkte bulunan kısımlarda Wolfram ve daha koyu kısımlarda Ni görülebilmektedir. Sağdaki en koyu kısımlar, taban malzemesidir (1020 çeliği). Buradaki kontrast farkı, taban malzemesi ile kaplama tabakasının rahatlıkla ayırt edilmesini sağlamaktadır.

Şekil 6.10-a

Yüksek krom alaşımlı kaplamanın, son derece homojen olarak taban malzemesi üzerine yayıldığı görülmektedir ki kontrast farklılıkları yok denecek kadar azdır.

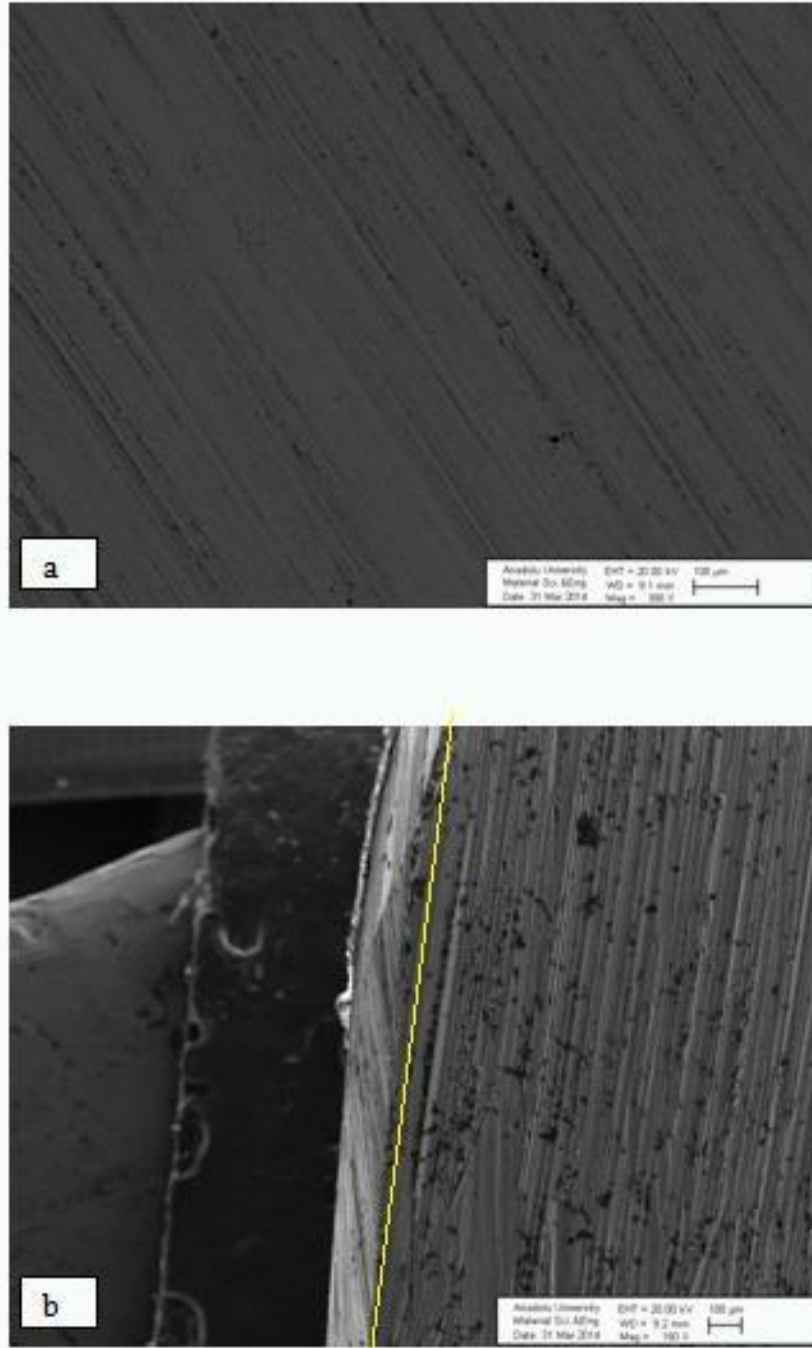
Şekil 6.10-b

Yandan ara kat görüntüsüne yer verilmiş olup, açık renkte krom ve koyu renkte taban malzemeleri görülebilmektedir.

Şekil 6.11

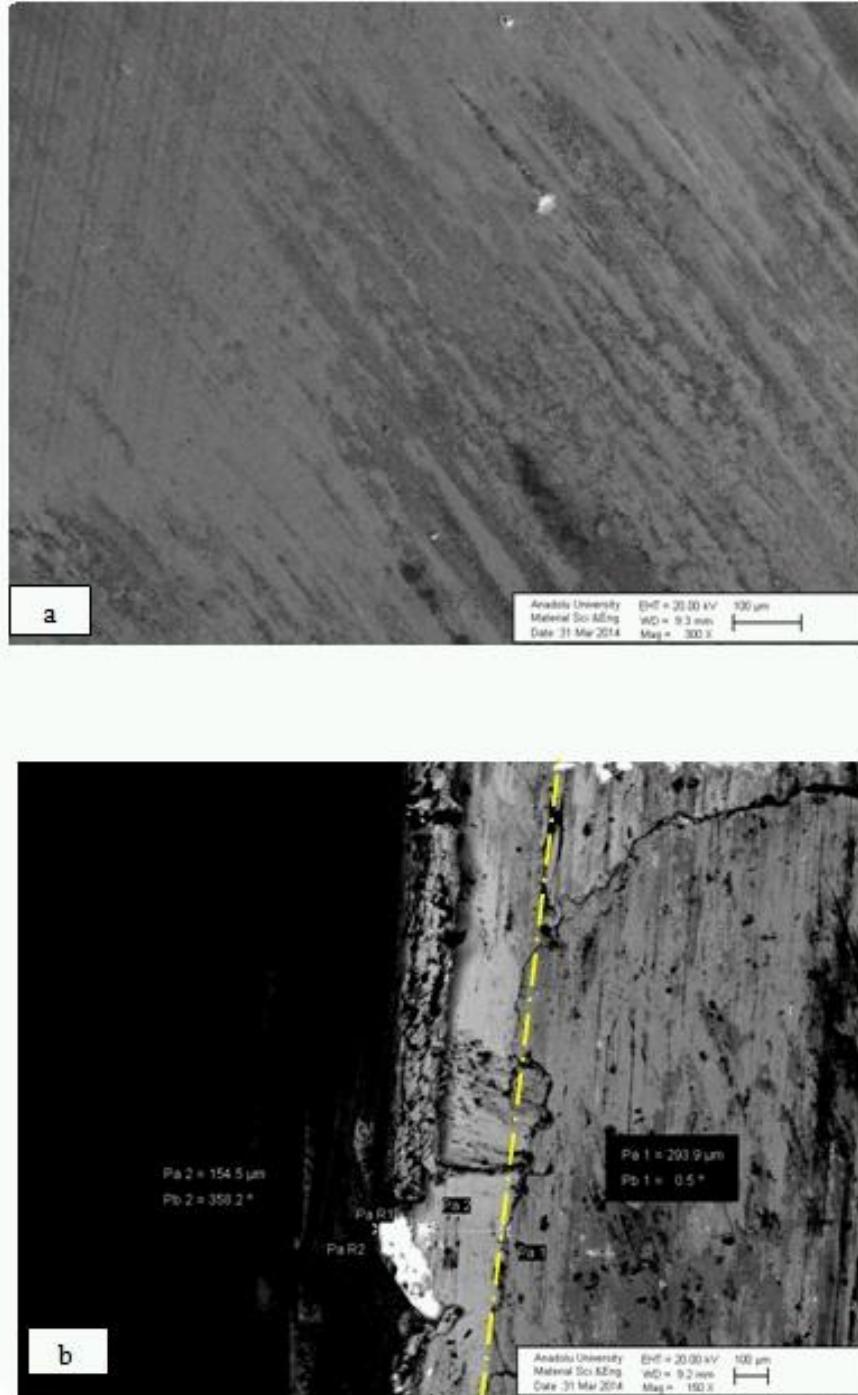
WC plaka görülmekte olup, homojene yakın düzgün bir kontrast dağılımı vermiştir. Açık kısımlar wolfram, daha koyu olan kısımlar nikel alaşımı ve nihayet ara kat görüntüsündeki en koyu kısımlar taban kısımları göstermiştir.

6.3.1.2. CrC elektrod kaplamasının SEM analizi (aşınma sonrası)



Şekil 6.10. CrC Kaplama SEM a) 300 X (ön yüzey) b) 150 X arakat (yan yüzey).

6.3.1.3. WC plaka kaplamanın SEM analizi (aşınma sonrası)

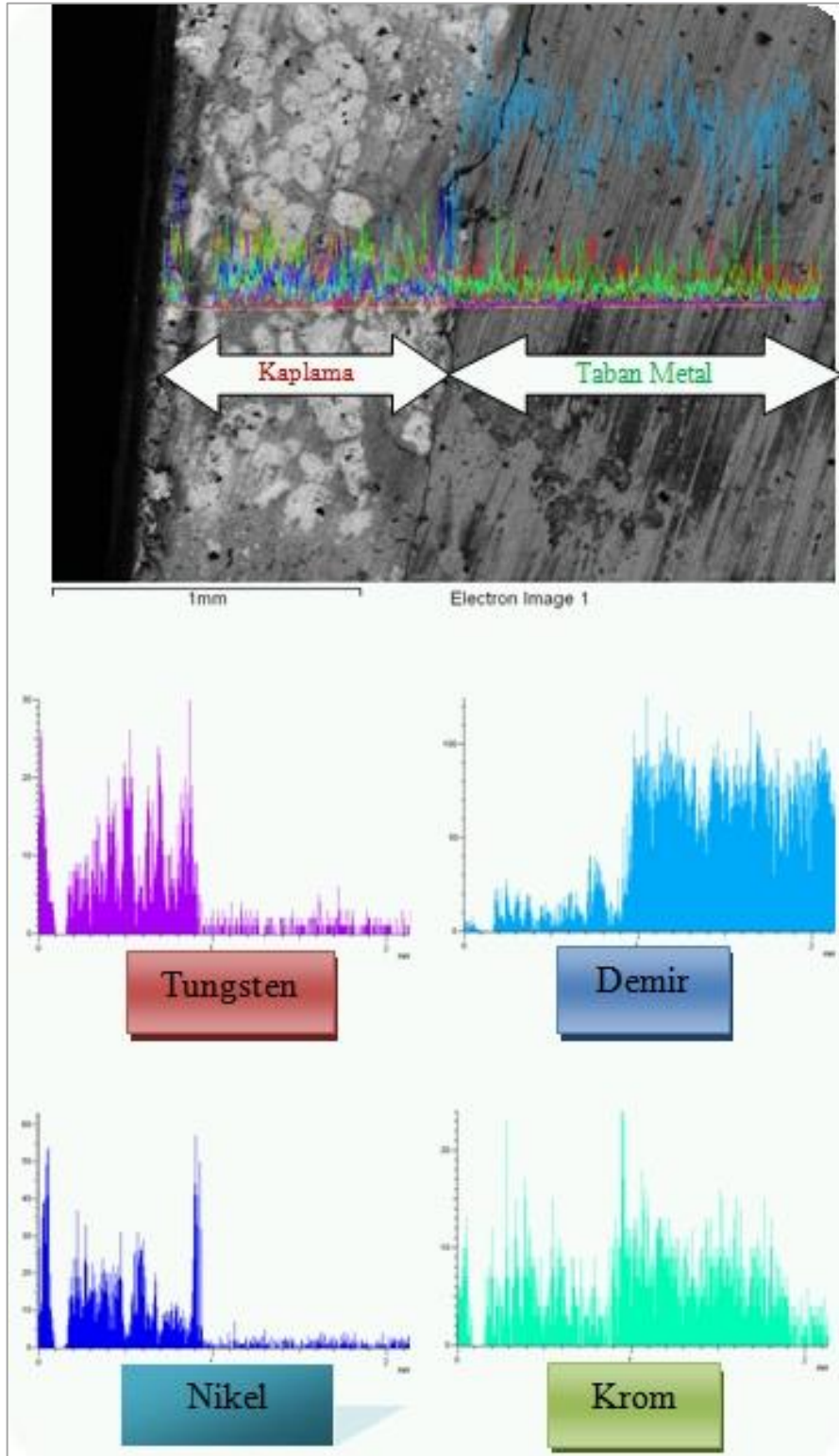


Şekil 6.11. WC Plaka kaplama ara kat görüntüsü a) 300 X (ön yüzey) b) 150 X arakat (yan yüzey).

6.3.2. EDX analizleri

6.3.2.1. WC tel kaplamanın EDX analizleri

Yan kesitten ara kat incelemesi yapılmıştır. 1 mm. ye yakın kaplama kalınlığı olduğu, tungsten grafiğinde anlaşılmaktadır. Elektrik ark kaynağı ile elektrodun rahat kullanılabilmesi için, krom ve nikel katkıların bulunmaktadır (kaplama kısmı). Bu nedenle tungsten kısımlar beyaz ve nikel yoğun kısımlar (koyu) gri renkte görüntü vermiştir. Taban metali ise siyah renk vermektedir.



Şekil 6.12. WC Tel kaplama EDX çizgi analizi.

Şekil 6.12

EDX çizgi analizinde, numunenin yandan (ara kat) görüntüsü ve kaplama çok net olarak görülmektedir. Sol bölümde; kaplamayı oluşturan wolfram, nikel ve krom, sağ tarafta taban malzemesi izlenmiştir.

Şekil 6.13

Açık renkteki kısımların wolframdan oluştuğu ve % dağılımı görülebilmektedir. Grafikte görülen pikler, elementlerin doğal enerji yapılarından gelmektedir.

Şekil 6.14

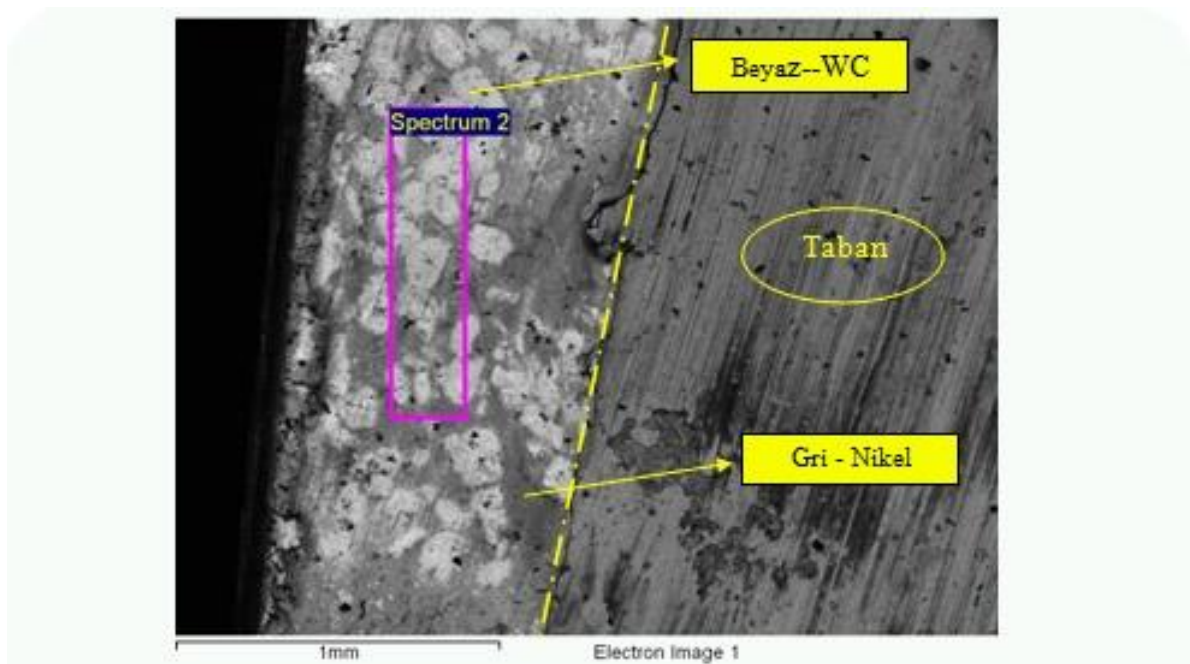
Burada da benzer şekilde, taban malzemesi izlenmektedir.

Şekil 6.15

Bu görüntüde, kaplamanın ortalama kimyasal dağılımı alınabilmektedir. Yapının %65'lik bölümü WC olarak tespit edilmektedir.

Şekil 6.16

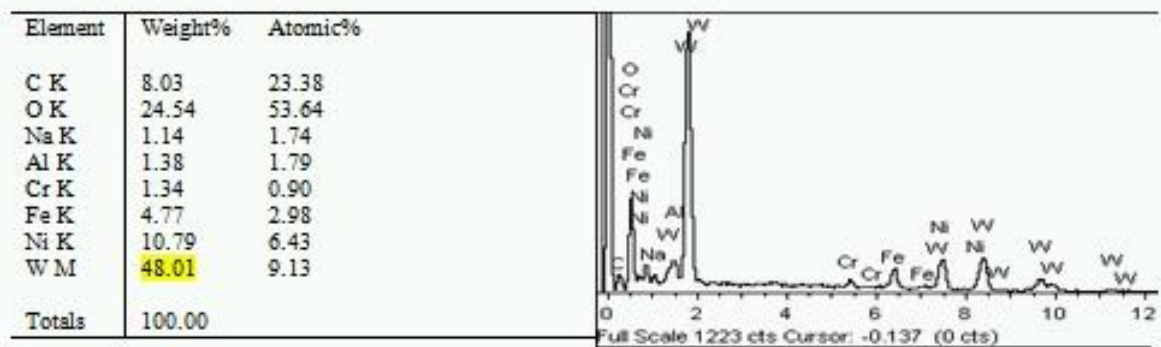
Beyaz olarak görülen en açık kontrastaki bölgelerin, wolfram olduğunu kanıtlayan görüntüdür.



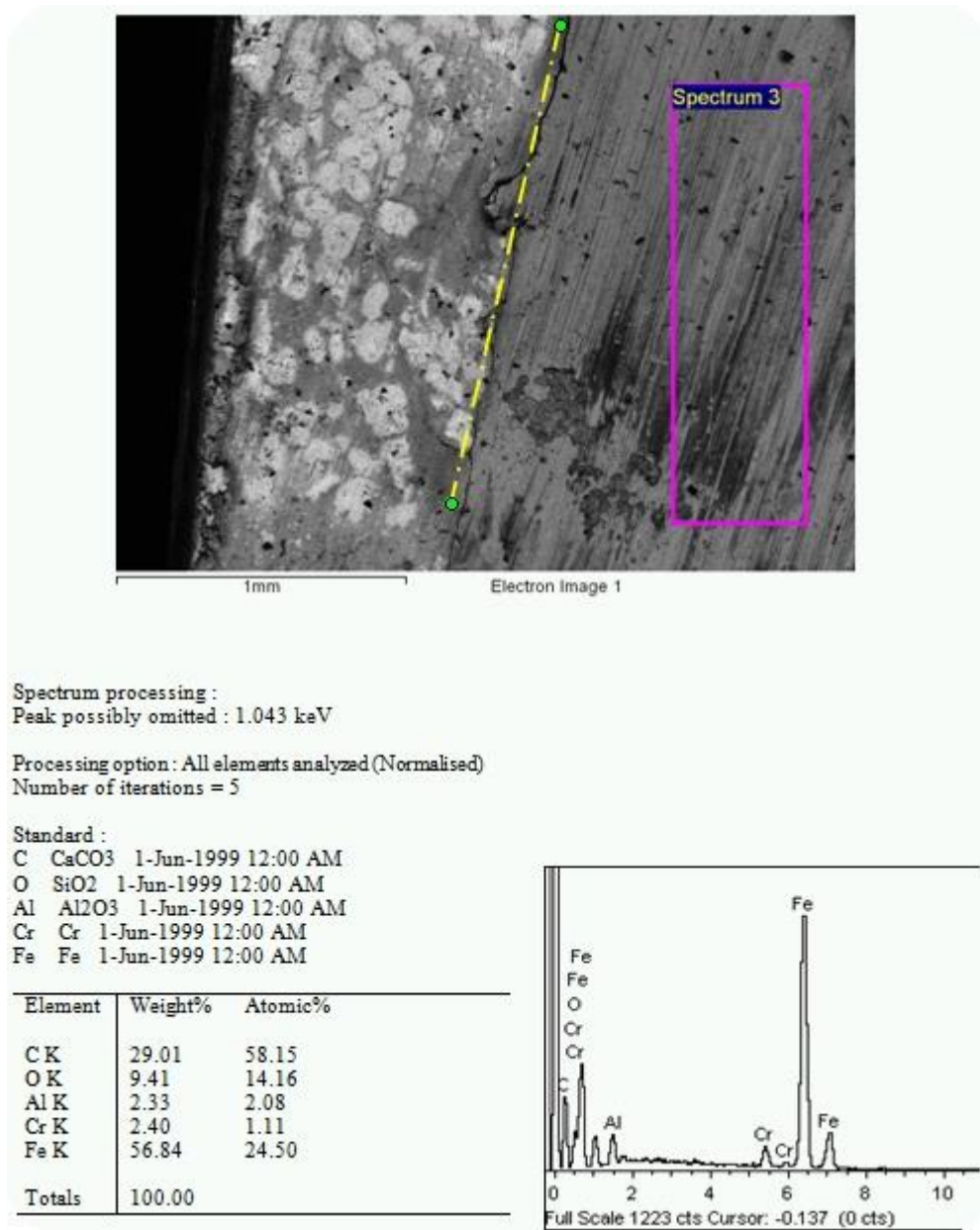
Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

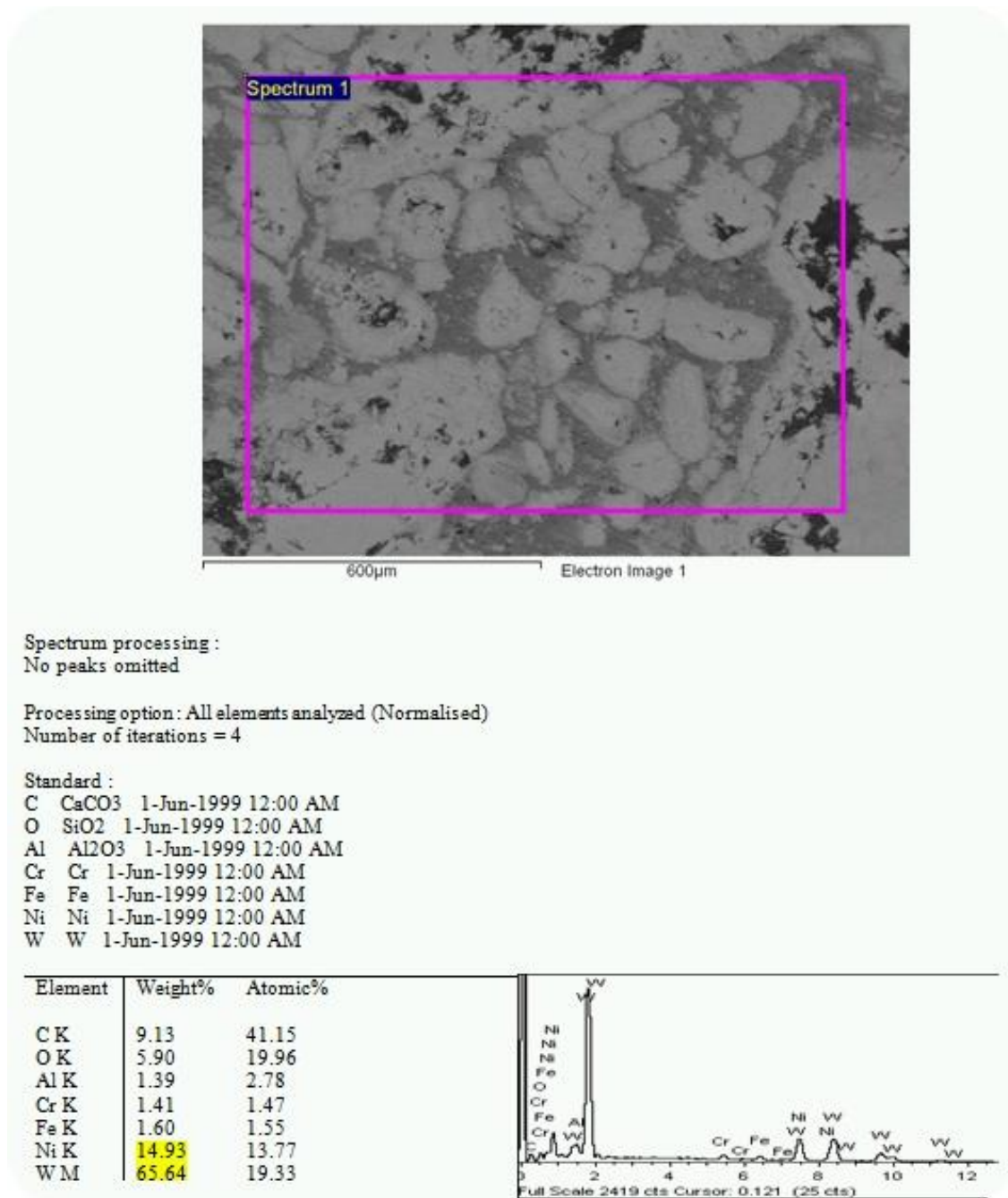
Standard :
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Na Albite 1-Jun-1999 12:00 AM
Al Al₂O₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM
W W 1-Jun-1999 12:00 AM



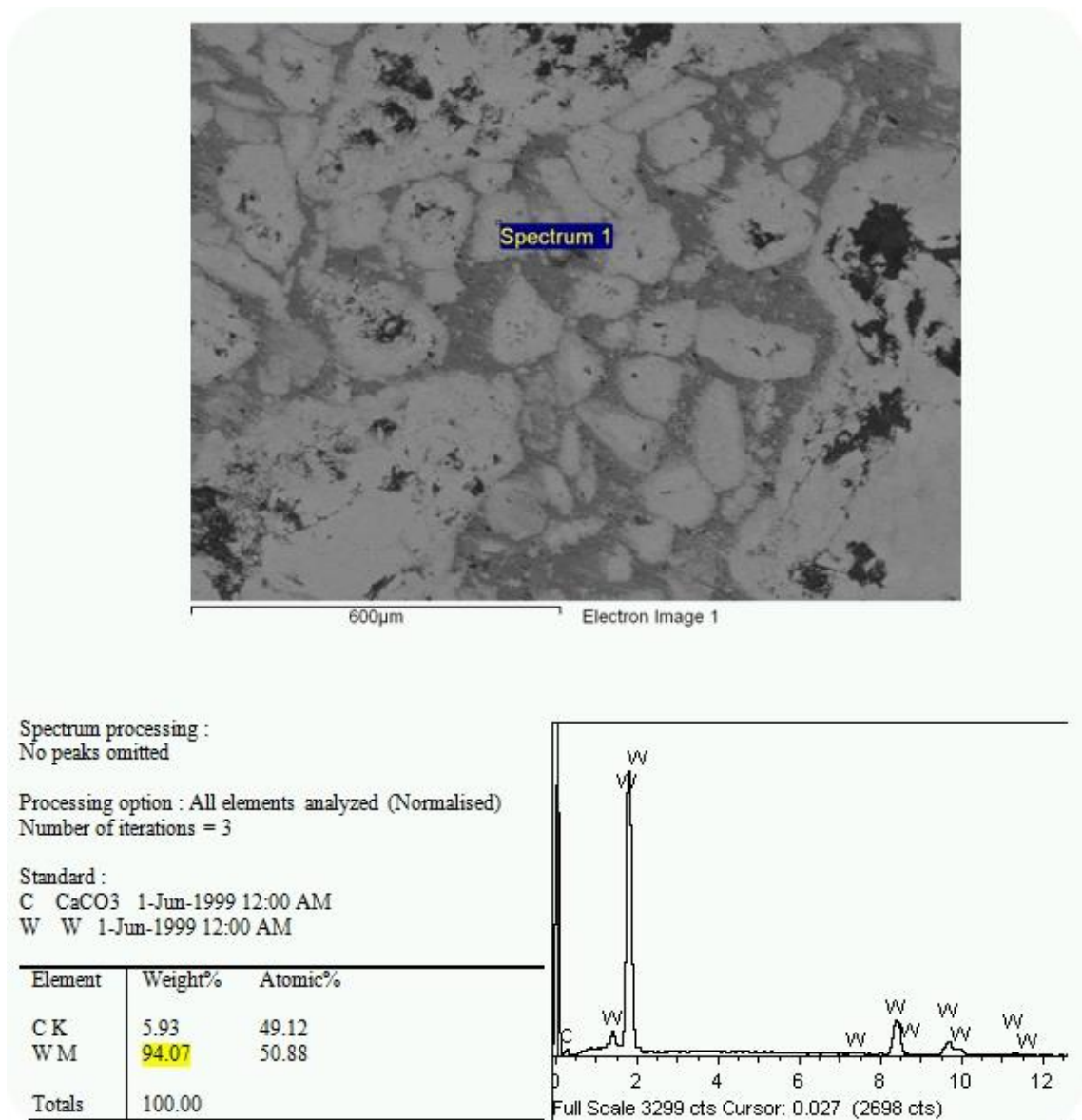
Şekil 6.13. WC Tel kaplama ara kat EDX içerik analizi (kaplama tarafı).



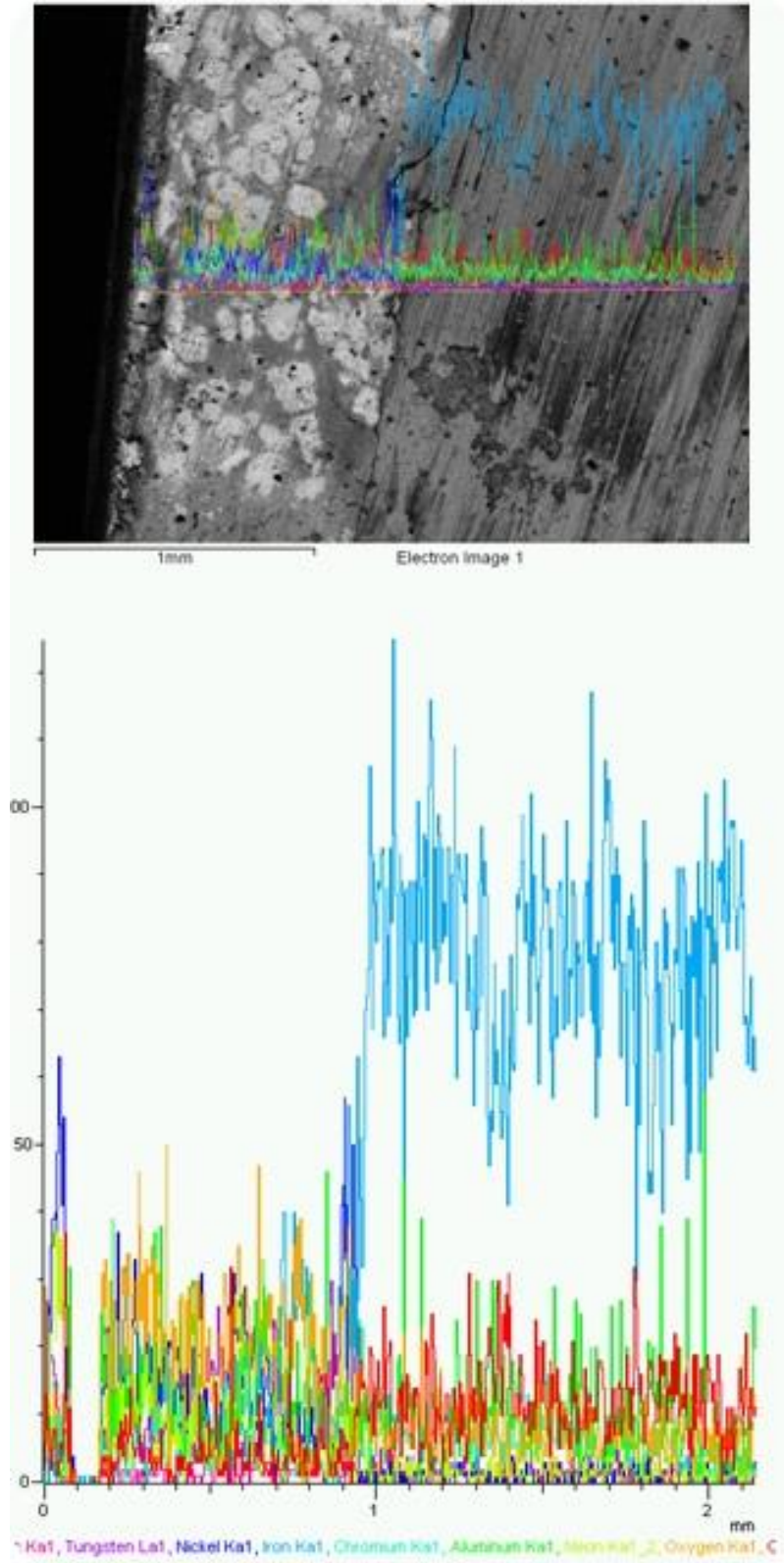
Şekil 6.14. WC Tel ara kat EDX içerik analizi (taban tarafı).



Şekil 6.15. WC Tel kaplama EDX analizi (ortalama).

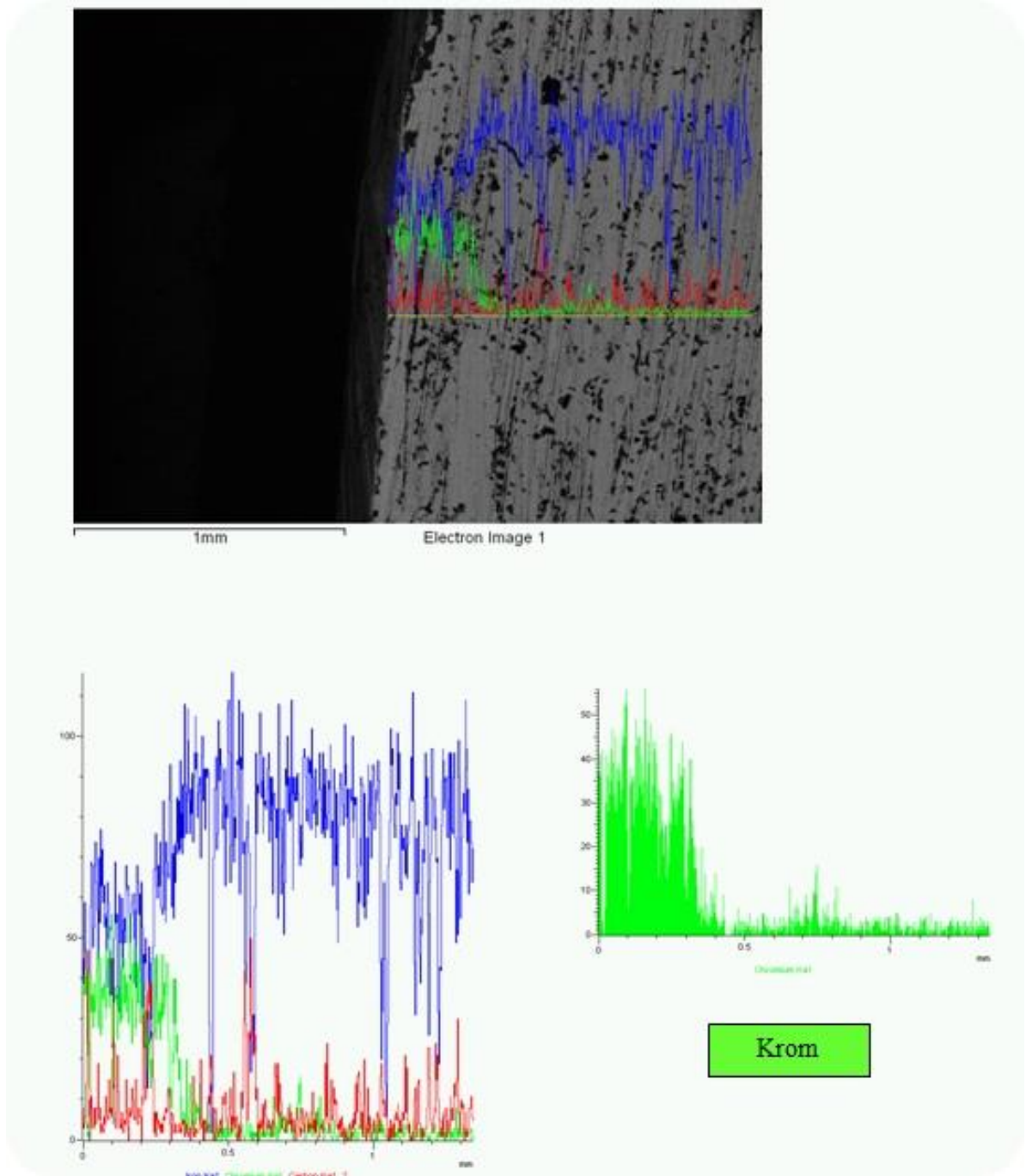


Şekil 6.16. WC Tel kaplama, (Beyaz) W bölgesi nokta EDX analizi.



Şekil 6.17. WC Tel kaplama EDX çizgi analizi.

6.3.2.2. CrC elektrod kaplamasının EDX analizi



Şekil 6.18. CrC Kaplama EDX çizgi analizi.

Şekil 6.18

Görüntüde, ince bir kaplama tabakası (~ 0,5 mm.) ve bu tabakadaki krom yoğunluğu görülebilmektedir. Çizgi analizinin sağ tarafı yine taban malzemesini işaret etmektedir.

Şekil 6.19

Kaplamanın ortalama kimyasal dağılımı görülebilmekte olup, endüstride yaygın olan %27 krom içeriği tespit edilmektedir.

Şekil 6.20

Kaplamaya yakın bulunan sol taraftan analiz alınmış olup, krom yoğunluğu izlenmektedir.

Şekil 6.21

WC plaka kaplamadan alınan bu görüntü, kaplama tarafındaki wolfram yapısını, taban malzemesini ve bu ikisini birleştirmek için uygulanan sert lehimlemedeki bakır-çinko alaşımını net olarak ortaya koymaktadır.

Şekil 6.22

Kaplamanın ortalama kimyasal kompozisyonu görülebilmekte olup, %60 Wolfram tespit edilmiştir.

Şekil 6.23

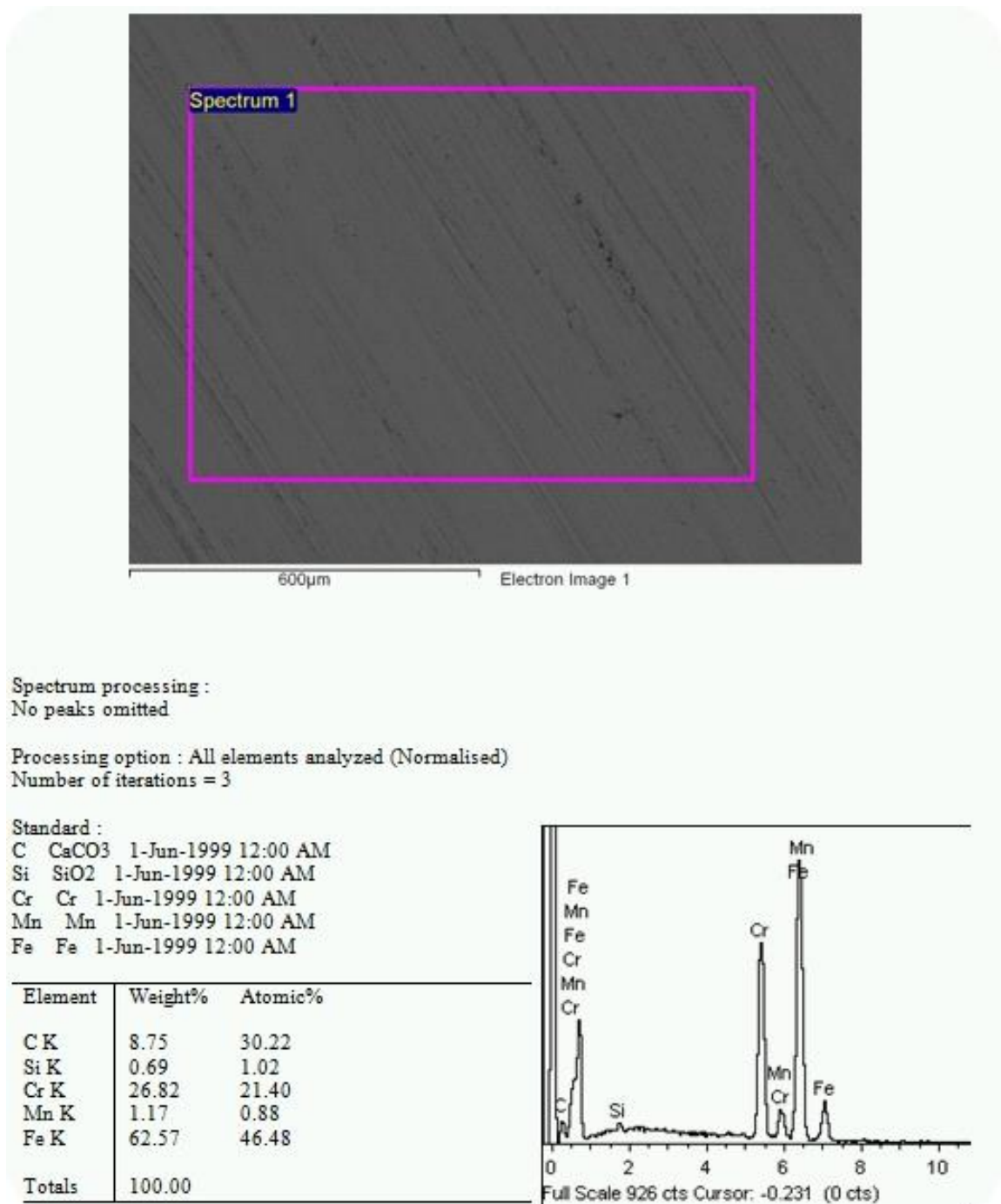
Görüntünün açık renkte olan kısımlarının Wolframı temsil ettiğini işaret eden analizdir.

Şekil 6.24

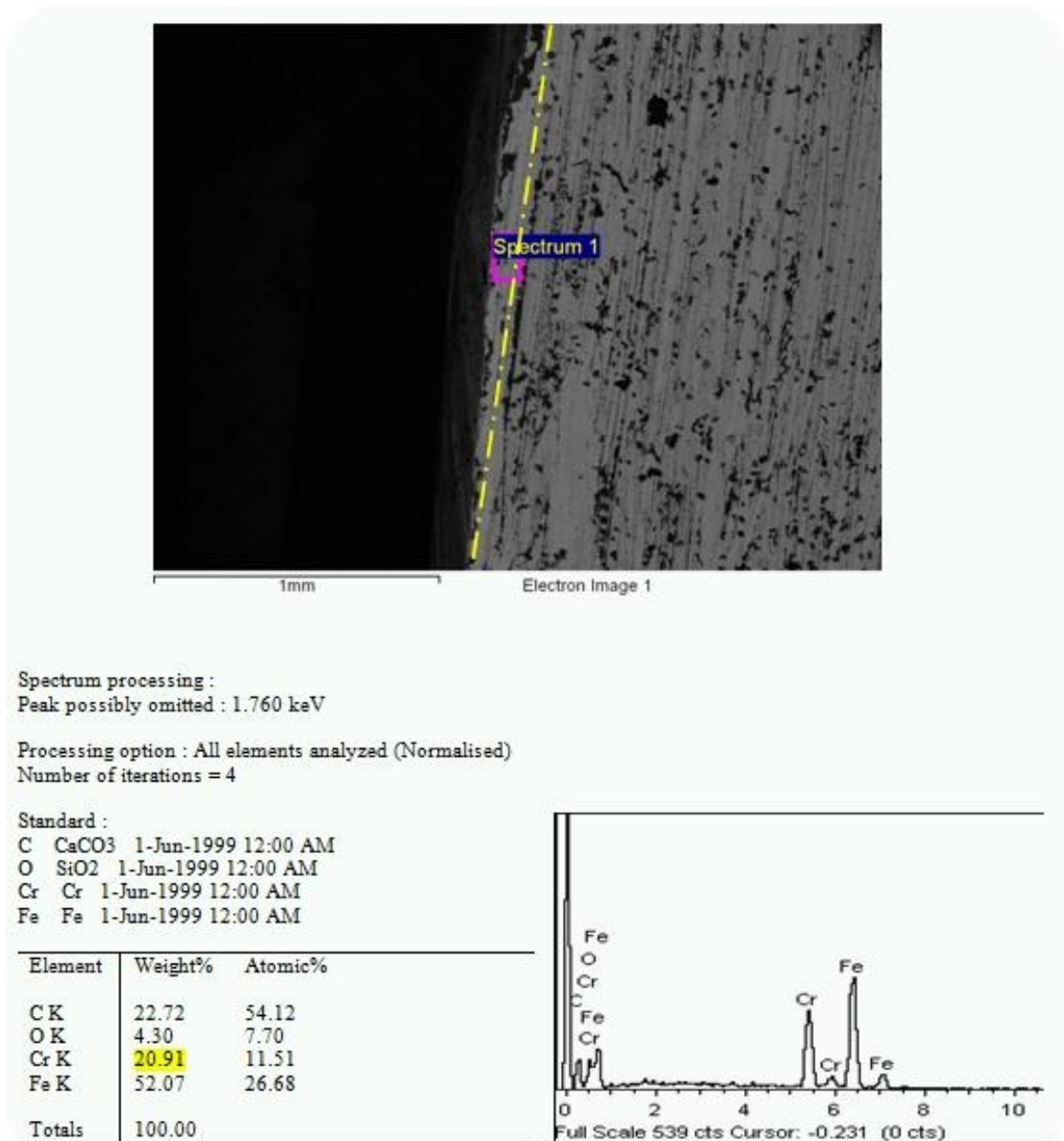
WC plakanın tabana sert lehimleme ile birleştirilmesi esnasında kullanılan pirinç alaşımının kompozisyonu görülebilmektedir.

Şekil 6.25

Kaplama plakasının kompozisyonu, ara kat (yan) görüntüsü üzerinden görülebilmektedir.

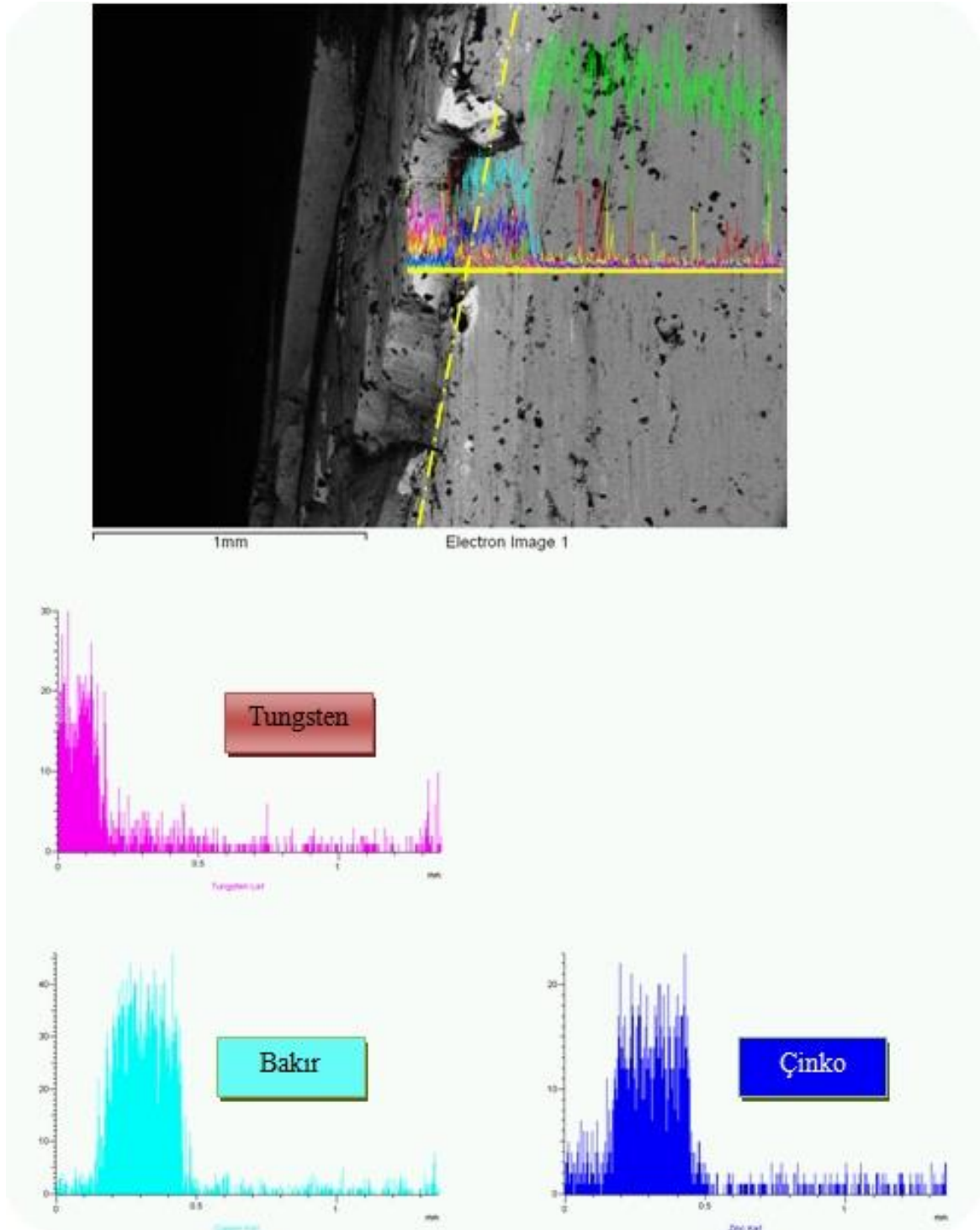


Şekil 6.19. CrC Kaplama EDX ortalama içerik analizi.

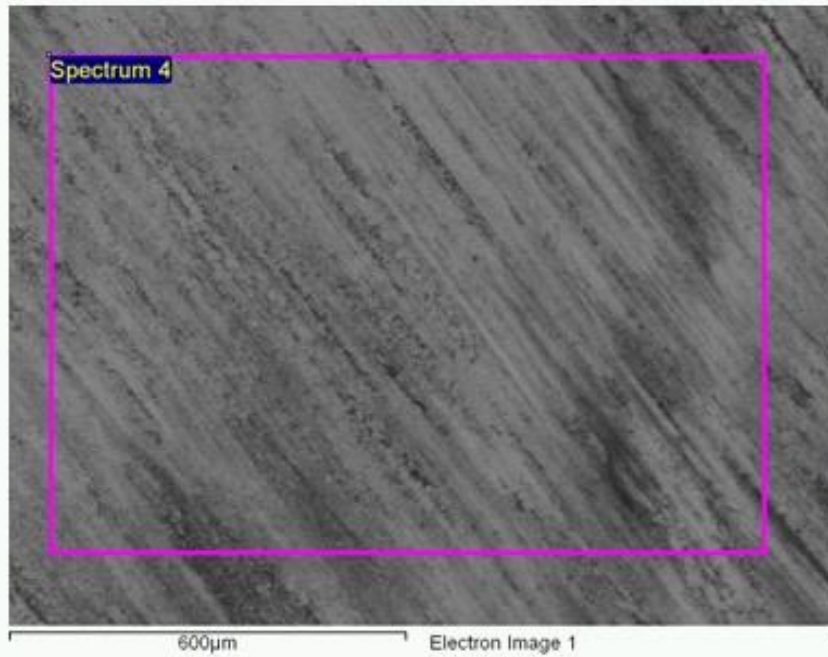


Şekil 6.20. CrC Kaplama ara kesit EDX analizi.

6.3.2.3. WC plaka kaplamanın EDX analizi



Şekil 6.21. WC Plaka kaplama ara kat EDX analizi.

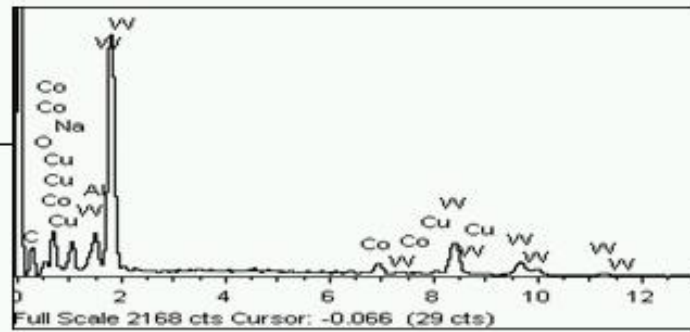


Spectrum processing :
Peak possibly omitted : 6.370 keV

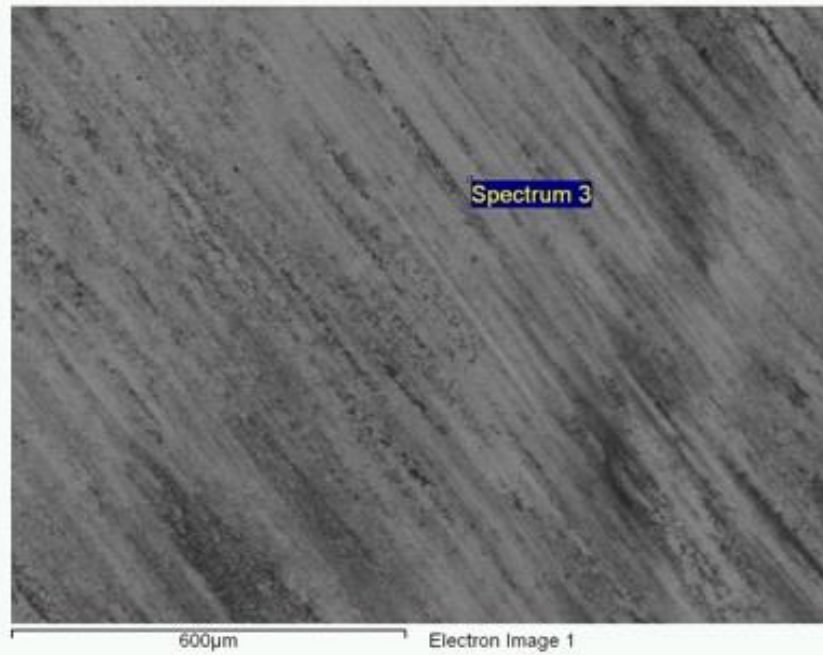
Processing option : All elements analyzed
(Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
Co Co 1-Jun-1999 12:00 AM
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM
W W 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
CK	20.67	60.66
Co K	4.23	2.53
Cu K	1.42	0.79
WM	60.37	11.58



Şekil 6.22. WC Plaka kaplama EDX ortalama içerik analizi.

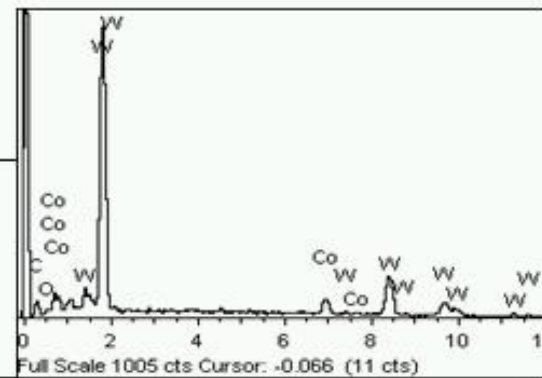


Spectrum processing :
No peaks omitted

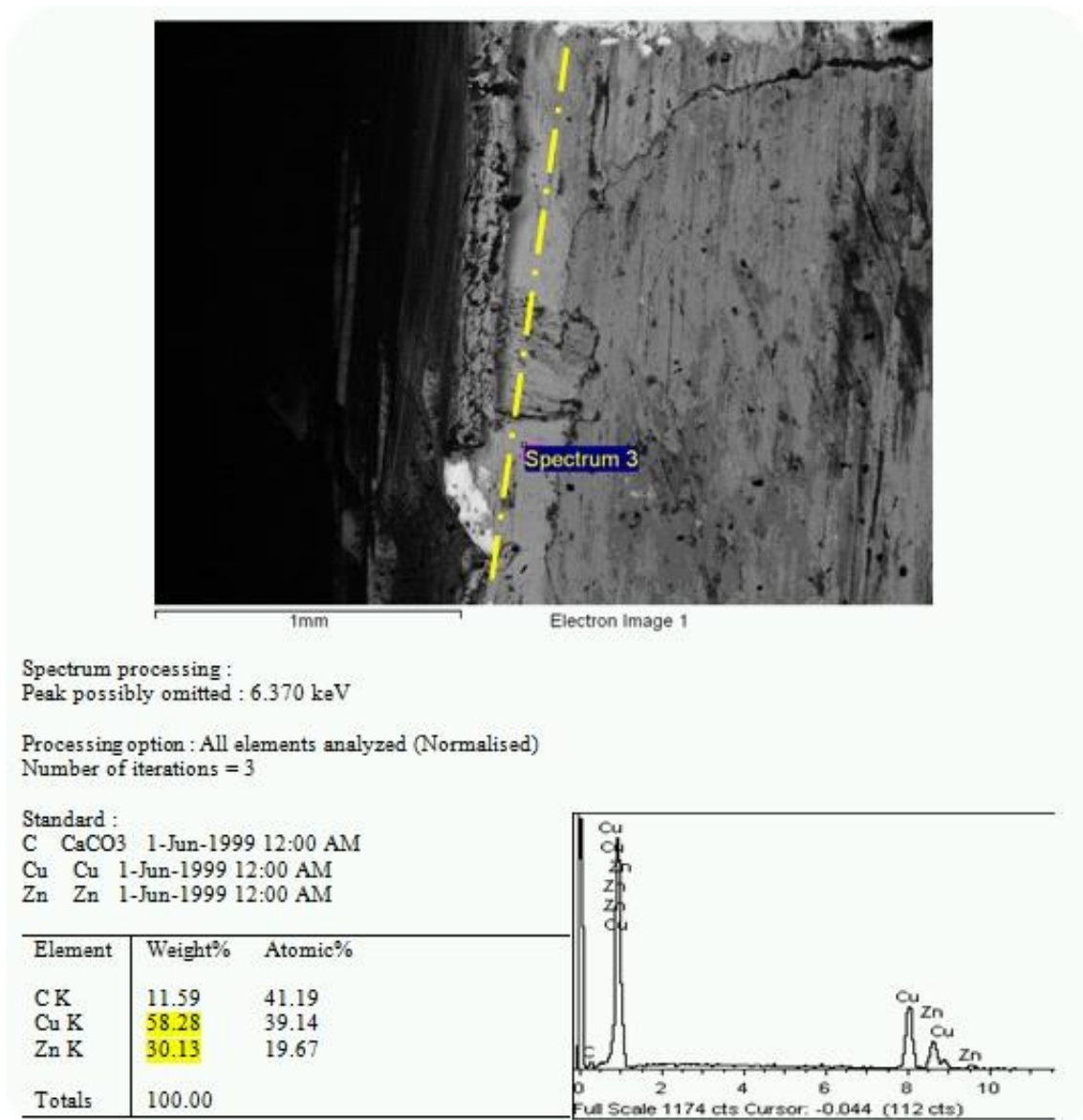
Processing option : All elements analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Co Co 1-Jun-1999 12:00 AM
W W 1-Jun-1999 12:00 AM

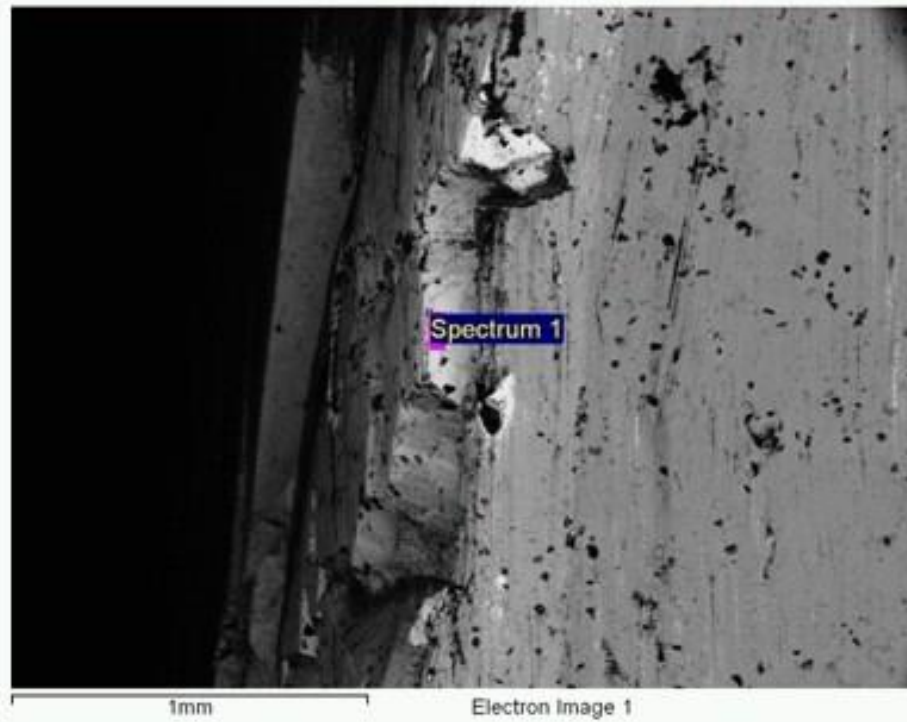
Element	Weight%	Atomic%
CK	14.08	61.23
OK	3.34	10.91
Co K	7.30	6.47
WM	75.28	21.39
Totals	100.00	



Şekil 6.23. WC Plaka kaplama EDX nokta analizi.



Şekil 6.24. WC Plaka arakat EDX analizi (sert lehimleme katı).

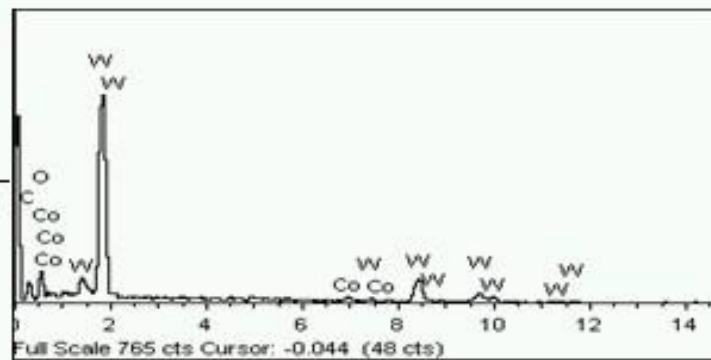


Spectrum processing :
No peaks omitted

Processing option : All elements
analyzed (Normalised)
Number of iterations = 4

Standard :
C CaCO₃ 1-Jun-1999 12:00 AM
O SiO₂ 1-Jun-1999 12:00 AM
Co Co 1-Jun-1999 12:00 AM
W W 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
CK	16.77	48.47
OK	17.80	38.62
Co K	1.39	0.82
WM	64.04	12.09



Şekil 6.25. WC Plaka kaplama ara kat EDX analizi.

6.4. Servis Şartlarında Aşınma Davranışı

Servis şartlarında aşınma davranışını izleyebilmek adına, yöntem olarak önce 3 farklı kaplama yapılmış bıçaklar hazırlanmış, ardından karıştırıcıya bağlanarak her 7 günde aşınma durumları kontrol edilmiştir. Fonksiyonunu yitirme durumuna gelmiş bıçak, karıştırıcı üzerinden sökülerek analizler için saklanmıştır. 3 numune de karıştırıcıdan söküldükten sonra mikro yapı incelemelerine geçilmiştir. Fabrika üretim programının müsait olduğu 5 Mayıs 2013 Pazar günü karıştırıcı bakıma alınmış, deneme bıçaklarının takıldığı karıştırıcı bağlanmıştır.

6.4.1. Numunenin hazırlanması

Karıştırıcı bıçakları, karıştırma yönüne göre 15° açı verilmiş, 1010 alaşımsız çelik lamadır. Numunelerden ilki için, "krom karbür" yapı oluşturacak bir elektrot, elektrik ark kaynağı ile lama üzerine doldurulmuştur. Diğerine, "Tungsten Karbür (WC)" yapı oluşturacak bir tel eritilmiştir. Son numune ise, sert lehim metodu ile, toz metalurjisi ürünü tungsten karbür plakaların birleştirilmesi ile oluşmuştur. Mikser karıştırıcı motoruna bir zaman sayacı bağlanmış olup, denemelerin bağlandığı gün sayaç değeri "679" olarak kaydedilmiştir. Karıştırıcı, Eiricah firmasının DE22 tip kuru karıştırıcısıdır. 2006 model olan karıştırıcının, 2 ayrı döner ekipmanı bulunmaktadır. Bunlardan ilki hızlı (teze konu olan) karıştırıcı, diğer daha yavaş ancak boyutu büyük olan karıştırma parçasıdır. Bunların dışında malzemeyi içine alan ve tekne olarak adlandırılan kısım da döner durumdadır. Sistem tam otomatik çalışmakta olup, prosesine uygun olarak katı malzemeleri ve bağlayıcıları uygun sırayla üzerine almakta, karıştırma süresi tamamlandığında alt kısımda bulunan kapağını açarak boşaltım yapmaktadır. 1.000 lt. hacme sahip olup, manyezit için her periyotta yaklaşık 1.750 kg. harman hazırlayabilir.



Şekil 6.26. Servis şartları için hazırlanmış test numune seti (408 saat sonunda aşınarak testten çıkan CrC numune işaretlenmiş olarak).

7. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

7.1. Genel Değerlendirme

Numuneler içerisinde, kromla kaplanan yüzeylerde; ilk mikrosertlik değerleri 840-850 HV iken, yüzeyden uzaklaştıkça ölçülen mikrosertlik değerleri gittikçe azalmakta, 2350 µm uzaklıktan sonra sertlik değeri aniden düşüş göstermektedir. Bunun da nedeni; 2350 µm'den sonraki uzaklıklarda krom metalinin kaplama katı içerisindeki nüfuziyetinin bitmesi ve bu noktadan sonra artık sert krom karbürlerin ve martenzit fazı oluşumunun ortaya çıkmamasıdır.

AISI 1020 çeliğinin SiC zımpara kağıdı ile yapılan abrasiv aşınma deneyinde, ilk 100 metrelik aşınma yolu içerisinde yüzeydeki pürüzlerin kırılması ve kopması sonucunda çok hızlı bir aşınma kaybı olmuştur. Aşınma deneyinin ilerleyen safhalarında yüzeydeki aşırı büyük pürüzlerin koparak azalması ile, kayma ve aşınmanın bir arada gerçekleşmesi sonucu kararlı aşınmanın görüldüğü üst bölgeye geçilmiştir.

Citodur V1000 elektrodun SiC zımpara kağıdı ile yapılan abrasiv aşınma deneyinde, ilk 100 metrelik aşınma yolu içerisinde yüzeydeki kaba pürüzlerin kırılması ve kopması sonucunda çok hızlı bir aşınma kaybı olmuştur. Bunu takip eden 100-400 metreler arasında, aşınma yoluna bağlı ağırlık kaybı yön değiştirerek doğrusal bir artma göstermiştir. Aşınma deneyinin son bölümünde; aşırı iri pürüzlerin önceden kopup azalmış olması nedeni ile 400 m.'nin üzerindeki aşınma yolunda kayma ve aşınma bir arada gerçekleşmekte ve daha sonra kararlı aşınma bölgesine geçilmektedir.

WC kaplama plakalarının SiC zımpara kağıdı ile yapılan abrasiv aşınma deneyinde, yaklaşık ilk 50 metrelik aşınma yolu içerisinde yüzeydeki kaba pürüzlerin kırılması ve kopması sonucunda bir aşınma kaybı olmuş, ancak yüzey düzgünlüğü sayesinde diğer numunelere göre daha yavaş seyretmiştir. Bunu takip eden 50-200 metreler arasında, aşınma yoluna bağlı ağırlık kaybı az çok doğrusal bir artma göstermiştir. Aşınma yolunun 200 metrenin üzerindeki son bölümünde kayma yolunda iri pürüzlerin önceden tamamen kopup azalması nedeniyle, daha sonra kararlı aşınma bölgesine geçilmiştir.

Çizelge 7.1. Numunelerin çalışma saatleri.

Tarih	Sayaç	Geçen Gün	Geçen Saat	Ortalama Günlük Çalışma (saat)	Not
05.05.2013	679	0	0		Başlangıç
26.05.2013	1087	21	408	19,43	Krom Karbür Kaplamalı Aşındı
25.08.2013	2939	112	1852	20,35	
27.10.2013	4186	175	1247	19,79	
24.11.2013	4765	203	579	20,68	WC Tel Kaplamalı Aşındı
30.03.2014	7267	329	2502	19,86	
11.05.2014	8111	371	844	20,10	WC Plaka Kaplama Aşındı

Çizelge 7.4'de görüldüğü üzere, krom karbür oluşturarak yapılan kaplama, ortalama günde 20 saat çalışarak sadece 21 gün dayanabilmiştir. Oysa WC yapı oluşturan tel, 203 gün çalışma ile neredeye 10 kat fazla dayanmıştır. Yine WC plaka kaplama, 371 gün çalışma ile WC telin de neredeyse 2 katına yakın ömür sağlamıştır.

Servis şartlarında aşınma durumu, bakım personeli tarafından gözle muayene ederek takip edilmektedir. Toplam karıştırma lama boyunun 1/5 bölümü aşındığında, değişim için bakım programı yapılmaktadır.

1 takım karıştırıcı bıçağı hazırlamak için, 72 adet Oerlikon Citodur elektrot ya da 71 adet Castolin 8811 teli kullanmak gerekmektedir. WC plaka kaplı bıçaklar ise Almanya'dan orijinal yedek parça kapsamında satın alınmaktadır. 1 takım (16 adet) karıştırma bıçağının dolgusu için ortalama 95\$ işçilik masrafı olmaktadır. Bu durumda, elektrot/tel birim fiyatları ile maliyet tablosu şu şekilde oluşmaktadır.

Çizelge 7.2. Kaplama maliyetleri.

Kaplama	Maliyet
CrC elektrod	175 \$
WC tel ile	1478 \$
WC plaka ile	3780 \$

Karıştırıcıda bıçak değişimi için, 1 vardiya temizlik ve 1 vardiya mekanik bakım zamanı gerekmektedir. Çizelge 7.4’de görülebileceği gibi, her karıştırıcı ortalama vardiyada 20 harman hazırlamakta olup, üretilemeyen $20 \times 2 = 40$ harman, 30.000 \$ değerinde refrakter tuğla üretilememesine neden olmaktadır.

52 hafta için üretim kaybı hesaplandığında, Çizelge 7.3’de görüldüğü gibi, bıçak değişimden meydana gelen üretim kayıplarının yanında kaplama maliyetleri oldukça küçük kalmaktadır.

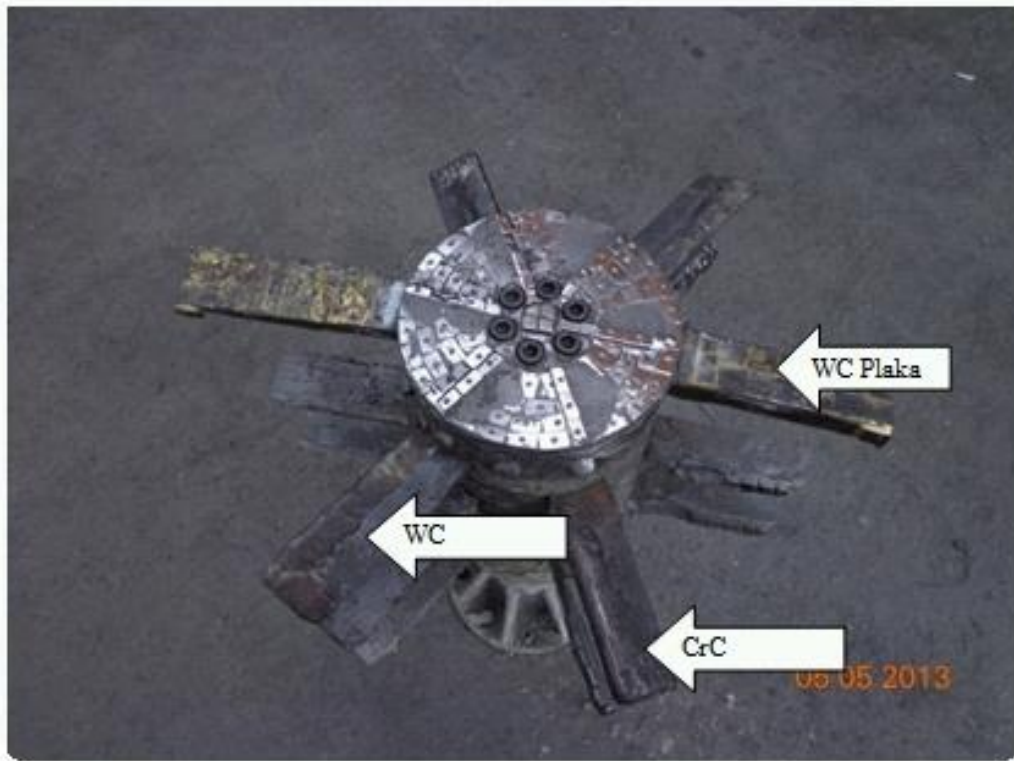
Çizelge 7.3. Kaplama türüne göre üretim kayıpları.

Kaplama	Yılda Değişim Sayısı	Toplam Kayıp
CrC	17	510.000 \$
WC Tel	2	60.000 \$
WC Plaka	1	30.000 \$

Günümüz fabrika çalıştırma metotlarında, işçilik maliyetlerinin azaltılması yönüne yoğun bir eğilim vardır. Zira özellikle Çin gibi ülkelerle rekabet buna bağlıdır. Bu nedenle, tekrarlanan bakımlardan kesin olarak kaçınılmak istenmektedir. Dolayısıyla, WC plaka kaplama maliyeti, CrC maliyetinden 20 kat fazla olmasına rağmen, her açıdan tasarruf sağlamaktadır.

Bu nedenledir ki fabrikalarda artık fiyat değil maliyet konuşulmaktadır.

(Not: Kaplamasız bir karıştırma bıçağının kullanımı/testi mümkün olmamaktadır, muhtemel ömrü birkaç saattir)



Şekil 7.1. Servis şartları için hazırlanan karıştırıcı bıçak takımı.



Şekil 7.2. Karıştırıcı erken dönem gözlem fotoğrafları (a:23 Haziran ve b:28 Temmuz 2013).



Şekil 7.3. Çalışma saati: 2939 Karıştırıcının durumu (aşınma başlangıçları).



Şekil 7.4. Çalışma saati: 4186 WC kaplı bıçak uçlarında aşınma.



Şekil 7.5. Çalışma saati: 4765, WC Tel kaplamanın aşındığını gösteren görüntü.



Şekil 7.6. Çalışma saati: 7267 – WC Plakaların aşınma durumu (bıçak uçlarında aşınma belirtileri).



Şekil 7.7. Çalışma saati 7700 – WC Plakaların aşınma durumu.



Şekil 7.8. “8111” saat sonunda, WC Plakaların aşındığını gösteren görüntüler.

7.2. Sonuç

i) Deneysel çalışmalarda görünen aşınma oranları, gerçek çalışma şartlarında da görülmüştür,

ii) Sadece tek bir ekipmanda, karıştırma bıçaklarına 3.780 \$ maliyetle yapılan bir tungsten karbür plaka kaplaması ile, yılda 510.000 \$ değerinde üretim artışı sağlanmıştır ,

iii) Tungsten karbür plaka kaplama, krom karbür kaplamaya göre 17 kat fazla parça ömrü sağlamıştır,

iv) Tungsten karbür yapı oluşturan tel eritme yöntemi de, plaka kaplamanın yarı ömrünü verebilmiştir. Uygulama maliyeti de plaka kaplamanın %40'ı civarındadır,

v) Tungsten karbür tel eritilen numunelerin mikro yapıları incelendiğinde, eritme kolaylığı için kullanılması gereken %10-15 Ni alaşımının kritik olduğu görülmüştür. Zira erimiş nikel kısımların dayanımı az olduğundan, aşınmaya karşı savunma zafiyeti oluşturmaktadır. Hem kullanılan teldeki kompozisyon hem de uygulama parametreleri bu anlamda kaplamanın performansında önemli etkilere sahiptir. Bu da tel eritmenin, toz metalurjisi ile üretilen plakaların kaplanması metoduna karşı zayıf noktadır. Çünkü tel eritmedeki ve elektrik ark kaynağındaki uygulama parametreleri, işçinin ustalığı ile doğrudan ilişkili olmaktadır. Oysa plaka üretimi, otomasyon kullanımına elverişli olduğundan insan inisiyatifi daha azdır.

vi) Krom karbür yapı oluşturan elektrotun, yüzeyi son derece düzgün kapladığı ve herhangi bir boşluğa ya da zayıf noktaya yer bırakmadığı görülmüştür. Ancak kromun dayanımı, tungstene göre oldukça düşük kalmıştır,

vii) Tungsten plaka kaplamanın zayıf noktasının, lehimle oluşturulan birleştirme tabakası olduğu görülmüştür. Bu tabaka ile taban metali arasında kalan boşluklar mikro yapı incelemelerinde tespit edilmiş olup, lehimin düzgün olmaması halinde plakaların düşeceği/kopacağı bariz olarak görünmektedir. Bıçak üzerine kaplanan plakalardan sadece 1 tanesinin düşmesinin, parçanın çok hızlı bir şekilde tükenmesine neden olacağı aşikardır,

viii) Endüstriyel piyasada yüksek tungsten alaşımlı olarak satılan bazı tellerin ya da elektrotların beklenen performansı verememesinin, maliyet kaygılarıyla kullanılan fazla nikel oranı olduğu düşünülmektedir. Zira nikelin, gerekli olmakla beraber savunma açığına neden olduğu mikro yapı görüntülerinde izlenmiştir,

ix) Tungsten plakaların en önemli avantajlarından birinin de yüzey düzgünlüğü olduğu düşünülmüştür. Kuru karıştırıcıda, özellikle elektrik ark kaynağının neden olduğu pürüzlerin hızlı bir aşınmaya neden olduğu, aşınma deneylerinde anlaşılmıştır. Oysa ki tungsten plakalar, toz metalurjisi ile preslenerek imal edildiğinden, son derece düzgün bir yüzeye sahiptir,

x) Abrasif aşınma literatür bilgisinin verildiği kısımda yer verilen, Nottingham Üniversitesinde yapılan çalışma, abrazyonda aşınmanın meydana gelebileceği tüm mekanizmaları dikkate almanın ve aşınma mekanizmalarını en iyi şekilde önleyecek şekilde kaplamaları seçmenin önemini çok güzel vurgulamıştır. Zira özellikle endüstriyel ortamlarda en büyük yanlışlar, tek başına sertliğin aşınma dayanıklılığına işaret ettiği gibi kanırlardır.

xi) Günümüz işletmelerinde, Kaizen ve 6 sigma gibi metodolojiler çok etkin kullanılabilmektedir. Bakım ekiplerinin, aşınma ortamı/aşındırıcı/aşınan gibi etkileri, bu metodolojiler ile irdeleyerek, bu çalışmaya konu olan denemeleri yapmaları çok önemlidir. Zira mekanik bozulmaların %66'sına sebep olan abrasif aşınma maliyetlerinin azaltılması, her geçen gün daha önemli hale gelmektedir.

Yapılan örnek bir 6 sigma çalışmasının çıktısı olarak, Çizelge 7.5'deki gibi özet sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 7.5. Aşınmaya karşı önlem için 6 Sigma ile uygulama seçimi.

Uygulama	Abrasyon dayanımı	Sıcaklık dayanımı	Darbe dayanımı	Maliyet	Uygulama kolaylığı
CrC elektrod dolgu	1	3	4	5	5
WC elektrod dolgu	3	4	4	4	3
WC plaka kaplama	4	4	3	3	4
Aşınmaz sac kullanımı	2	4	4	3	4
Bazalt kaplama	4	2	1	2	1
Korondum kaplama	5	5	1	1	1
Sert kauçuk kaplama	1	1	5	3	4
Termal Sprey	4	4	4	2	2
Mikser için etki çarpanı	5	3	5	2	3

Uygulama	Abrasyon dayanımı	Sıcaklık dayanımı	Darbe dayanımı	Maliyet	Uygulama kolaylığı	Toplam
CrC elektrod dolgu	5	9	20	10	15	59
WC elektrod dolgu	15	12	20	8	9	64
WC plaka kaplama	20	16	15	6	12	69
Aşınmaz sac kullanımı	10	16	20	6	12	64
Bazalt kaplama	20	8	5	4	3	40
Korondum kaplama	25	20	5	2	3	55
Sert kauçuk kaplama	5	4	25	6	12	52
Termal Sprey	20	16	20	4	6	66

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akçakaya, N., (1995), Mühendisler için eğitim notları serisi, KÜMAŞ Hüsnü Baltacıoğlu Kütüphanesi Arşivi. Kütahya.

ASM International - Welding Brazing ve Soldering, (1993), ASM International, Welding Brazing and Soldering, Sayı.6. USA.

Baltacıoğlu, H., (1991), KÜMAŞ eğitim notları serisi. Kütahya.

Baykal, A. M., (2013), Düşük karbonlu refrakter harman karıştırıcı bıçaklarının değişik kaplama katlarıyla aşınma ömrünün araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya: DPU.

Bozkurt, Y., (2008), Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen Aa2124/Sicp/25 kompozit levhaların mekanik özellikleri ve mikroyapı karakterizasyonu, İstanbul: Marmara Ün.

Buytoz, S., Ulutan, M. S., (2005), Tig yöntemiyle yüzeyi sertleştirilen Aısı 4340 çeliğinin mikroyapısının incelenmesi, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi C.XVIII, S.1.

Çakır, M., (2009), Koçluk eğitimleri serisi, KÜMAŞ Hüsnü Baltacıoğlu Kütüphanesi Arşivi. Kütahya.

Çavaç, M., (2008), KÜMAŞ eğitim notları, Kütahya.

Çöğür, T., (2007), Toz alev spreyleme yöntemi kullanılarak kaplanan farklı malzemelerin aşınma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya: Dumlupınar Üniversitesi.

Gürcan, H., (2010), KÜMAŞ eğitim notları, Kütahya.

Güven A. ve Özcan, M. T., (2005), Aşınan malzeme sertliği ve aşındırıcı sertliğinin abrasiv aşınmaya etkisi, Mühendis ve Makine, Cilt: 46, Sayı: 545.

[http://bilgecelik.com.tr/tr/page.asp?id=2&sayfa=3.](http://bilgecelik.com.tr/tr/page.asp?id=2&sayfa=3)

http://hvof.gts-ev.de/hvof2012/e_overv.html

[http://izmitemlmetal.com/?cat=9.](http://izmitemlmetal.com/?cat=9)

[http://news.thomasnet.com/news/paints-coatings/coatings/ceramic-coatings.](http://news.thomasnet.com/news/paints-coatings/coatings/ceramic-coatings)

[http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp.](http://products.asminternational.org/hbk/index.jsp) (Mayıs 2014)

[http://reliabilityweb.com/index.php/print/Understanding_lubrication_failures.](http://reliabilityweb.com/index.php/print/Understanding_lubrication_failures)

[http://www.aygersan.com.tr/kabilyetler/yuzey-kaplama-islemleri/.](http://www.aygersan.com.tr/kabilyetler/yuzey-kaplama-islemleri/)

[http://www.bdrgalvaniz.com.tr/site/index.php/sicak-daldirma-galvaniz/scak-daldrma-galvaniz-nedir.html.](http://www.bdrgalvaniz.com.tr/site/index.php/sicak-daldirma-galvaniz/scak-daldrma-galvaniz-nedir.html)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

<http://www.castolin.com/tr-TR/literatur>.

<http://www.eirich.com/en/intensive-mixers>. Mayıs 2014.

<http://www.machinerylubrication.com/Read/26920/shaft-alignment-bearing-lubrication>.

<http://www.mining.sandvik.com>

<http://www.mtfca.com/discus/messages/257047/322425.html?1356826982>.

<http://www.pall.com/main/industrial-manufacturing/why-is-filtration-important-3779.page>.

<http://www.pall.de/>.

http://www.oerlikon.com.tr/oerlikon_kutuphanesi.html.

<http://www.sistemteknikfirin.com/sistem-teknik-product-detail.asp?id=67&Lng=TRK>.

<http://www.stellite.co.uk/WeldingProcesses/PlasmaSpraying/tabid/77/Default.aspx>.
KENNAMETAL.

http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear.

<http://www.uctcoatings.com/capabilities/application-development/custom-engineering/>.

<http://www.ytmk.sakarya.edu.tr/>. Yüzey Teknolojileri ve Mühendisliği.

http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/Knowledge_Center/engg_design_mag/ed092/ed09205.html.

<http://www3.toshiba.co.jp/power/english/thermal/service/turbines/valves.htm>.

Hurreeram, D. K., (1998), Material science-MECH 2104, University of Mauritius, Faculty of Engineering, Mauritius.

İpek, R., Karaoğlu, S., Dursun, B., (2011), Çok kısa süreli borlama ile zincir imalatında kullanılan kavuzların aşınma direncinin artırılması, DPU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, S.24.

İpek, R., (2007), Ders notları, Yüzey Mühendisliği, Ege Üniversitesi.

Kahraman, M., (2009), Yüzeyi toz alev püskürtme yöntemi ile kaplanan (Wc, B4c, B4c - Nicrosi) Aısı 1040 çeliğinin aşınma mekanizmalarının deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, Bornova: Ege Üniversitesi.

Kamdi, Z., Shipway, P. H., Voisey, K. T., Sturgeon, A. J., (2010), Abrasive wear behaviour of conventional and large-particle tungsten carbide-based cermet coatings As a function of abrasive size and type, Wear 271 (2011) 1264– 1272, Nottingham University.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kamdi, Z., Shipway, P. H., Voisey, K. T., Sturgeon, A. J., (2010), Abrasive wear behaviour of conventional and large-particle tungsten carbide-based cermet coatings As a function of abrasive size and type, Nottingham University.

Karabaşoğlu, M., (2008), Aşınma deney cihazı tasarımı ve imalatı, Yüksek Lisans Tezi. Sakarya: Sakarya Ün.

Karakaplan, A., (2011), Orta karbonlu alaşımsız bir çeliğin yüksek krom içerikli bir elektrotla yapılacak kaplamanın mikroyapı karakteristiklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya: DPU.

Karaoğlu, Y., (2006), Bir aşınma test cihazının tasarımı ve imalatı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya: Sakarya Üniversitesi.

Keleşoğlu, E., (2011), Sert kaplamalar. İstanbul.

Keskin, Z., (2006), Alüminyum kompozit levhalarının işlenmesinde, Cnc freze kesici takımlarının kaplama seçiminin ve işlem parametrelerinin taguchi metodu ile optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: Marmara Üniversitesi.

Kowalewski, J., Szczurek, (2006), “Issues in vacuum brazing”, Heating Treating Progress, USA, 41-45.

Kuzu, E., (1998), Eğitim notları serisi, KÜMAŞ Hüsnü Baltacıoğlu Kütüphanesi Arşivi. Kütahya.

KÜMAŞ, (2010), KÜMAŞ manyezit fabrikası eğitim notları, Kütahya.

KÜMAŞ, (2014), KMMK., Mühendislik Müdürlüğü Kütüphanesi, Kütahya.

Nalbant, M., Palalı, A. T., (2009), Farklı kaplama malzemeleri kullanımının pulluk uç demirinde aşınma üzerine etkisi, Tübitak Araştırma Makalesi - Turk J Agric For 35 (2011) 215-223 © TÜBİTAK doi:10.3906/tar-0904-30.

Oğur, A., Gürses, C. O., (2013), Çimento fabrikalarında merdane, vals ve kazıyıcılardaki aşınma, SAÜ., Fen Bil., Der., 18. Cilt, 1. Sayı, s.39-47.

Oğuz, B., (1988), “Sertlehimleme”, Oerlikon Yayınları, Oerlikon Kütüphanesi, İstanbul.

Ömür, A., (2005), Katı ortamda borlanmış AISI 1030 çeliğinde işlem parametrelerinin yüzey ve aşınma özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir: OGÜ.

Salman, S., (1995), Plazma ve alev püskürtme tekniğiyle seramik kaplanan malzemelerin özellikleri, Doktora Tezi, İstanbul: Yıldız Teknik Ün.

Sarı Y., (2005), Ni-esaslı kaplamaların abrazif + erozif aşınma direncine ısı püskürtme yönteminin ve WC ilavesinin etkisi, Mühendis ve Makine, Cilt: 46, Sayı: 541.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Stachowiak, G. W., (2001), Engineering tribology kitabı, Avustralya.

Şafak, H. E., (2008), Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi.

Şahin, S., (2013), Yorulma ve aşınma ders notları, Celal Bayar Üniversitesi.

Taşçı, S., (2002), Mühendisler için eğitim serisi, KÜMAŞ Hüsnu Baltacı Kütüphanesi Arşivi. Kütahya.

Teknik, Çelik Sanayi (2012), Çelik paslanmaz endüstri mamülleri ürün teknik kataloğu, Teknik Yayın, Cilt. 1-3.

Topuz, P., Salman, S., (2009), Akışkan yataklı fırında farklı çeliklerin borlanması ve borlama parametrelerinin geliştirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul.

Tosun, G., (2011) 1010 çeliğinin Ni-WC tozları ile PTA yöntemi kullanılarak kaplanması, 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyum Bildirisi, 126-131, Elazığ.

Türkmen, M., Yılmaz R., Fıçıcı, F., (2012), Hardoks 500 çeliğinin abrasiv aşınma davranışının incelenmesi, International Iron & Steel Symposium.

Yazıcıoğlu, Y., (2007), İleri teknoloji kaplamalarının metalik malzemeler üzerine uygulanması ve fonksiyonel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi.

Yılmaz, F., (1997), 9. Uluslararası metalürji ve malzeme kongresi bildirisi, Sakarya: Sakarya Üniversitesi.