

**BOR KARBÜR KATKILI TOZ METAL ELEKTROTLARIN
ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSININ VE YÜZEY
ALAŞIMLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Asım GENÇ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AĞUSTOS 2010
ANKARA**

Asım GENÇ tarafından hazırlanan BOR KARBÜR KATKILI TOZ METAL ELEKTROTLARIN ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSININ VE YÜZEY ALAŞIMLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nizami AKTÜRK
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Prof. Dr. Can ÇOĞUN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER
Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Nizami AKTÜRK
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Makine Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi

Doç. Dr. Şefaatdin YÜKSEL
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. İbrahim USLAN
Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Tarih: 23 / 08 / 2010

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

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Asım GENÇ

**BOR KARBÜR KATKILI TOZ METAL ELEKTROTLARIN
ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSININ VE YÜZEY
ALAŞIMLAMA KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

Asım GENÇ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ağustos 2010**

ÖZET

Bu çalışmada amaç toz metalurjisi yöntemi ile seramik malzemelerden elektro erozyon ile işleme (EEİ) teknolojisi için elektrot üretmek, bu elektrotlarla işleme yapmak ve elektrot içindeki malzemeleri iş parçası yüzeyine alaşımlayarak iş parçası yüzeyinin sertliğini ve aşınma direncini arttırmaktır. Çalışmada, elektrot yapımında yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik, düşük yoğunluk, kimyasal maddelere karşı üstün direnç gibi özellikleri olan bor karbür tozundan % 20 ve bakır tozundan % 80 ağırlıkta kullanılmıştır. Bu çalışma ile dünya rezervleri açısından en fazla ülkemizde bulunan borun farklı bir alanda da kullanım imkânı incelenecektir. İlk olarak bor karbür – bakır karışımı ve saf bakır tozları kalıpta basılarak ham elektrot üretilmiştir. Daha sonra bu ham elektrotlar sinterlenmiştir. Ayrıca dolu silindirik bakır çubuktan elektrot yapılmıştır. Dört farklı işleme koşullarında bu elektrotlarla yapılan deneylerde elektrot aşınma hızları (EAH), iş parçası işleme hızları (İİH) ve bağıl aşınma (BA) değerleri karşılaştırılmıştır. İş parçası yüzeyine alaşımlanan malzemeleri görebilmek için XRF, SEM, EDS analizleri ve optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır.

İşlenen yüzeylerin pürüzlülük, sertlik ve aşınma karakteristikleri incelenmiştir.

Bilim Kodu : 914.1.140
Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme, Toz metalurjisi, Elektrot, Bor karbür, Aşınma, Sertlik
Sayfa Adedi : 124
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Nizami AKTÜRK – Prof. Dr. Can ÇOĞUN

**AN INVESTIGATION ON MACHINING PERFORMANCE AND SURFACE
ALLOYING CHARACTERISTIC OF POWDER METALLURGY
ELECTRODES WITH BORON CARBIDE ADDITION
(PhD Thesis)**

Asım GENÇ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
August 2010**

ABSTRACT

This study aimed to make electrode from ceramic materials by powder metallurgy method for electric discharge machining, using this electrode on Electrical Discharge Machining and to make alloying the electrode material into the work piece surface for increase hardness and abrasion resistance on work piece surface. In this experimental study, electrodes consist of 20% boron carbide which used because of their high melting temperature, high hardness, low density, high resistance against chemical agents and 80% copper powder. This study will lead to use boron carbide in another field which has wide application areas and world most reserves in our country in terms of quantity. First of all boron carbide – copper and copper powder pressed in mold and green electrodes have produced. Then green electrodes had been sintered. Also cylindrical copper bar electrodes have produced. Experimental study made with those electrodes under four different process conditions and electrode wear rates (EWR), material removal rates (MRR) and relative electrode wear (REW) values have compared. XRF, SEM, EDS analysis and optic microscope research have performed for look into alloying material on work piece surface.

Also machined surfaces roughness, hardness and wear characteristics have investigated.

Science Code : 914.1.140
Key Words : Electric discharge machining, Powder metallurgy, Electrode, Boron carbide, Abrasion resistance, Hardness
Pages : 124
Thesis Manager : Prof. Dr. Nizami AKTÜRK – Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanlarım Prof. Dr. Nizami AKTÜRK ve Prof. Dr. Can ÇOĞUN 'a tez izleme jürimde yer alarak çalışmalarına katkı sağlayan Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR ve Doç. Dr. Şefaaddin YÜKSEL 'e teşekkür ederim.

Kimya Mühendisliği bölümündeki laboratuvarları kullanmama müsaade eden ve çok değerli katkılar sağlayan Prof. Dr. Metin GÜRÜ ve Arş. Gör. Dr. Çetin ÇAKANYILDIRIM, toz metalurjisi konusunda yardımlarını daima yanımda hissettiğim Doç. Dr. İbrahim USLAN 'a, sinterleme çalışmalarımı yapmam için laboratuvarı ve fırınları kullanmama izin veren Prof. Dr. Mehmet TÜRKER 'e, takım tezgâhları sorumlusu Teknisyen Kadir YILMAZ, İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı Uzmanı Aydın GÖKÇE, Öğr. Gör. Alpay ÖZER, Makine Yüksek Müh. Yusuf ATAK ve Makine Yüksek Müh. Mustafa CEVİZ 'e teşekkür ederim.

Çalışmalarımda kullandığım elektro erozyon tezgâhını Makine Mühendisliği Bölüm laboratuvarına bağışlayan Doğanlar Çelik Dövme firmasına çok teşekkür ederim.

2001K120590 Nolu “Gazi Üniversitesi İleri araştırma ve Eğitim Programları” başlıklı DPT projesine ve Gazi Üniversitesi'ne: BAP 006 / 2007 – 35 nolu proje için teşekkürlerimi sunarım.

Manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli aileme, sabır ve desteğinden dolayı eşim Tuba, çocuklarım Ömer Alp ve Mert Bilal 'e teşekkürleri bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xviii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
3. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ) YÖNTEMİ	22
3.1. Elektro Erozyon İle İşlemenin Fiziksel Prensibi	22
3.2. Elektro Erozyon İle İşlemede İşleme Parametreleri	24
3.2.1. Elektro erozyon ile işlemede elektriksel parametreler	25
3.2.2. Jeneratörler	30
3.2.3. Dielektrik sıvı	31
3.2.4. Elektrot	34
3.2.5 İşleme sonrası iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar	35
3.2.6. İş parçası işleme hızı	36
3.2.7. Elektrot aşınma hızı	36
3.2.8. Bağlı aşınma	36
4. YÜZEYLERDE SÜRTÜNME VE AŞINMA	38
4.1. Yüzeylerin Sürtünme Özellikleri	38

Sayfa

4.2. Aşınma	39
4.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler	39
5.TOZ METALURJİSİ (T/M) İLE PARÇA ÜRETİMİ	44
5.1. Tozların Sıkıştırılması	44
5.2. Kalıp İmalatı	47
5.3. Kalıp Ömrü ve Bakımı	48
5.4. Sinterleme	49
5.4.1. Katı faz sinterlemesi	49
5.4.2. Sıvı faz sinterlemesi	50
6. DENEYLER	53
6.1. Elektrot Tipi, Boyutları, Kullanılan Tozlar, Elektrot İmalat Yöntemi	53
6.2. Toz Boyutları, Tozların Hazırlanması ve Preslenmesi	55
6.3. Elektrik İletkenlik Ölçümü	66
6.4. Sinterlemenin Yapılışı	68
6.5 Elektro Erozyon Tezgâhı	71
6.6. İş parçası	72
6.7. Elektrotlar	73
6.8. İşleme Parametreleri	76
6.9. İşleme Sonrası Yüzey Katmanının Sertliğinin ve Kalınlığının Ölçülmesi	76
6.10. Yüzey Katmanının Aşınma Direncinin Ölçülmesi	79
7. DENEY SONUÇLARI	81
7.1. İşleme Süresi	82

Sayfa

7.2. İş Parçası İşleme Hızının Karşılaştırılması	85
7.3. Elektrot Aşınma Hızı Değerlerinin Karşılaştırılması	88
7.4. Bağlı Aşınma	91
7.5. Yüzey Pürüzlülüğü	94
7.6. Yüzeye Alaşımlanan Katmanlar	96
7.7. Sertlik	105
7.8. İş Parçası Aşınma Değerleri	107
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
8.1. Sonuçlar	111
8.2. Öneriler	113
KAYNAKLAR	114
EKLER	119
EK-1. Yüzey pürüzlülük parametreleri ve tanımları	120
ÖZGEÇMİŞ	124

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. İşleme şartları ve elektrot özellikleri	5
Çizelge 2.2. Elektrot yapımında kullanılan tozların karışım oranları	7
Çizelge 2.3. Elektrot yapımında kullanılan tozların özellikleri	7
Çizelge 2.4. Yarı sinterlenmiş TiC elektrotun özellikler	8
Çizelge 2.5. Elektrot malzemelerinin karışım oranları ve sinterleme sıcaklığı	11
Çizelge 2.6. İşleme parametreleri	14
Çizelge 2.7. Çalışma parametreleri	17
Çizelge 2.8. İİH ve EA için işleme ve aşınma değerleri	18
Çizelge 2.9. Deney parametreleri ve pürüzlülük, EAH, İİH değerleri	20
Çizelge 3.1. Farklı malzemelere göre kutuplama	29
Çizelge 3.2. Tipik elektrot (takım) malzemeleri ve karakteristikleri	34
Çizelge 6.1. Kalıp malzemesi 2080	54
Çizelge 6.2. Kalıp malzemesi 4340	55
Çizelge 6.3. B ₄ C'ün iş parçası malzemesi özellikleri	56
Çizelge 6.4. Denemesi yapılan toz karışım oranları ve basma kuvvetleri ...	64
Çizelge 6.5. % 80 bakır, % 20 B ₄ C li elektrotların ölçülen elektrik iletkenlikleri	68
Çizelge 6.6. 50 A Furkan marka dalma elektro erozyon tezgahı teknik özellikleri	72
Çizelge 6.7. İş parçası malzemesi kimyasal bileşimi	73
Çizelge 6.8. Deney parametreleri	76

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.1. Sinterlemede oluşan boyut değişimi.....	81
Çizelge 7.2. Sinterlemede oluşan ağırlık değişimi.....	82
Çizelge 7.3. İş parçası yüzeyine alaşımlanan malzeme dağılımı	105

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. EEK prensibinin şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Yüzeye kaplanan Ti ve Fe malzemeler	6
Şekil 2.3. TiC elektrotlarla işlemede kalınlık ve aşınma oranı arasındaki ilişki	9
Şekil 2.4. TiC elektrotlarla işlemede yüzey pürüzlülüğü ve aşınma hızı arasındaki ilişki	9
Şekil 2.5. T/M ile üretilmiş elektrotlarda İİH karakteristikleri	10
Şekil 2.6. T/M ile üretilmiş elektrotlarda elektrot aşınma karakteristikleri	11
Şekil 2.7. Sinterleme sıcaklığı	12
Şekil 2.8. ZrB ₂ Cu elektrotların EEİ performansları	12
Şekil 2.9. EDT ile yapılan yüzey alaşımlama işleminin şematik resmi	13
Şekil 2.10. Mikro sertlik değerinin değişimi	14
Şekil 2.11. Polyester-bakır tozu kompozit elektrotun üretim aşamaları:	16
Şekil 2.12. Bakır ve kompozit elektrotlarla işlenen yüzeylerin pürüzlülük değerleri	17
Şekil 2.13. T, I, t_i, η, U ve P 'nın S_m 'a etkisi	21
Şekil 3.1. Bir elektro erozyon sisteminin temel elemanları	22
Şekil 3.2. Akım ve gerilimin zamana göre değişimi ve bu zamanlara karşılık gelen elektrot ve iş-parçası aşınma aşamaları	25
Şekil 3.3. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe, vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri	26
Şekil 3.4. Elektrot kutuplama türleri	30
Şekil 3.5. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Sürtünme yüzeylerindeki tabakalar	39
Şekil 4.2. Sürtünme öncesi temas noktaları	39
Şekil 4.3. Aşınmayı oluşturan unsurlar	40
Şekil 5.1. Çeşitli metallerin sıkışma özellikleri	44
Şekil 5.2. Toz sıkıştırma	45
Şekil 5.3 Toz sıkıştırma için zimba ve dişi kalıp seti	46
Şekil 5.4. Kalıpta sıkıştırma çevrimi	47
Şekil 6.1. Elektrot yapımında kullanılan ilk ve parçalanmış kalıp	53
Şekil 6.2. 4340 Islah çeliğinden yapılmış ve yeniden boyutlandırılmış kalıp	54
Şekil 6.3. Lazerle boyut ölçme genel kurulumu	57
Şekil 6.4. Elotrolitik bakır toz boyut dağılımı ve bilgiler	58
Şekil 6.5. Bakır elektrot fotoğrafı (x600)	60
Şekil 6.6. Turbula	61
Şekil 6.7. Basma için kullanılan 60 tonluk Dartec RF çekme basma cihazı	61
Şekil 6.8. Basma grafiği	62
Şekil 6.9. Bağlayıcı karıştırılmış bakır elektrot fotoğrafı (x600)	62
Şekil 6.10. % 92 B ₄ C ve % 8 Co	64
Şekil 6.11. % 80 Bakır ve % 20 Bor Karbür Elektrotun mikro yapı fotoğrafı	65
Şekil 6.12. KEITHLEY 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı	66
Şekil 6.13. Düşük direnç ölçümü, 2-nokta metodu	67
Şekil 6.14. Düşük direnç ölçümü 4-nokta metodu	67

Şekil	Sayfa
Şekil 6.15. Argon koruyucu atmosferli fırın GÜ (Mühendislik Fakültesi)	68
Şekil 6.16. Argon koruyucu atmosferli fırın GÜ (Teknoloji Fakültesi)	69
Şekil 6.17. Sinterleme işleminin sıcaklık-zaman grafiği	70
Şekil 6.18. Furkan EDM M50 A elektro erozyon tezgâhı	71
Şekil 6.19. Aşınma testi için kullanılan iş parçası	73
Şekil 6.20. Silindirik elektrolitik bakır (EB)	74
Şekil 6.21. Toz bakırdan yapılmış elektrot (TB)	74
Şekil 6.22. Ağırlık olarak % 80 bakır % 20 B ₄ C (BCT)	75
Şekil 6.23. Deneylerde kullanılan üç tip elektrot.....	75
Şekil 6.24. Üç grup elektrotlarla elektro erozyonda yapılan işleme sonucu oluşan yüzey	77
Şekil 6.25. Mikro sertlik ölçüm cihazı	78
Şekil 5.26. JEOL JSM 6360 LV marka taramalı elektron mikroskop cihazı	78
Şekil 6.27. Sürtünme aşınma düzeneği	79
Şekil 7.1. 3 A ve 25 µs işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması	82
Şekil 7.2. 3 A ve 50 µs işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması	83
Şekil 7.3. 6 A ve 25 µs işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması	84
Şekil 7.4. 6 A ve 50 µs işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması	84
Şekil 7.5. 3 A ve 25 µs işleme koşullarında iş parçası işleme hızının karşılaştırılması	86

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. 3 A ve 50 μ s işleme koşullarında iş parçası işleme hızının karşılaştırılması	87
Şekil 7.7. 6 A ve 25 μ s işleme koşullarında iş parçası işleme hızının karşılaştırılması	87
Şekil 7.8. 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması	89
Şekil 7.9. 3 A ve 50 μ s işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması	90
Şekil 7.10. 6 A ve 25 μ s işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması	90
Şekil 7.11. 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması	91
Şekil 7.12. 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında bağıl aşınma değerlerinin karşılaştırılması	92
Şekil 7.13. 3 A ve 50 μ s işleme koşullarında bağıl aşınma değerlerinin karşılaştırılması	92
Şekil 7.14. 6 A ve 25 μ s işleme koşullarında bağıl aşınma değerlerinin karşılaştırılması	93
Şekil 7.15. 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında bağıl aşınma değerlerinin karşılaştırılması	94
Şekil 7.16. 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında elektrot tipleri için İş parçasının yüzey pürüzlülüğü	95
Şekil 7.17. 3 A ve 50 μ s işleme koşullarında elektrot tipleri için İş parçasının yüzey pürüzlülüğü	95
Şekil 7.18. 6 A ve 25 μ s işleme koşullarında elektrot tipleri için İş parçasının yüzey pürüzlülüğü	96
Şekil 7.19. 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında elektrot tipleri için İş parçasının yüzey pürüzlülüğü	96
Şekil 7.20 EB elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen İş parçası yüzeyi	97

Şekil	Sayfa
Şekil 7.21 EB elektrotlarla 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen İş parçası yüzeyi	98
Şekil 7.22 TB elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen İş parçası yüzeyi	99
Şekil 7.23 TB elektrotlarla 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen İş parçası yüzeyi	100
Şekil 7.24 BCT elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen İş parçası yüzeyi	101
Şekil 7.25 BCT elektrotlarla 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen İş parçası yüzeyi	102
Şekil 7.26 BCT elektrotlarla 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında SEM görüntüsü sonrası EDS taraması	103
Şekil 7.27 BCT elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında EDS analiz ile belirlenen yüzey haritası	104
Şekil 7.28 BCT elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında iş parçası yüzeyinin XRF fotoğrafı	105
Şekil 7.29 BCT elektrotlarla yapılan işleme koşullarında iş parçası Yüzey sertliği değişimi	106
Şekil 7.30 EB elektrotlarla yapılan işleme koşullarında iş parçası Yüzey sertliği değişimi	107
Şekil 7.31 TB elektrotlarla yapılan işleme koşullarında iş parçası Yüzey sertliği değişimi	107
Şekil 7.32 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında iş parçasının aşınma değerleri	108
Şekil 7.33 3 A ve 50 μ s işleme koşullarında iş parçasının aşınma değerleri	109
Şekil 7.34 6 A ve 25 μ s işleme koşullarında iş parçasının aşınma değerleri	109
Şekil 7.35 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında iş parçasının aşınma değerleri	110

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al_2O_3	Alüminyum oksit
BA	Bağıl aşınma
$BaTiO_3$	Baryum titan oksit
BCT	Bor karbür – bakır elektrot
CrO_2	Krom dioksit
EB	Dolu bakır elektrot
E_d	Vurum enerjisi
EAH	Elektrot aşınma hızı
EEİ	Elektro erozyon ile işleme
EDS	X ışınımı kırımıyla bileşik analiz
EEK	Elektro erozyon ile kaplama
Fe_2O_3	Demir oksit
f_c	Vurum frekansı
h	İşlem süresi
HRC	Sertlik (Rockwell cinsinden)
I	Akım yoğunluğu
I_d	Boşalım akımı
İİH	İş parçası işleme hızı
L_c	Örnekleme uzunluğu
P	Püskürtme basıncı
P_c	Tepe sayısı veya tepe yoğunluğu
R_a	Pürüzlülük değerleri
R_t	Pürüzlülük değerleri
SEM	Taramalı elektron mikroskopunda

Sembol	Anlam
SiC	Silisyum karbür
SLA	Stereolitografi (Stereolithography)
S_m	Profil düzensizliklerinin ortalaması
$SrTiO_3$	Stronsiyum titan oksit
TB	Toz bakır elektrot
T/M	Toz metalurjisi
t_d	Boşalım süresi
t_i	Vurum süresi
UF_6	Uranyum hekza floridden
USM	Ultrasonik işleme
U	Açık devre gerilmesi
V_d	Boşalım gerilimi
V_0	Açık devre gerilimi
$Y(x)$	Herhangi bir x mesafesinde profilin ortalama çizgisine uzaklığı
ZrO_2	Zirkonyum dioksit
μm	Mikrometre
ρ	Yoğunluk

1. GİRİŞ

İmalat sektöründe kalıpçılığın önemli bir yeri vardır. Kalıp yapımı hem pahalı hem de uzmanlık isteyen bir alandır. Elektro erozyon ile işleme (EEİ), imalat endüstrisinde ihtiyaç duyulan yüksek kalitedeki pres, enjeksiyon, dövme, ekstrüzyon ve toz sıkıştırma kalıplarının imalatı başta olmak üzere, çok küçük parçaların seri imalatı ile uzay, otomotiv, mekanik, tıp, uçak ve ziraat makineleri endüstrilerinde model ve kalıp işlemede kullanılmaktadır [1-3].

Elektriksel kıvılcımın aşındırma etkisi ilk olarak 1768 yılında İngiliz bilim adamı Priestly tarafından keşfedilmiştir. Elektrik kontağındaki aşındırıcı etkiyi azaltmak için yapılan çalışmalar sırasında Rus bilim adamları B.R. ve N.I. Lazarenko 1943 yılında elektriksel kıvılcımın aşındırıcı etkisini olumlu yönde kullanmaya karar vermişler ve metal işlemesi için bir metot geliştirmişlerdir. Bu amaçla Lazarenko devresi olarak bilinen kıvılcım jeneratör devresi ile ilk EEİ tezgâhını oluşturmuşlardır. Bu jeneratör devresinin geliştirilmiş şekli mevcut birçok erozyon tezgâhında kullanılmaktadır [4,5].

Alışılmamış imalat usullerinden, EEİ diğer konvansiyonel tezgâhlarla işlenemeyen çok sert, karmaşık geometrili, keskin köşeli parçaları yüksek hassasiyet ile işleyebilme kabiliyetinden dolayı gün geçtikçe daha çok tercih edilen bir yöntemdir. Bu işlemin avantajı, işleme performansının işlenen malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olması, parçaya kesme kuvveti uygulamaması ve diğer imalat yöntemleri ile işlenemeyen karmaşık geometrileri kolaylıkla işleyebilmesidir [6].

EEİ 'de üretim maliyetinin azaltılabilmesi ve işleme hassasiyetinin iyileştirilebilmesi için elektrot imalatı önemli bir çalışma alanı olmuştur. Elektrotun hassasiyeti üretilen parçaların hassasiyetini de belirlemektedir. Elektrot imalatı, takımın tasarımı, üretim akışının modellenmesi, prototip üretimi ve üretilen parçaların ölçü doğrulukları ve yüzey kalitelerinin ölçümü gibi birçok adımı içermektedir. Genel olarak elektrot üretim yöntemleri

arasında talaşlı imalat, Stereolitografi (Stereolithography (SLA), 3-B inkjet ve toz metalürjisi (T/M) sayılabilir.

T/M farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını mukavemetli, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştüren bir üretim tekniğidir. Bu işlem, toz karıştırma, presleme ve tozların sinterleme yolu ile bağlanması basamaklarını içerir.

T/M, düşük enerji tüketimine, yüksek verimde malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş bir işlemdir. T/M konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme operasyonları yanında önemli bir yer tutmaktadır [7]. T/M 'nin avantajları, talaşlı işlem gereksiniminin azaltılması veya tamamen ortadan kaldırılması, yüksek üretim hızları, karmaşık şekillerin üretimi, farklı malzemelerde bulunan üstün özelliklerin bir araya gelecek şekilde geniş bir bileşim aralığı, özelliklerin geniş bir aralıkta değişimi, hurda miktarının azaltılması veya ortadan kaldırılmasıdır. T/M 'nin kısıtlamaları, düşük mekanik özellikler, nispeten yüksek kalıp maliyeti, yüksek malzeme maliyeti, tasarım sınırlamaları, parça kesiti boyunca özelliklerin değişim göstermesidir.

Bor karbür, borun en önemli bileşeni ve ara hammadde niteliğindedir. Bor karbür yüksek sıcaklığa dayanıklı olup, diğer bor bileşiklerinin sentezlenmesinde kullanılır. En önemli özellikleri, elmadan sonra ikinci sertliğe sahip olması ve nötron absorpsiyon kabiliyetidir. Bu çalışmada elektrot malzemesi olarak Bor karbür seçilmesinin diğer bir nedeni ise Türkiye'nin dünyanın birinci sırada bor rezervlerine sahip olmasıdır.

Yapılan çalışmada elektrot üretimi için bir kalıp tasarlanmış ve değişik malzemelerden kalıplar imal edilmiştir. Sıkıştırma için en uygun malzeme ve boyut belirlenerek yeterli sertlik (60 HRC) için ısıtma işlemi uygulanmıştır. Üretilen elektrotların elektrik iletkenlikleri incelenmiş ve elektro erozyonda işleme için uygunluğuna bakılmıştır. EEI yöntemi ile işlenen iş parçası

yüzeyinin pürüzlülüğü, aşınma direnci ve sertliği incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskopunda (Scanning Electrone Microscope) (SEM) iş parçasının yüzey yapısı ve alaşımlanan malzemenin iş parçası yüzeyindeki kalınlığı incelenmiştir. X-ışınımı kırınımlı bileşik, EDS analiziyle element analizi yapılmıştır. X ışınları Floresan X-ray fluorescence (XRF)'de görüntüler incelenerek yüzeye hangi malzemeden ne kadar alaşımlandığı incelenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Yapılan literatür çalışmasına öncelikle EEİ için elektrot üretim yöntemlerinden biri olan toz metalürjisi ile yapılan çalışmaların incelenmesinden başlanmıştır. Yapılan çalışmalarda kullanılan tozların cinsi, sıkıştırma basıncı, elektrot boyutları, sinterleme sıcaklığı ve ortamları incelenmiştir.

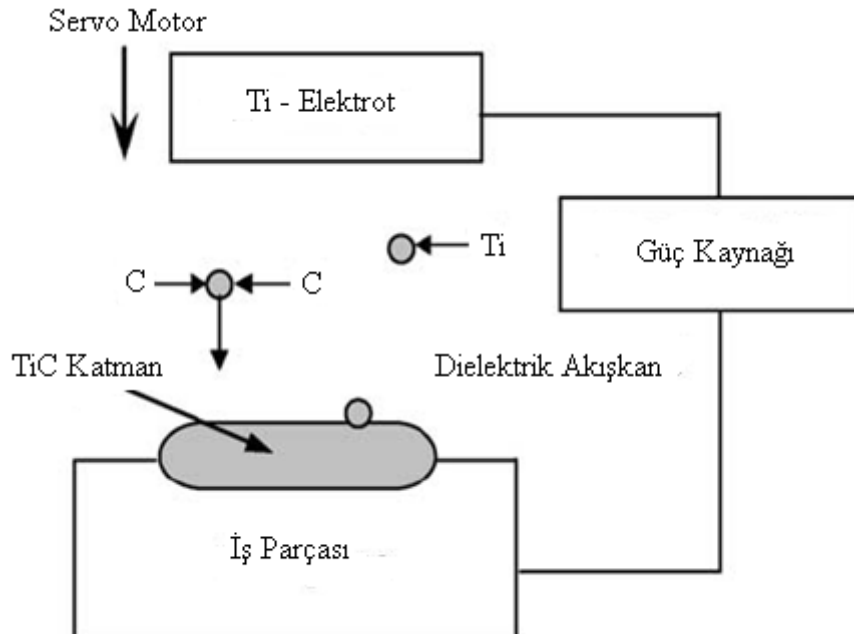
Sonraki kısımda iş parçası yüzeyine yapılan alaşımlamalar ve yüzeyde meydana gelen aşınma direnci, sertlik değişimi gibi fiziksel değişimler incelenmiştir. Son kısımda ise seramik elektrotlar ve seramik iş parçaları ile yapılan işlemlerle ilgili çalışmalar toplanmıştır.

Wang ve diğerleri, Ti tozlarından yapılmış elektrotlarla EEİ 'de yüzey modifikasyonu üzerine çalışmışlardır [8]. EEİ 'de toz metalürjisi yöntemi ile sıkıştırılmış seramik toz elektrotlarla yapılan işleme sonunda iş parçası yüzeyinde sert bir seramik tabaka elde etmişlerdir. Bu yeni kaplama yöntemine Elektro Erozyon ile Kaplama (EEK) adı verilmiştir. Japonya ve diğer gelişmiş ülkeler bu konudaki çalışmalara birkaç yıl önce başlamışlardır. Bu proseste (EEK), EEİ 'de kullanılan seramik elektrot aşınmaya başlar. Aşınan elektrot malzemesi ile yüksek sıcaklıkta ayrılmış dielektrik gazyağının karbon partikülleri kimyasal reaksiyona girerler. Karbür, iş parçası yüzeyine hızlı şekilde toplanır ve birkaç dakika gibi kısa bir sürede 20 µm kalınlığında sert seramik tabaka oluşturur.

Şekil 2.1. 'de EEK 'nın prensibinin şematik gösterimi görülmektedir. İşleme şartları ve elektrotun özellikleri Çizelge 2.1. ve Çizelge 2.2. 'de verilmiştir.

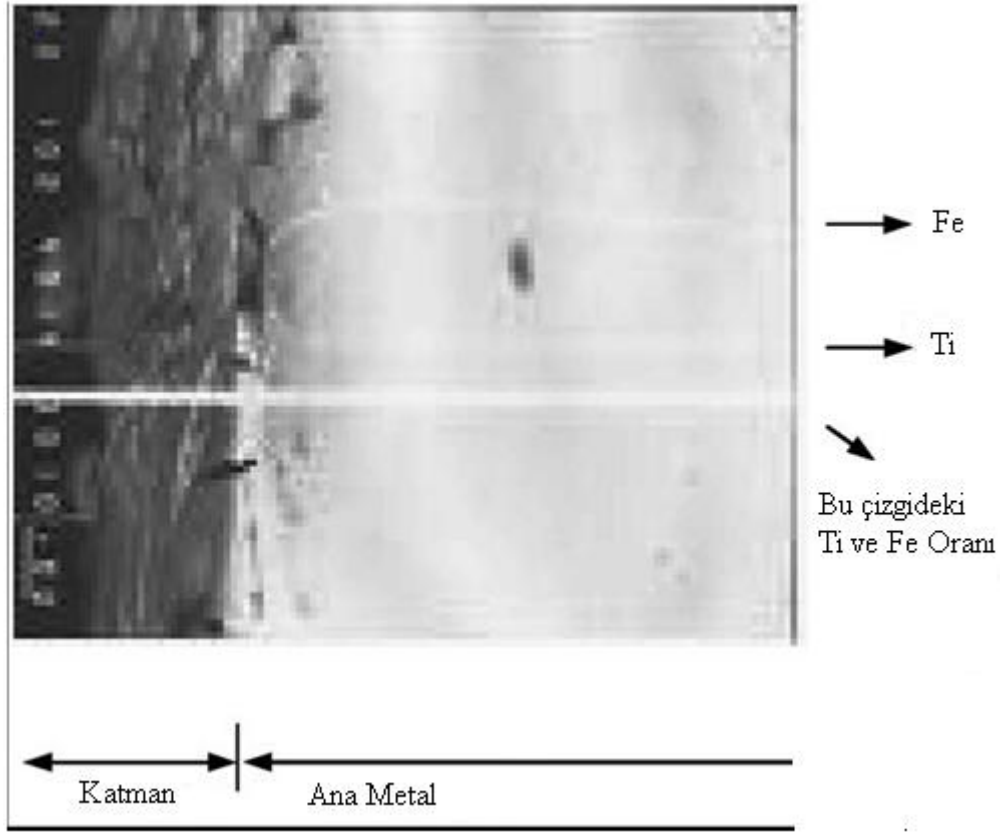
Çizelge 2.1. İşleme şartları ve elektrot özellikleri [8]

İşleme akımı (A)	$i_e = 2.2-10$
Şarj süresi (μs)	$t_e = 2-12$
İşleme süresi (dak.)	18
İşleme alanı (mm^2)	12
Kutuplama	Elektrot (-)
Elektrot	Φ 12 Titanyum
İş parçası	Çelik
Elektrot tipi	Yarı sinterlenmiş
Malzeme	Ti tozları
Toz boyutu (μm)	80
Püskürtme basıncı ($1/cm^2$)	10
Boyut (mm^2)	12



Şekil 2.1. EEK prensibinin şematik gösterimi [8]

Deneyler sonucunda TiC seramik elektrotun metal iş parçası yüzeyini sert bir tabakayla kapladığı görülmüştür. Sert tabakayla kaplanan yüzey, ana malzemeden 3 kat daha sert olup sertlik yüzeyden ana malzemeye doğru azalmaktadır. Kaplama yapılan yüzeyin SEM fotoğrafından (Şekil 2.2.) görüldüğü gibi Ti ve Fe yüzeye kaplanmıştır.



Şekil 2.2. Yüzeye kaplanan Ti ve Fe malzemeler [8]

Yazarların yaptığı çalışmada Ti kaplanan yüzeylerde; kalıp yapışmasının üç kat, iş parçası ömrünün 3-7 kat arttığı görülmüştür. Bu metodun (EEK) yüzey modifikasyonunda yüzey tamiri, kesici takım ve kalıp sertleştirme gibi geniş bir uygulama alanı bulacağı yazarlarca savunulmuştur [8].

Li ve diğerleri, lazerle sinterlenmiş bakır esaslı TiC elektrotların EEİ 'de performansını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada elektrot üretiminde TiC oranının artması, yoğunluğu önce artırıp sonra azaltmasına karşın elektriksel direnci önce azaltıp sonra artmasına neden olmuştur. Ayrıca elektrotlara TiC ilavesi yüzey bitirme işleminde iyi bir performans sağlamıştır. TiC ilavesi ile üretilen elektrotlarla, klasik elektrot malzemesi olan bakır elektrotlar karşılaştırıldığında, TiC ilaveli elektrotların yoğunluğunun %15 daha yüksek olduğunu ve yüksek akım değerlerinde dahi Elektrot Aşınmasının (EA)

düşük, İİH 'nın yüksek olduğunu öne sürmüşlerdir [9]. Tozların karışım oranları Çizelge 2.3. 'de ve özellikleri Çizelge 2.4. 'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Elektrot yapımında kullanılan tozların karışım oranları [9]

No	Numune Adı	Ni	TiC/Cu-W	Elektrot
1	A1	3.5%	96.5%	25% Cu 75% 95% W 5% TiC
2	A2	3.5%	96.5%	25% Cu 75% 90% W 10% TiC
3	A3	3.5%	96.5%	25% Cu 75% 85% W 15% TiC
4	A4	3.5%	96.5%	25% Cu 75% 80% W 20% TiC
5	A5	3.5%	96.5%	25% Cu 75% 70% W 30% TiC
6	A6	3.5%	96.5%	25% Cu 75% 60% W 40% TiC
7	C	75% W 25% Cu		Ticari elektrot

Çizelge 2.3. Elektrot yapımında kullanılan tozların özellikleri [9]

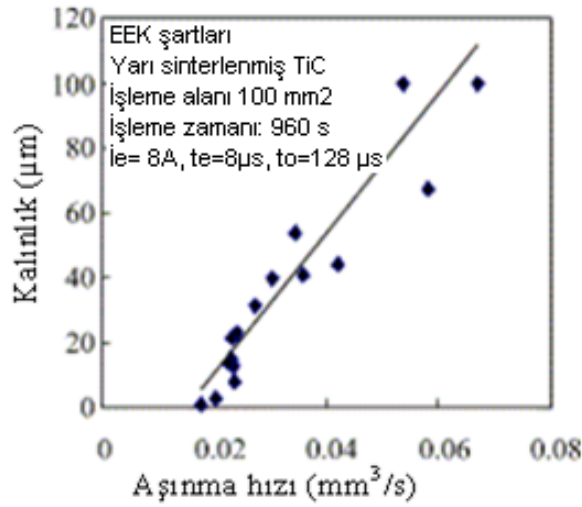
Toz	Cu	W	Ni	TiC
Safılık (%)	99.9	99.9	99.9	99.8
Yoğunluk (g/cm ³)	8.96	19.3	8.9	4.938
Sertlik (HV)	31	>100	>100	>100
Elektrik iletkenlik 20 °C (μΩ cm)	1.69	5.4	6.9	180-250
Isı iletkenliği 0-100 °C (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	401	173	90.9	50-70
Genleşme katsayısı 0-100 °C (x10 ⁻⁶ /K)	17	4.5	13.3	9-12.3
Ergime sıcaklığı (°C)	1083	3410	1453	3250

Moro ve diğerkleri, EEİ 'de yüzey modifikasyonun pratik uygulamalarını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yerine EEİ için geliştirilmiş elektrotun EEK için uygulamalarının detayları anlatılmıştır. Çizelge 2.5. 'de yarı sinterlenmiş TiC elektrotun özellikleri verilmiştir. Bu çalışma, EEK yapılan takımların uygulama alanlarını delik delme gibi düşük hızda kesme şartları için sınırlandırmıştır. Araştırmacılar, aşınıp EEK 'nan elektrotlar kullanıldığında sürtünme katsayısı yükseldiği için yüzey pürüzlülüğünün de arttığını ileri sürmüşlerdir. Taşlanarak kullanılan elektrotlarda ise yüzey pürüzlülüğünün azaldığı yazarlarca belirtilmiştir [10].

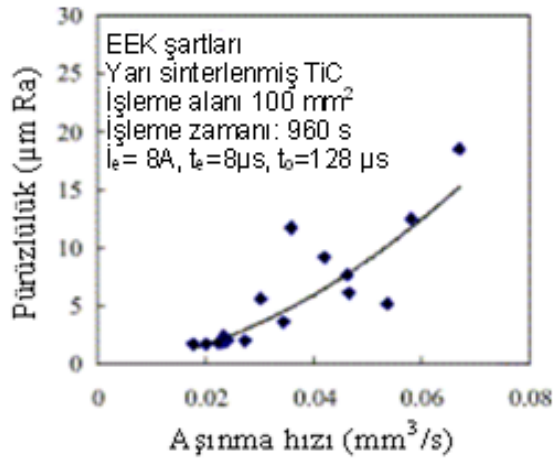
Yapılan çalışmanın sonucunda iş parçası yüzeyine aşınma kalınlığı ile aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü ile aşınma hızı arasındaki ilişkiyi Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'de sunmuşlardır. Grafiklere göre, yüzeye alaşımlanan kalınlık arttıkça aşınma hızı lineer olarak artmakta aynı zamanda pürüzlülük arttıkça aşınma hızı artmaktadır.

Çizelge 2.4. Yarı sinterlenmiş TiC elektrotun özellikleri [10]

Malzeme	TiC tozu
Safılık (%)	99.0
Toz boyutu (μm)	1.0
Kalıplama ve sinterleme şartları	Basınçla kalıplama 98.1 N/mm^2 Sinterleme: $900^\circ\text{C} \times 1\text{h}$
Boyut (mm)	60x60x60
Kopma gerilmesi (N/mm^2)	14.1



Şekil 2.3. TiC elektrotlarla işlemede kalınlık ve aşınma hızı arasındaki ilişki [10]

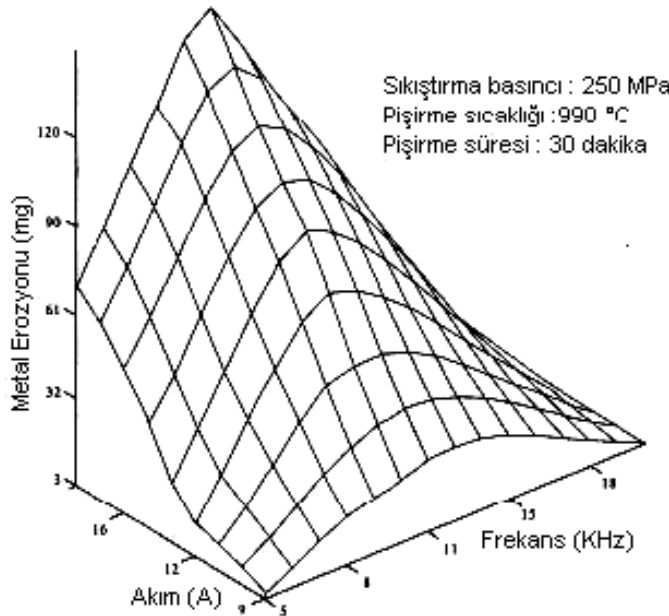


Şekil 2.4. TiC elektrotlarla işlemede yüzey pürüzlülüğü ve aşınma hızı arasındaki ilişki [10]

Samuel ve Philips, T/M ile üretmek amacıyla, görünür yoğunluğu 8,9 g/cm³, akış hızı 1.25 g/s ve ASTM elek boyutu 11 olan %99,7 saflıktaki bakır tozlarını kullanmışlardır [11]. Bakır tozlarını ağırlık başına %1 'lik çinko tozları ile birlikte çift konili karıştırıcıyla karıştırıp, 20 tonluk pres ile 62 ile 625 MPa arasında sıkıştırıp, 950 °C fırında 30 dakika sinterleyerek çapı 14 mm, boyu 12 mm olan silindirik elektrotlar üretmişlerdir. Bu elektrotlarla yaptıkları

deneylerde kısa devre ve ark oluşumlarını, iş parçası ile elektrot arasındaki kirliliği, EEİ 'nin kararlılığı ile İİH ve EAH 'nı akım ile vurum frekansı değişimlerine göre incelemişlerdir. T/M ile üretilmiş elektrotlarda; büyük bakır parçaların işleme sırasında kısa devreye neden olduğunu, yüzey pürüzlülüğünün fazla olması nedeniyle çok kolay ark oluşumuna neden olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, iş parçası ile elektrot arasındaki kirlilik ne kadar dielektrik sıvıya ve uygulama metoduna bağlı olsa da T/M elektrot üretim parametreleri olan sinterleme sıcaklığı ile sıkıştırma basıncının da etkili olduğu, işleme kararlılığının ise özellikle bakır tozlarının büyüklüğüyle ters orantılı olarak azaldığını ileri sürmüşlerdir.

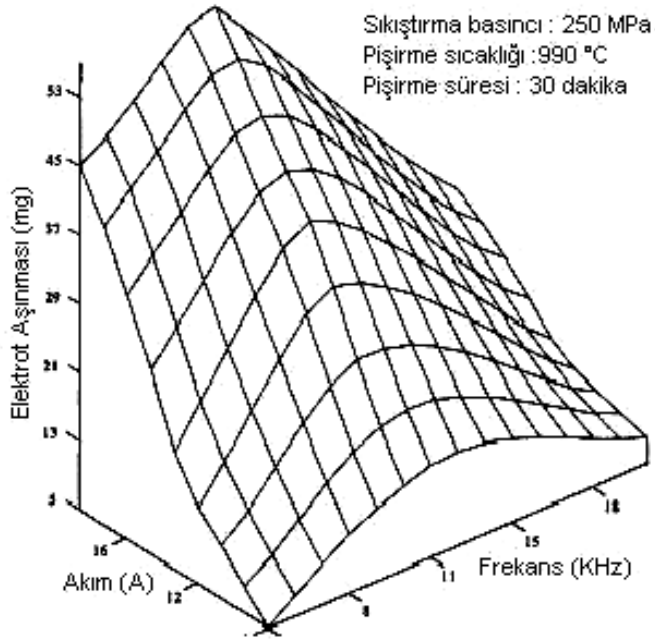
T/M ile üretilmiş elektrotlarla yapılan işlemlerde, düşük akım–yüksek frekansta veya yüksek akım–düşük frekansta İİH 'nin düşük olduğu, bunun tersine yüksek akım–yüksek frekansta ise İİH 'nin yüksek olduğu belirlenmiştir. Burada etkili faktörün ise, elektrotun gözenekli yüzey yapısı olduğu belirtilmiştir (Şekil 2.5.).



Şekil 2.5. T/M ile üretilmiş elektrotlarda İİH karakteristikleri [11]

T/M ile üretilmiş elektrotlarda EAH 'nın düşük sinterleme sıcaklığı ile düşük

sıkıştırma basıncı ile üretilmiş elektrotlarda fazla olduğu, işleme akımının ve vurum frekansının İİH 'nda aynı etkiyi yarattığını vurgulamışlardır (Şekil 2.6) [11].

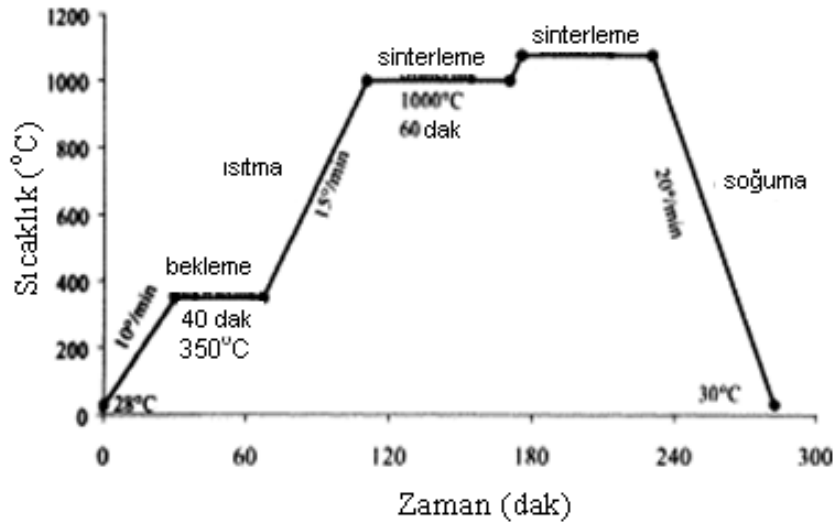


Şekil 2.6. T/M ile üretilmiş elektrotlarda elektrot aşınma karakteristikleri [11]

Zaw ve diğerleri, elektrot üretiminde elektrot malzemesi olarak Çizelge 2.6. 'daki toz karışımlarını seçmişlerdir. Tozlar V tipi karıştırıcıda 1 saat karıştırılarak 350 bar basınçta 25 mm çapında elektrot üretilmiştir. Ham elektrotlar Argon gazlı koruyucu atmosferinde Şekil 2.7. 'de görülen sıcaklık döngüsünde sinterlenmiştir [12].

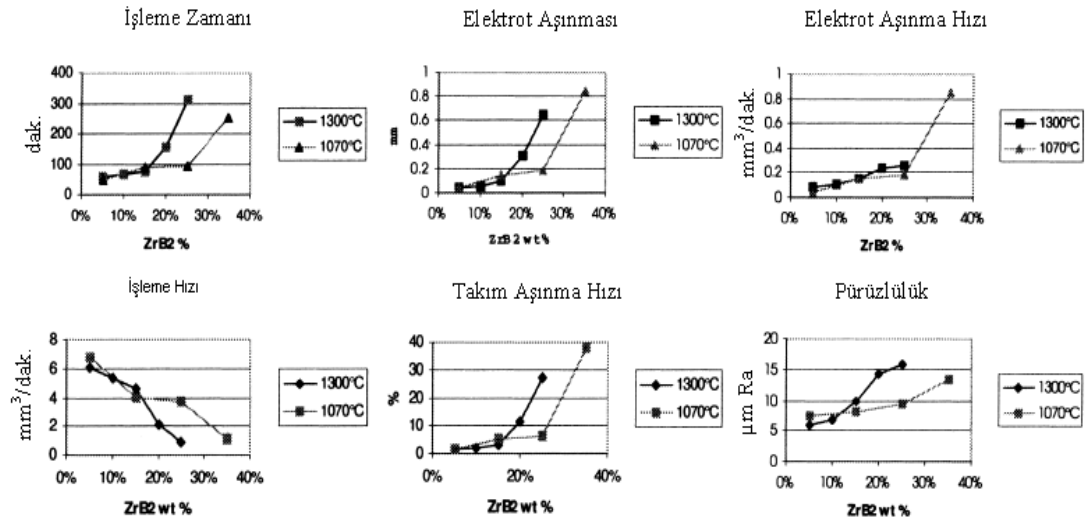
Çizelge 2.5. Elektrot malzemeleri karışım oranları ve sinterleme sıcaklığı [12]

No	Karışım	Sinterleme Sıcaklığı (°C)
1	CuXwt.ZrB ₂	
	X = 5,15,25,35 X = 5,10,15,20,25	1070 1300
2	CuXwt.Ti0.36Xwt.Si X = 5,10,15,20	1200



Şekil 2.7. Sinterleme sıcaklığı [12].

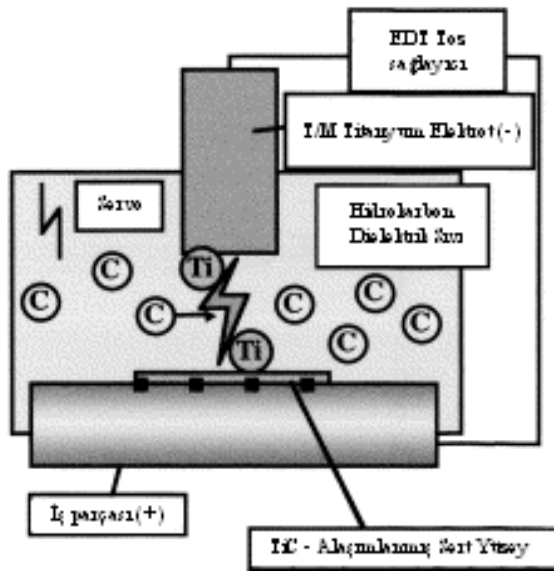
Yapılan çalışma sonunda, işleme süresi, elektrot aşınması, elektrot aşınma hızı, işleme hızı ve pürüzlülük değerleri ile ilgili elde edilen grafikler Şekil 2.8.'de sunulmuştur.



Şekil 2.8. ZrB₂Cu elektrotların EEİ performansları [12]

Simao ve diğeri, AISI D2 malzemesinden yapılan rulo yüzeyini kaplamışlardır. Çalışmalarında rulonun yüzeyini alaşımlamak için T/M yöntemi ile ürettikleri ham ve sinterlenmiş TiC/WC/Co ve WC/Co elektrotları kullanmışlardır. T/M ile ürettikleri elektrotlarla saf bakır ve grafit elektrotları aynı işleme şartlarında kullanarak iki boyutlu yüzey pürüzlülük değerlerini karşılaştırmışlardır. (Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy on a GDOES) GDOES analizi sonucunda T/M elektrot kullanımında Ti ve W ile birlikte C 'unda iş parçası yüzeyine alaşımlandığını tespit etmişlerdir [13].

Rulo üzerinde yaptıkları mikro sertlik ölçümlerinde yüzeyde oluşan beyaz tabakanın sertliğinin TiC/WC/Co ve WC/Co elektrotlarla yapılan işlemede klasik elektrotlarla yapılan işlemeye göre 300 HK 'lık bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Elektro Erozyon İle Alaşımlama (EDT) ile yapılan yüzey alaşımlama işleminin şematik resmi Şekil 2.9. 'da ve işleme parametreleri ise Çizelge 2.7. 'de verilmiştir.

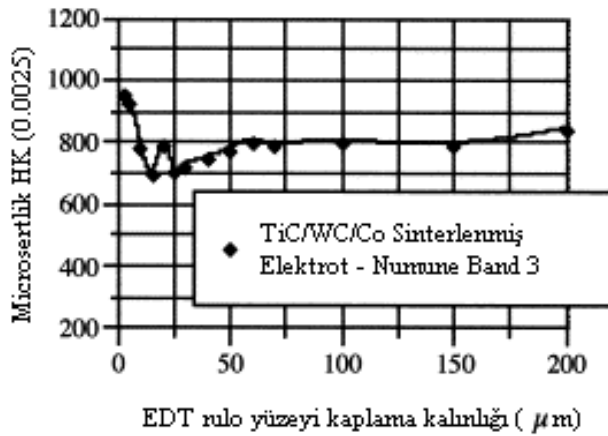


Şekil 2.9. EDT ile yapılan yüzey alaşımlama işleminin şematik resmi [13]

Çizelge 2.6. İşleme parametreleri [13]

EDT işlem sırası	Tepe akımı (A)	Arkın uygulama süresi (μ s)	Bekleme süresi (μ s)	Elektrot kutuplaması
1	1	6	20	+
2	2	10	20	+
3	10	18	20	+
4	6	10	20	-
5	12	10	20	-
6	18	10	20	-

Sinterlenmiş elektrotlarla yapılan çalışmada mikro sertlik değerlerinin değişimi Şekil 2.10'da verilmiştir.



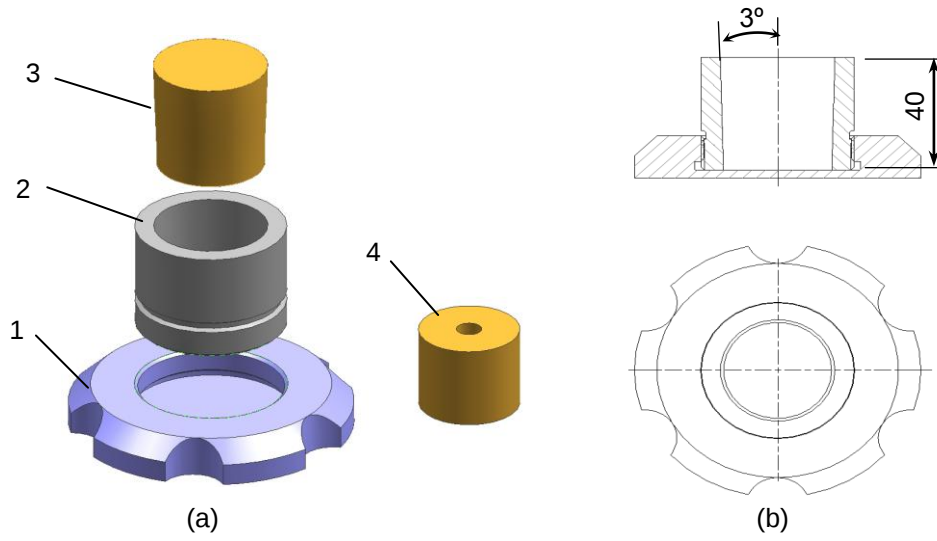
Şekil 2.10. Mikro sertlik değerinin değişimi [13]

Çalışmanın sonucunda yazarlar aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir;

- 1) Uygun çalışma şartlarında yüzeyde oluşan beyaz tabakaya Ti ve W alaşımlanmıştır.
- 2) T/M ile elektrot üretilirken basınç ve sinterleme sıcaklığı yükseltildiği zaman fiziksel, elektriksel, mikro yapı, mekanik ve termal özelliklerde iyileşme meydana gelirken yüzeye alaşımlanan elektrot malzemesi azalmaktadır.

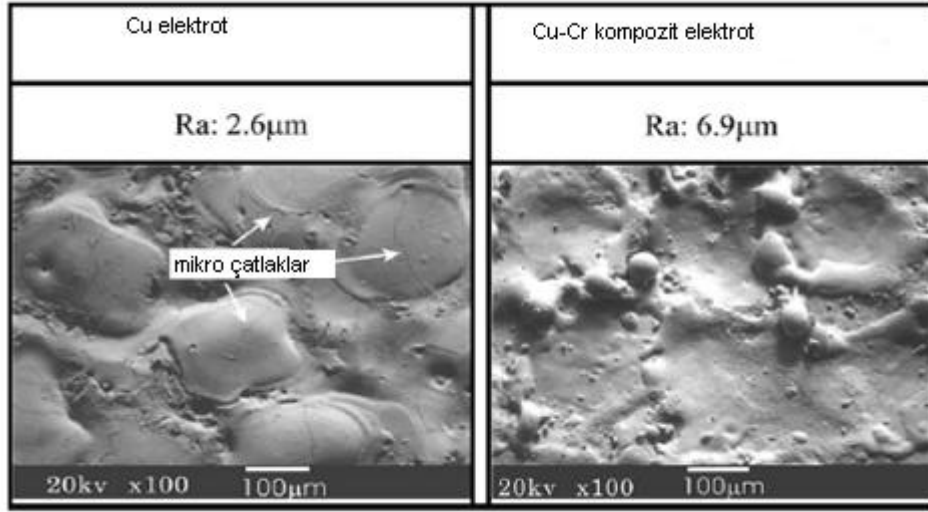
Yaman yapmış olduğu çalışmada, EEİ 'de elektrot üretimini kolaylaştırmak ve maliyetini düşürmek için, alternatif bir elektrot üretim yöntemi geliştirmiştir. Bu amaç için, elinde hazır halde bulunan modelden alçı, silikon, reçine v.b. bir kalıp yaparak, daha önce hazırlamış olduğu tutucu ve iletken dolgu malzemesinden oluşan karışımın bu kalıp içine dökülmesi ve katılaşmasını sağlamıştır. Çalışmada, tutucu malzeme olarak polyester reçine ve elektrot malzemesi olarak dendritik şekilli saf bakır tozu, grafit tozu ve bunların karışımı kullanılmıştır. Karışımın döküldüğü kalıpta kısa sürede sertleşerek rijit hale gelmesi için, hızlandırıcı ve dondurucu olmak üzere iki farklı kimyasal madde kullanmıştır. Yaman çalışmasında elektrotu Şekil 2.11. 'de gösterildiği gibi dört aşamada yapmıştır. Amacı İİH ve EAH değerlerini tespit ederek en uygun elektrot karışımını ve imal yöntemini belirlemektir. Serbest bakır-polyester (N-B/P), sıkıştırılmış bakır-polyester (S-B/P), pişirilmiş bakır-polyester (P-B/P), pişirilmiş bakır-grafit-polyester (P-B/G/P) ve sıkıştırılmış bakır-grafit-polyester (S-B/G/P) olmak üzere beş farklı tip kompozit elektrot üretmiştir [14].

Çalışmada, işleme akımı olarak kullanılan 9 amper'in üzerindeki işleme uygulamalarında elektrotun iş parçasına oranla daha fazla aşındığı ve elde edilen iş parçası yüzeyinin daha pürüzlü olduğu görülmüştür. Bu akım değeri altındaki deneylerde ise İİH 'nin düştüğü görülmüştür. Elektrotların pişirilerek son-kür ile kürleşmenin %90-%100 oranlarına kadar tamamlanmasının elektriksel iletkenliğe – dolayısıyla işleme ve aşınma performansına – belirgin bir biçimde etki ettiği görülmüştür. Pişirme ile İİH 'nin arttığı, EAH 'nın azaldığı ve BA 'nın saf bakır elektrota yaklaştığı gözlenmiştir. Bu çalışmada, denemeleri yapılmış olan elektrotların saf bakır elektrota göre düşük İİH ve yüksek EAH değerlerinden dolayı kaba operasyondan çok bitirme (finish) operasyonunda kullanılmasının daha uygun olacağı ortaya çıkmıştır. Elektriksel iletkenliği iyi olan elektrotların İİH, EAH ve BA değerlerinin de iyi olduğu ve saf bakır elektrot değerlerine yaklaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.11. (a) Polyester-bakır tozu kompozit elektrotun üretim aşamaları: 1. Kalıp altlığı, 2. Kalıp, 3. Ham kompozit elektrot, 4. Son ölçülerine işlenmiş kompozit elektrot
(b) Kalıbın boy ve koniklik ölçüleri [14]

Tsai ve diğerleri, Cr ve Cu tozlarını ilave bir bağlayıcı kullanarak kompozit elektrot üretmişlerdir. Elektrot üretim maliyetini düşürmek için düşük sıcaklık (200 °C) ve düşük basınç 20 (MPa) kullanmışlardır. Çalışma parametreleri olarak Çizelge 2.8.'deki değerleri kullanmışlardır. Çalışmada, toz bakır ve bağlayıcı kullanılarak üretilen elektrotlarda, Cu-Cr kompozit elektrotlardan daha yüksek İİH elde edilmesine karşın EAH daha büyük çıkmıştır. Buna karşın bakır elektrot ile işlenen iş parçası yüzeyinde kompozit elektrotla işlenen yüzeye göre daha düşük pürüzlülük elde edilmiştir (Şekil 2.12.). 20-30 MPa basınçta sinterlenerek üretilen elektrotlar 10 MPa basınçta sinterlenerek üretilen elektrotlardan daha yüksek İİH elde edilmiştir. Kompozit elektrotlarla yapılan işlemede elektrottan kopan Cr ve Cu tozları iş parçası yüzeyine alaşımlandığı için iş parçası yüzeyinin sertliğinin ve aşınma direncinin arttığı görülmüştür [15].



Şekil 2.12. Bakır ve kompozit elektrotlarla işlenen yüzeylerin pürüzlülük değerleri [15]

Çizelge 2.7. Çalışma parametreleri [15]

Çalışma Parametreleri	Açıklama
İş parçası	AISI 1045 (Φ 32X10 mm)
Elektrot	Cu-Cr kompozit elektrot (Φ 12X 4 mm) Cu tozu: 53 μ m, Cr tozu: 45 μ m Cu elektrot (Φ 12X 4 mm)
Dielektrik	Gaz yağı
Kutuplama	Pozitif (+)
Tepe akımı, I_p	12 (A)
Şarj süresi	25,100,200,400,800 (μ s)
İşleme süresi	120 (s)

Luis ve diğerleri, silisyum karbür elektrotlar için EEİ hızı ve aşınma karakteristiklerini incelemişlerdir. SiC 'ün uygulama alanları, gaz türbinleri, rulmanlar, contalar ve endüstriyel fırınlardır. Bu çalışmada silisyum karbür elektrotlar sadece bitirme (finish) aşaması için uygulanmış ve değişik işleme parametrelerinin (işleme akımı (I), vurum süresi (t_i), işlem süresi (η), açık devre gerilmesi (U) ve dielektrik sıvısı püskürtme basıncı (P) 'nın işlemedeki etkisi incelenmiştir [16].

Çalışmanın sonucunda, İİH ve EA için birinci dereceden bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde İİH 'nın %95 ağırlıkla işleme akımı ve açık devre gerilimine bağlı olduğu görülmüştür. İİH ve EAH için tespit edilen ikinci derece model Çizelge 2.9.'da sunulmuştur [16].

Çizelge 2.8. İİH ve EAH için işleme ve aşınma değerleri [16]

İİH ve EA 'nın ikinci dereceden model için tasarım matrisi

	I	t_i (μ s)	η	U (V)	P(kPa)	EW (%)	MRR (mm^3/min)
1	3	30	0.4	-120	60	10.29	0.033
2	5	30	0.4	-120	20	7.34	0.104
3	3	70	0.4	-120	20	19.82	0.020
4	5	70	0.4	-120	60	10.01	0.116
5	3	30	0.6	-120	20	11.87	0.049
6	5	30	0.6	-120	60	9.83	0.091
7	3	70	0.6	-120	60	13.55	0.030
8	5	70	0.6	-120	20	12.16	0.136
9	3	30	0.4	-200	20	12.66	0.051
10	5	30	0.4	-200	60	7.48	0.312
11	3	70	0.4	-200	60	16.06	0.030
12	5	70	0.4	-200	20	7.91	0.267
13	3	30	0.6	-200	60	12.84	0.092
14	5	30	0.6	-200	20	11.63	0.344
15	3	70	0.6	-200	20	16.33	0.055
16	5	70	0.6	-200	60	9.29	0.354
17	3	50	0.5	-160	40	13.29	0.032
18	5	50	0.5	-160	40	7.47	0.283
19	4	30	0.5	-160	40	6.61	0.244
20	4	70	0.5	-160	40	6.74	0.177
21	4	50	0.4	-160	40	6.92	0.147
22	4	50	0.6	-160	40	10.50	0.168
23	4	50	0.5	-120	40	10.92	0.087
24	4	50	0.5	-200	40	8.00	0.258
25	4	50	0.5	-160	20	7.24	0.195
26	4	50	0.5	-160	60	6.65	0.201
27	4	50	0.5	-160	40	6.61	0.189
28	4	50	0.5	-160	40	7.06	0.199
29	4	50	0.5	-160	40	7.25	0.199
30	4	50	0.5	-160	40	7.51	0.201

Simao ve diğerleri, çalışmalarında WC/Co tozlarından T/M yöntemi ile elektrot üretmişler ve dielektrik sıvıya alüminyum, nikel ve titanyum tozları karıştırarak deneyler yapmışlardır. İş parçası olarak AISI H13 sıcak iş takım

çeliği kullanmışlardır. EEİ sonrasında EAH, İİH ve iş parçası yüzey sertliğindeki değişimleri incelemişlerdir. İş parçası yüzeyine 30 µm kalınlıkta seramik malzemenin alaşımlandığını ve sertliğin 650 HK 'den 1350 HK 'ye çıktığını tespit etmişlerdir [17].

Çoğun ve Özerkan, dielektrik sıvı içerisine katılan grafit ve borik asit tozlarının yüzey pürüzlülüğüne, İİH'na, EAH 'na, mikro yapıya ve yüzey sertliğine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir Her iki toz karışımı dielektrik sıvı için vurum süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini tespit etmişlerdir. Borik asit tozlu çalışmada değişik toz konsantrasyonlarında aynı vurum süresi için saf gazyağı ile elde edilen yüzeylere oldukça yakın yüzey pürüzlülüğü elde edilmiş, artan toz konsantrasyonu ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinde saf gazyağında elde edilenlere göre belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Borik asit tozlu çalışmalardan iyi sonuç alınamamasının sebebi olarak, bu tozların kötü iletken olması ileri sürülmüştür. Grafit tozlu çalışmada ise yüzey pürüzlülüğü, saf gazyağı kullanılarak elde edilen yüzeylere göre belirgin şekilde iyileşmiştir. Borik asit tozlu deneylere göre grafit tozlu deneyler daha iyi yüzey pürüzlülüğü vermiştir. Bütün toz karışımı deneylerde, S_m ve R_z (DIN) pürüzlülük parametrelerinin toz konsantrasyonu ile az da olsa azalması krater çapının ve derinliğinin de azaldığını göstermektedir. Bu durum çekilen yüzey profil fotoğraflarındaki kraterler incelendiğinde de açıkça görülmektedir. Sonuç olarak, grafit tozlu işlemlerde işleme aralığında oluşan toz köprüleri boşalım süresince daha fazla sayıda boşalım kanalı oluşturarak borik asit tozlu ve tozsuz çalışmalara göre aynı boşalım enerjisini birim alandaki işleme yüzeyine daha düşük yoğunlukta ileterek yüzey pürüzlülüğünü belirgin şekilde iyileştirmiştir. Yapılan deneylerde, borik asit tozlarının yüzey sertliği dışında saf gazyağı ile yapılan deneylere göre İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü açılarından belirgin bir üstünlük sağlamadığını tespit etmişlerdir [18].

Puertas ve Luis, iletken seramikler üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında üç farklı iletken seramiğin (WC-Co, B_4C ve SiSiC) EEİ

işlenebilirliğini karşılaştırmışlardır. Yapılan karşılaştırma, akım yoğunluk faktörü I , vurum zamanı t_i ve serbestlik derecesi η ile yüzey pürüzlülüğü R_a , hacimsel elektrot aşınması ve malzeme işleme hızı arasında yapılmıştır. Bor karbür ile yapılan işlemede akım yoğunluğu arttıkça R_a değerinin azaldığı, SiC ve WC ile işlemede ise akım yoğunluğu arttıkça R_a değerinin de arttığı gözlenmiştir. Buna göre artan vurum süresi yüzey pürüzlülüğünü de arttırmıştır. İşleme süresi arttığında özellikle silisyum karbür elektrotlarda çok kötü yüzey pürüzlülüğü görülmüştür (Çizelge 2.10).

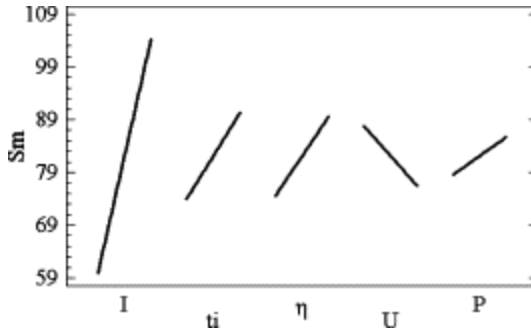
Çizelge 2.9. Deney parametreleri ve pürüzlülük, EAH, İİH değerleri [19]

Sıra No	I	t_i (μ s)	η	B ₄ C			SiSiC			WC - Co		
				R_a (μ m)	EA (%)	İİH (mm ³ /dak)	R_a (μ m)	EA (%)	İİH (mm ³ /dak)	R_a (μ m)	EA (%)	İİH (mm ³ /dak)
1	3	10	0.4	1.38	1.93	0.135	0.89	9.47	0.092	0.66	36.51	0.055
2	5	10	0.4	1.30	3.10	0.187	1.09	8.80	0.213	1.24	15.32	0.248
3	3	50	0.4	2.27	0.26	0.159	0.75	16.18	0.024	0.66	71.58	0.012
4	5	50	0.4	2.16	0.59	0.206	1.17	8.92	0.118	1.93	12.09	0.202
5	3	10	0.6	1.41	2.07	0.328	0.86	10.60	0.139	0.65	35.25	0.090
6	5	10	0.6	1.26	3.38	0.357	1.23	11.82	0.331	1.37	15.54	0.428
7	3	50	0.6	2.03	0.30	0.339	0.82	14.90	0.043	0.64	71.77	0.020
8	5	50	0.6	2.06	0.39	0.396	1.86	8.04	0.378	2.02	11.09	0.318
9	3	30	0.5	1.56	1.04	0.183	0.84	13.03	0.047	0.64	66.41	0.026
10	5	30	0.5	1.68	0.80	0.261	1.34	8.92	0.234	1.75	11.02	0.279
11	4	10	0.5	1.34	2.84	0.290	1.20	8.07	0.339	1.11	17.34	0.236
12	4	50	0.5	1.92	0.50	0.250	1.26	8.25	0.159	1.73	15.21	0.155
13	4	30	0.4	1.68	1.01	0.171	1.24	8.17	0.147	1.43	14.93	0.147
14	4	30	0.6	1.51	0.91	0.341	1.34	8.68	0.254	1.54	13.35	0.246
15	4	30	0.5	1.77	0.77	0.283	1.34	8.42	0.190	1.43	14.29	0.193
16	4	30	0.5	1.83	0.69	0.282	1.33	8.45	0.192	1.34	14.15	0.192
17	4	30	0.5	1.77	1.02	0.277	1.30	8.59	0.180	1.39	14.08	0.194
18	4	30	0.5	1.78	0.88	0.274	1.37	8.29	0.203	1.42	14.09	0.194

Diğer yandan bor karbür elektrotlarla işleme yapıldığında düzgün bir yüzey

elde edilmiştir. Elektrot aşınması yönünden, bor karbür elektrotlarda akım yoğunluğu arttıkça aşınma da artmıştır. Diğer taraftan silisyum karbür ve tungsten karbür elektrotlarda akım yoğunluğu arttıkça aşınma minimum değere kadar azalmıştır. Bor karbür elektrotlarla işlemede vurum süresi arttıkça elektrotlardaki aşınma azalmıştır. Silisyum karbür ve tungsten karbür elektrotlarda vurum süresi arttıkça elektrot aşınması artmıştır [19].

Puertas ve diğerleri, silisyum karbür iş parçasının elektrolitik bakır elektrotlarla EEİ 'sinde yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Yapılan çalışma sadece bitirme aşaması için uygulanmıştır. Bu çalışmada R_a , R_t veya R_q gibi en çok kullanılan yüzey parametreleri yerine S_m (profil düzensizliklerinin ortalama aralığı) ve P_c (tepe sayısı veya tepe yoğunluğu) kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, işleme akımı (I), vurum süresi (t_i), çevrimoranı (η), açık devre gerilmesi (U) ve dielektrik sıvısı püskürtme basıncı (P) 'nın S_m 'a etkisini sunmuşlardır (Şekil 2.13) [20]. İşleme parametrelerinden I , t_i , η , P 'nin artışı ile S_m değeri yükselirken, U 'nun artışı ile S_m değeri azalmıştır.

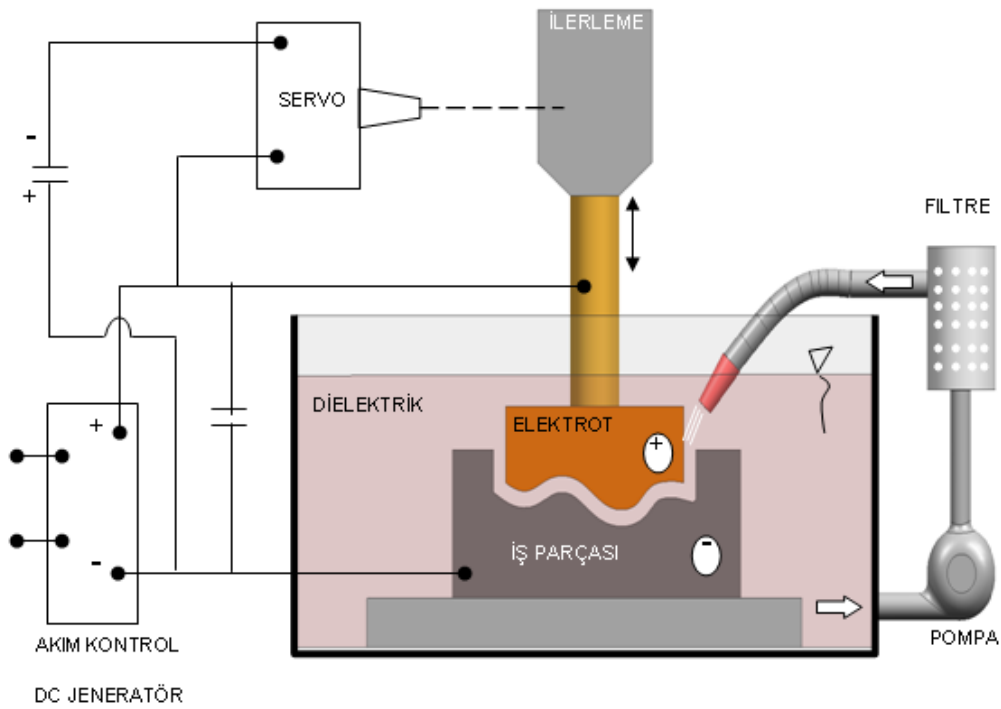


Şekil 2.13. I , t_i , η , U ve P 'nin S_m 'a etkisi [20]

3. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME YÖNTEMİ

3.1. Elektro Erozyon İle İşlemenin Fiziksel Prensibi

EEİ’de enerji boşalması, elektronik kontrollü olarak mikro-saniye aralıklarda elektriksel boşalmalarla sağlanır ve boşalmalar sonucu oluşan tahribat kontrol altına alınabilir.



Şekil 3.1. Bir elektro erozyon sisteminin temel elemanları [14]

EEİ, Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi bir dielektrik sıvı içerisine daldırılan bir elektrot ve işlenecek iş parçası ile gerçekleştirilir [14]. EEİ’ de kıvılcım boşalmasının fiziksel oluşumu dokuz aşamada tanımlanabilir. Bunlar:

1. Elektrot ile iş parçası arasında aralığın en küçük olduğu yerde, güç kaynağının açık durumuna getirilmesinden sonra gerilim yükselir veya dielektriğin yerel iletkenliğinin en yüksek olduğu yerde bir elektrik alanı

oluşur.

2. Negatif olarak yüklenmiş partiküller (katyonlar), negatif olarak yüklenmiş iş parçasının yüzeyinden fırlatılır. Bunlar, malzeme çifti arasında bir köprü oluşturur. Gerilim, düşmeye başlar, fakat akım hala sıfır olarak devam eder.
3. Elektrot (takım) tarafında üretilen negatif yüklü parçacıklar (anyonlar), yani elektronlar aralıkta bulunan dielektrikten çıkan nötr parçacıklarla çarpışır ve yeni pozitif ve negatif parçacıklar üretmek üzere parçalanırlar. Yüklü parçacıkların oluşumu yüzünden dielektrik akışkanın izolasyon etkisi bozulur ve gerilim düşmeye başlar. Boşalmanın ilk aşamasını temsil eden akım, akmaya başlar.
4. Bir buhar tüneli oluşmaya başlar, aradaki iletkenlik yükselir, akım akışı yükselmeye başlar ve gerilim düşer. Patlama hızında negatif ve pozitif parçacık oluşumu devam eder ve pozitif parçacıklar negatif elektroda, negatif parçacıklarda pozitif iş parçasına taşınmaya başlar. İş parçasına çarpan negatif parçacıkların etkisi, küçük bir alanın erimesine sebep olur.
5. Boşalma tüneli, yanlamasına (radyal yönde) genişlemeye başlar ve akım maksimum değerine ulaşır. Sıcaklık yükselirken bir buhar bölgesi oluşur ve bu buhar bölgesinin içerisinde basınç (bu bölgede dielektrik sıvının da buharlaşması ile basınç 20 atm' ye kadar çıkar) yükselmesi meydana gelir.
6. Kıvılcım, bu aşamada en büyük ısı enerjisini üretebilmektedir (sıcaklık 8000-12000 °K değerleri arasına çıkar). Buhar bölgesi hızlı biçimde genişlemeye devam eder, gerilim ve akım aynı seviyede kalır, elektriksel güç kesilir ve elektrik pulsu biter.
7. Elektriksel güç kesilirken, akımda ani bir düşme oluşur ve bu yüklü parçacıkların sayısında ani bir düşüşle sonuçlanır. Artık ısı üretimi de

yoktur. Boşalım kanalı yok olur ve işleme sonucu oluşan talaşlar, dielektrik sıvı içine karışır. Burada sözü edilen dielektrik, sürekli veya aralıklı olarak kıvılcım aralığına talaşların birikmesini önlemek için pompalanmaktadır.

8. Buhar kanalı söner (kaybolur) ve malzeme çifti (elektrot/iş parçası) yüzeyleri hızlıca soğutulur ve dielektrik sıvı tarafından temizlenir.
9. Yeni bir elektriksel kıvılcım boşalımını üretmek amacıyla yeniden elektrik uygulanmadan, dielektrikteki iyonların kaybolması (deiyonizasyon) için zaman tanınır [14,21].

EEİ' de farklı işleme koşullarında elektrotlarda meydana gelen aşınma aynı değildir. Bu durum;

- Kutuplamaya,
 - Malzeme ısı iletkenlik katsayısına,
 - Ergime noktasına,
 - Boşalımın şiddet ve süresine
- bağlıdır.

EEİ' de malzeme kaybı, elektrotta olduğu zaman, "aşınma" iş parçasında olduğu zaman "işleme" olarak adlandırılır. Uygun elektrot malzemesi seçimiyle, kutuplama (polarite), işleme akımı, vurum süresi değiştirilerek hacimsel olarak %99,8 işleme ve %0,2 aşınma elde etmek mümkündür. Uygulanan bazı özel ayarlamalar ile 0,1-0,2 μm R_a kalitesinde yüzey elde edilebilmektedir [14, 21].

3.2. Elektro Erozyon İle İşlemde İşleme Parametreleri

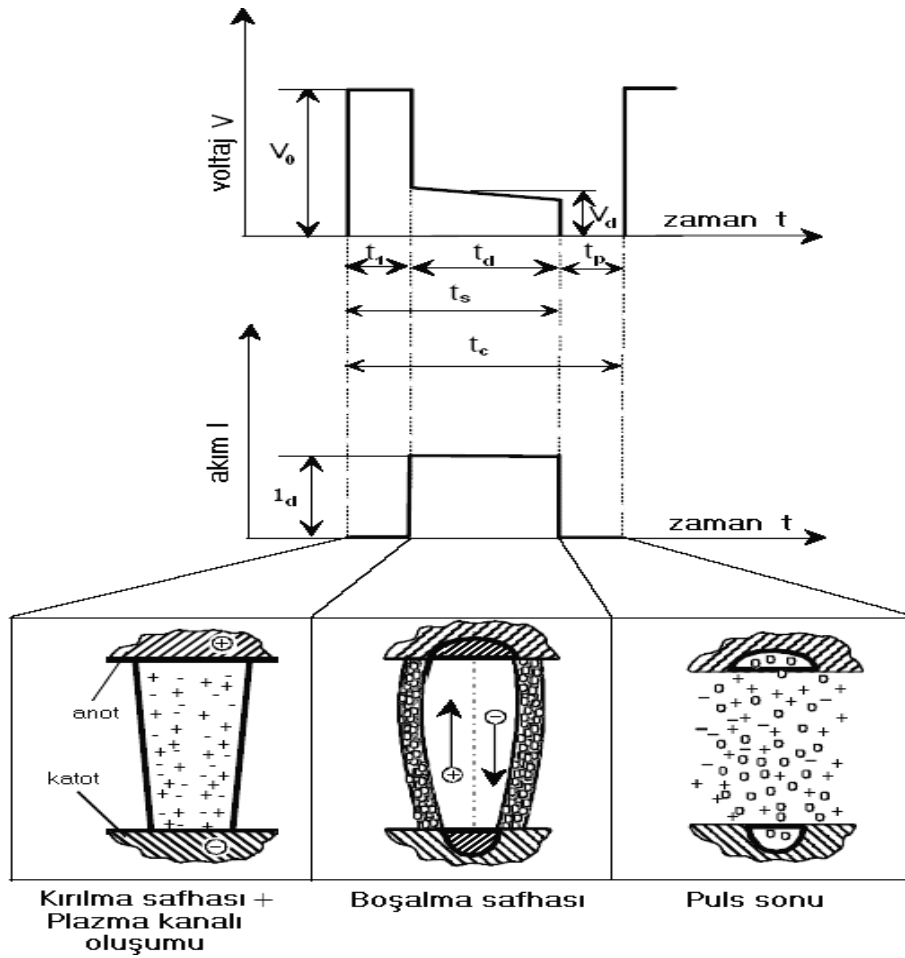
EEİ ile işlemenin temel parametreleri şu alt başlıklara ayrılabilir:

- Elektriksel parametreler,

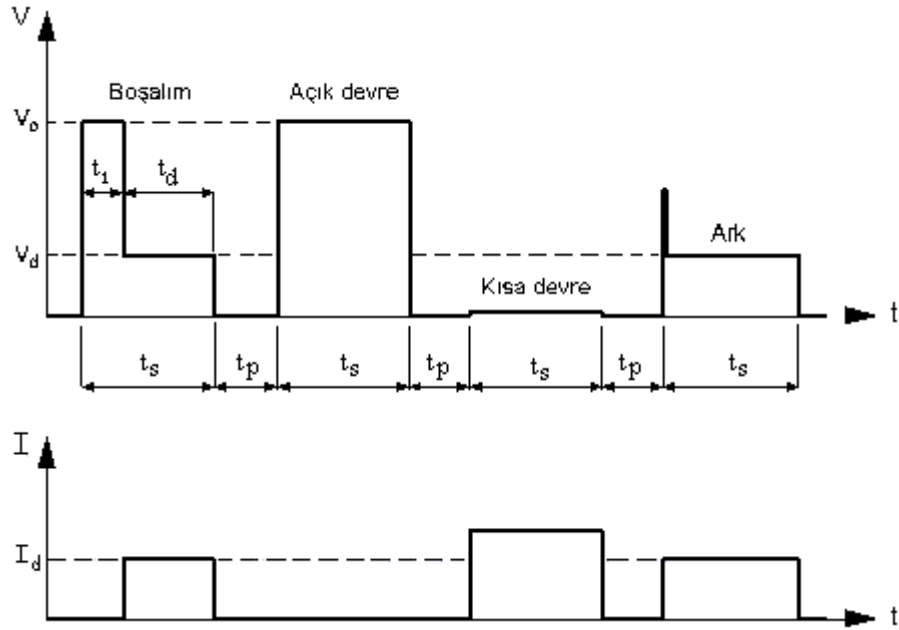
- Vurum jeneratörü karakteristikleri,
- Dielektrik sıvı,
- Elektrot özellikleri,
- İş parçası özellikleri

3.2.1. Elektro erozyon ile işlemede elektriksel parametreler

İşleme aralığındaki elektriksel boşalmanın temel elektriksel parametreleri olan tipik gerilim ve akım değişimleri ($V(t)$ ve $I(t)$) Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Akım ve gerilimin zamana göre değişimi ve bu zamanlara karşılık gelen elektrot ve iş-parçası aşınma aşamaları [22]



Şekil 3.3. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri [23]

Boşalım (vurum) enerjisi (E_d)

Gerilim kontrollü vurum jeneratörlü erozyon tezgahlarında vurum enerjisi (E_d) Eş. 3.1 ile hesaplanmaktadır. Birim zamanda harcanan boşalım enerjisi (boşalım gücü) Eş. 3.2’de tanımlanmıştır.

$$E_d = \int_t V_d(t) \cdot I_d(t) \cdot dt \cong V_d \cdot I_d \cdot t_d \quad (3.1)$$

$$P_d = V_d \cdot I_d \quad (3.2)$$

Burada,

V_d : Boşalım gerilimi

I_d : Boşalım akımı

t_d : Boşalım süresi

Bu eşitlikte, V_d ve I_d belli iş parçası ve elektrot çiftleri ve dielektrik ortamı için sabit, t_d ise boşalım ortamının o andaki karakteristiklerine bağımlı rastsal bir zaman değişkenidir.

Boşalım akımı (I_d)

Kıvılcım boşalması sırasında meydana gelen akım değeridir. Yüzey kalitesini ve İİH'nı etkileyen en önemli parametredir. Endüstriyel amaçlı elektroerozyon tezgahları 0,5 ile 100 A boşalma akımı aralığında çalışır. Çok yüksek boşalım akımı değerleri, aşırı ısının iş parçası yüzeyine zarar vermesinden dolayı nadiren kullanılmaktadır.

Ortalama işleme akımı (I)

Ortalama işleme akımı, bir elektroerozyon döngüsünde kıvılcım oluşması esnasında görülen akım değerlerinin ortalamasıdır. Bu değer, işleme boyunca tezgahdaki ampermetreden okunabilen bir değerdir.

Vurum süresi (t_s)

Elektrot ile iş parçası arasında, gerilimin ilk uygulanma anı ile kıvılcım boşalımının bitiş anı arasındaki toplam süre olarak ifade edilebilir. Elektrot aşınmasını ve yüzey kalitesini etkileyen önemli bir parametredir.

Bekleme (ara) süresi (t_p)

Birbiri ardına üretilen iki vurum arasında ki süredir. İşleme talaşlarının ortamdan uzaklaştırılması ve dielektrik sıvının deiyonize olması bekleme

süresi boyunca gerçekleşmektedir. Bekleme süresi, toplam işlem süresini artırdığından zaman kaybı gibi görünmesine rağmen, EEI'nin kararlılığı için gereklidir. Bekleme süresi çok kısa tutulursa koparılan işleme artıkları ortamdaki uzaklaşacak süreyi bulamazlar. Bunun neticesinde, işleme artıklarının toplanmasıyla elektriksel alan sürekli aynı noktada oluşur. Bu durumda hep aynı noktada kıvılcım (ark) oluşacağı için iş parçasında ve elektrotta arzu edilmeyen tahribatlar meydana gelir.

Gecikme süresi (t_1): Kıvılcım boşalması öncesinde dielektrik sıvının iyonize olması için geçen süredir.

Boşalım süresi (t_d): Akımın boşaldığı süredir.

Vurum çevrim süresi (t_c) : Vurum süresinin (t_s) ve bekleme süresinin (t_p) toplamıdır (Eş. 3.3).

$$t_c = t_s + t_p \quad (3.3)$$

Açık devre gerilimi (V_o), boşalım gerilimi (V_d) ve işleme aralığı

Açık devre gerilimi (V_o), vurum jeneratörü tarafından uygulanan ve genellikle 60-120V arasında tutulan, boşalımının olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilim değeridir (Şekil 3.2). Boşalım gerilimi (V_d), elektrot ile iş parçası arasında kıvılcım boşalımının devam ettiği sürece ölçülen gerilim değeridir.

Dielektrik sıvı iyonize olduğu anda gerilim değeri, açık devre gerilimi değerinden boşalım gerilimi değerine düşmektedir (Şekil 3.2). Genelde boşalım gerilimi, 80V'luk açık devre geriliminde bakır-çelik elektrot-iş parçası

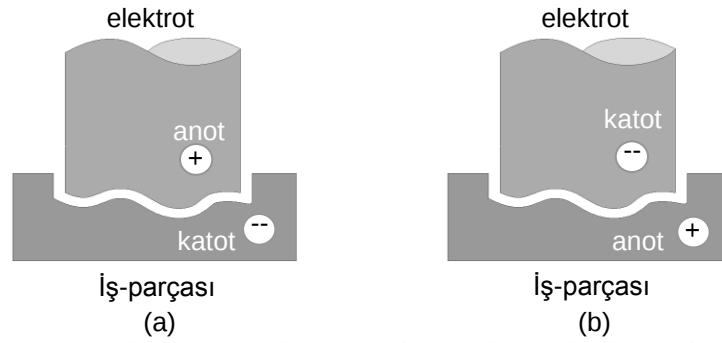
çifti ve gazyağı dielektrik sıvı uygulaması için yaklaşık 23V'dur [36]. İşleme aralığı, elektrot ile iş parçası arasındaki işleme esnasında servo ilerleme mekanizması tarafından sabit tutulan mesafedir. Dalma tipi elektroerozyon işlemlerinde işleme aralığı 0,01 ile 0,08 mm arasındadır.

Kutuplama (Polarite)

Kutuplama, elektrotta göre kıvılcımın akış yönünü belirleyen durumdur. Kutuplama, işleme ve aşınma hızını belirleyici önemli bir faktördür. Uygulamanın tipine ve elektrot veya iş parçası malzemelerine bağlı olarak kutup seçimi kaba ve ince işleme için önem arz etmektedir. Çizelge 3.1'de farklı iş parçası malzemeleri ve kaba veya ince işleme koşulları için kutuplama tipleri görülmektedir. EEİ'de elektrot (+) veya (-) kutba bağlanabilmektedir. EEİ'de kutuplama, Şekil 3.4.'de gösterildiği gibi kutuplama elektrotun bağlandığı kutba göre adlandırılır.

Çizelge 3.1. Farklı malzemelere göre kutuplama [14]

İşparçası	Kaba İşleme	İnce İşleme
Takım Çeliği	+	+ / -
Paslanmaz Çelik	+	+ / -
Alüminyum	+ / -	+ / -
Titanyum	-	-
Karbür	-	-
Bakır	-	-



Şekil 3.4. Elektrot (takım) kutuplama türleri: (a) pozitif kutuplama, (b) negatif kutuplama [14]

Vurum frekansı (f_c)

Jeneratör tarafından elektrotla iş parçası arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısıdır. Diğer işleme parametreleri sabit kalmak koşulu ile vurum frekansı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır. Bunun sebebi işleme için gerekli boşalım enerjisinin fazla sayıda kıvılcım tarafından işleme yüzeyine iletilmesidir. Böylelikle yüzeyde oluşan krater boyutları küçülmektedir. EEİ'de hassas işleme yapılırken yüksek vurum frekansı tercih edilmektedir.

3.2.2. Jeneratörler

Jeneratörler EEİ metodu için gerekli olan elektriksel vurumları üretmede kullanılan devrelerdir. EEİ'de aşağıda verilen tip jeneratörler kullanılmaktadır[14]:

- RC (rezistans-kapasitans) jeneratörleri
- Vurum jeneratörleri
- Dönüşümlü impuls jeneratörleri
- Sabit impuls jeneratörleri.

Bunlar içinde en çok kullanılan jeneratörler vurum tipi jeneratörlerdir. Vurum

jeneratörleri kare dalga formu üreten jeneratörlerdir. Kare dalga formu önceden ayarlanabilen frekanslarda devreyi açıp kapayabilen bir anahtar yardımı ile üretilir. Bu jeneratörlerde her bir boşalmada hem bitirme yüzeyi hem de işleme verimliliği aralık değiştirmesine rağmen düşüktür. Bu verimi yükseltmek amacıyla, malzeme çifti arasında, gerilim periyodik olarak uygulanır. Aralığın fiziksel konumu ve ölçüsü boşalmayı oluşturabilecek sınırlar arasında kalmak zorunda olduğundan, boşalım oluşumundan hemen sonra gerilim boşalımını kısa bir süre gecikir (Şekil 3.2, gecikme süresi, t_d). Bu sayede İİH'da artış, EAH'da ise azalma meydana gelir.

3.2.3. Dielektrik sıvı

EEİ yönteminde çoğunlukla, hidrokarbon bazlı (parafin, madeni yağlar, gazyağı vb.) ve silikon esaslı yağlar dielektrik sıvı olarak kullanılmaktadır. EEİ yönteminin verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için dielektrik sıvının iki özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bunlar:

- Boşalım gerilimi değerine ulaşıncaya kadar elektrik yalıtkanlığını koruyacak yeterli dielektrik (elektriksel) dirence sahip olmak,
- Kıvılcım sonrasında çok hızlı bir şekilde deiyonize

olabilmektir.

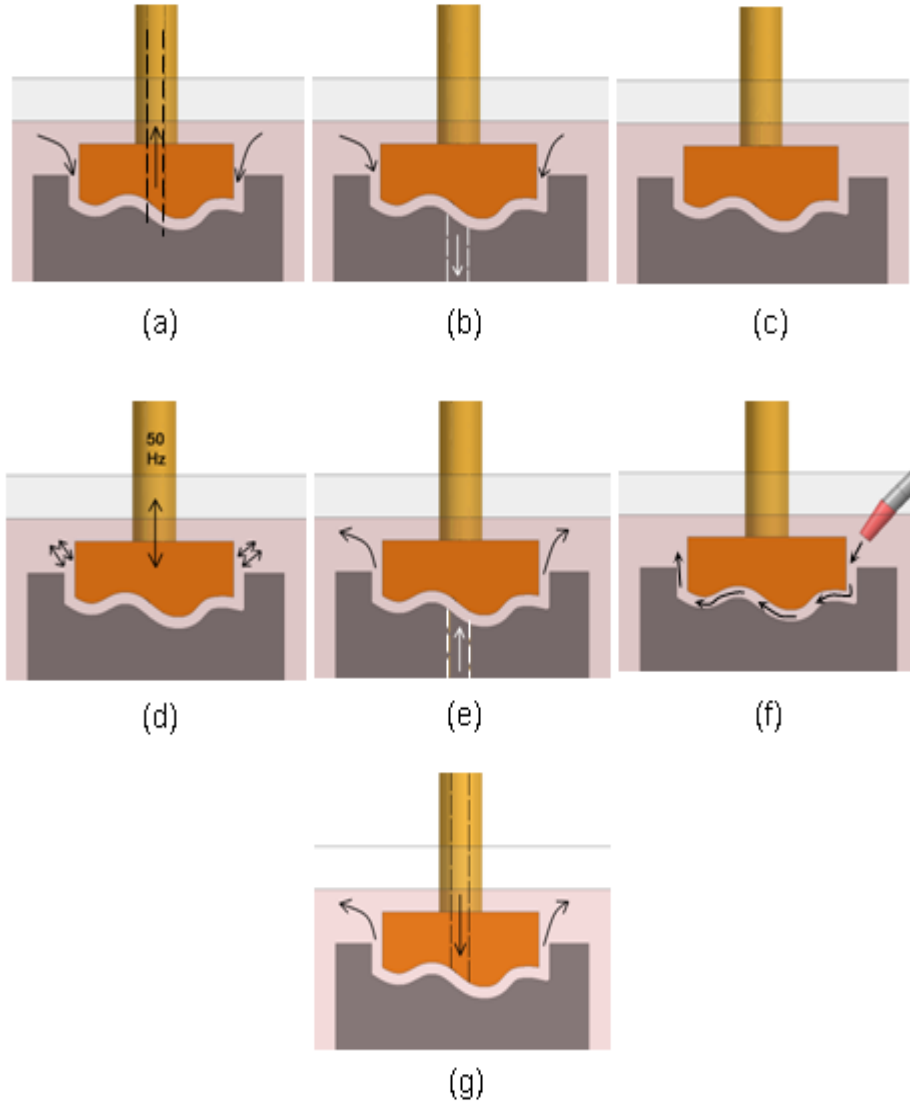
Fazla ısınma, dielektrik sıvının bozunmasına ve bozunma sonrası gaz ve karbonların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Gazlar boşalım kanalında istenmeyen genişlemeye sebep olarak, İİH değerinin azalmasına neden olurlar. Karbon tanecikleri ise elektrot ile iş parçası üzerinde birikerek ark tipi zararlı vurumların oluşmasına sebep olur.

Dielektrik sıvının içindeki işleme artıkları boşalım kanalının oluşmasını

kolaylaştırdığından dielektrik sıvının çok sık değiştirilmesi işlem performansını negatif etkilemektedir. İletken toz karışımlı dielektrik kullanımında işleme bölgesinde dielektrik sıvı iletkenliği daha iyi olduğundan vurumların uygulanması sonrasında görülen gecikme süresi daha kısa olmakta, böylelikle boşalım vurumlarının malzeme kaldırma etkisi artmaktadır [23].

Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri

Her elektroerozyon tezgahı basit olarak dielektrik tankı, pompa, dielektrik sıvı filtresi ve işleme tankından oluşan bir dielektrik sirkülasyon sistemine sahiptir. İşlem performansı için dielektrik sıvı uygulama tipi önemlidir.



Şekil 3.5. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri (a) elektrot içinden emme, (b) iş-parçası içinden emme, (c) statik, (d) titreşimli, (e) iş-parçası içinden püskürtme, (f) yanıl püskürtme, (g) elektrot içinden püskürtme [14]

Yetersiz (düşük debili) dielektrik sıvı uygulaması ve işe uygun olmayan uygulama tipinin seçilmesi ark ve kısa devre tipi vurum oluşumuna, elektrot ömrünün azalmasına ve işleme süresinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 3.5’ de dielektrik sıvının farklı uygulama yöntemleri gösterilmiştir.

3.2.4. Elektrot

Temelde elektrik iletken tüm malzemeler elektrot (takım) olarak kullanılabilir. EEİ'de elektrot malzemelerinin sahip olması istenen en genel ısı-fiziksel özellikler, yüksek ısı kapasitesi ve yüksek ergime sıcaklığı değerleridir. EEİ'de elektrot aşınması bu değerler ile ters orantılıdır. Kolay işlenebilirlik, yüksek İİH ve düşük EAH ideal elektrot malzemesi özellikleridir (Çizelge 3.2). Bakır bu niteliklerin çoğuna sahip olduğundan elektrot yapımında en sık kullanılan malzemedir.

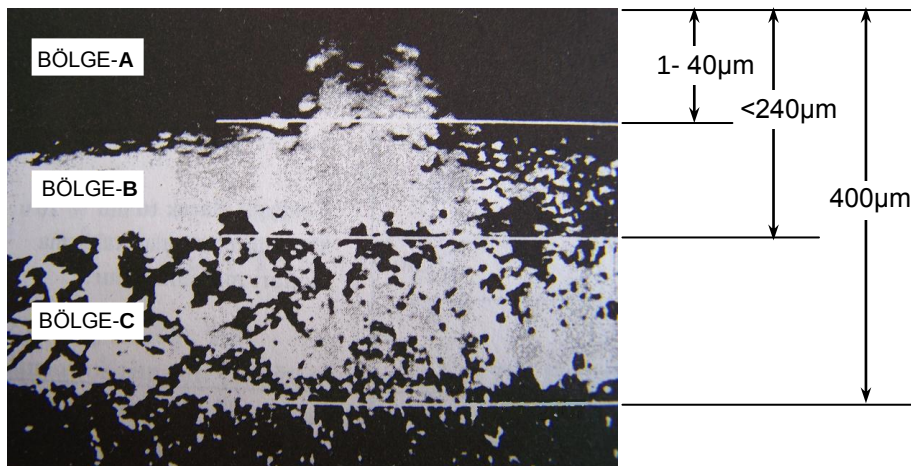
Çizelge 3.2. Tipik elektrot (takım) malzemeleri ve karakteristikleri [14]

Malzeme	EAH	İİH	Üretimi
Bakır	Düşük	Yüksek (Kaba işlemede)	Kolay
Pirinç	Yüksek	Yüksek (bitirme)	Kolay
Tungsten	En düşük	Düşük	Zor
Tungsten Bakır	Düşük	Düşük	Zor
Dökme demir	Düşük	Düşük	Kolay
Çelik	Yüksek	Düşük	Kolay
Çinko alaşımlar	Yüksek	Yüksek (Kaba işlemede)	Kolay
Bakır grafit	Düşük	Yüksek	Zor

3.2.5 İşleme sonrası iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar

Geleneksel yöntemlerle işlenemeyecek sertlikteki malzemeler EEİ' de rahatlıkla işlenebilir. İşleme sonunda iş parçası yüzeyinde sığ bir tabaka

meydana gelir. İş parçası yüzeyinin, boşalım kanalı ile temasta olan bölgesi aşırı ısıdan eriyip dielektrik sıvı ile hızla soğuyarak katılaşır ve ergimiş-katılaşmış katmanı (beyaz bölge, bölge-A) oluşturur (Şekil 3.6). Uygulanan EEİ parametrelerine bağlı olarak bu katmanın kalınlığı 1-40 μm arasında değişmektedir. İşlem esnasında oluşan sıcaklığın etkisiyle temelde hidrokarbon bileşiklerinden oluşan dielektrik sıvının kimyasal yapısı bozulur. Kimyasal bozulmadan ortaya çıkan karbon, ergimiş-katılaşmış katmana nüfuz ederek buranın karbonca zengin ve ana metalden oldukça farklı bir metalürjik yapıya sahip olmasına sebep olur. Bu katman oldukça sert (60-65 HRC) bir yapıya sahiptir. Ergimiş-katılaşmış katmanın hemen altında ısı olarak etkilenmiş bölge (bölge-B) bulunur. Bu bölgenin oluşmasında, ergimiş-katılaşmış katmandan malzeme difüzyonu ve hızlı ısınma-soğuma etkilidir. Dielektrik sıvı ile doğrudan temasta olmayan bu bölge, karbondan az etkilendiği için sahip olduğu sertlik değeri beyaz bölgeye göre daha düşüktür. Ancak, işlem sırasında meydana gelen ısı etkilenmeler bu bölgenin metalürjik yapısının değişmesine neden olur. Bu da malzemenin yorulma mukavemetini azaltmaktadır. Isıl olarak etkilenmiş bölgenin altında iş parçasının orijinal tane yapısından farklı geçiş bölgesi (Bölge-C) bulunur. Bu bölgenin özellikleri ana metale çok yakın olmasına rağmen birçok kaynakta bu bölge tavllanmış olarak tanımlanır [24].



Şekil 3.6. EEİ' deki iş parçası yüzeyinde oluşan katmanlar[20]
Bölge A: Ergimiş-katılaşmış katman (beyaz bölge),

Bölge B: Isıl olarak etkilenmiş katman,
Bölge C: Geçiş katmanı

3.2.6. İş parçası işleme hızı

İİH, birim zamanda iş parçası yüzeyinden kaldırılan malzeme hacmidir (Eş. 3.4). Birim zamanda iş parçası yüzeyinden kaldırılan malzeme hacmi, işleme akımı, elektrot malzemesi, kutuplama, ortalama çalışma gerilimi, vurum süresi, bekleme süresi, dielektrik sıvı (tipi, uygulama şekli, içerisine katılan çeşitli malzeme tozları, uygulama basıncı), iş parçası ergime sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır.

$$\text{İİH [mm}^3\text{/dak]} = \frac{\text{İş Parçasından kaldırılan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{İşleme süresi [dak]}} \quad 3.4)$$

3.2.7. Elektrot aşınma hızı

Oluşan her kıvılcım iş parçasından olduğu gibi elektrottan da bir miktar malzeme kaybına neden olmaktadır. Bundan dolayı, işleme tamamlandığında elektrotta belirgin bir aşınma meydana gelmektedir. EAH, birim zamanda elektrotta meydana gelen aşınma miktarıdır (Eş. 3.5).

$$\text{EAH [mm}^3\text{/dak]} = \frac{\text{Elektrottaki aşınan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{İşleme süresi [dak]}} \quad 3.5)$$

3.2.8. Bağlı aşınma

BA, EAH değerinin İİH değerine oranı şeklinde tanımlanmaktadır:

$$\text{BA (\%)} = (\text{EAH (mm}^3\text{/dak)} / \text{İİH (mm}^3\text{/dak)}) \times 100 \quad 3.6)$$

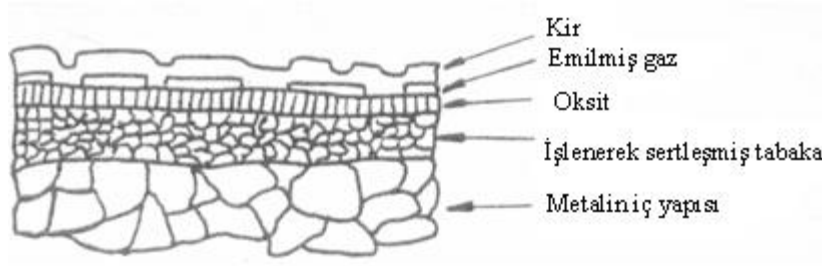
Boşalım akımı ve vurum süresi BA'yı etkileyen en önemli parametrelerdir. Düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerine göre daha fazla aşınır. Ayrıca elektrotun negatif kutuplanmasında işleme akımı artıkça pozitif kutuplamaya göre BA değerleri daha düşük çıkmaktadır.

4. YÜZEYLERDE SÜRTÜNME VE AŞINMA

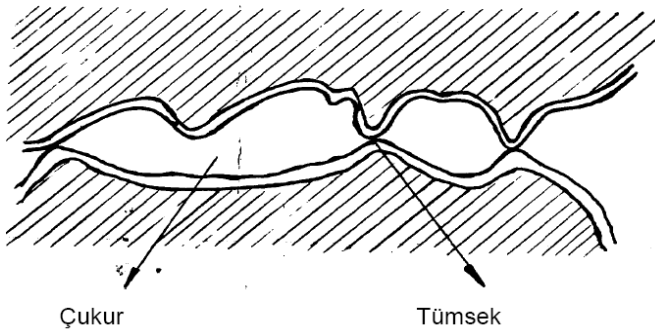
İnsanlığın tükettiği toplam enerjinin büyük bir bölümü kayma sırasında meydana gelen sürtünme kayıplarını yenmek için harcanmaktadır. Yapılan konstrüksiyonlarda, daha uygun bağlantı malzemelerinin kullanılması veya daha iyi bir yağlama ile sürtünmenin azaltılabilmesi bugünkü teknolojinin oldukça önemli bir sorunudur. Sürtünmeyi gerektiği zaman azaltma ve gerektiği zaman yeterince yüksek seviyeye çıkarabilme, sürtünme ile ilgili en önemli iki etmendir. Sürtünme çeşitli konstrüksiyonlarda yerine göre istenilen veya hiç istenilmeyen bir etmen olarak önemini her zaman korumaktadır [25,26]

4.1. Yüzeylerin Sürtünme Özellikleri

Sürtünme özelliklerine en büyük etki; sürtünen yüzeylerin tabaka yapılarıdır. Kuru sürtünen bir yüzey Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi bir dizi tabaka ile örtülüdür. Sürtünmeyi yüksek sürtünme ve küçük sürtünme olarak tanımlamak mümkündür. Yüksek sürtünmeden sonra yüzeyler incelendiğinde, sürtünen yüzeylerden birinden diğerine malzeme transferi ile bir yüzeydeki çıkıntıların diğer yüzey üzerinde geniş ve genellikle düzensiz izler bıraktığı görülür. Küçük sürtünme olayında, sürtünme katsayısı düşüktür. Sürtünen yüzeylerde çok ince çizgiler meydana gelir. Birbiri üzerinde kayan malzemelerden birisi sert, diğeri yumuşaksa (örneğin, kalay, kursun) yumuşak olan malzeme diğer malzemeyi kendi malzemesinden oluşan bir tabaka ile kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış olur. Yani yumuşak malzeme yağlayıcı görevi görür. Sonuçta sürtünme katsayısı azalır. Sürtünme başlamadan önce Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi temas sırasında kontak noktaları oluşur. Sürtünmenin başlaması ile birlikte yük etkisi altında iki yüzey arasında ortaya çıkan soğuk kaynak bağları her iki yüzeyi birbirine bağlar. Bu kaynak bağlarının kopması için gereken kuvvet sürtünme kuvveti olarak tanımlanır [25, 26].



Şekil 4.1. Sürtünme yüzeylerindeki tabakalar [25]

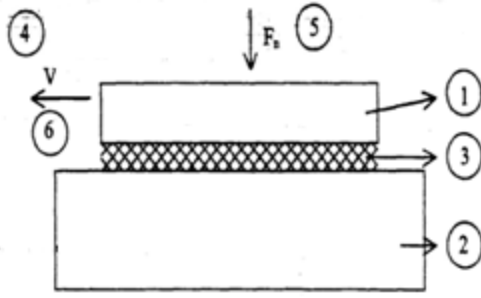


Şekil 4.2. Sürtünme öncesi temas noktaları [25]

4.2. Aşınma

Metal aşınması, metal yüzeyinden plastik deformasyon sonucu parçacık kopması biçiminde görülür. Bunun için iki yüzey arasında genellikle bir sürtünme olması gerekir. Aşınma; korozyon, yorulma, sürünme, çarpma ve aşındırıcı parçacıklar ile bozulma ve kesme modlarını içerebilir. Aşınma yağlı aşınma ve yağsız aşınma diye iki sınıfa ayrılır. Ayrıca sürtünen metal yüzeylerin durumuna göre de türlere ayrılabilir. Metal metale, metal metal dışı aşındırıcılara, metale sıvı çarpması gibi [25,26].

Aşınma olayını analiz edebilmek için aşınma olayını oluşturan temel unsurların bilinmesi gerekir. Aşınma olayının meydana gelebilmesi için Şekil 4.3.'de gösterildiği gibi altı temel unsurun bir arada bulunması gerekir [25, 27].



Şekil 4.3. Aşınmayı oluşturan unsurlar

- 1- Temel sürtünme elemanı: Fiziki ve kimyasal özellikleri, yüzey yapısı, şekli tamamen belirli olan parçadır.
- 2- Karşı sürtünme elemanı: Gaz, sıvı ve katı olabilir.
- 3- Ara madde: Temel sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında sıvı, gaz, katı, buhar veya bunların karışımı şeklinde bir madde bulunabilir. Aşınma esnasında yüzeyden kopan parçacıklar yüzeyler arasında kalıyorsa ara madde olarak düşünülebilir.
- 4- Çevre: Çevrenin fiziksel ve kimyasal özellikleri.
- 5- Yükleme: Tesir eden yükün (kuvvetin) büyüklüğü, şekli (statik, titreşimli, darbeli v.s.), doğrultulu ve zamana göre değişimi yükleme parametreleridir.
- 6- Hareket: Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma, çarpma vd.), büyüklüğü, doğrultusu ve süresi ile ilgilidir [25].

4.3. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı meydana getiren faktörleri bir bütün içinde incelemek gerekir. Aşağıda yapılan sınıflandırma abrasif aşınma göz önünde bulundurularak yapılmıştır [23,24].

A- Tribolojik sistemin elemanlarına bağlı etmenler;

- 1- Esas sürtünme elemanına bağlı etmenler
- 2- Karşı elemana bağlı etmenler
- 3- Ortama bağlı etmenler

B- İşletmeye bağlı etmenler

Esas sürtünme elemanına bağlı etmenler

Malzeme cinsi

Bir malzeme belli şartlarda yüksek aşınma direnci gösterirken, farklı şartlarda düşük aşınma direnci gösterebilir. Bu nedenle aşınmanın meydana geldiği koşullar göz önünde bulundurularak aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi yapmak gerekir.

Malzemenin mikro yapısı

Mikro yapıda bulunan fazlar ve tane boyutu mekanik özellikleri önemli derecede etkileyen önemli etmenlerdir. Katmanlı perlit yapının katmanlar arası sertliğin fazla olması, tanecikli perlitik yapıya göre aşınma direncini artırır [28].

Hacimsel ve yüzey sertliği

Malzemenin sertliği ile aşınma direnci arasındaki ilişki belli bir düzeye kadar doğrusal değişim gösterir. Yani, sertliğin artması ile aşınma direnci de artar. Ancak belli bir değerden sonra sertlik artışı aşınmaya karşı direnç artışı sağlamaz [26].

Elastik modül

Elastiklik modülü arttıkça malzemenin aşınmaya karşı direnci de artar. Zira

elastiklik modülü ve akma sınırı yüksek olan malzemelerde gerçek temas alanı azalır. Düşük elastik modülüne sahip malzemenin, gerçek temas alanı yüksek elastik modülüne sahip olandan daha fazla olduğu için relatif hareket sırasında bu malzemede soğuk kaynak olma ihtimali artar ve neticede daha çabuk aşınır [29].

Yüzey pürüzlülüğü

Metaller yüzeyinin pürüzlülüğü gerçek temas alanını dolayısıyla sürtünme ve aşınma olaylarını etkileyen en önemli faktördür. Malzeme yüzeyinin kaba işlenmesi sonucunda gerçek temas alanı azalır. Yüzeyde temas alanının azalmasıyla tek bir pürüze gelen yükün artmasıyla bu noktalarda gerilme yığılmaları meydana gelerek temas noktaları şekil değiştirerek aşınmanın artmasına sebep olur [29].

Soğuk şekil vermenin etkisi

Soğuk şekil vermenin aşınma direnci etkisine geçmeden önce sertliğin aşınma direncine etkisi incelenmiş ve sertliğin artışıyla aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir. Soğuk şekil değiştirme sırasında meydana gelen pekleşme malzemenin sertliğinin artmasına neden olur. Böylece, artan sertlik ile malzemenin aşınmaya karşı direnci artar.

Isıl işlem

Mekanik özellikleri etkileyen ısı işlem, aşınmayı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Özellikle çeliklerde ısı işlem sonucu sertlik artarak aşınmaya karşı direnci yükseltir. Sertleştirme işleminden sonra malzemenin içyapısında gerilme yığılmaları meydana gelir. Bu gerilme yığılmalarını gidermek için temperleme işlemi yapılmalıdır.

Aşındırıcının etkisi

Aşınma deneylerinde çok çeşitli aşındırıcılar kullanılır. Alüminyum oksit (Al_2O_3) aşındırıcı taneleri sert ve keskin köşelidir. Silisyum karbür (SiC) aşındırıcı taneleri ise daha sert ve keskin köşeli olmalarına rağmen, alüminyum oksit aşındırıcılara göre aşırı derecede kırılıgandır. Bazı araştırmacılar artan tane büyüklüğüne bağlı olarak aşınma miktarlarının arttığını ve köşeli tanelerin yuvarlak tanelere göre daha fazla aşınma etkisi yaptığını göstermişlerdir [33]. Date ve Malkin çeşitli aşındırıcılar ile deneyler yapmışlar ve aşınmanın, aşındırıcı tane boyutlarının 100 μm tane boyutuna kadar artması ile doğrusal olarak, bu boyuttan sonra ise sabit kaldığını göstermişlerdir [26, 34].

Karşı elemana bağlı faktörler (tane büyüklüğü, şekli ve dağılımı)

Yapılan araştırmalar sonucunda malzeme tane büyüklüğü arttıkça, malzemenin aşınma miktarının azaldığı görülmüştür. Aşındırıcı tanenin eliptik şekilli olması, keskin köşeli tanelere göre aşınmayı azaltmıştır [35].

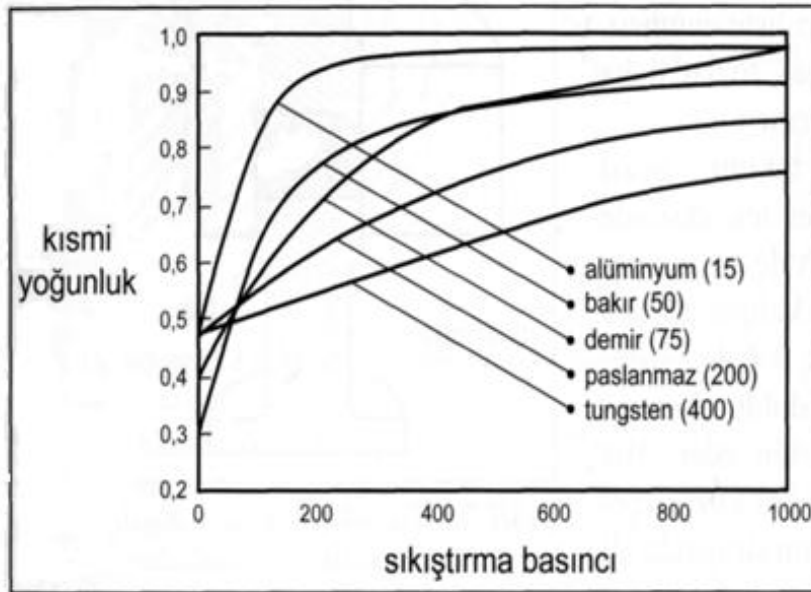
Ortama bağlı faktörler (sıcaklık, nem, atmosfer)

Aşınmayı etkileyen önemli faktörlerin biri de aşınma ortamının atmosferi, nemi ve sıcaklığıdır. Temas halinde bulunan yüzeylerin sürtünmeden dolayı yüzeylerde bölgesel olarak sıcaklık artısına sebep olur. Yüzeylerde meydana gelen sıcaklık artışı, malzemenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirerek malzemenin aşınma direncini etkiler [36].

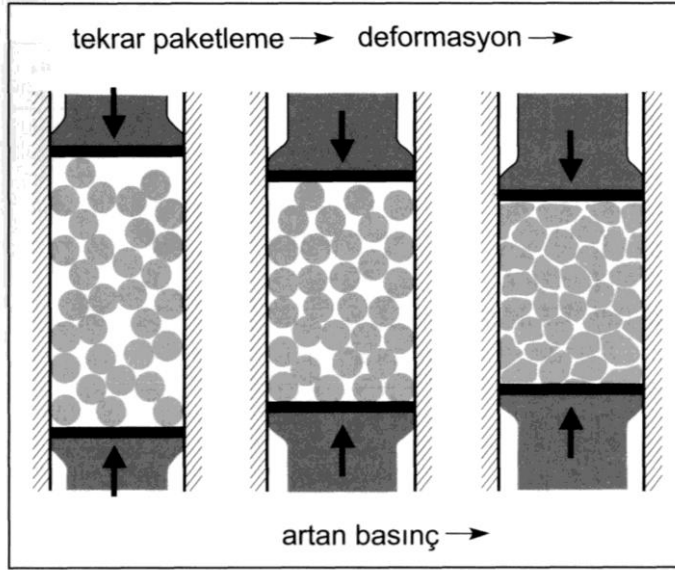
5. TOZ METALURJİSİ (T/M) İLE PARÇA ÜRETİMİ

5.1 Tozların Sıkıştırılması

Tozlar basınç uygulandığında önce parçacıklara birbiri üzerinden kayarak ve daha sonra da yüksek basınçlarda parçacığın şekil değiştirmesiyle yoğunlaştırılır. Şekil 5.1.'de görüldüğü gibi, yoğunluk artması düşük basınçlarda önce hızlıdır. Ancak, gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya (sıkışmaya) karşı artarak direnç gösterir. Şekil 4.1. sertlikleri giderek artan beş metalin sıkışmaya karşı davranışını göstermektedir. Kalıpta sıkıştırma basit olarak Şekil 5.2.'de olarak verilmiştir [31].



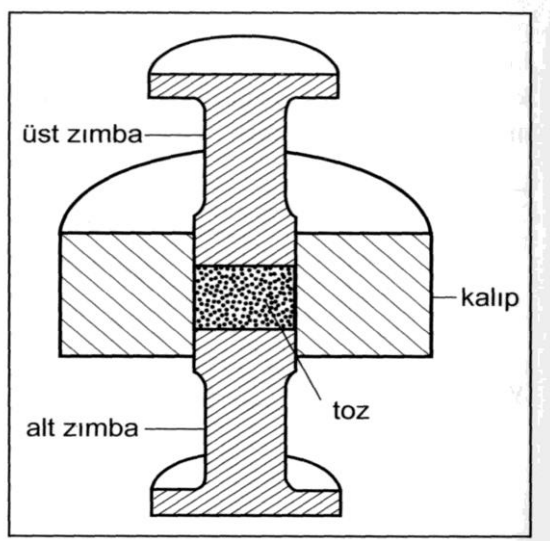
Şekil 5.1. Çeşitli metallerin sıkışma davranışları [31]



Şekil 5.2. Toz sıkıştırma [31]

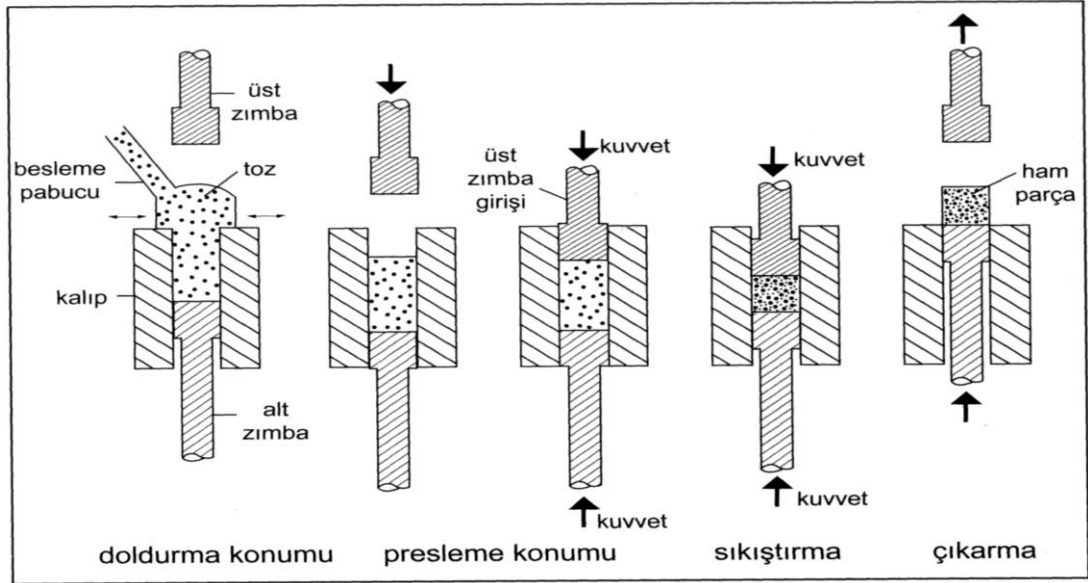
Görünür yoğunlukta her bir toz tanesi (parçacık) 4-6 toz komşusu ile temastadır (koordinasyon sayısı). Bu aşamada tozun herhangi bir bağ mukavemeti yoktur. Basınç uygulandıkça taneleri yerleşir, şekil değiştirir ve bağ oluşturur. Şekil değiştirme tozların sertliğini arttırdığından, sıkıştırmayı devam ettirebilmek için daha yüksek basınç gerekir. Kalıpta sıkıştırma zımbası, Şekil 5.3.'te görüldüğü gibi bir tek eksenle basınç uygulayacak şekilde tasarlanır. Presleme sırasında kalıpta oluşan ardışık hareketler Şekil 5.4.'te gösterilmiştir. Toz dolumu sırasında üst zimba yukarı çekilmiş durumdadır. Dolum sırasında alt zımbanın bulunduğu durum doldurma konumu olarak tanımlanır ve kalıbın içine ne kadar toz dolumu yapılacağını belirler. Toz, kalıp boşluğuna doldurma pabucu vasıtasıyla doldurulur. Tozun akışında oluşabilecek herhangi bir değişiklik basılacak parçayı etkiler. Doldurma sırasında, boşluğa homojen toz dolumu sağlamak için alt zimbaya hareket verilebilir. Doldurma sonunda, sıkıştırma sırasında tozun kalıp merkezinde olması için alt zimba daha alt noktaya çekilir. Yoğunlaştırma, zımbaların kuvvet altında kalıp merkezine doğru hareketiyle oluşur. Ayrıca, parça içinde delik oluşturmak için zımbaların içine yerleştirilmiş maça çubukları bulunabilir. Sıkıştırılmış toz parçaya "ham parça" adı verilir.

Preslenme sonrası yoğunluk “ham yoğunluk”, preslenme sonrası mukavemet ise “ham mukavemet” olarak adlandırılır. Basınç uygulamasının alt ve üst zımbaların her ikisinden de yapıldığı işleme çift hareketli presleme denir. Aynı etki üst zımbanın basınç uygulaması sırasında kalıbın hareketli olması ile de sağlanabilir. Eğer basınç tek bir zımbadan uygulanırsa parça yoğunluk açısından daha az homojendir. Bu işleme “tek hareketli presleme” denilir.



Şekil 5.3 Toz sıkıştırma için zimba ve dişi kalıp seti [31]

Preslemeden sonra, ham parça kalıbın içinde mekanik olarak kilitlenmüş (sıkışmış) durumdadır. Parçayı kalıptan çıkartacak kuvvete çıkartma kuvveti denir. Burada yağlayıcı çok etkilidir. Yağlayıcı etkisi arttıkça hem çıkartma kuvveti, hem de kalıp aşınması azalır.



Şekil 5.4. Kalıpta sıkıştırma çevrimi [31]

5.2. Kalıp İmalatı

Kalıp tasarımında dikkate alınması gereken hususlardan birisi, oluşturulacak ham parçaya göre toz doldurma yüksekliğidir. Küçük tonajlı presler ancak küçük doldurma yüksekliklerinde çalıştıkları için, preslenecek parça, kalıp ve pres uyumlu olmalıdır. Kalıpta üretilen parça sayısı arttıkça, kalıp aşınmasını azaltmak için malzeme seçimi çok daha dikkatli yapılır. Az sayıda parça üretilen zaman takım çeliklerinden yapılan kalıplar kullanılır. Yüksek basınçlar ve çok sayıda üretim için sert metallerden yapılan kalıplar kullanılır. İstenilen parça şeklini üretebilmek için kalıp boyutlarının dikkatle tasarlanması gereklidir.

Parçanın her bölgesine aynı basıncı uygulayabilmek için kalıplar parçalı olarak yapılır. Eğer alt zimba tek parça olarak yapılırsa, parçanın iki tarafı değişik basınçlarda sıkıştırılacaktır. Sıkıştırma ile elde edilecek ham yoğunluk ρ_G , görünür yoğunluk ρ_A , doldurma yüksekliği H_0 ve basılacak parça yüksekliği H ile aşağıdaki gibi ilişkilidir.

$$\rho_G = \rho_A(H_0/H) \quad (5.1)$$

Sıkıştırılmış parça yüksekliği, yükseklik değişimi ΔH 'ın fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$H = H_0 - \Delta H \quad (5.2)$$

Buradan preslenmiş yoğunluk zimbalar arasındaki mesafenin değişimi olarak ifade edilebilir.

5.3. Kalıp Ömrü ve Bakımı

Kalıp hasarları, gerilme denklemleri ile hesaplanan geometrilerden daha büyük geometri seçilerek engellenir. Böylece akma, bükülme, flambaj veya kırılma oluşmaz. Örneğin F yükü altında L boyunda zımbadaki boyut değişmesi ΔL aşağıdaki gibi hesaplanır [31,32].

$$\Delta L = \frac{F \cdot L}{A \cdot E} \quad (5.3)$$

Burada A , zımbanın kesit alanı ve E , kalıp malzemesinin elastik modülüdür. Tipik bir çelik zımba 700 MPa sıkıştırma basıncı altında % 0,3 boyut değişmesi gösterirken, sert metal zımba için bu değer % 0,1'dir. Kalıpta kısa zamanda oluşan hasarlar kalıp malzemesinin mukavemet açısından yetersiz olduğunu gösterir. Zamanla oluşan hasarlar ise genellikle kalıbın talaşlı imalat hatalarından kaynaklanan yorulma kırılmalarıdır. Bu sebeple keskin köşelerden kaçınılır ve çizikleri gidermek için kalıplar çok iyi parlatılır. Belirgin olmayan iç hatalar bile malzeme yorulmasını başlatabilir.

Kalıp elemanlarının birbiri üzerindeki hareketi sırasında aradaki boşluktan toz girmemesi için parçaların sıkı geçmesi gereklidir. Toz parçacıklarının

ortalama boyutu genellikle 20 μm civarında olduğu için, kalıp elemanlarının geçme boşlukları da en fazla bu kadar olmalıdır. Kalıp malzemeleri ısıtılma işlemi sırasında çarpıldığı için, son parlatma işlemi ısıtılma işleminden sonra yapılır.

5.4. Sinterleme

Sıkıştırma sonrası, ıslak bünye içerisinde temas halinde olan tozların birbirine kaynatılması amacıyla yüksek sıcaklıkta yapılan pişirme işlemine sinterleme denir. Bu sayede parçalar gereken rijitlik, dayanım ve sertliği kazanmış olur. Sinterleme genellikle mutlak ergime sıcaklığının % 70'i ile % 90'ı arasında yapılır.. Sinterleme sırasında gözeneklerin azalması ile yoğunluğun artmasında itici kuvvetin, bünye içerisinde tozların yüzeylerinden kaynaklanan toplam yüzey enerjisinin azaltılarak toplam enerjinin minimuma düşürülme eğiliminden kaynaklandığı düşünülür[32].

Sinterleme yöntemlerinin sınıflandırılmasında, işlem sırasında basınç uygulanıp uygulanmaması durumu önemlidir. Yüksek yoğunlukta parça üretim yöntemlerinin çoğunda sıcak presleme, sıcak dövme, sıcak ekstrüzyon gibi yöntemler kullanılır. Bütün bu sinterleme işlemleri basınç altında gerçekleşir.

Basıncsız sinterleme yöntemlerini de katı – faz (ha)l sinterlemesi ve sıvı faz sinterlemesi olarak ikiye ayırabiliriz. Katı - faz sinterlemesi;

- 1) Faz karışımı
- 2) Tek faz

olarak ikiye ayrılır.

5.4.1. Katı faz sinterlemesi

Sinterleme işlemi süresince içyapıda sıvı faz oluşmaz ve bütün olaylar

(difüzyon, yoğunluk artışı vb.) katı halde meydana gelir.

5.4. 2. Sıvı faz sinterlemesi

Kaliteli parça üretiminin uygun bir yoludur. Sinterleme sırasında sıvı faz kapiler etki ile parçacıklara yeterli iç basınç uyguladığından dış basınca gerek yoktur. Kapiler kuvvet büyük miktarda dış basınca eşit etki yapar.

Sinterleme işleminin herhangi bir safhasında oluşan sıvı faz, gözenekleri doldurarak difüzyonu ve yoğunluk artışını hızlandırmaktadır. Yüksek mukavemette parça üretimi günümüzde önemli olduğu için sıvı faz sinterlemesi gibi teknikler malzeme mühendisliği için önerilmektedir.

Sıvı faz sinterlemesinde sıvı faz oluşumu için iki ana mekanizma vardır. Bunlardan birincisi, farklı kimyasal bileşimlerde toz karışımı kullanmaktır. Sinterleme sırasında farklı bileşimdeki tozların etkileşimi sonucunda sıvı faz oluşur. İkincisi ise sıvı fazın toz karışımında bulunan bileşenlerden bir tanesinin ergimesi veya ötektik faz oluşumu ile oluşmasıdır

Sıvı faz sinterlemesi;

- 1- Geçici sıvı faz sinterlemesi
- 2- Sürekli sıvı faz sinterlemesi
- 3- Solidüsüstü sinterleme
- 4- Reaksiyonlu sinterleme

olarak dörde ayrılır.

Bu sınıflandırmada, oluşan sıvı fazın çözünme durumuna göre sinterleme sırasında alaşım oluşumu ile ortadan kalkması (geçici SFS veya reaktif sinterleme) veya sinterleme süresince içyapıda sürekli olarak bulunabilmesi (sürekli sfs) göz önünde bulundurulur. Farklı bir yöntemde ön alaşımlı tozun

katı-sıvı sıcaklığı arasında sinterlenmesi suretiyle sıvı + katı karışımı oluşturarak yapılan katı üstü sinterlemedir.

Sıvı faz sinterlemesi ana gruplarının içinde malzeme özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan bazı farklı durumlar vardır. Örneğin katı, oluşan sıvı içinde çözünür veya çözünmeyebilir. Bu farklılık sinterleme hızını ve mikroyapı oluşumunu önemli ölçüde etkiler. Diğer önemli faktörler sıvı katı fazlar arasındaki arayüzey enerjisi (ıslatma ve ıslatmama durumu) ve sıvı fazın katı – katı tane sınırlarına nüfuziyet durumlarıyla ilgilidir. Bu değişkenler parçacık boyutu, sinterleme sıcaklığı, sinterleme atmosferi ve ham yoğunluk gibi işlem parametreleriyle birlikte oluşacak içyapıyı önemli ölçüde etkilerler. Bu değişkenlik sıvı faz sinterlemesini hem metal hem de seramikler için esnek bir üretim yöntemi haline getirir.

Sürekli sıvı faz sinterlemesi

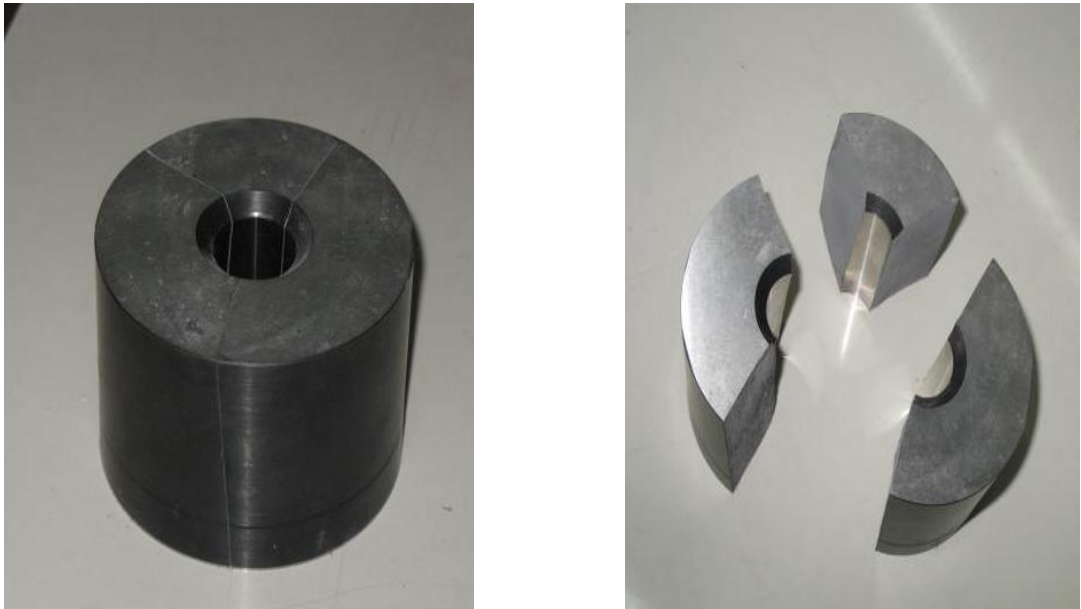
Sinterleme işleminin yüksek sıcaklık aşamasında içyapıda sürekli bulunan sıvı faz hızlı yoğunluk artışı ve tane büyümesine neden olur. Başlangıçta katıyı ıslatan sıvının parçacıklar üzerine uyguladığı kapiler kuvvetler sonucu parçacıkların yeniden düzenlenmesiyle yoğunluk artışı olur. Yeniden düzenlenme sonucu oluşan yoğunluk artışı, oluşan sıvı faz miktarına, parçacık büyüklüğüne ve katının sıvı fazda çözünürlüğüne bağlıdır. Sıkıştırılmış kütle içindeki gözenek miktarının azalması sıvı faz akışını güçleştirir. Bu nedenle yoğunlaşma hızı giderek azalır. Belirli bir aşamadan sonra çözünürlük ve yayınma (difüzyon) daha etkin hale gelir ve çözünme ve tekrar çökme safhasına geçilir. Bu safhada yoğunlaşma ve tane büyümesine katkıda bulunan Ostwald olgunlaşması ve tane şekli oluşumunun her ikisi de difüzyon kontrollü işlemlerdir. Bu işlemlerin oluşabilmesi için katı fazın sıvı fazda çözünürlüğünün olması gerekir. Alaşım oluşumu ile ergime sıcaklığının düşmesi sinterleme özelliğinin iyileştiğinin bir göstergesidir.

Sürekli sıvı faz sinterlemesinin başarılı olması bazı kriterlerin yerine getirilmesine bağlıdır. Normal olarak toz karışımı sıvının olduğu sıcaklığa ısıtılırken ön alaşımlı tozlar solidüs üstü (süpersolidüs) sıcaklığa ısıtılarak hızlı sinterleme gerçekleştirilir. Başarılı sistemlerde oluşan sıvı faz katı fazı ıslatır ve aynı zamanda katıyı çözer. Düşük sıcaklıkta ergiyen katıların çoğu zaman tatminkâr olmadığı görülmüştür. Bu yöntemde en çok başarı gösteren sistemler ötektik sistemlerdir.

6. DENEYLER

6.1. Elektrot Tipi, Boyutları, Kullanılan Tozlar, Elektrot İmalat Yöntemi

Toz malzemelerin sıkıştırılıp elektrot üretilmesi için 90 mm dış çapında ve 66 mm yüksekliğinde ortasına 24 mm delik delinecek bir kalıp tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan ilk kalıp bu ölçülerde 2080 soğuk iş takım çeliğinden (özellikleri Çizelge 6.1'de) üretilmiştir. Daha sonra ısıtılma işlemine tabi tutularak yağda soğutulup 48 HRC sertliğe getirilmiş ve delik içi taşlanmıştır (Şekil 6.1.).



Şekil 6.1. Elektrot yapımında kullanılan ilk ve parçalanmış kalıp

Ancak ilk denemede 660 kN'luk yük uygulanıp elektrot basılmasına karşın ikinci deneyde 610 kN'luk yükte kalıp parçalanmıştır (Şekil 6.1)

Kalıbın parçalanma nedenleri araştırıldığında, kalıp yapımında kullanılan 2080 soğuk iş çeliğinin darbelere karşı dayanıklı olmadığı, kalıp çapının küçük olduğu ve ısıtılma işlemdeki sertleştirme malzemeyi gevrekleştirerek kırılmayı kolaylaştırdığı mütalaa edilmiştir. Kalıbın parçalanmasını takiben

kalıp malzemesinin ve boyutlarının değiştirilmesine karar verilmiştir. Yeni kalıpta 4340 ıslah çeliği (özellikleri Çizelge 6.2’de) kullanılmış, kalıp dış çapı ve yüksekliği arttırılmış (118 mm çap ve 90 mm yükseklik), ve ısıtım işlem ile 60 HRC sertliğe getirilmiş ve taşlanmış (Şekil 6.2.).



Şekil 6.2. 4340 ıslah çeliğinden yapılmış ve yeniden boyutlandırılmış kalıp

Çizelge 6. 1. Kalıp malzemesi 2080

MARKASI :	Böhler
TÜRÜ :	Soğuk İş Çeliği
ALAŞIM ELEMENLERİ % :	C Si Mn Cr
	2 .25 .30 11.5
DIN Normu :	1.2080 X 210Cr12
BS Normu :	~ BD3
AFNOR Normu :	Z 200 C 12
UNI Normu :	X 205 Cr 12 KU
Yumuşatma tavı derecesi (°C) :	800 – 850
Yumuşatma tavından sonraki sertlik (HB) :	Maksimum 250
Gerilim alma derecesi (°C) :	Yaklaşık 650
Sertleştirme derecesi (°C) :	940 – 970
Sertleştirmeden sonraki sertlik (HRC) :	63 – 65
Kullanım alanları :	Deforme olmaması, kesme kabiliyetinin yüksek oluşu, sürtünmeye dayanıklılığından dolayı fazla darbe olmayan her nevi kesme, bükme ve şekillendirme işlerinde

Çizelge 6.2. Kalıp malzemesi 4340

MARKASI :	Böhler
TÜRÜ :	Alaşımlı Makine Yapım Çeliği
ALAŞIM ELEMANLARI % :	C Si Mn Cr P S Mo
	035 .5 .80 .9 .0035 .0035 .20
DIN Normu :	Ç 4340 35 NiCrMo 6
Yumuşatma tavı derecesi (°C) :	700
Yumuşatma tavından sonraki sertlik (HB) :	Maksimum 250
Gerilim alma derecesi (°C) :	Yaklaşık 880
Sertleştirme derecesi (°C) :	900
Sertleştirmeden sonraki sertlik (HRC) :	63 – 65
Kullanım alanları :	Büyük valslar, miller ve büyük dişli imalinde ve sıcak, soğuk iş kalıbı olarak kullanılır

İslah işlemi, çelik parçaya yüksek tokluk özelliğinin kazandırılabilmesi için önce sertleştirme arkasından menevişleme işlemlerinin bütünüdür. İslah çelikleri, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli makine ve motor parçaları, dövme parçalar, çeşitli civata, somun ve saplamalar, krank miller, akslar, kumanda ve tahrik parçaları, piston kolları, çeşitli miller, dişliler gibi parçaların imalinde olmak üzere geniş bir alanda kullanılırlar (Çizelge 6.2) [37].

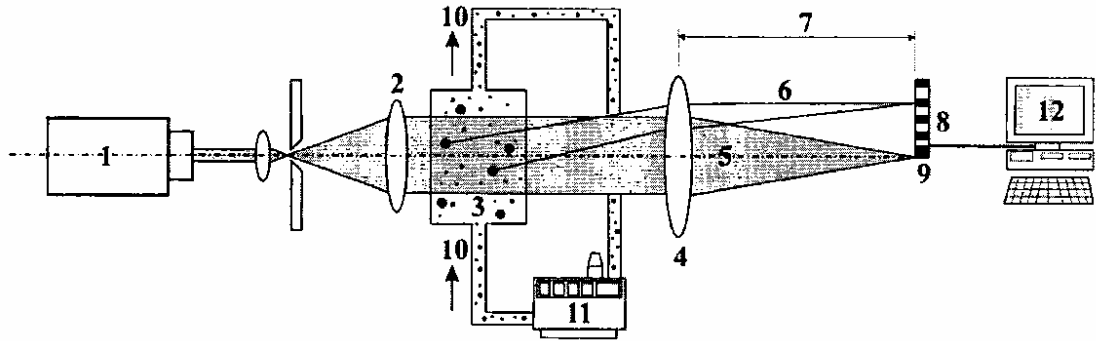
6.2. Toz Boyutları, Tozların Hazırlanması ve Preslenmesi

B₄C malzemesi refrakter sanayisinde antioksidan olarak, aşınma dayanımlı makina parçalarında, hafif zırh malzemesi olarak helikopterlerde ve can yeleklerinde kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme türüne ait özellikler ve uygulama alanları Çizelge 6.3 'de verilmiştir [50].

Çizelge 6.3. B₄C iş parçası malzemesi özellikleri [51, 52, 53]

Teknik Özellikler	Ergime Sıcaklığı (°C) Yoğunluğu (g/cm ³) Vickers Sertliği (Gpa Hv 0,5 Kg) Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa) Elastisite Modülü (GPa 20°C) Kırılma Tokluğu (MPa/m ²) Isıl İletkenlik (W/mK 20°C) Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ /°C) Spesifik Yalıtkanlık Direnci (Ω-cm 20°C)	2450 2,45-2,52 32 1400-3400 450-470 2,9-3,7 30-90 5,6 10
Genel Özellikler	Kübik bor nitrit ve bor oksit, sıcak preslenmiş bor karbür, elmastan sonra bilinen en sert malzemedir. Uygulamalarda kullanılmasının ana sebebi, mükemmel aşınma direnci ve yüksek dayanımıdır. Balistik malzeme olarak kullanımını sağlayan, düşük yoğunluğunun yanında yüksek elastisite modülü ve yüksek basma dayanımıdır.	
Uygulama Alanları	✓ Aşındırıcılar: Cilalama ve tesviye uygulamaları, yumuşak aşındırıcılar, elmas takım ucu giydirme. ✓ Nozullar: Sulu çamur pompalama, su jeti kesicileri, kumlama ✓ Nükleer uygulamalar: Kalkan, kontrol mili, kapama misketleri ✓ Balistik zırh ✓ Aşınmaya karşı dirençli malzemelerin uygulanmasında: Seramik işleme kalıpları, havan tokmağı	

Tozların tane boyutları Malvern Mastersizer de ölçülmüştür. Malvern Mastersizer lazerle boyut ölçme ünitesinde, tek-renkli, yoğun ve paralel ışınlar üretmek için lazer kaynağı, ışın genişletici, ölçüm hücresi, Fourier merceği ve dedektör bulunmaktadır [37]. Örnek hazırlama ünitesinde mekanik karıştırıcı, santrifüjlü pompa ve ultrasonik enerji uygulama özellikleri mevcuttur. Ultrasonik enerji topakların dağıtılmasını, mekanik karıştırıcı analiz boyunca süspansiyonun homojen kalmasını ve pompa ise süspansiyonun lazer ışınlarının önünden geçirilmesini sağlamaktadır. Haznenin içerisinde yaklaşık 1 litre suyla karışmış halde bulunan örneğin, lazer ışınlarının önünde sürekli dolaşım yapması sağlanır. Bu sırada tanelere çarparak belli açılarda kırılan lazer ışınları, Fourier merceğinden geçip, dedektörün üzerine düşmektedir. Dedektör üzerine düşen ışınlar bilgisayara bağlı analog-dijital dönüştürücü vasıtasıyla aynı anda sayısallaştırılarak bilgisayara aktarılmakta ve özel bir yazılım ile ışınların kırılma açısından tane büyüklüğü, yoğunluğundan ise hacimce tane yüzdeleri hesaplanmaktadır [38].

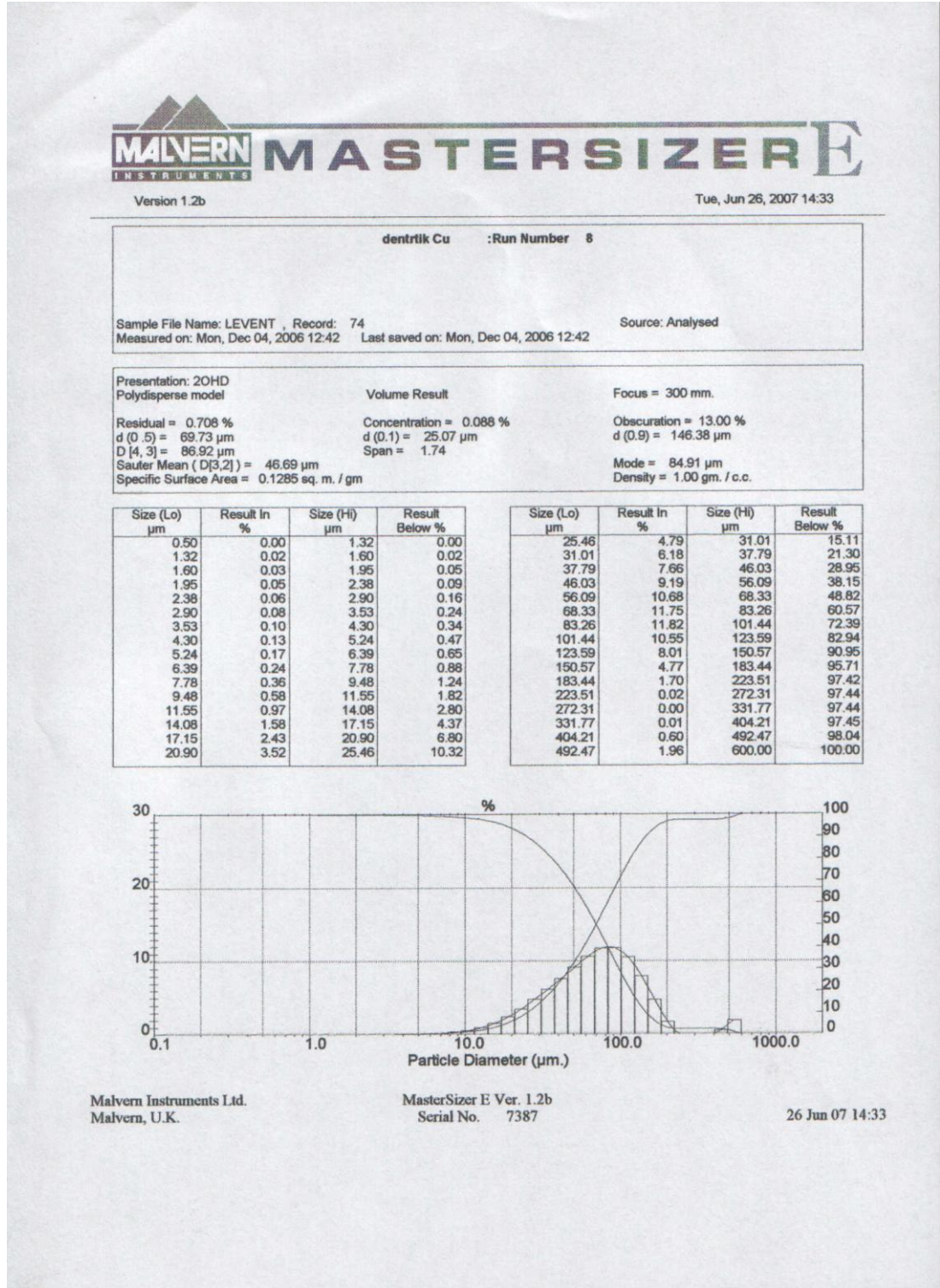


Şekil 6.3. Lazerle boyut ölçme genel kurulumu

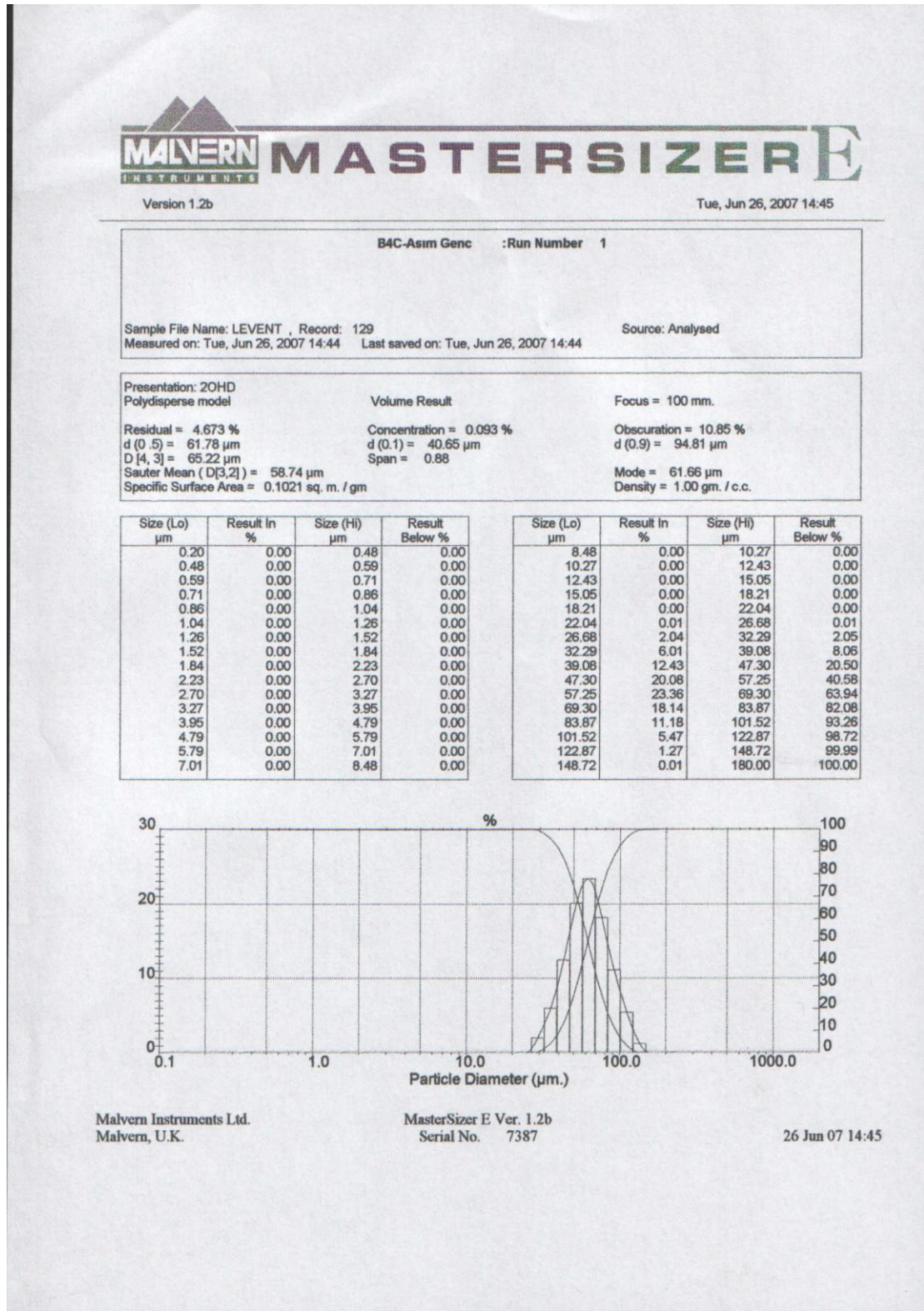
1. Lazer kaynağı, 2. Işın genişletici, 3. Ölçüm hücresi, 4. Fourier merceği, 5. Herhangi bir taneye çarpmayan ışın demeti, 6. Aynı büyüklükteki tanelere çarparak kırılan ışınlar, 7. Mercek odak uzaklığı, 8. Çok elemanlı dedektör, 9. Merkezi dedektör, 10. Süspansiyon akış yönü, 11. Örnek hazırlama ünitesi, 12. Bilgisayar [38].

Tanelerin büyüklüğüyle, tanelere çarparak kırılan ışınların kırılma açısı arasında ters orantı bulunmaktadır. Büyük taneler ışınları küçük açıyla, küçük taneler ise büyük açıyla kırarlar [39]. Lazer kırınım yönteminin özelliği eş değer küre kuram yöntemini kullanmasıdır. Taneyle aynı kırılma desenini veren eş değer kürenin çapını tane çapı olarak hesaplamaktadır [40]. Kırılan ışığın şiddeti ise toz çapının karesi ile orantılıdır. Şekil 6.4 'de lazer boyut ölçme cihazı şematik resmi verilmiştir.

Yapılan çalışmada ortalama 69,73 μm boyutunda elektrolitik bakır (saflığı %99.95) ve 70 μm boyutunda bor karbür tozları karıştırılarak kullanılmıştır. Kullanılan tozların boyut dağılımları Şekil 6.5 ve Şekil 6.6. 'da verilmiştir.

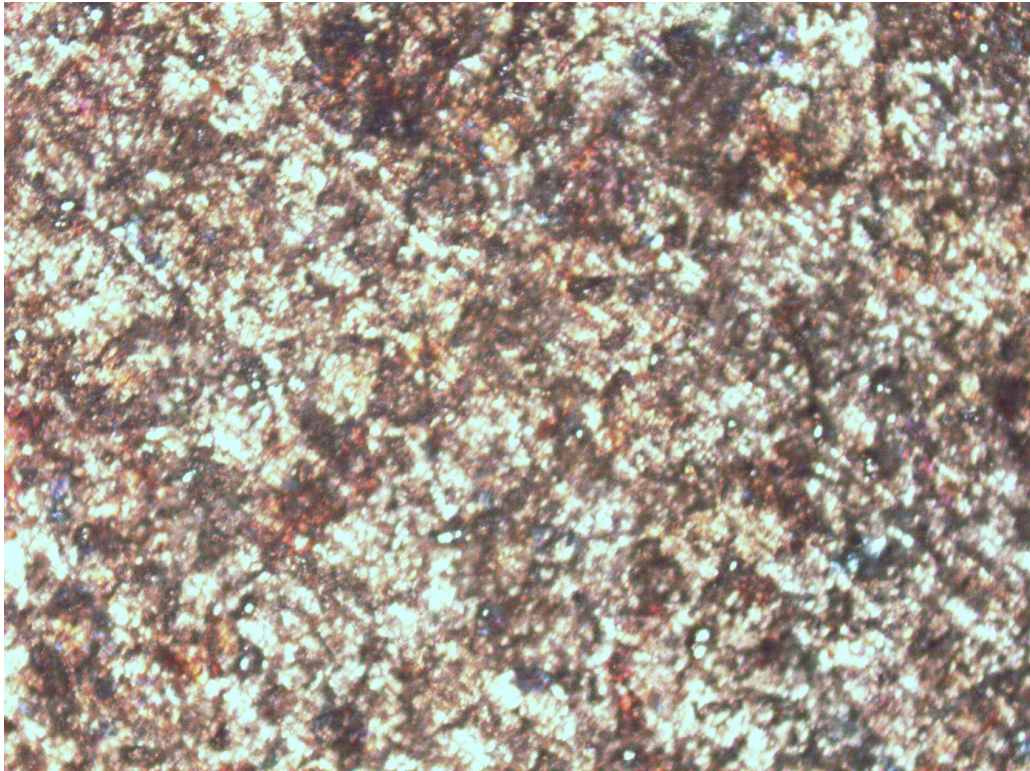


Şekil 6.4 Elektrolitik bakır toz boyutu ve dağılımı bilgileri



Şekil 6.5. Bor karbür toz boyutu ve dağılımı bilgileri

Hazırlanan bakır tozları tek-tesirli bir preste elik kalıp içerisinde 1215 MPa basınç altında preslenerek 24 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde olacak şekilde 1. tip elektrot üretilmiştir. Her presleme işleminden önce kalıp i yüzeyleri ve zimba dış yüzeyleri etil alkol-çinko stearat solüsyonu sürülerek yağlanmıştır. İmalatı yapılan bakır elektrotların optik mikroskoptaki (600 büyütmeli) fotoğrafı ekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.5. Bakır elektrot fotoğrafı (x600)

2. tip elektrot, bakır tozlarına ağırlık olarak %0.8 oranında PEG 4000 polimerik bağlayıcısı katılarak turbula marka üç boyutlu karıştırıcıda (ekil 6.8) 45 dak. karıştırılarak preste basılarak üretilmiştir. Basma, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Dartec RF ekme – basma cihazında yapılmıştır (ekil 6.9.). Basma yükü olarak 550 kN uygulanmış ve maksimum yükte 5 dakika bekletilerek yk kaldırılmıştır. İlk yapılan denemelerde toz karışımının ham mukavemet sağlamaması üzerine 5 dakika beklenerek basma yükü kaldırılmıştır. Basma

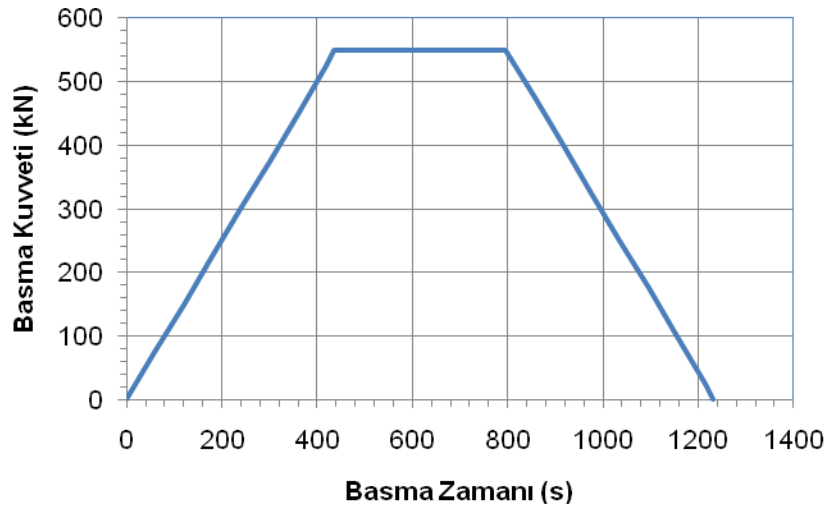
yükünün zamana karşı değişimi Şekil 6.10'da sunulmuştur.



Şekil 6.6. Turbula

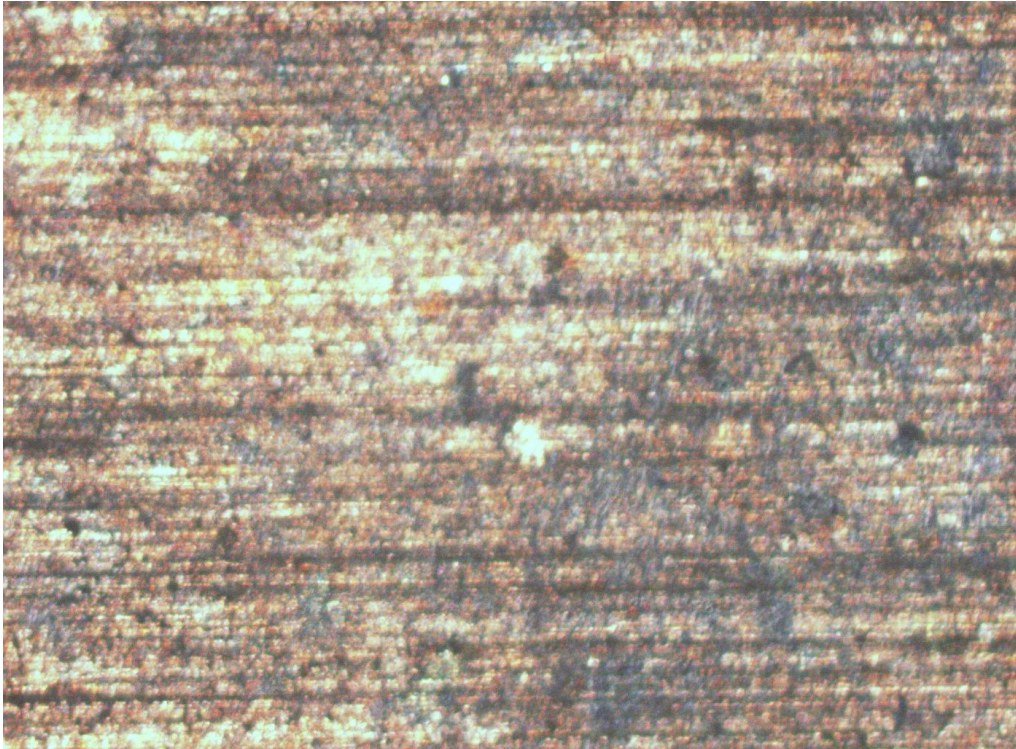


Şekil 6.7. Basma için kullanılan 60 tonluk Dartec RF çekme basma cihazı



Şekil 6.8. Basma grafiği

Bağlayıcı karıştırılarak imal edilen elektrotun mikro yapısının optik mikroskoptaki fotoğrafı Şekil 6.11. 'de görülmektedir.



Şekil 6.9. Bağlayıcı karıştırılmış bakır elektrot (x600)

3. tip elektrot bor karbür tozu esaslı olarak imal edilmiştir. Bu amaçla, bor karbür toz oranının en fazla olduğu durumdan başlanmış, istenen mukavemette elektrot elde edilinceye kadar karışım oranları ve malzemeler değiştirilerek maksimum bor karbür içeren karışım bulunmuştur. Bor karbürün iletken olmamasından dolayı değişik oranlarda bakır tozları ilave edilerek EEİ için gerekli olan iletkenlik şartı sağlanmıştır. İlk deneme de ağırlık olarak %92 B₄C, % 8 Co tozları kullanılmış ve bu tozlar 45 dakika süreyle karıştırılmıştır. Hazırlanan karışım her presleme işleminden önce kalıp iç yüzeyleri ve zımba dış yüzeyleri etil alkol-çinko stearat solüsyonu sürülerek yağlanmış ve tektesirli bir preste çelik kalıp içerisinde 995 MPa basınç altında sıkıştırılmıştır. Bu denemede toz karışımının ham mukavemeti çok düşük çıkmış ve karışım kalıptan çıkarılırken dağılmaya başlamıştır. Bu sonuç üzerine karışıma uygulanan basınç 1215 MPa 'a çıkarılmış, bu basınçta karışım kalıptan katı halde çıkmıştır. Ancak sinterleme sonrası malzeme mukavemet kazanmamış aksine dağılmaya başlamıştır (Şekil 6.12).

İkinci denemede ağırlık olarak % 50 B₄C ve % 50 Cu tozları kullanılmıştır. İlk denemedeki sıkıştırma işlemleri yapılmış önce 995 MPa basınç ile sıkıştırılmış ancak ham mukavemet çok düşük çıkmıştır. Toz karışımı ikinci olarak 1215 MPa 'da sıkıştırıldığında ham mukavemet yine çok düşük çıkmış toz karışımı elektrot haline getirilememiştir.



Şekil 6.10 % 92 B₄C ve % 8 Co

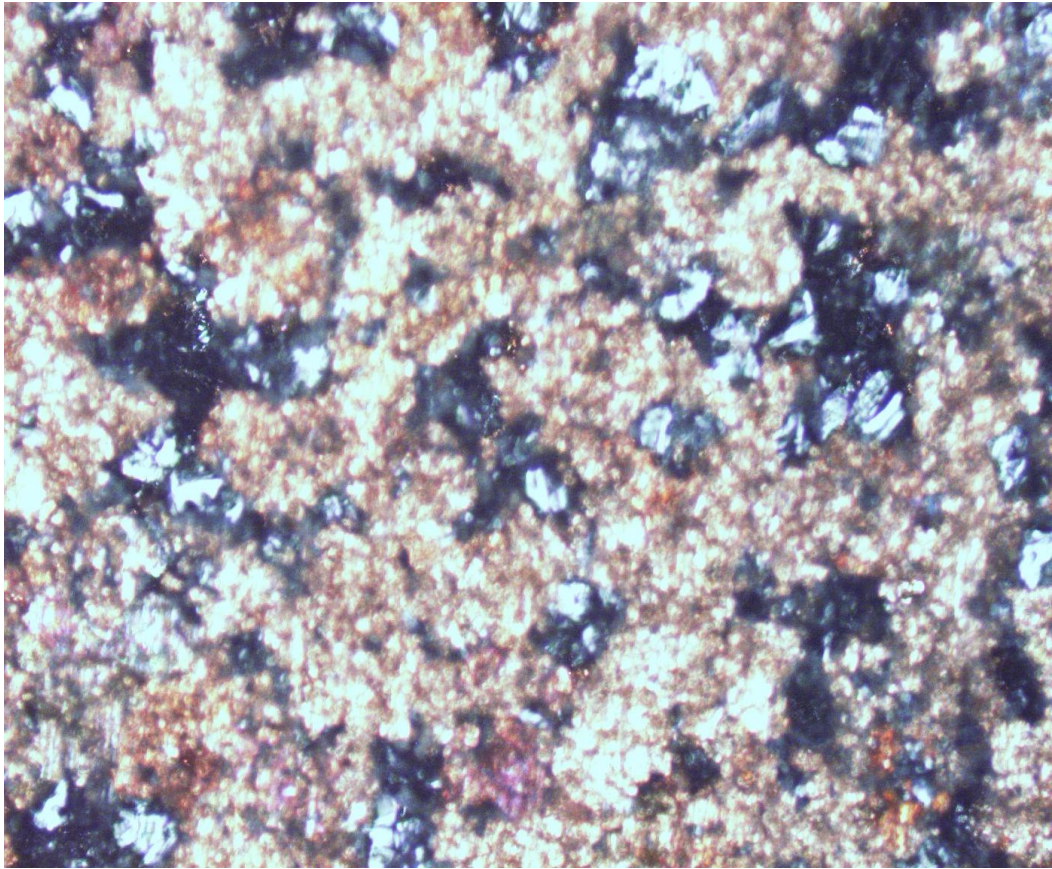
İlk iki denemede çıkan olumsuzluk sonucunda toz karışımı içerisindeki B₄C miktarı azaltılıp Cu miktarı artırılarak elektrot üretilmeye çalışılmıştır. Denemesi yapılan toz oranları ve uygulanan basma kuvvetleri Çizelge 6.4.'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Denemesi yapılan toz karışım oranları ve basma kuvvetleri

Deneme No	% B ₄ C	% Cu	Basma Kuvveti (kN)	Sonuç
1	50	50	450	Ham mukavemet elde edilemedi
2	50	50	550	Ham mukavemet elde edilemedi
3	40	60	450	Ham mukavemet elde edilemedi
4	40	60	550	Ham mukavemet elde edilemedi
5	25	75	450	Ham mukavemet elde edilemedi
6	25	75	550	Ham mukavemet sağlandı, sinterlemede sonucunda mukavemet sağlanamadı

Son denemede ağırlık olarak % 20 B₄C ve % 80 Cu tozları kullanılmıştır. Karışım 1215 MPa basınçla sıkıştırılmış 24 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde elektrot elde edilmiştir. Ham mukavemet ve sinterleme sonrası mukavemet çok iyi çıkarak Elektro Erozyon ile işlemeye uygun elektrot üretilmiştir.

Karışım oranları belirlendikten sonra yeterli en düşük basma yükünün tespiti için basma denemeleri yapılmıştır. İlk sıkıştırmada 1325 MPa basınçla basma yapıldığında bor karbür tozlarının kalıbın iç çeperlerini derin çizdiği (kalıba zarar verdiği) görüldü. Ancak kalıbın iç yüzeyinin daha sertleştirilmesi (60 HRC civarı) ve basma basıncının azaltılarak 1215 MPa 'a düşürülmesi sonucunda kalıp yüzeyinin bozulmadığı ve elektrot imalatının problemsiz gerçekleştirildiği görülmüştür. İmalatı yapılan son elektrodun mikro yapıları Şekil 6.13 'de görülmektedir.



Şekil 6.11. % 80 bakır ve % 20 bor karbür elektrot (x600)

6.3. Elektrik İletkenlik Ölçümü

İmalatı yapılan, ağırlıkça % 80 bakır % 20 bor karbür elektrotların elektrik iletkenliği Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan KEİTHLEY marka 2400 Series SourceMeter ile ölçülmüştür. Şekil 6.14. 'de görülen KEİTHLEY 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı, hem akım kaynaklı gerilim ölçümü, hem de gerilim kaynaklı akım ölçümü yapabilmektedir. $\pm 1\mu\text{V}$ 'dan $\pm 200\text{ V}$ 'a kadar gerilim ölçümü ve $\pm\text{pA}$ 'dan $\pm\text{A}$ 'e kadar akım ölçümü yapabilmektedir. Cihaz IEEE-488 ve RS-232 ara yüzey veri yoluna sahiptir. Ölçüm sonuçları Çizelge 6.5 'de verilmiştir.

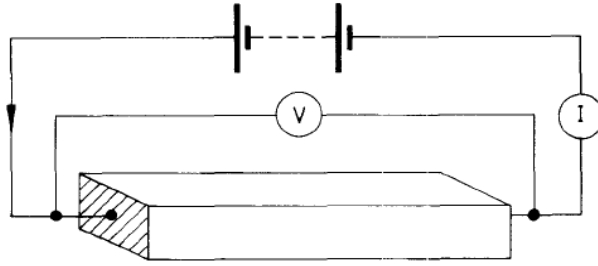


Şekil 6.12. KEİTHLEY 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı

Genelde, direnç ölçümleri özel şekilli numuneler ve elektrot konfigürasyonları kullanılarak düzgün bir elektrik alan oluşturularak yapılır. Böylece direnç, ölçülen direnç ve elektrotlar arasında ölçülen gerilim değerine göre Ohm Yasası ile hesaplanabilir. İletkenlik ölçümleri temelde iki farklı başlık etrafında incelenir:

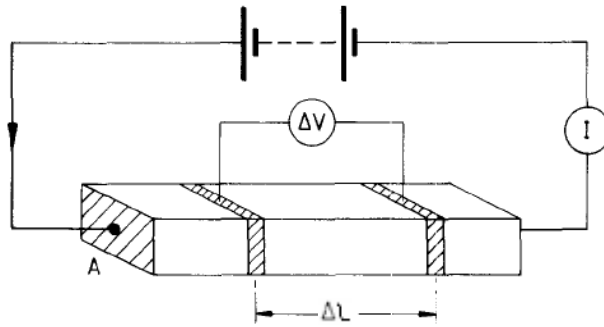
- Düşük dirence sahip malzemelerin ölçümü,
- Yüksek dirence sahip malzemelerin ölçümü,

Düşük hacimsel dirence sahip malzemelerin direnç ölçümlerinde temas direnci önemli bir faktördür. Şekil 6.15. 'de gösterildiği gibi direnç, uygulanan gerilimin ölçülen akım şiddetine oranıdır.



Şekil 6.13. Düşük direnç ölçümü, 2-nokta metodu [41]

Hassas ölçmedeki ana problem, elektrot ile numune arasındaki temas direncinin ölçümüdür. Temas direnci elektrotlara basınç uygulanarak azaltılabilir.



Şekil 6.14. Düşük direnç ölçümü (b) 4-nokta metodu [41]

Temas direnci etkisinin daha da azaltılması Şekil 6.16. 'da gösterildiği gibi 4–nokta metodu ile elde edilir.

$$\rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (6.1)$$

$$\sigma = \frac{L}{R \cdot A} \quad (6.2)$$

ρ = Öz direnç A = Kesit alanı L = Uzunluk R = Direnç σ = Elektrik iletkenliği

Çizelge 6.5. % 80 bakır, % 20 B₄C li elektrotların ölçülen elektrik iletkenlikleri

I (Amp)	V (Volt)	L (mm)	A (mm ²)	R (ohm)	Σ (mm ¹ /ohm)
0.1	21	7.5	111.3	0.4900	0.1375
0.1	21	7.5	110.25	0.4830	0.1408
0.1	21	7.5	111.25	0.5078	0.1327
0.1	21	7.5	111.3	0.5025	0.1341
0.1	21	7.5	111	0.5045	0.1339

6.4. Sinterlemenin Yapılışı

Üretilen elektrotların sinterlemesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü Gazi Üniversitesi İleri Malzeme ve Boya Araştırma Merkezi (GİMBAM) ve Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metal Bölümü laboratuvarlarında bulunan fırınlarda yapılmıştır (Şekil 6.17. ve Şekil 6.18).

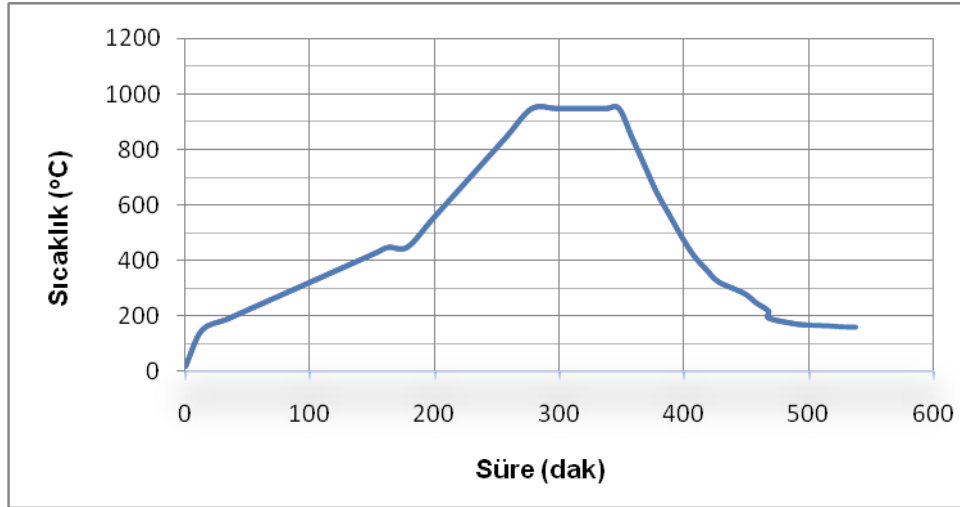


Şekil 6.15. Argon koruyucu atmosferli fırın GÜ, (Mühendislik Fakültesi)

Sinterleme, PEG 4000 bağlayıcı karıştırılan elektrotlar için % 99.95 saf argon gazı koruyucu atmosferli fırında yapılmıştır. Fırın 150 °C sıcaklığa 10 °C/dak hız ile bu sıcaklıktan 450 °C sıcaklığa kadar ise 2 °C/dak hız ile ısıtılmıştır. 450 °C de 15 dak. beklenerek bağlayıcının giderilmesi sağlanmıştır. Fırın daha sonra 950 °C ' ye 5 °C/dak. hız ile ısıtılmış, 950 °C de 60 dakika beklenmiştir. Elektrotlar fırın içinde 10 °C/dak hızı ile soğumaya bırakılmıştır. Sinterleme işlemi için sıcaklık zaman grafiği Şekil 6.19. 'da verilmiştir.



Şekil 6.16. Argon koruyucu atmosferli fırın GÜ, (Teknoloji Fakültesi)



Şekil 6.17. Sinterleme işleminin sıcaklık-zaman grafiği

Elektrotlar fırın içerisinde 10°C/dak. hız ile soğumaya programlanmıştır. 950–350°C arası programa uygun soğumuştur, 350°C den sonra ise soğuma hızı azalarak (Şekil 6.19) devam etmiş ve sinterleme tamamlanmıştır.

Preslenen numuneler, hazırlanan grafit kaplar içerisinde yatay tüp fırın içerisinde sinterlenmiştir. Sinterleme öncesi ve sonrası parçaların boyut ve ağırlık ölçümleri yapılarak her bir numune için yoğunluk değeri elde edilmiştir. Yoğunluk verilerinin elde edilmesinde Eş. 6.3 kullanılmıştır.

$$\rho_{kar} = [(\%W)_1 * \rho_1] + [(\%W)_2 * \rho_2] + \dots + [(\%W)_n * \rho_n] \quad (6.3)$$

Burada:

- ρ_{kar} : Toz karışımının teorik yoğunluğu
- $(\%W)_n$: Her bir bileşenin karışım içindeki ağırlık yüzdesi
- ρ_n : Her bir bileşenin yoğunluğudur

Sinterleme işlemi sonunda her bir numunenin boyutları (çap ve boy) 0.01 mm hassasiyetinde mikrometre ile ölçülmüş ve 0.02 mg hassasiyetindeki dijital

terazide tartılmıştır. Numune (elektrot) hacmi ve ağırlığından gerçek yoğunluk bulunmuştur. Gerçek yoğunluğun kompozit parça yoğunluğuna bölünmesiyle teorik yoğunluk (%) belirlenmiştir.

6.5. Elektro Erozyon Tezgâhı

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgâhları Laboratuvarında bulunan Furkan EDM M50 A tipi Dalma-EEİ tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.20). Tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 6.6. 'da verilmiştir.



Şekil 6.18. Furkan EDM M50 A elektro erozyon tezgâhı

Çizelge 6.6. 50 A Furkan marka dalma elektro erozyon tezgahı teknik özellikleri [54]

Elektronik Güç Devresi	
Güç (220 V, 50 Hz, 3f)	3 KVA
Boşalım Akımı Kademeleri	1,5 - 3 - 6 - 12 - 25 -50A
Vurum Süresi Kademeleri	4-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Bekleme Süresi Kademeleri	4-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Çalışma Süresi Kademeleri	0,1-0,2-0,4-0,8-1,6-3,2-6,4-12,8 s-Sürekli
Geri Çekme Süresi Kademeleri	0,1-0,2-0,4-0,8-1,6-3,2-6,4-12,8 s
Tezgâh Gövde Boyutları	
İş Tablası Ölçüleri (X-Y)	550 x 250 mm
Tabla Hareket Ölçüleri (X-Y)	300 x 200 mm
Tabla Hareket Hassasiyeti (X-Y)	0,02 mm
İşleme Haznesi Ölçüleri (X-Y-Z)	860 x 470 x 280 mm
Maksimum İş Parçası Ölçüleri (X-Y-Z)	660 x 470 x 280 mm
Z - Eksenli Kontrol Mekanizması	Servo Kontrol
Z - Eksenli Hareket Kursu	160 mm
Z - Eksenli Hareket Hassasiyeti	0,01 mm
Dielektrik Sıvı Sistemi	
Depo Ölçüleri (X-Y-Z)	950 x 580 x 600 mm
Pompa Kapasitesi	50 lt/dak.

6.6. İş parçası

Deneylerde iş parçası olarak Çizelge 6.9.'da kimyasal bileşimi verilmiş olan SAE 1040 çeliği kullanılmıştır. SAE 1040 sanayide çok kullanılan malzemelerden birisi olduğu için seçilmiştir. İş parçası, lama şeklindeki malzemeden 70x70x10 mm ölçülerinde kesildikten sonra frezelenerek 69x35x9.5 mm ölçülerine getirilmiş ve ortadan ikiye kesilmiştir. Daha sonra bütün yüzeyler taşlanarak 68x34x9 mm 'lik ölçüleri elde edilmiştir. Aşınma ve sertlikte meydana gelen değişimleri incelemek için Şekil 6.21.'de görülen iş parçası seçilmiştir.



Şekil.6.19. Aşınma testi için kullanılan iş parçası

Çizelge 6.7. İş parçası malzemesi kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	W	Fe
%	0,3754	0,208	0,744	0,0081	0,0269	0,0727	0,0148	0,097	0,0183	0,0243	0,1495	0,0915	98,175

6.7. Elektrotlar

İşleme deneylerinde elektrot olarak

1. Silindirik elektrolitik bakır elektrot (EB) (Şekil 6.22)
2. Toz bakırdan yapılmış elektrot (TB) (Şekil 6.23)
3. Ağırlık olarak % 80 bakır ve % 20 B₄C elektrot (BCTE) (Şekil 6.24)

kullanılmıştır. Elektrotları tezgaha bağlamak için üç farklı tip bağlama adaptörü kullanılmıştır (Şekil 6.22 - 6.24)

Üç tip elektrotun birlikte fotoğrafları Şekil 6.25.'de verilmiştir.



Şekil 6.20. Silindirik elektrolitik bakır elektrot (EB)



Şekil 6.21. Toz bakırdan yapılmış elektrot (TB)



Şekil 6 .22. Ağırlık olarak % 80 bakır ve % 20 B₄C elektrot (BCT)



Şekil 6.23. Deneyeler kullanılan üç tip elektrot

6.8. İşleme Parametreleri

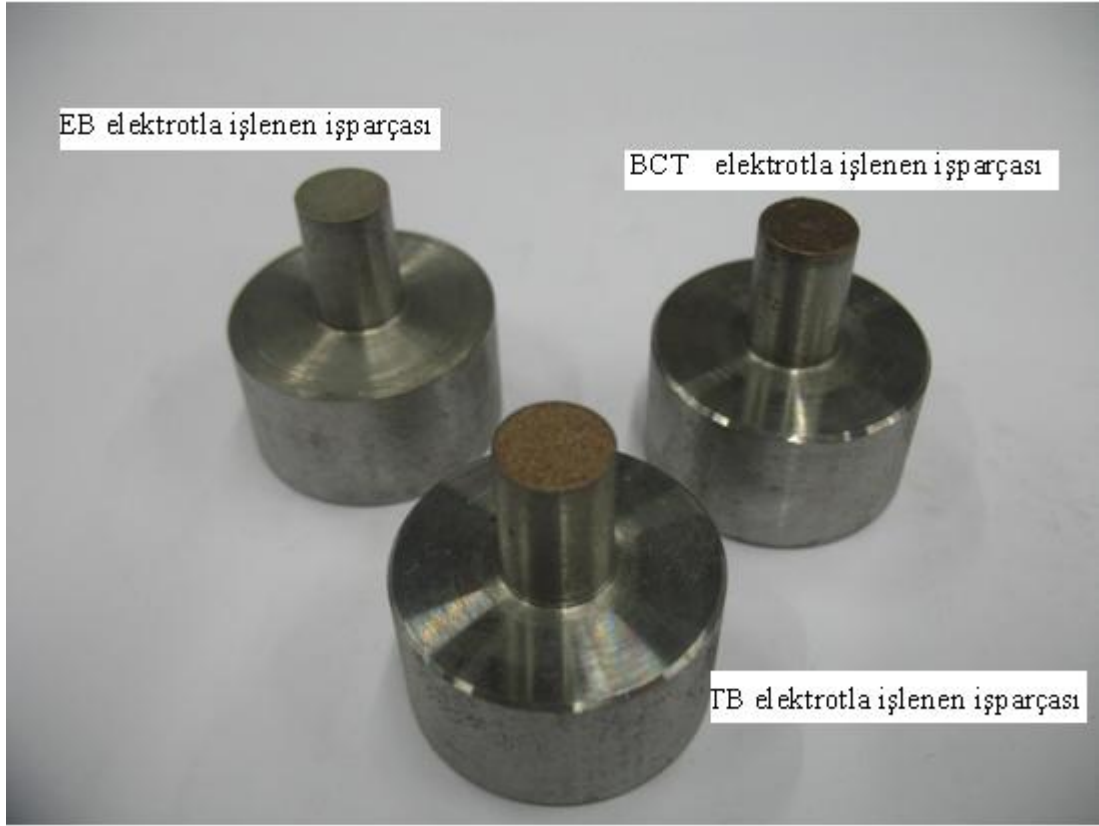
Üç tip elektrotla iki akım değerinde (3 ve 6 A) ve iki vurum süresi değerinde (25 ve 50 μ s) deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan sabit parametreler Çizelge 6.8.'de sunulmuştur

Çizelge 6.8. Deney parametreleri

Deney Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı (i_d) [A]	1.5, 3.6
Vurum Süresi (t_s) [μ s]	25, 50
Dielektrik Sıvı Uygulama Şekli	Püskürtme
Püskürtme Basıncı (P) [bar]	0.5
Statik Basınç (P) [bar]	0.0
Emme Basıncı (P) [bar]	0.0
Kutuplama	Elektrot (+), İşparçası (-)
Bekleme Süresi (t_p) [μ s]	12
Dielektrik Sıvı	Gaz Yağı
İşparçası Malzemesi	Çelik
Elektrot Malzemesi	Elektrolitik Bakır(EB), Toz Bakır(TB), Bakır Tozu + B ₄ C(BCT)
İşleme Derinliği [mm]	1

6.9. İşleme Sonrası İşparçası Yüzey Katmanının Sertliğinin ve Kalınlığının Ölçülmesi

Üç tip elektrotla yapılan işleme deneyleri sonucunda EB elektrotlarla işlemede yüzeyde alaşımlama olmadığı görülmüştür ancak TB ve BCT elektrotlarla yapılan işlemlerde iş parçası yüzeyine elektrot malzemesi alaşımlanmıştır (Şekil 6.26).



Şekil 6.24. Üç grup elektrotla yapılan işleme sonucu oluşan yüzeyler

İlerde bahsedileceği üzere yüzeyde 30 – 140 μm 'lik bir sertleşmiş bölge oluşmuştur. İşlenen yüzeylerde oluşan alaşımlama çok ince olduğu için mikro sertlik ölçme yöntemi kullanılmıştır. Bu sertlik ölçümleri için HV1 (Vickers sertliği 1 skalası) uygun olup, çalışmada da bu skala kullanılmıştır. Sertlik 19 N yük ve 5 saniye uygulama koşullarında piramit uç kullanılarak HV1 cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümünde Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarlarında ve TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Laboratuvarlarında bulunan Digital Microhardness Tester MHV2000 marka sertlik cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.27). Her iş parçasının on farklı yerinden ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalamaları alınarak iş parçası sertlik değeri bulunmuştur.



Şekil 6.25. Mikro sertlik ölçüm cihazı GÜ Müh. Fak.

Yüzeyde oluşan katmanın (alaşımın) kalınlığı Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan JEOL JSM 6360 LV marka taramalı elektron mikroskop cihazı (SEM) ile ölçülmüştür (Şekil 6.26)



Şekil 6.26. JEOL JSM 6360 LV marka taramalı elektron mikroskop cihazı

6.10. Yüzey Katmanının Aşınma Direncinin Ölçülmesi

İş parçası yüzeyinde işleme sonrası meydana gelen katmanların aşınma direnci G.Ü. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Toz Metalurjisi Laboratuvarındaki aşınma test cihazıyla ölçülmüştür (Şekil 6.30). Cihaz üzerinde bulunan 1,1 kW, 1100 d/dak kapasiteye sahip elektrik motorunun dönme hareketi kayış kasnak mekanizması yardımıyla karşı aşındırıcı olarak kullanılan diske iletilmektedir. Disk malzemesi olarak ısıl işlemle 55 HRC'ye sertleştirilmiş SAE 1040 çeliği kullanılmıştır. Disk yüzeyinin düzlemselliğini sağlamak ve yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için uygulanan taşlama sonrası 1 μ m Ra yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Farklı hız ve yol değerlerinde deney yapabilmek için test cihazına frekans ayarlayıcı, devir sayacı ve yol ölçer bağlantısı yapılmıştır.



Şekil 6.27. Sürtünme aşınma düzeneği

Aşınma testleri disk üzerinde pim kullanılarak kuru ve yağsız kaydırma koşulları altında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 30 N yük altında ve 100 d/dak dönme hızında, 80 mesh silisyum karbür (SiC) zımpara aşındırıcılar üzerinde yapılmıştır. Zımpara üzerinde aşınma numuneleri, aşınma yönüne dik şekilde hareket ettirilmiş ve böylece numuneler daima yeni zımpara yüzeyine temas ettirilmiştir. Zımpara üzerinde numunelerin toplam sürtünme mesafesi 50 m'dir. Aşınma deneyinden önce ve sonra numuneler elektronik terazi ile tartılarak aşınma miktarları bulunmuştur.

7. DENEY SONUÇLARI

Tez çalışmasında amaç, EEİ bitirme işlemlerini T/M elektrot ile yaparak yüzeye bor karbür alaşımlamak olduğu için öncelikle BCT elektrot ile yapılan çalışmalara uygun işleme parametreleri belirlenmiş ve üç tip elektrotla da aynı şartlarda deneyler yapılmıştır. Elektrot üretimi amaçlı ilk yapılan çalışmalarda öncelik en yüksek oranda B_4C takviyesinin bulunmasıdır. Bu nedenle yüksek oranlarda B_4C karışımı ile denemelere başlanmıştır. EEİ yapabilecek elektrot ($Cu + B_4C$) T/M yöntemiyle üretildikten sonra deneylere başlanmıştır.

Değişik tip elektrotların farklı işleme şartlarındaki davranışlarının karşılaştırılması için elektrot malzemesi olarak elektrolitik bakır (EB), toz bakır (TB) ve $B_4C + Cu$ (BCT) karışımı elektrotlar kullanılmıştır. Bu üç elektrot tipi içinde aynı işleme şartlarında deneyler yapılmış, İİH, EAH, BA, işleme süresi, işleme sonrası iş parçası mekanik aşınma direnci ve iş parçası yüzey sertliği incelenmiştir.

Sinterleme öncesi ve sonrası elektrot boyut ve ağırlık değişimi Çizelge 7.1. ve Çizelge 7.2’de verilmiştir. Çizelgelerden görüldüğü üzere sinterleme sonrasında elektrotlarda yaklaşık % 1 hacim ve ağırlık değişimi tespit edilmiştir. Sinterleme sonucu oluşan hacim ve ağırlık değişiminin küçük olmasının nedeni elektrot üretiminde kullanılan yüksek sıkıştırma basıncıdır (1215 MPa).

Çizelge 7.1. Sinterleme sonucu elektrotta oluşan hacim değişimi

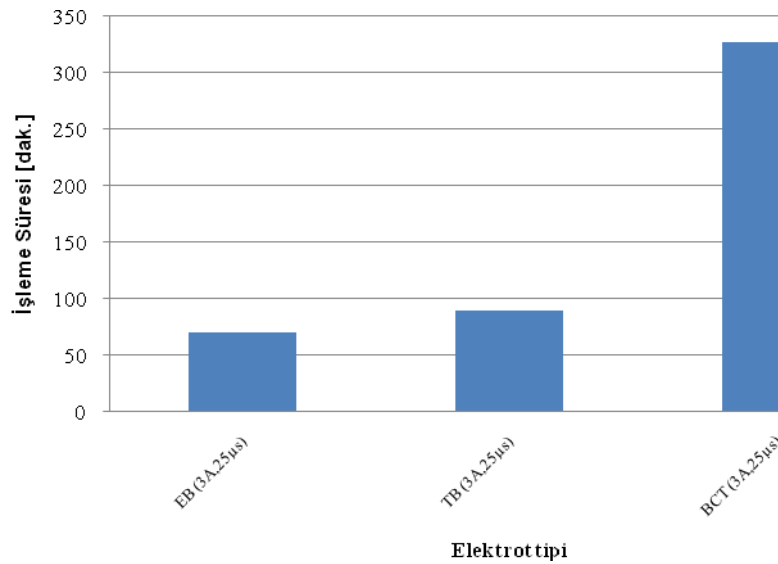
No	Sinterlemeden Önceki hacim (mm^3)	Sinterlemeden Sonraki hacim (mm^3)	Hacimdeki değişim
1	6671.39	6646.30	0.996
2	6757.59	6742.86	0.997
3	6780.76	6762.48	0.997
4	6758.73	6728.32	0.995
5	6773.25	6757.46	0.997

Çizelge 7.2. Sinterlemede oluşan ağırlık değişimi

No	Sinterlemeden Önceki ağırlık (g)	Sinterlemeden Sonraki ağırlık (g)	Ağırlıktaki değişim
1	34.76	34.73	0.999
2	34.86	34.82	0.998
3	34.72	34.67	0.998
4	34.75	34.74	0.999
5	34.21	34.20	0.999

7.1. İşleme Süresi

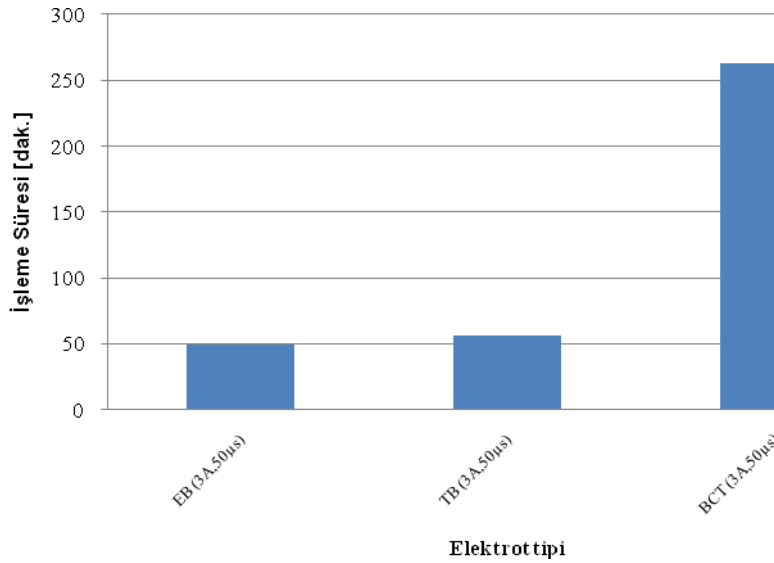
Yapılan işleme son işlem (bitirme işlemi) olarak düşünülmüştür. Bu nedenle işleme derinliği 1mm olarak seçilmiştir. İşleme süresi olarak bu derinliğin işlenme süresi alınmıştır. Elektrotların işleme sürelerinin karşılaştırılabilmesi için üç elektrot çeşidi için boşalım akımı olarak 3 A ve vurum süresi olarak ta 25 μ s alınarak işlemler yapılmış olup, elde edilen değerler (Şekil 7.1.) 'de verilmiştir.

Şekil 7.1. 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması

İlk grup deneyde işleme parametreleri olarak, 3 A boşalım akımı ve vurum süresi kullanılmıştır. Bu işleme grubunda en kısa işleme süresinin 70 dak. ile

EB elektrotlarla yapılan işlemede olduğu tespit edilmiştir. EB elektrotlarla yapılan işleme süresi, TB elektrotlarla yapılan işleme süresine göre % 22 ve BCT elektrotlarla yapılan işlemeye göre ise % 79 daha kısadır. TB elektrotlarla yapılan işlemler BCT elektrotlarla yapılan işlemeye göre % 72 daha kısa sürede tamamlanmıştır.

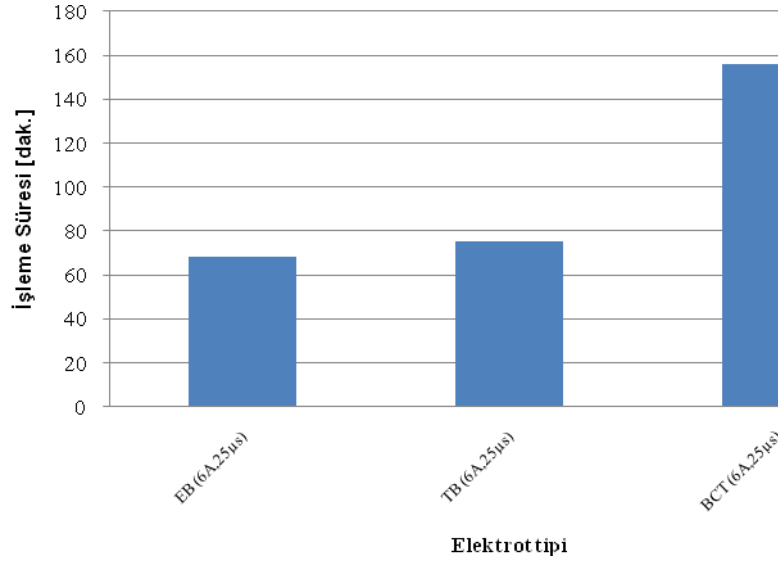
İkinci grup deneylerde işleme parametreleri olarak 3 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresi seçilmiştir. Bu grup deneylerde de EB elektrotlarla yapılan işleme diğer tip elektrotlarla yapılan işlemeye göre daha kısa sürede (49 dak.) tamamlanmıştır. EB elektrot, TB elektrota göre % 12.5, BCT elektrota göre ise % 81 daha kısa sürede işlemeyi tamamlamıştır (Şekil 7.2.).



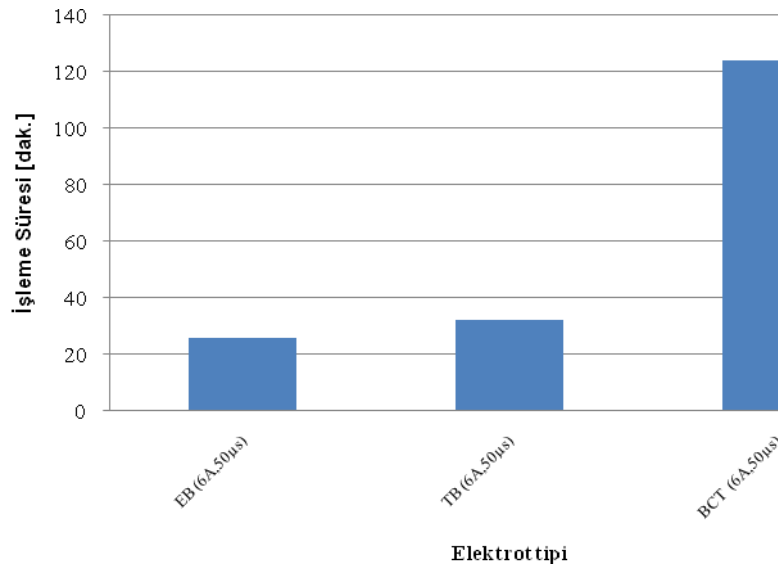
Şekil 7.2. 3 A ve 50 μ s işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması

Üçüncü grup deneyler 6A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresinde yapılmıştır. EB elektrot ile yapılan işleme en kısa sürede (68 dak.) tamamlanmıştır. TB elektrotlarla yapılan işleme ise EB elektrotlarla yapılan işlemeye göre % 10 daha uzun sürmüştür. TB elektrotlarla yapılan işleme BCT elektrotlara göre % 48 daha kısa sürede tamamlanmıştır. EB elektrotlar BCT elektrotlarla karşılaştırıldığında EB elektrotun % 56 daha kısa sürede

işlemeyi tamamladığı görülmüştür (Şekil 7.3.).



Şekil 7.3. 6 A ve 25 µs işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması



Şekil 7.4. 6 A ve 50 µs işleme koşullarında işleme sürelerinin karşılaştırılması

Dördüncü grup deneyler 6A boşalım akımı ve 50 µs vurum süresinde yapılmıştır. Bu deneylerde üç elektrot tipi için de işleme süresi ilk üç grup işlemeye göre daha kısa sürede tamamlanmıştır. EB elektrotun işleme süresi

(26 dak.), TB elektrota göre % 18.8, BCT elektrota göre % 80 daha kısadır. TB elektrotlarla işleme BCT elektrota göre % 75 daha kısa sürede tamamlanmıştır (Şekil 7.4).

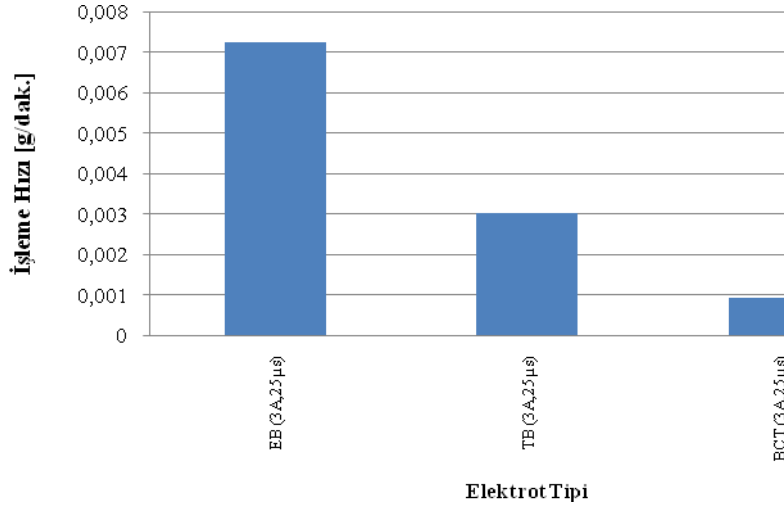
Dört grup deney incelendiğinde, BCT elektrotlarla yapılan deneylerin EB ve TB elektrotlarla yapılan çalışmalara göre daha uzun sürede tamamlandığı görülmüştür. Dört grup deney içinde EB elektrotlarla yapılan işleme diğer iki tip elektroda göre daha kısa sürede işlemeyi tamamladığı görülmüştür. Yapılan çalışmada TB elektrotların EB elektrotlardan uzun ve BCT elektrotlardan kısa sürede işleme yaptığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmaların hepsinde, TB elektrotlarla yapılan deneylerin işleme süreleri EB ile yapılan işleme sürelerine yakın değerlerde çıkmıştır. BCT elektrotlarla yapılan işlemenin diğer tip elektrotlarla yapılan işlemlere göre çok uzun sürmemiş olması bu elektrot tipinin kullanılabilirliği açısından umut vericidir.

7.2. İş Parçası İşleme Hızının Karşılaştırılması

Aynı şartlarda yapılan deneyler İİH açısından karşılaştırıldığında EB elektrotun en iyi sonucu (en yüksek İİH değerleri) verdiği, TB elektrotun ise BCT elektrota göre daha yüksek İİH verdiği görülmüştür (Şekil 7.5)

İlk grup deneylerde 3A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresi için, EB elektrotun TB elektrota göre 2.38 kat, BCT elektrota göre ise 7.85 kat daha hızlı işleme yaptığı tespit edilmiştir. TB elektrotların ise BCT elektrotlara göre 3.29 kat daha hızlı işleme yaptığı görülmüştür.

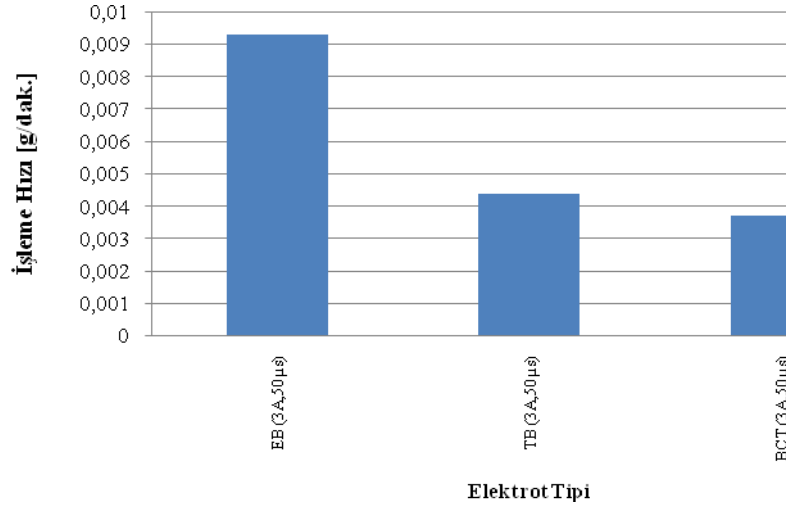
EB elektrot için boşalım akımı 3A vurum süresi 50 μ s olduğu durumlarda İİH'nin 25 μ s vurum süresinin olduğu koşullara göre 1.28 kat hızlandığı görülmektedir. Bunun yanında 25 μ s vurum süresinde boşalım akımının 3 A'den 6 A'e çıktığında İİH'da 1.58 kat artış olduğu görülmüştür.



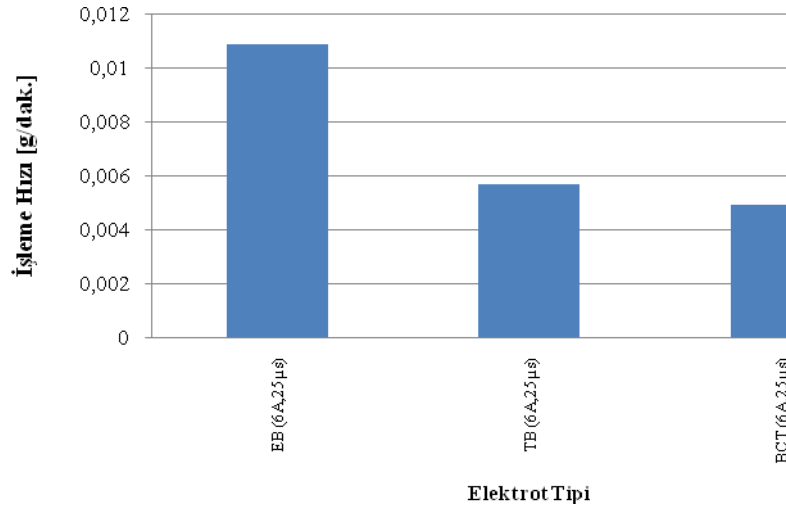
Şekil 7.5. 3 A ve 25 µs işleme koşullarında iş parçası işleme hızının karşılaştırılması

İkinci grup deneyler için 3 A boşalım akımı ve 50 µs vurum süresinde EB elektrot TB elektrota göre 2.13 kat, BCT elektrota göre ise 2.51 kat daha hızlı işleme yaptığı tespit edilmiştir. TB elektrotlarla yapılan işleme hızı BCT elektrotlara göre 1.17 kat artmıştır Bu grup deneylerde vurum süresi sabit kalmak koşuluyla boşalım akımı 6 A' e yükseltildiğinde İİH' nin EB elektrotlarda 1.17, TB elektrotlarda 1.29 ve BCT elektrotlarda ise 1.33 kat arttığı tespit edilmiştir (Şekil 7.6.).

Üçüncü grup deneylerde 6 A boşalım akımı ve 25 µs vurum süresinde, EB elektrot TB elektrota göre yaklaşık 1.9 kat, BCT elektrota göre 2.2 kat daha yüksek İİH vermiştir. Boşalım akımı 6 A' de sabit tutup vurum süresi 50 µs' e yükseltildiğinde İİH' nin EB elektrotlarda 1.23, TB elektrotlarda 1.67 ve BCT elektrotlarda ise 1.61 kat arttığı tespit edilmiştir (Şekil 7.7.).



Şekil 7.6. 3 A ve 50 µs işleme koşullarında iş parçası işleme hızının karşılaştırılması



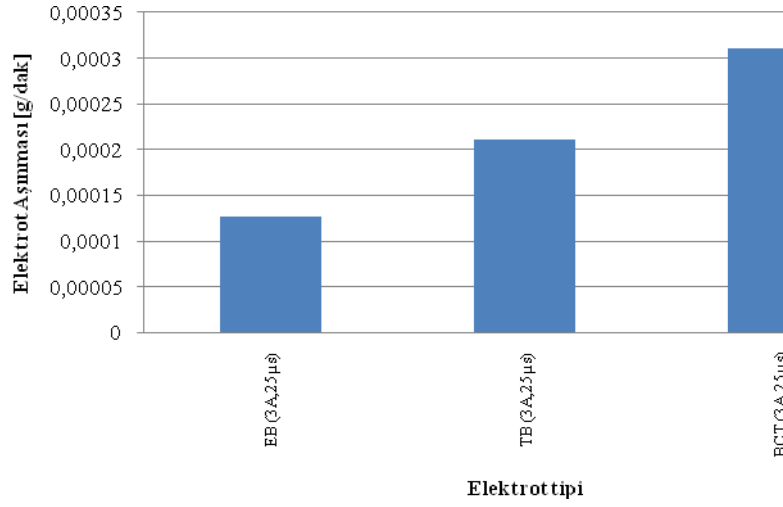
Şekil 7.7. 6 A ve 50 µs işleme koşullarında iş parçası işleme hızının karşılaştırılması

Dördüncü grup deneylerde 6 A boşalım akımı ve 50 µs vurum süresinde, EB elektrot TB elektrotu göre 1.42 kat, BCT elektrotu göre 1.68 kat daha yüksek İİH vermiştir.

Deneylerin tümü bir arada incelendiğinde, vurum süresi 25 μ s iken boşalım akımı 3 A' den 6 A' e yükseltildiğinde İİH 'da EB elektrotta 1.51, TB elektrotta 1.86 ve BCT elektrotta 6.14 kat artış olduğu görülmüştür. 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresi parametrelerinin her ikisi de iki katına yükseltildiğinde (6 A boşalım akımı ve 50 μ s vurumu süresi) İİH' da EB elektrotlarda 1.85, TB elektrotlarda 3.11 ve BCT elektrotlarda ise 8.66 kat iyileşme görülmüştür. Yani İİH' ları açısından BCT elektrotlarla yapılan işlemlerde boşalım akımı ve vurum sürelerinin yükseltilmesi ile diğer iki elektrota göre daha yüksek iyileşme görülmüştür. Bu iyileşmeye rağmen işleme parametrelerinin yükseltilmesi ile işlemede düzensizliklerin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bu durum göz önüne alındığında BCT elektrotlar için düşük değerlerdeki işleme koşullarının daha uygun olduğu kararına varılmıştır.

7.3. Elektrot Aşınma Hızı (EAH) Değerlerinin Karşılaştırılması

Deneyler sonucunda bütün deney koşullarında en yüksek elektrot aşınma hızının BCT elektrotlarda görüldüğü tespit edilmiştir. Elektrot aşınması EEİ uygulamalarında istenmeyen bir durum olmasına rağmen bu çalışmada amaç, yüzeye elektrot malzemesini alaşımlamak olduğu için elektrot aşınmasını azaltma yönünden bir çaba sarf edilmemiştir.

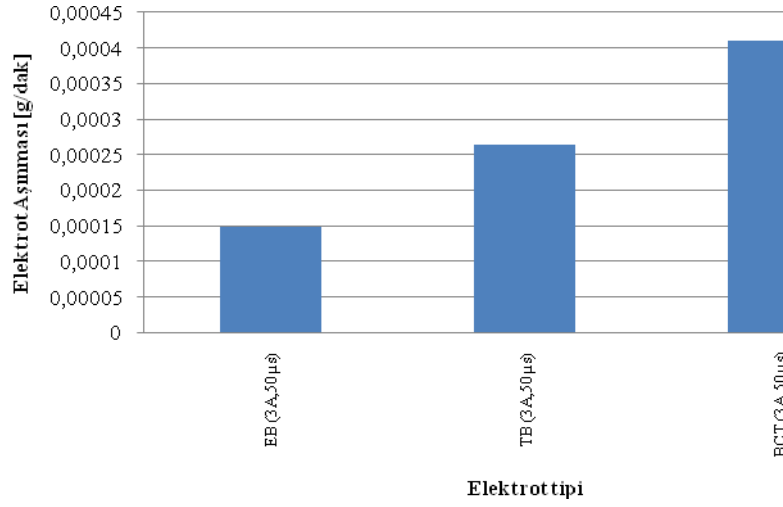


Şekil 7.8. 3 A ve 25 µs işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması

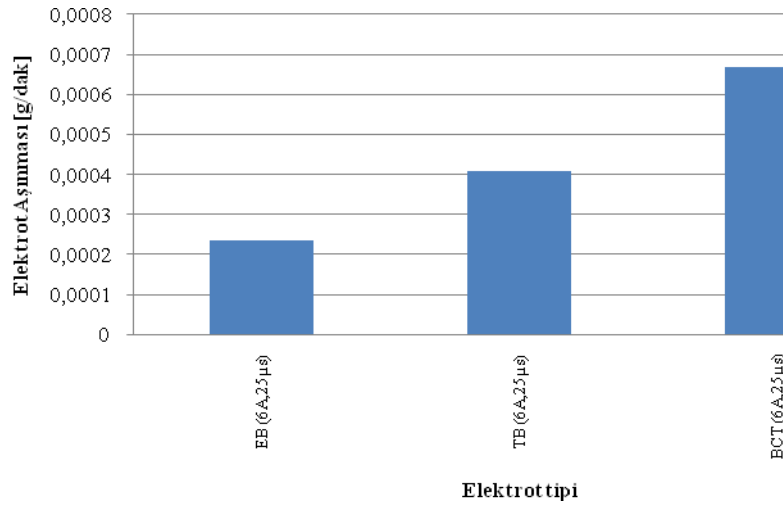
İlk grup deneylerde (3 A boşalım akımı ve 25 µs vurum süresi) BCT elektrotlar ile yapılan işlemede en yüksek EAH değeri elde edilmiştir. BCT elektrotlarla yapılan işlemede EB elektrotlara göre 2.45, TB elektrotlara göre 1.47 kat daha yüksek EAH tespit edilmiştir. TB elektrot ise EB elektrota göre 1.67 kat daha hızlı aşınmıştır (Şekil 7.8).

İkinci grup deneylerde (3 A boşalım akımı ve 50 µs vurum süresi) yine en yüksek EAH değeri BCT elektrotlar ile yapılan işlemede elde edilmiştir. BCT elektrotlar EB elektrotlara göre 2.77 ve TB elektrotlara göre 1.55 kat daha hızlı aşınmıştır. TB elektrot ise EB elektrota göre 1.55 kat daha hızlı aşınmıştır (Şekil 7.9.).

Üçüncü grup deneylerde (6 A boşalım akımı ve 25 µs vurum süresi) de en yüksek EAH yine BCT elektrotlar ile yapılan işlemede elde edilmiştir. BCT elektrotlar EB elektrotlara göre 2.85 ve TB elektrotlara göre 1.63 kat daha hızlı aşınmıştır. TB elektrot ise EB elektrota göre 1.74 kat daha hızlı aşınmıştır (Şekil 7.10.).



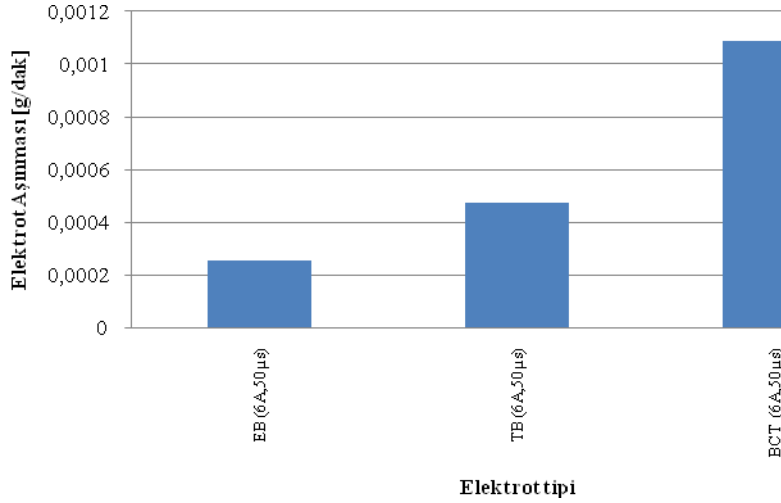
Şekil 7.9. 3 A ve 50 µs işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.10. 6 A ve 25 µs işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması

Dördüncü grup deneylerde (6 A boşalım akımı ve 50 µs vurum süresi) de en yüksek EAH yine BCT elektrotlar ile yapılan işlemede elde edilmiştir. BCT elektrotlar EB elektrotlara göre 4.28 ve TB elektrotlara göre 2.3 kat daha hızlı aşınmıştır. TB elektrot ise EB elektrota göre 1.86 kat daha hızlı aşınmıştır. Dördüncü grup deneylerdeki boşalım akımı ve vurum süresi ilk grup deneylerdekini iki katına yükseltilmiştir. Bu durum, EAH 'ı EB elektrotlar için

2 kat, TB elektrotlar için 2.24 kat ve BCT elektrotlar için ise 3.5 kat yükselmiştir(Şekil 7.11.).

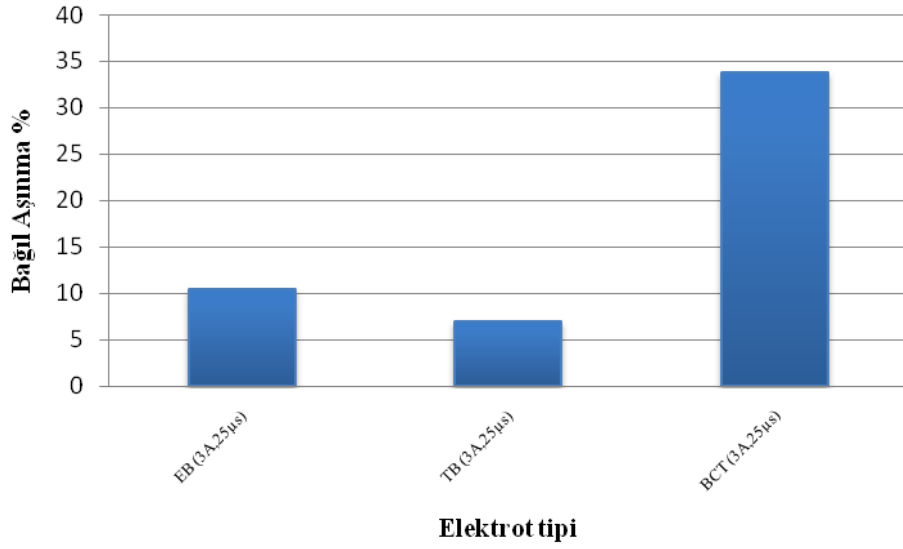


Şekil 7.11. 6 A ve 50 µs işleme koşullarında elektrot aşınma hızı değerlerinin karşılaştırılması

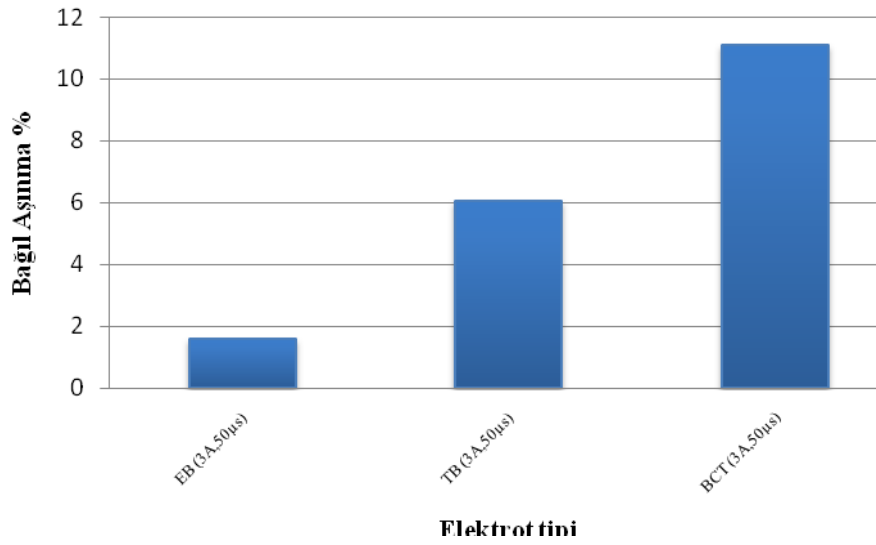
7.4. Bağlı Aşınma (BA)

İlk grup deneylerde (3 A boşalım akımı ve 25 µs) EB elektrot %10.4, TB elektrot % 6.9 ve BCT elektrotlar % 33.7 BA değerleri vermiştir (Şekil 7.12.).

İkinci grup deneylerde (3 A boşalım akımı ve 50 µs) EB elektrotlar için %1.59, TB elektrotlar için % 6.08 ve BCT elektrotlar için ortalama % 11.08 BA değerleri elde edilmiştir. Vurum süresinin iki katına yükseltilmesi ile EB elektrotlarda BA değerinin yaklaşık 6.5 kat, BCT elektrotlarda ise 3 kat düştüğü görülmüştür. TB elektrotlardaki BA değeri vurum süresinin yükseltilmesinden fazla etkilenmemiştir (Şekil 7.13.)



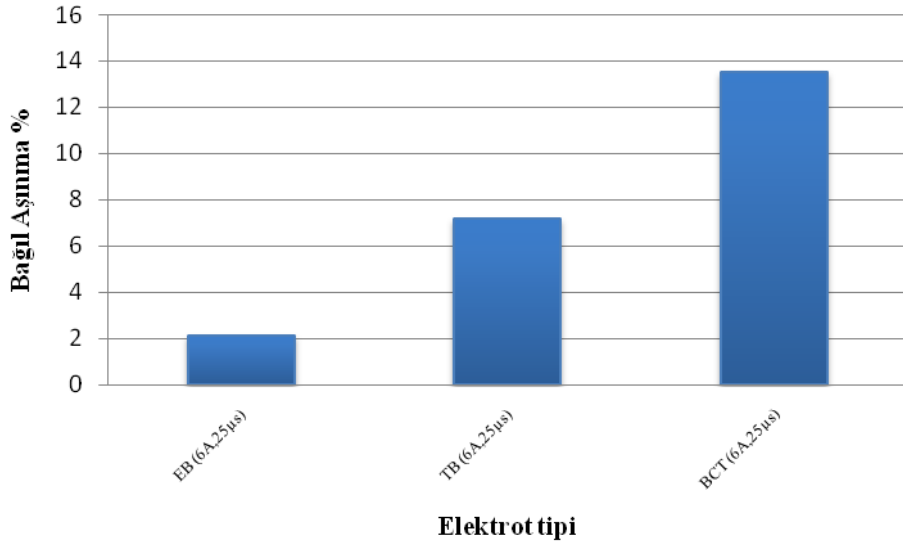
Şekil 7.12. 3 A ve 25 µs işleme koşullarında bağlı aşınma değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 7.13. 3 A ve 50 µs işleme koşullarında bağlı aşınma değerlerinin karşılaştırılması

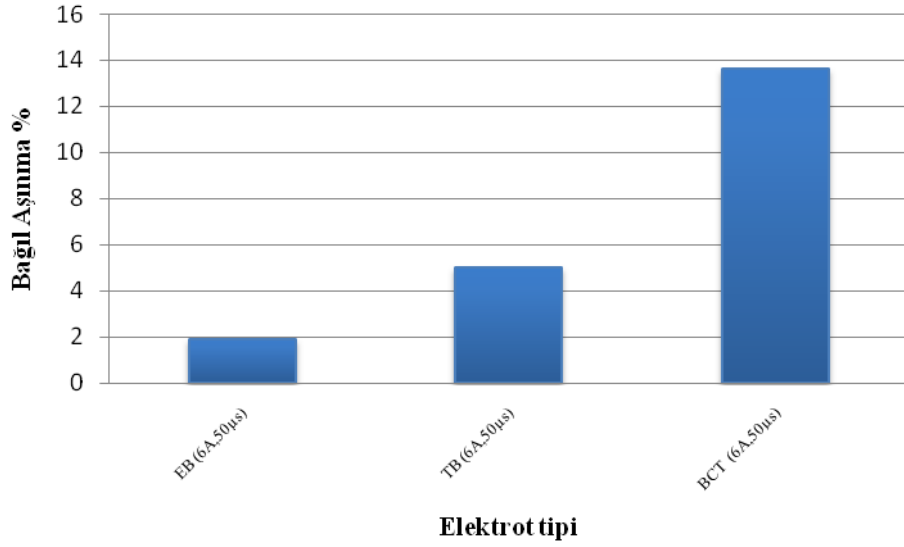
Üçüncü grup deneylerde (6 A boşalım akımı ve 25 µs) EB elektrotlar % 2.14, TB elektrotlar % 1.19 ve BCTE elektrotlar % 13.5 BA değerleri vermiştir. 25 µs vurum süresinde boşalım akımının 3A'den 6A'e yükseltilmesi ile BA değeri, EB elektrotlarda 4.8 kat, BTC elektrotlarda 2.49 kat azalırken TB elektrotlarda aynı değerlerde kalmıştır (Şekil 7.14.).

Dördüncü grup deneylerde (6 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresi) BA değerleri EB elektrotlar için % 1.88, TB elektrotlar için % 4.93 ve BCT elektrotlar içinde %13.6 olarak bulunmuştur. Vurum süresi 50 μ s için boşalım akımı 3 A' den 6 A' e yükseltildiğinde BA değerleri, EB elektrotlarda 1.18 kat, BCT elektrotlarda 1.22 kat artarken TB elektrotlarda 1.22 kat azalma görülmüştür (Şekil 7.15.).



Şekil 7.14. 6 A ve 25 μ s işleme koşullarında bağlı aşınma değerlerinin karşılaştırılması

Boşalım akımı 3 A' den 6 A' e ve vurum süresi de 25 μ s' den 50 μ s' e yükseltildiği durumda üç tip elektrot içinde BA değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Bu azalmanın, EB elektrotlar için 5.54, TB elektrotlar için 1.39 ve BCT elektrotlar için 2.48 kat olduğu görülmüştür. BA değerlerindeki azalmada temel etkinin vurum süresinin artışı ile olduğu EEİ teknolojisinde bilinmektedir.



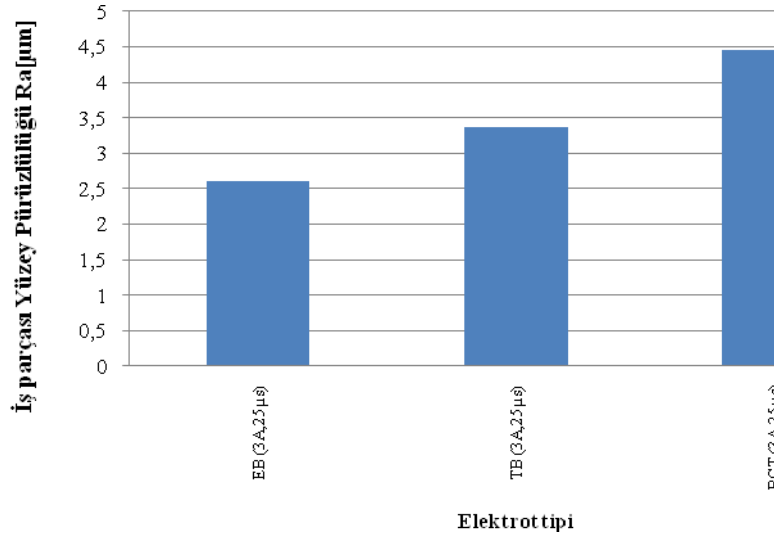
Şekil 7.15. 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında bağıl aşınma değerlerinin karşılaştırılması

Yapılan deneyler değerlendirildiğinde, dört grup deneyde de BA değerleri BCT elektrotlarla yapılan çalışmalarda yüksek çıkmıştır. Bu durum çalışmanın amaçları arasında bulunan iş parçası yüzeyine elektrot malzemesini alaşımlama hedefi ile uyumlu olduğu için iyileştirilmesi yönünde çaba sarf edilmemiştir.

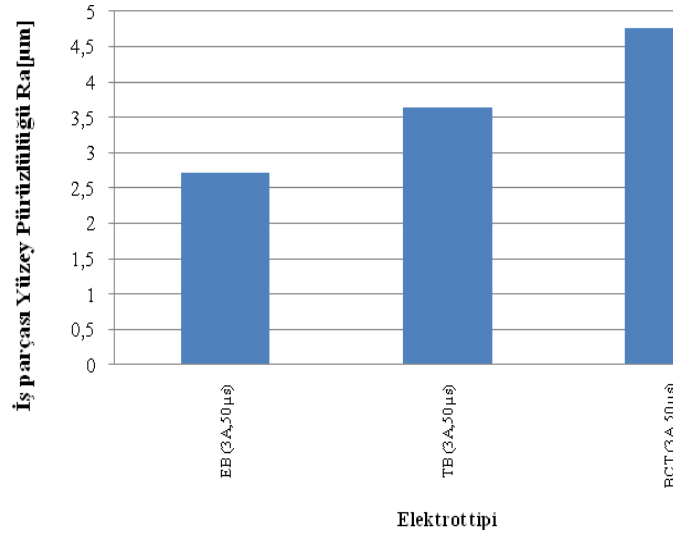
7.5. Yüzey Pürüzlülüğü

BCT elektrotlarla yapılan işlemlerde EAH değerlerinin yüksek çıkması yanında iş parçası yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri de yüksek çıkmıştır (Şekil 7.17-7.20). EB elektrot ile yapılan işlemede elde edilen en kaba yüzey (R_a 2.9 μ m), BCT elektrotlarla yapılan en ince yüzeyden daha düşük (R_a 4.46 μ m) yüzey pürüzlülük değeri vermiştir. İlk grup deneylerde kullanılan 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresi dördüncü grup deneyde her iki değerde iki katına (6 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresi) çıkarıldığında üç tip elektrotta da iş parçası yüzey pürüzlülük değerlerinin yaklaşık 1.1 kat arttığı görülmüştür. Bu değişimde etken sebep boşalım akımının ve vurum süresinin artışına bağlı olarak vurum başına düşen boşalım enerjisinin artması ve bunun sonucunda iş parçası yüzeyinde oluşan krater boyutlarının (derinlik ve

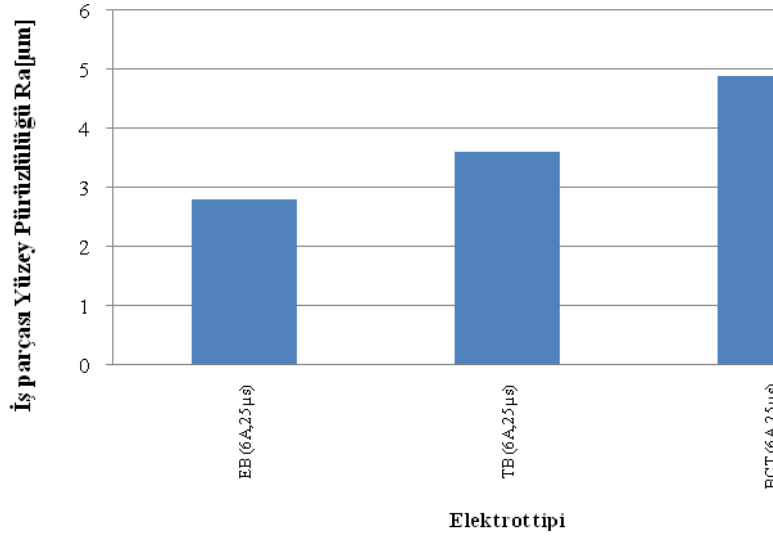
çap) büyümesidir [49].



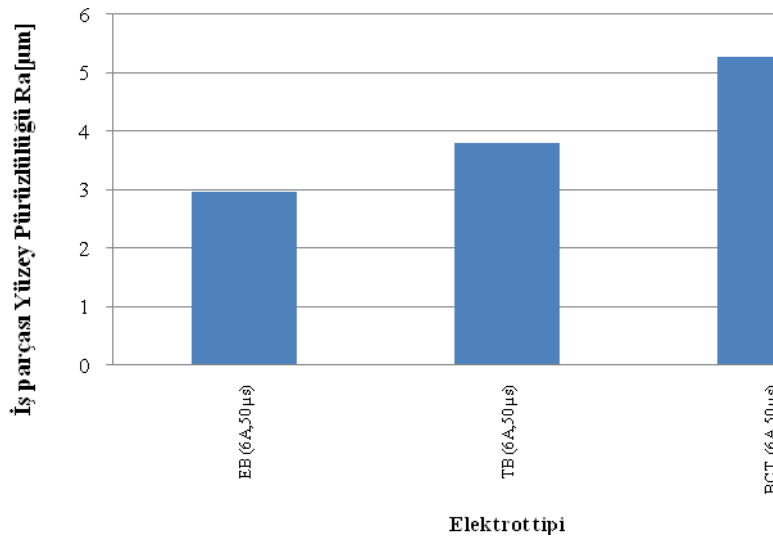
Şekil 7.16. 3 A ve 25 µs işleme koşullarında elektrot tipleri için iş parçasının yüzey pürüzlülüğü



Şekil 7.17. 3 A ve 50 µs işleme koşullarında elektrot tipleri için iş parçasının yüzey pürüzlülüğü



Şekil 7.18. 6 A ve 25 μ s işleme koşullarında elektrot tipleri için iş parçasının yüzey pürüzlülüğü

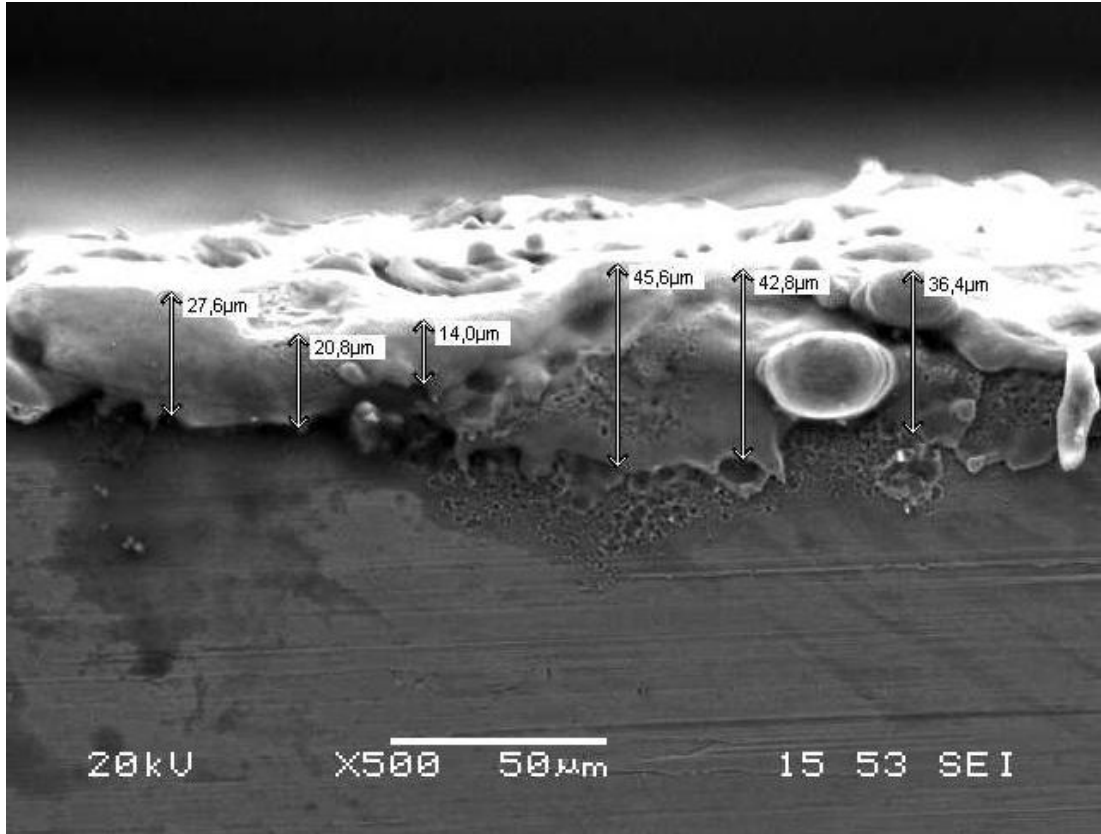


Şekil 7.19. 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında elektrot tipleri için iş parçasının yüzey pürüzlülüğü

7.6. Yüzeye Alaşımlanan Katman Kalınlığı

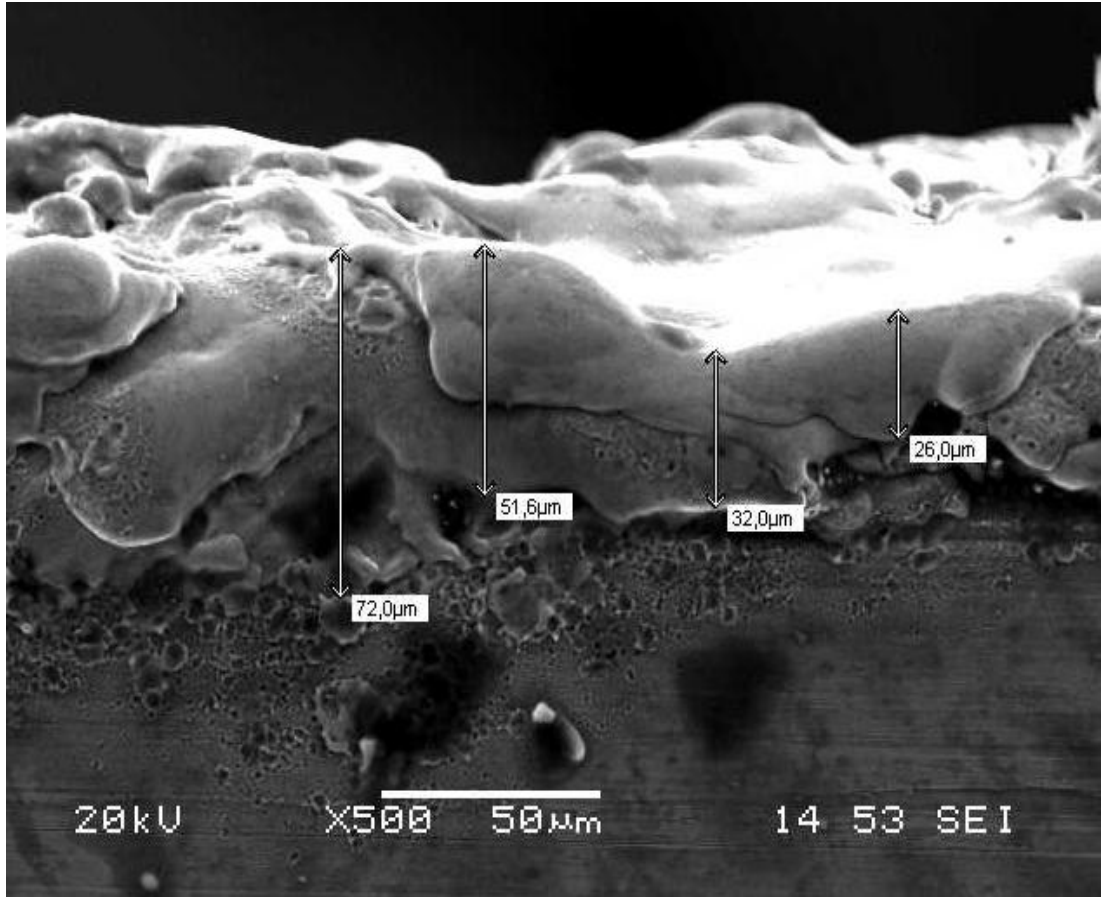
EB elektrotlarla yapılan işlemede iş parçası yüzeyine alaşımlanan elektrot malzemesinin kalınlığı, boşalım akımı ve vurum süresinin artışına paralel

olarak artmıştır. İlk grup deneylerdeki iş parçasının yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendiğinde 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresinde iş parçası yüzeyinde yaklaşık 32 μ m kalınlığında ısıdan etkilenen bölge olduğu görülmüştür (Şekil 7.20).



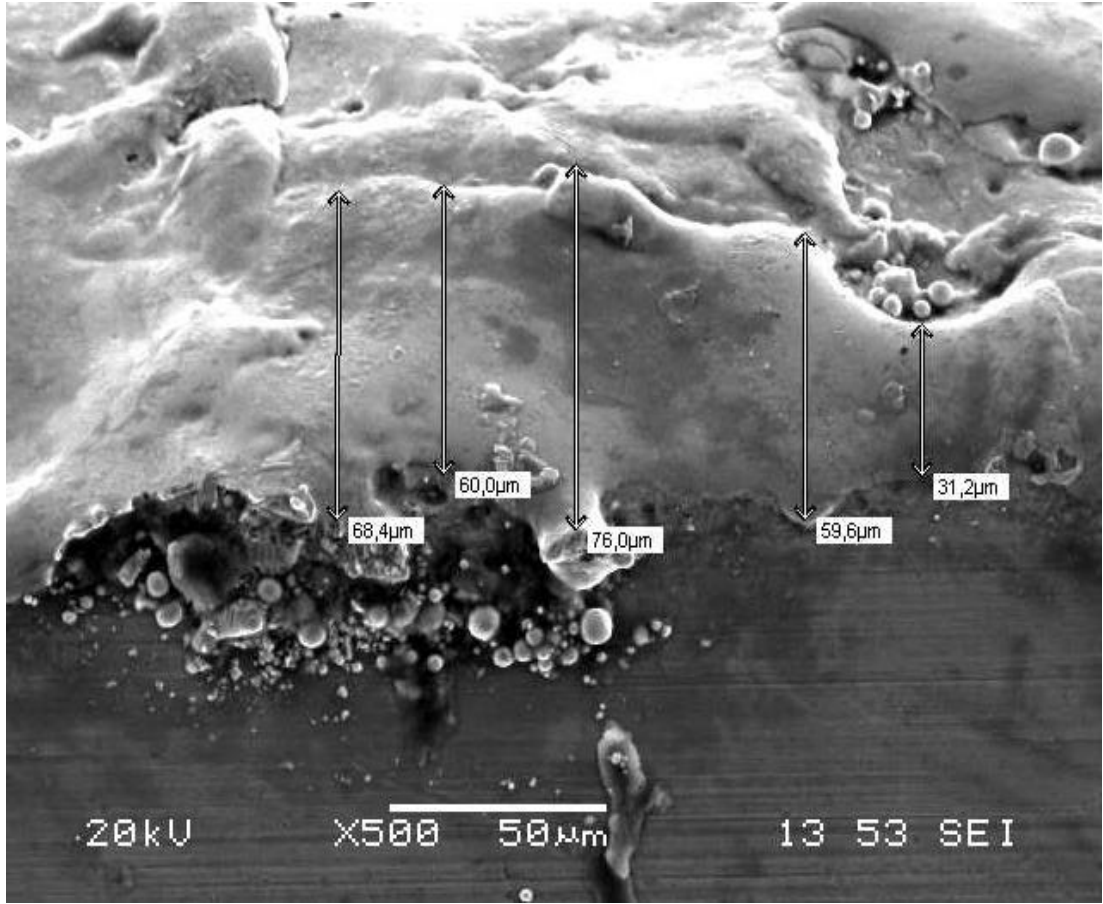
Şekil 7.20. EB elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen iş parçası yüzeyi

EB elektrotlarla 6 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresine çıkıldığında iş parçası yüzeyinde ısıdan etkilenen bölge kalınlığının ortalama 45 μ m' ye çıktığı görülmüştür (Şekil 7.21).



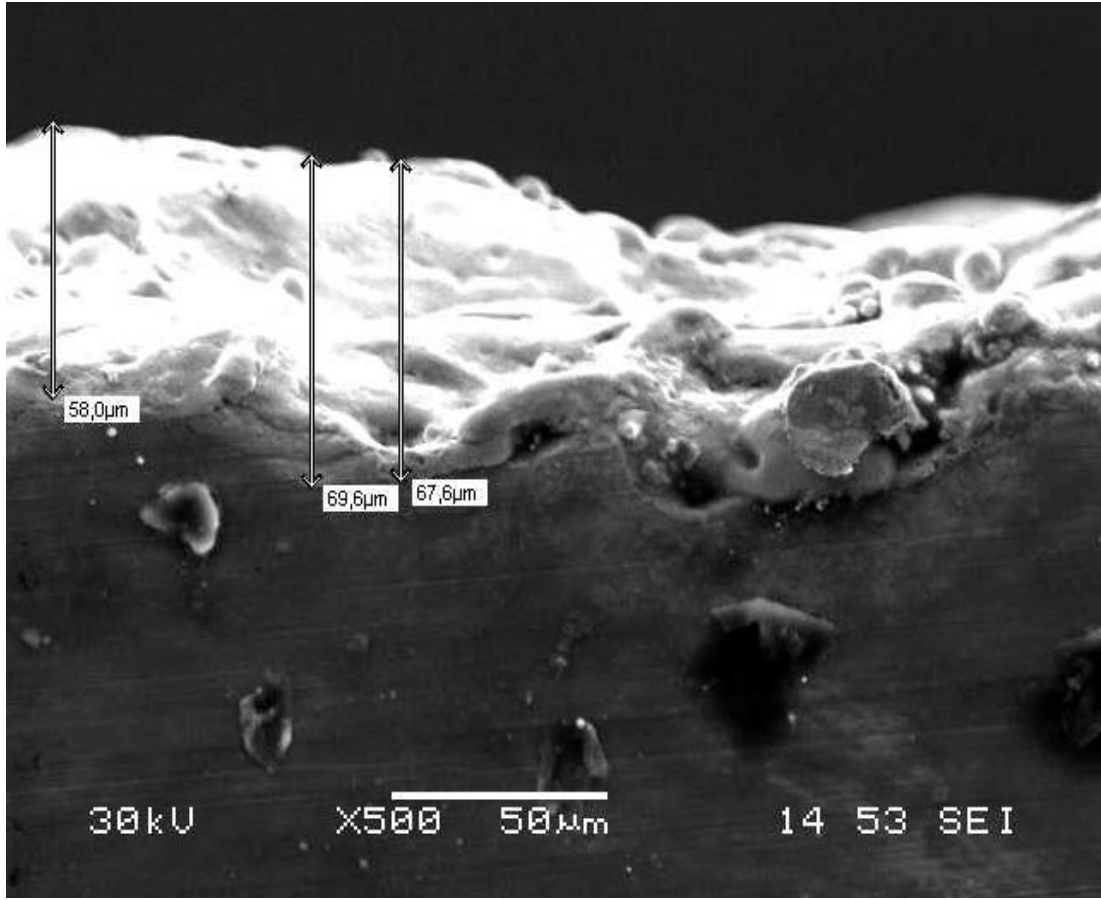
Şekil 7.21. EB elektrotlarla 6 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresinde yapılan işlemede ısıdan etkilenen İş parçası yüzeyi

TB elektrotlarla 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresinde yapılan çalışmada yüzeye ortalama 59 μ m elektrot malzemesinin alaşımlandığı tespit edilmiştir (Şekil 7.22).



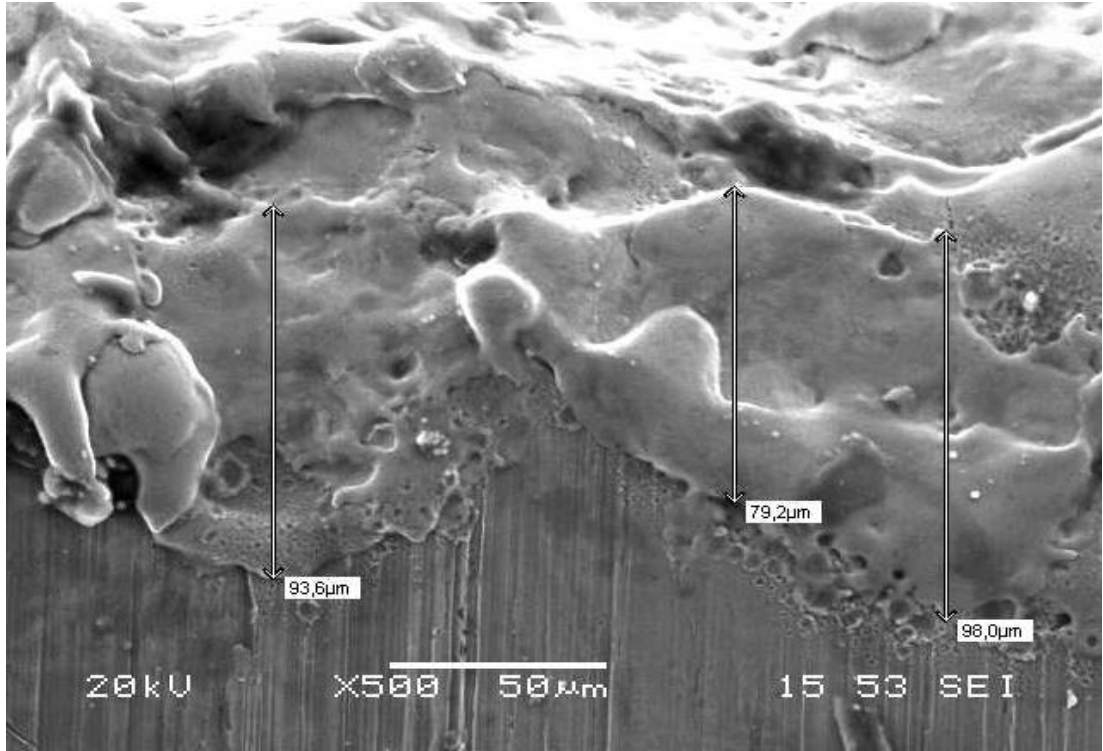
Şekil 7.22. TB elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen iş parçası yüzeyi

TB elektrotlarla 6 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresinde yapılan deneylerde yüzeye ortalama 65 μ m elektrot malzemesinin alaşımlandığı tespit edilmiştir (Şekil 7.24). TB elektrotlarla yapılan deneylerde de boşalım akımının ve vurum süresinin artırılması ile yüzeye alaşımlanan elektrot malzemesi kalınlığı artmıştır.



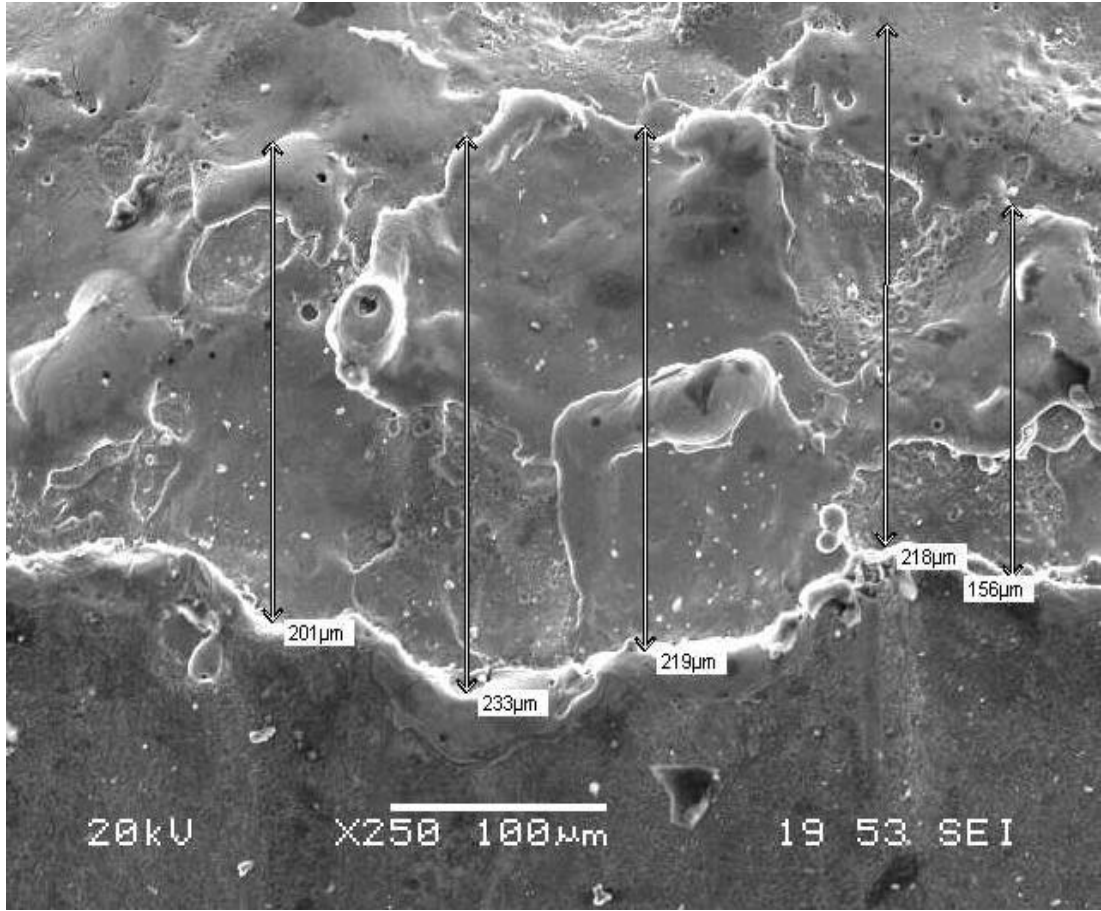
Şekil 7.23. TB elektrotlarla 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen iş parçası yüzeyi

BCT elektrotlarla 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresinde yapılan deneylerde yüzeye ortalama 90 μ m elektrot malzemesinin alaşımlandığı tespit edilmiştir (Şekil 7.24.)



Şekil 7.24. BCT elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen iş parçası yüzeyi

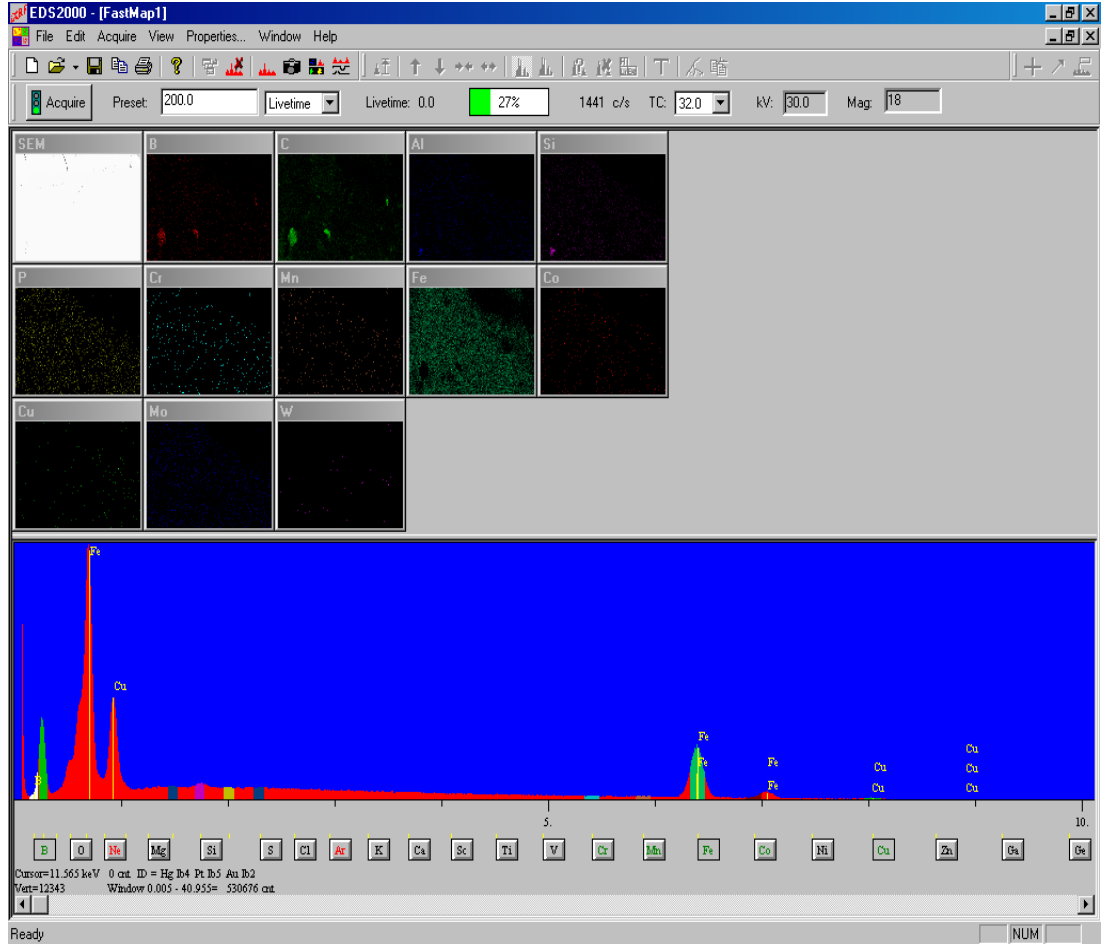
BCT elektrotlarla 6 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresinde yapılan deneylerde yüzeye ortalama 200 μ m elektrot malzemesinin alaşımlandığı tespit edilmiştir (Şekil 7.25). TB elektrotlarla yapılan çalışmada da boşalım akımının ve vurum süresinin artırılmasıyla yüzeye alaşımlanan elektrot malzemesi kalınlığı artmıştır.



Şekil 7.25. BCT elektrotlarla 6 A ve 50 μ s işleme koşullarında ısıdan etkilenen iş parçası yüzeyi

Sonuç olarak yüzeye alaşımlanan ve ısıdan etkilenen bölgeler incelendiğinde, her üç elektrot için de boşalım akımı ve vurum süreleri arttırıldığında yüzeye alaşımlanan katman kalınlığının arttığı tespit edilmiştir.

Yüzeylerde alaşımlanan malzemelerin cins ve miktarlarının tayini için EDS (X ışınları dağılımı) analizi yapılmıştır. X ışınları dağılımı (EDS) analizi SEM görüntüsü alınan 1000 büyütmeli BCT elektrotlarla 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresinde yüzeyler üzerinden yapılmış (Şekil 7.26) ve en yüksek tepe noktaları belirlenmiş, daha sonra ise yüzey haritası çıkarılmıştır (Şekil 7.27).



Şekil 7.27. BCT elektrotlarla 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında EDS analizi ile belirlenen yüzey haritası

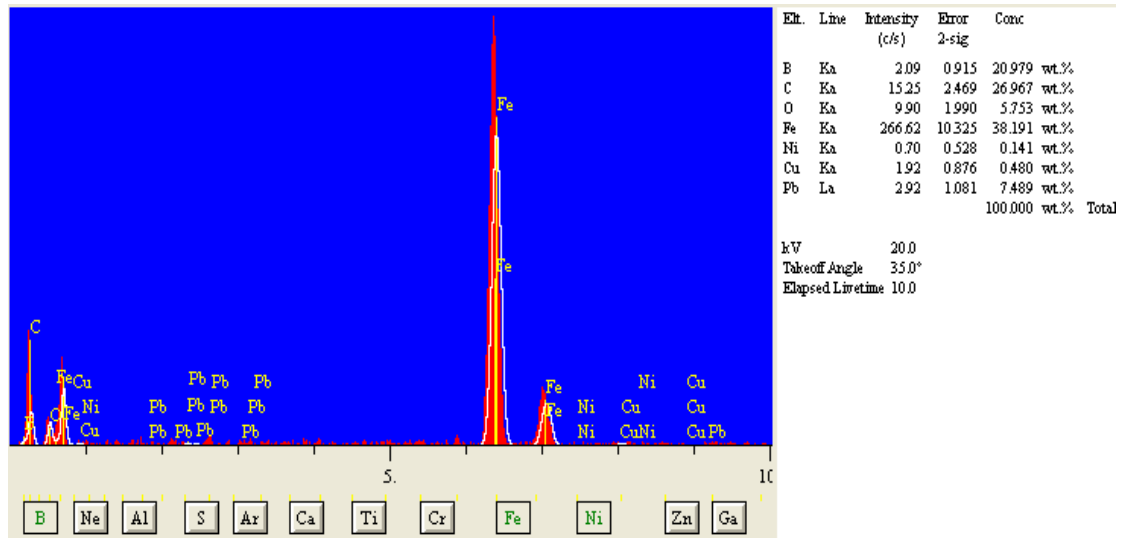
BCT elektrotlarla 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresi koşullarında işlenen iş parçası yüzeyinin XRF (X-Ray Fluorescence) ile yapılan analizinde (Çizelge 7.3.) beklendiği gibi çelik iş parçasının temel elementi Fe %81 (hacimsel) en yüksek çıkmıştır. Elektrot üretiminde kullanılan %80 bakırın sadece %9.5' u yüzeye CuO formunda alaşımlanırken, %20 kullanılan bor karbür içindeki borun yüzeye alaşımlanması B₂O₃ formunda %6.6 'ya erişmiştir. Alaşımlanan borun yüzeyin sertliği açısından nasıl bir değişim sağladığının tespiti için sertlik ve aşınma testleri uygulanmıştır.

Çizelge 7.3. İş parçası yüzeyine alaşımlanan malzeme dağılımı

% Fe ₂ O ₃	% CuO	% B ₂ O ₃	% SiO ₂	% O	% Al ₂ O ₃	% SO ₃	% CaO	Toplam
81,7	9,5	6,6	1,0	0,689	0,260	0,144	0,111	100,040

7.7. Sertlik

BCT elektrotlarla yapılan işlemede iş parçasının yüzeyine ince bir tabaka halinde elektrot malzemesi alaşımlanmıştır (Şekil 7.28.). Bu sebepten yüzey sertlik incelemesi mikro sertlik skalasında. Şekil 7.29' daki grafik incelendiğinde üç elektrot tipi ve dört ayrı işleme koşulu için iş parçası yüzey sertliği BCT elektrotlarla yapılan işlemede en yüksek değerde bulunmuştur.



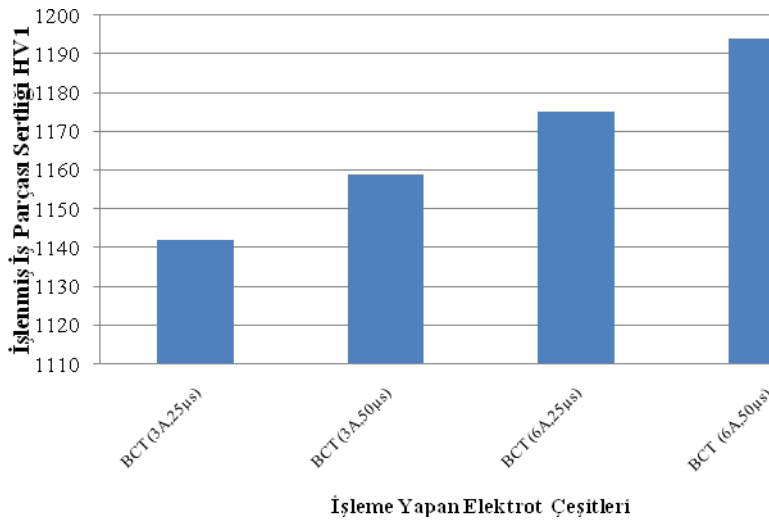
Şekil 7.28. BCT elektrotlarla yapılan 3 A ve 25 µs işlemede koşullarında iş parçası yüzeyinin XRF fotoğrafı

BCT elektrotlarla yapılan işlemede iş parçası yüzeyinde en yüksek sertlik değeri 6 A boşalım akımı ve 50 µs vurum süresinde elde edilmiştir (1194 HV1). İlk grup deneyde BCT elektrotlarla yapılan işlemede iş paçası yüzey pürüzlülüğü 4.46 Ra µm iken sertlik 1142 HV1 çıkmış, dördüncü grup

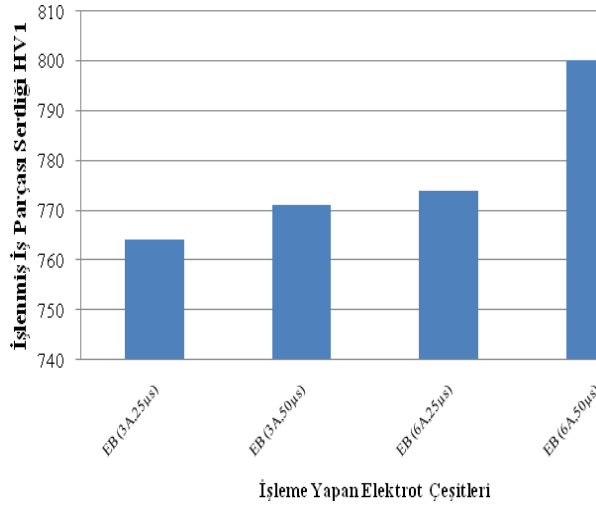
deneyde ise pürüzlülük 5.28 Ra μ s iken sertlik 1194 HV1' e yükselmiştir. İlk deneyle dördüncü deney arasında sertlik 1.04 kat artarken iş parçası yüzey pürüzlülüğü de 1.18 kat artmıştır (Şekil 7.29).

Benzer durum EB elektrotlarla yapılan işlemede de görülmüştür. İlk deney için iş parçası yüzey pürüzlülüğü 2.6 Ra μ m iken sertlik 764 HV1 ölçülmüştür. Dördüncü grup işleme için pürüzlülük 2.96 Ra μ m ve sertlik 800 HV1 olmuştur. Sertlik değerleri 1.04 kat artarken pürüzlülük değeri 1.13 kat artmıştır (Şekil 7.30).

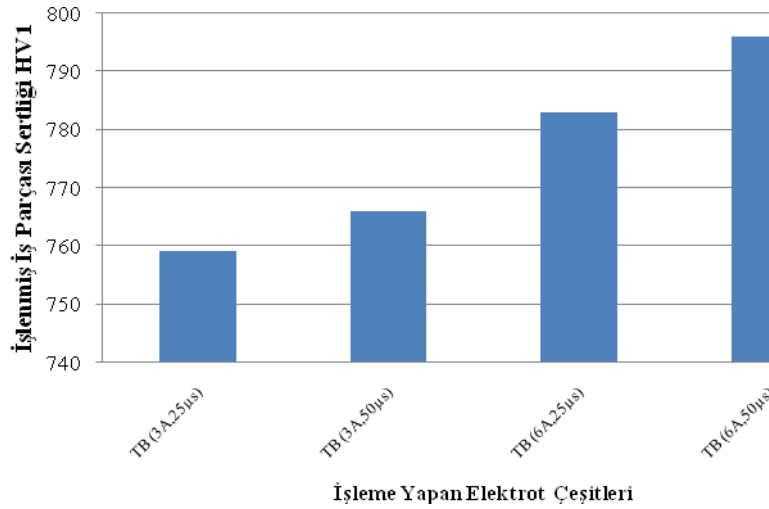
TB elektrotlarla yapılan ilk çalışmada iş parçası yüzey pürüzlülüğü 3.36 Ra μ m iken sertlik 759 HV1 ölçülmüş dördüncü grup işleme için iş parçası yüzey pürüzlülüğü 3.8 Ra μ m iken sertlik 796 HV1 olarak ölçülmüştür. Sertlik ve pürüzlülük değerindeki artış EB ve BTC elektrotların değişimi ile aynı çıkmıştır (Şekil 7.31).



Şekil 7.29. BCT elektrotlarla yapılan işlemlerde iş parçası yüzey sertliği değişimi



Şekil 7.30. EB elektrotlarla yapılan işlemlerde iş parçası yüzey sertliği değişimi

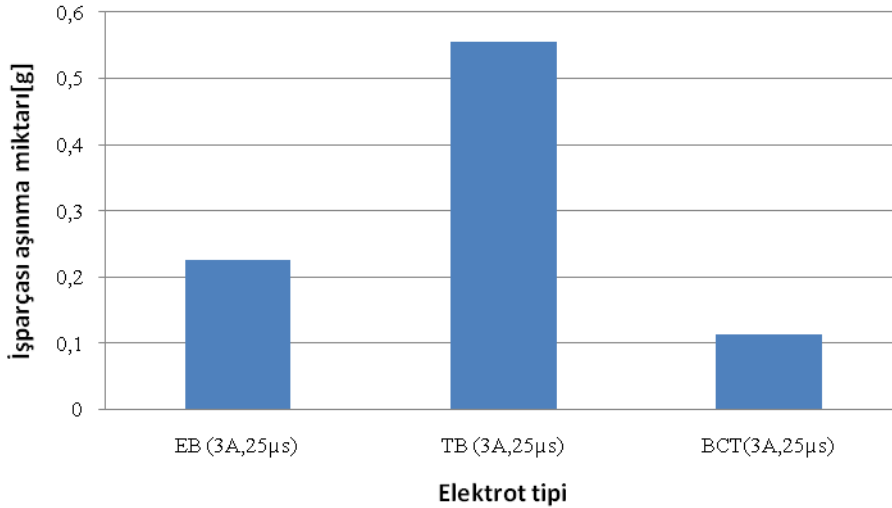


Şekil 7.31. TB elektrotlarla yapılan işlemlerde iş parçası yüzey sertliği değişimi

7.8. İş Parçası Aşınma Değerleri

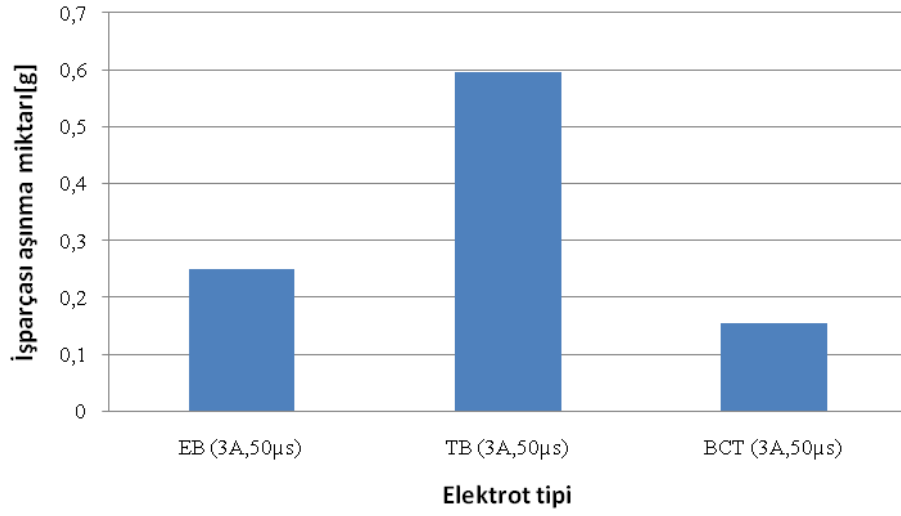
Bu çalışmada, EB elektrotla yapılan işleme (3 A boşalım akımı ve 25 µs) iş parçası yüzeylerinin aşınması referans alınmıştır. EB elektrotlarla yapılan işlemede elde edilen iş parçası yüzeylerinde BCT elektrotlarla işlemede elde edilenlere göre ağırlık olarak 2 kat fazla aşınma görülmüştür, EB ile elde

edilen yüzeylerde TB elektrotla elde edilenlere göre % 40 daha az aşınma görülmüştür (Şekil 7.32.). TB elektrotla yapılan ikinci işlemede (3 A boşalım akımı ve 50 μ s vurum süresi) EB elektrotun 2.38 katı, BCT elektrotla yapılan işleminin 3.86 katı fazla aşınma meydana gelmiştir (Şekil 7.33.).

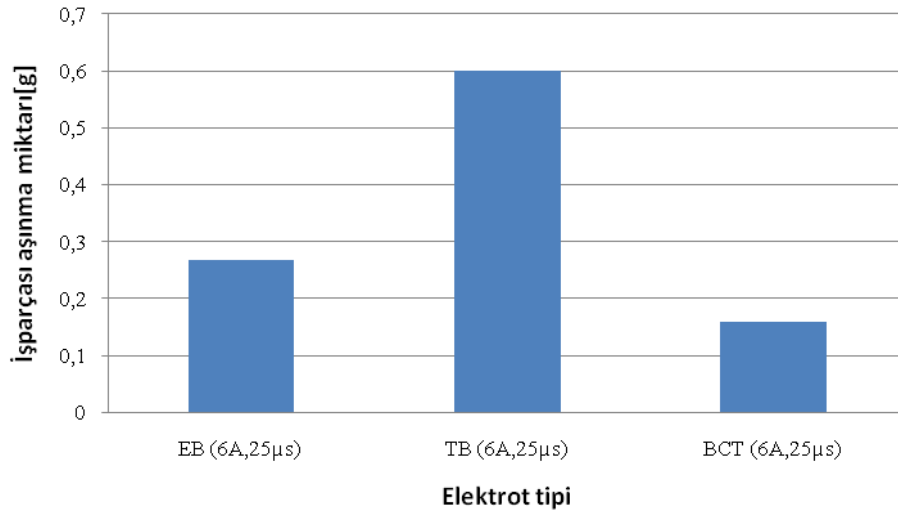


Şekil 7.32. 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında iş parçasının aşınma değerleri

Üçünü ve dördüncü işlemlerin her ikisinde de TB elektrotlarla yapılan işlemlerde EB elektrotlara göre 2.24 kat ve BCT elektrotlara göre 3.8 kat fazla aşınma olmuştur (Şekil 7.34 - 7.35). Sonuçta üç tip elektrot için yapılan işlemlerin tümünde en büyük aşınma değeri TB elektrotlarla yapılan işlemlerde olmuştur. BCT elektrotlarla yapılan işlemede yüzeye bor oksit elektrot malzemesi alaşımlandığı için aşınma miktarının az çıkması beklenen bir sonuçtur. Ancak TB elektrotlarla yapılan işlemde de iş parçası yüzeyine yumuşak bakır tozları alaşımlandığı için TB elektrotlarla yapılan işlemlerde aşınma değerlerinin yüksek çıktığı düşünülmektedir

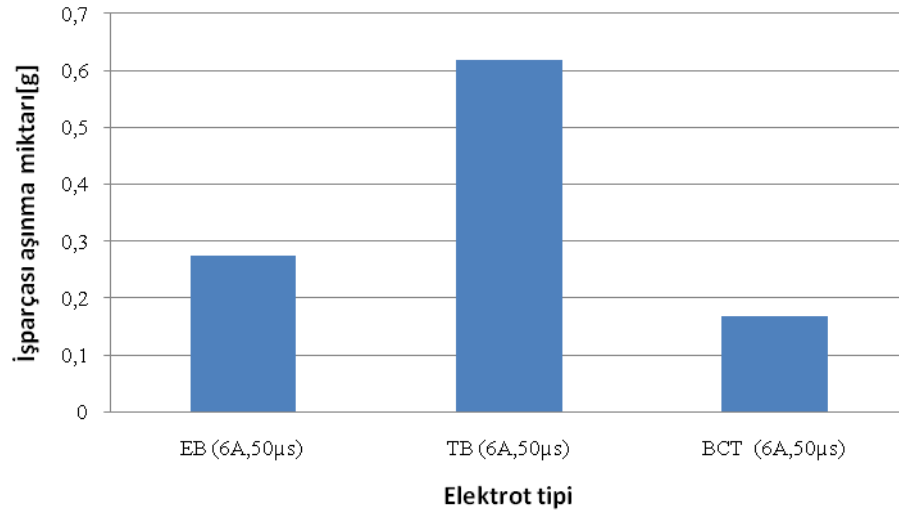


Şekil 7.33. 3 A ve 50 µs işleme koşullarında iş parçasının aşınma değerleri



Şekil 7.34. 6 A ve 25 µs işleme koşullarında iş parçasının aşınma değerleri

Dört deney tipi kendi içlerinde karşılaştırıldığında en küçük iş parçası aşınması BCT elektrotlarla yapılan birinci tip deneyde çıkmıştır.



Şekil 7.35.6 A ve 50 µs işleme koşullarında
iş parçasının aşınma değerleri

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, EEİ için T/M yöntemi ile bor karbür – bakır karışımından (BCT), saf bakır tozlarından (TB) ve elektrolitik bakırdan (EB) elektrotlar üretilmiştir. Üç farklı tip elektrot ve dört farklı işleme koşulu için, deneylerde elde edilen İİH, EAH, BA, iş parçası yüzey pürüzlülüğü, iş parçasının yüzey sertliği, iş parçası yüzey direnci ve iş parçası yüzeyindeki alaşımlama kalınlıkları karşılaştırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, elektrot olarak kullanılabilecek nitelikte ve en yüksek B₄C içeren elektrotun ağırlık olarak % 80 Cu ve % 20 B₄C içerdiği tespit edilmiş ve tüm BCT elektrotlar bu kompozisyonda hazırlanmıştır. Bu elektrotlarla düşük akım yoğunluğu ve düşük vurum sürelerinde (3 A, 25 µs) yapılan deneylerde iş parçası yüzeyine 30 µm kalınlığında elektrot malzemesi alaşımlanabilmiştir. Akım yoğunluğu ve vurum süresi arttırıldığında (6 A, 50 µs) iş parçası yüzeyinde alaşım kalınlığı 140 µm' ye kadar yükselmiş, İİH artmış yüzey pürüzlülük değeri yükselmiş ve yüzey mikro sertlik değeri yükselmiştir.

Üç elektrot tipi ve dört farklı işleme koşulunda da 1mm sabit bir işleme derinliği için en kısa işleme süresi (26 dak) EB elektrotla yapılan işlemede görülmüştür. Buna karşın BCT elektrotlarla yapılan tüm deneylerde en uzun işleme süresi (327 dak) tespit edilmiştir. Bu sonuçlara paralel olarak en yüksek İİH değerleri EB elektrotlarla, en düşük İİH değerleri ise BCT elektrotlarla yapılan deneylerde elde edilmiştir. EB elektrotlarla BCT elektrotlara göre % 87 daha hızlı işleme sağlanmıştır.

EB elektrotlarla yapılan işlemlerde en düşük (0,00013 g/dak), BCT elektrotlarla ise en yüksek (0,00109 g/dak) EAH değerleri elde edilmiştir. BCT elektrotlarda görülen aşırı elektrot aşınması EEİ uygulamaları için

istenmeyen bir sonuç olmasına karşın yapılan çalışmanın amacı, elektrot malzemesini iş parçası yüzeyine alaşımlamak olduğu için EAH değerini düşürmek için özel bir çaba sarf edilmemiştir.

BCT elektrotlarla düşük akım yoğunluğu ve düşük vurum süreli deneylerde BA değerleri % 10.4 gibi yüksek bir değerde iken EB elektrotlarla yapılan çalışmada dört işleme koşulunda da en düşük BA değerleri % (2.8) elde edilmiştir.

EB elektrot kullanılan deneylerde iş parçası yüzey pürüzlülük değeri en küçük çıkarken ($2.6 \mu\text{m Ra}$), BCT elektrotlar en yüksek değerleri ($8.4 \mu\text{m Ra}$) vermiştir.

BCT elektrotlarla yapılan işlemede, elektrot malzemesini oluşturan bor - karbür iş parçası yüzeyine alaşımlandığı için en yüksek yüzey sertlik değerleri (1194 HV1) elde edilmiştir. Buna karşın TB elektrotlarla yapılan işlemlerde sertlik % 36 daha düşük (759 HV1) çıkmıştır.

SEM, EDS analizleri ile XRF ve optik mikroskop incelemelerinden BCT elektrotlarla yapılan deneylerde iş parçası yüzeyinde % 81 Fe_2O_3 , % 9.06 CuO ve % 6.6 B_2O_3 bileşiği görülmüştür. B_2O_3 'ün varlığı iş parçası yüzeyinde bir bor bileşiğinin oluşturulabildiğini (elektrot malzemesinin iş parçası yüzeyine transfer edilebildiğini) göstermiştir. Bor elementinin alaşımlandığı iş parçası yüzeylerinin diğer elektrotlarla oluşturulmuş yüzeylere göre daha sert olduğu tespit edilmiştir. Yüzeye alaşımlanan elektrot malzemelerinin diğer bir etkisi de iş parçası yüzeyinde mekanik aşınma direncini arttırmasıdır. Üç elektrot tipi ve farklı işleme koşullarında en yüksek iş parçası mekanik aşınma direnci BCT elektrotlarla yapılan işlemlerde tespit edilmiştir. Buna karşın en düşük mekanik aşınma direnci TB elektrotlarla yapılan çalışmada görülmüştür.

8.2. Öneriler

- Elektrot içersine yağ, hava gibi değişik katkı maddeleri emdirilerek işlemeye olan etkisi çalışılmalıdır.
- Elektrot üretim yöntemi olarak T/M ve enjeksiyon ile elektrot üretilmeli, elektrotta oluşacak yoğunluğun işleme parametrelerine etkisi incelenmelidir.
- Daha küçük çapta elektrot tasarlanarak, sinterlenmemiş, yarı sinterlenmiş ve sinterlenmiş elektrotların etkileri karşılaştırılmalıdır.
- Üretilen elektrotlardan nano boyutlu toz üretimi denenmelidir

KAYNAKLAR

1. Springborn, R.K., "Non–Traditional Machining Processes", ***American Society of Tool and Manufacturing Engineers***, Dearborn, Michigan, 105-133 (1967).
2. Uhlman, E., Piltz, S., Doll, U., "Machining of micro/miniature dies and models by electrical discharge machining-recent development", ***Journal of Materials Processing Technology***, 167: 488-493 (2005).
3. Masuzawa, T., "State of the art of machining", ***Annals of the CIRP***, 49 (2): 473-488 (1993).
4. Pandey, P.C., Shan, H.S., "Modern Machining Processes", ***Tata McGraw Hill Publishing Company Limited***, New Delhi, 84-114 (1980).
5. Özgedik A., "Elektro-erozyon ile işlemede iş parçasına uygulanan titreşimlerin işleme performansına etkilerinin incelenmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, (2009).
6. Tsai, H.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., "EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 43: 245-252 (2003).
7. Dursun K., "Elektro-erozyon ile işlemede tel demeti elektrodun performansının deneysel ve teorik olarak incelenmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, (2007).
8. Wang, Z.L., Fang, Y., Wu, P.N., Zhao, W.S., Cheng, K., "Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode", ***Journal of Material Processing Technology***, 129: 139-142 (2002).
9. Li L., Wong, Y.S., Fuh, J.Y.H., Lu, L., "EDM performance of TiC / copper – based sintered electrodes", ***Material & Design***, 22: 669-678 (2001).
10. Moro, T., Mohri, N., Otsubo, H., Goto, A., Saito, N., "Study on the surface modification system with electrical discharge machine in the practical usage", ***Journal of Material Processing Technology***, 149: 65-70 (2004).

11. Samuel, M.P., Philips, P. K., "Powder metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 37(11): 625-633 (1997).
12. Zaw, M., Fuh, J. Y. H., Nee, A.Y.C., Lu, L., "Formation of a new EDM electrode material using sintering techniques", ***Journal of Material Processing Technology***, 89-90: 182-186 (1999).
13. Simao J., Aspinwall D., El-Menshawy F., Meadows K., "Surface alloying using PM composite electrode materials when electrical discharge texturing hardened AISI D2", ***Journal of Material Processing Technology***, 127: 211-216 (2002).
14. Yaman K., "Elektroerozyon ile işlemede polimer matrisli iletken toz takviyeli kompozit elektrot ile işlemenin deneysel ve teorik olarak incelenmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, (2007).
15. Tsai, H.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., "EDM P of Cr / Cu based composite electrodes", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 43: 245-252 (2003).
16. Luis, C.J., Puertas, I., Villa, G., "Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide", ***Journal of Material Processing Technology***, 164-165: 889-896 (2005).
17. Simao, H.G., Lee, D.K., Aspinwall, R.C., Dewes, E.M., "WorkPiece surface modification using electrical discharge machining", ***International Journal of Machine Tools & Manufacture***, 43: 121-128 (2003).
18. Çoğun, C., Özerkan, B., "Effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining (EDM)", ***Gazi University Journal of Science***, 18(2): 211-228 (2005).
19. Puertas I., Luis, C.J., "A study on the electrical discharge machining of conductive ceramics", ***Journal of Material Processing Technology***, 153-154: 1033-1038 (2004).
20. Puertas, I., Luis, C.J., Villa, G., "Spacing roughness parameters study on the EDM of silicon carbide", ***Journal of Material Processing Technology***, 164-165: 1590-1596 (2005).

21. Amorim, F.L., Weingaertner, W.L., "Die-sinking electrical discharge machining of a high-strength copper-based alloy for injection molds", **ABCM**, 26: 2-137 (2004).
22. Özerkan, B., "Atomize demir ve dendritik bakır tozlarının görünür yoğunluğunun farklı boyutlardaki toz ilavesiyle değişiminin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 12-40, Ankara, (2003).
23. Walton, D.J., "Electrically Conductive Polymers", **Materials and Design**, 11: 3 (1990).
24. Çoğun, C., Akaslan, Ş., "The effect of machining parameters on tool wear and machining performance in EDM", **KSME International Journal**, 16 (1): 46-59 (2002).
25. Atak Y., "Kendinden yağlamalı grafit katkılı bronz yatakların aşınma davranışının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2009).
26. Gemalmayan, N., "Sürtünme malzemelerinin özelliklerinin deneysel incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 10-50 (1984).
27. Demirci, A.H., "Ötektoid altı alaşımsız çeliklerin ısıtılma işlemlere bağlı olarak aşınma davranışlarının incelenmesi ve optimizasyonu", Doçentlik Tezi, **Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 26-35 (1982).
28. Çelik, H., "Kaynak edilebilen kobalt ve demir esaslı alaşımların yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışları", Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 33-41 (1991)
29. Can, A.Ç., "Makine Elemanları Tasarımı", **Birsan Yayınevi**, İstanbul, 250-350 (2006).
30. Özdemir A., "Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerlerinin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, (2006).
31. German M.R., "Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing" Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., **New Jersey**, 195-228 (2005).
32. German M.R., "Sintering Theory and Practice", **John Wiley and Sons. Inc.**, Canada, 10-20 (1996).

33. Moore, M.A., "Review of a two-body abrasive wear", **Wear**, 27: 1-17 (1974).
34. Date, S.W., Malkin, S., "Effect of grid size on abrasion with contact abrasives", **Wear**, 40: 252-264 (1976).
35. Kılıç, E.F., "Aluminyum alaşımlı SiC parçacık takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemiyle üretimi ve aşınma davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 29-36 (2007).
36. Abhok, K.V., "Comparative tendencies for metal loss by abrasive wear", **Impact Erosion and Arc Erosion Wear**, 40: 305-314 (1978).
37. Patel, M.R., Barrufet, M.A., Eubank, P.T., DiBitonto, D.D., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model", **Journal of Applied Physics**, 66 (9): 4104-4111 (1989).
38. Urtekekin L., "Toz enjeksiyon kalıplanmış steatit seramiklerin özelliklerine kalıplama ve sinterleme parametrelerinin etkisinin incelenmesi", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 80–82 (2008).
39. Özer, M. ve Orhan, M., "Lazer kırınım yöntemiyle zeminlerin tane büyüklüğü dağılımının belirlenmesi genel ilkeler ve örnek hazırlama yöntemi", **G.Ü M.M. F. Dergisi**, 22(2): 217-226 (2007).
40. Hesseman, R., "Particle size analysis in ceramics manufacture", **International Ceramics**, 1: 31-34 (2002).
41. Konert, M., Vanderberghe, J., "Comparsion of laser grain size analysis with pipette and sieve anakysis: a solution for the underestimation of the clay fraction", **Sedimentology**, 44: 523-535 (1997).
42. Psarras, G.C., Manolakaki, E., Tsangaris, G.M., "Dielectric dispersion and ac conductivity in-iron particles loaded-polmer composites", **Composites (Part A)**, 34: 1187–1198 (2003).
43. İzçiler, M., "Yüksek krom alaşımlı dökme demirlerin farklı sıcaklıktaki abrasiv aşınma davranışına alaşım katkı oranının ve ısı işlem şartlarının etkileri", Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 50-122 (1997).

- 44.Çelik, H., “Kaynak edilebilen kobalt ve demir esaslı alaşımların yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışları”, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 3-35 (1992).
- 45.Yılmaz, F., “Sürtünme ve Aşınma”, **Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı**, Cilt 1, İstanbul, 229-246 (1997).
- 46.Türker, M., Kurt, A., Gülenç, B., Karataşoğlu, F., “Monoblok tekerlerin aşınan kısımlarının MAG kaynağı ile yapılan dolgu metalinin aşınma davranışlarının incelenmesi”, **2. Uluslararası Kaynak Teknolojisi Sempozyumu IWTS 98**, İstanbul, 232-239 (1998).
- 47.Tabur M., “Bor karbür kaplanmış AISI 8620 ve Hardox 400 çeliklerinin abrasiv aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 80–82 (2008).
- 48.Lee, S.H., Li, X.P., “Study of the effect of machining parameters on the machining characteristics in electrical discharge machining of tungsten carbide”, **Journal of Materials Processing Technology**, 115: 344–358 (2001).
- 49.Hocheng, H., Lei, W.T., Hsu, H.S., “Preliminary study of material removal in electrical-discharge machining of SiC/Al”, **Journal of Materials Processing Technology**, 63: 813-818 (1997).
- 50.Küçüktürk G., “Elektro erozyon ile iletken olmayan seramiklerin işlenmesi için yöntem geliştirilmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 67–70 (2008).
- 51.İnternet: Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü “Seramik malzemeler” <http://chem.eng.ankara.edu.tr/345/345not3.pdf> (2007).
- 52.İnternet: MEMS and Nanotechnology Clearinghouse “Material Index” <http://www.memsnet.org/material/> (2007).
- 53.İnternet: The A to Z of Materials “Materials Information” <http://www.azom.com> (2007).
- 54.Furkan Mühendislik, Furkan Elektro Erozyon Tezgâhları Temel Bilgiler Kılavuzu, **Furkan Mühendislik**, Ankara, 35–80(2000)

EKLER

EK–1. Yüzey pürüzlülük parametreleri ve tanımları

Şekil 1.1’ de bir yüzey profili görülmektedir. Üstünde ve altında kalacak alanlar eşit olacak şekilde yüzey profilini kesen çizgi, ortalama çizgisi olarak tanımlanmaktadır. Ortalama çizgisi pürüzlülük tanımında referans olarak kullanılır ve matematiksel olarak yüzey profilinin ağırlık merkezi şeklinde de ifade edilebilir. “ L_c ” ile ifade edilen aralık örnekleme uzunluğudur. Örnekleme uzunluğu yüzeyin pürüzlülük karakteristiğini bulmada öncelikli olarak seçilen parametredir. “ n ” adet örnekleme uzunluğunun bir araya gelmesi ile “ L_n ” şeklinde ifade edilen ölçüm uzunluğu oluşmaktadır (Şekil 1.1). Eğer profil n adet örnekleme uzunluğu içeriyorsa ölçüm uzunluğu $L_n = n \times L_c$ ile hesaplanır.



Şekil 1.1. Ölçüm ve örnekleme uzunluğu

Değerlendirme uzunluğu (traverse length) algılayıcının yüzey üzerinde hareket ettiği toplam mesafedir. Ölçüm, yanaşma, hareket başlangıç ve bitiş uzunluklarının tümü değerlendirme uzunluğunu oluşturmaktadır. Değerlendirme uzunluğu normal olarak ölçüm uzunluğundan daha büyüktür. Böylece ölçüm başlangıcındaki ve bitişindeki mekanik ve elektriksel hatalar ölçüm uzunluğunun dışında bırakılarak ölçüm yapılmaktadır. Bu bölümde bu araştırmada kullanılan yüzey pürüzlülüğü parametrelerinden R_a , R_z (DIN) ve S_m ’in tanımları verilecektir.

EK–1.(Devam) Yüzey pürüzlülük parametreleri ve tanımları

Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a)

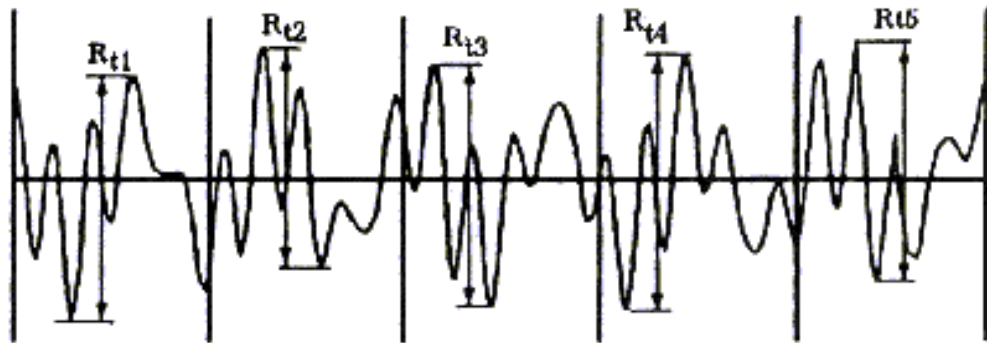
Ortalama yüzey pürüzlülüğü R_a , ortalama çizgisinden ölçülen yükseklik değişimlerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır (Şekil 1.2). R_a , en sık kullanılan pürüzlülük parametresidir. R_a matematiksel olarak,

$$R_a = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} |Y(x)| dx \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $Y(x)$ herhangi bir x mesafesinde profilin ortalama çizgisine uzaklığıdır.

Profildeki en büyük tepe-vadi yüksekliklerinin ortalaması ($R_z(DIN)$)

Her bir örnekleme uzunluğundaki en büyük tepe-vadi arası yüksekliği R_{ti} şeklinde tanımlanmaktadır. (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Profildeki en büyük tepe-vadi yükseklikleri

$R_z(DIN)$, ölçüm uzunluğundaki bütün R_{ti} değerlerinin ortalaması olarak ifade edilmektedir (Şekil 1.3).

EK–1.(Devam) Yüzey pürüzlülük parametreleri ve tanımları

$$R_z(DIN) = \frac{(R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + \dots + R_{tn})}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ti} \quad (1.2)$$

Profil tepe noktaları arasındaki uzaklıkların ortalaması (S_m)

S_m , ölçüm uzunluğu boyunca ortalama çizgisi üzerinde birbirini takip eden tepe noktalarının arasındaki mesafelerin ortalamasıdır (Şekil 1.3).

$$S_m = \frac{(S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n)}{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (1.3)$$



Şekil 1.3. Profil tepe noktaları

Pürüzlülük ölçüm teknikleri

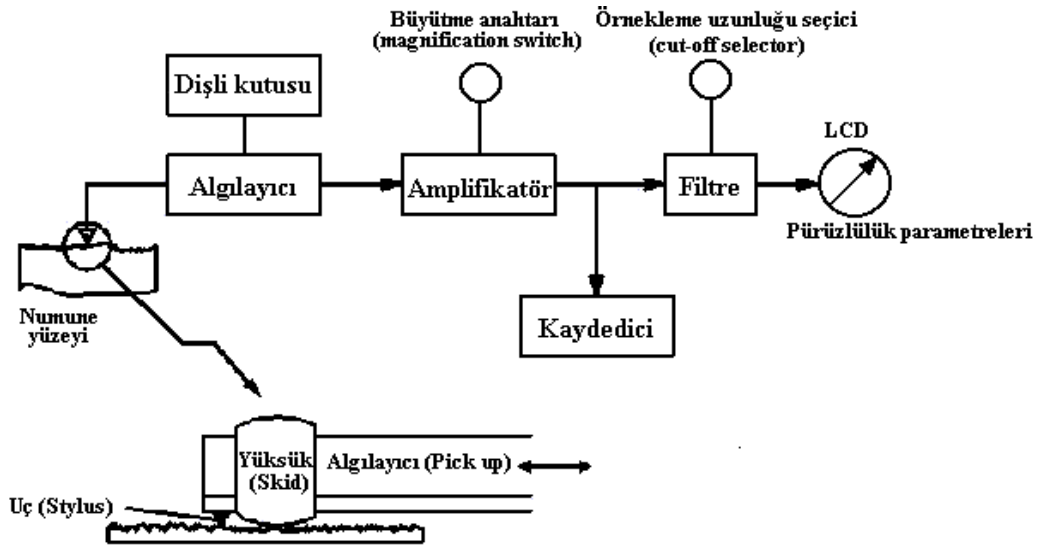
Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için, çok basit gözleme ve/veya dokunmaya dayalı metotlardan karmaşık ekipmanlar kullanan metotlara kadar birçok metot geliştirilmiştir. Bunlar başlıcaları, detektör iğne (stylus) uçlu cihazlar metodu, kapasitans metodu, optik yansıtma metodu, X-ışını metodu ve kesit alma metodudur.

Bunlardan sıklıkla kullanılanı detektör iğne uçlu cihazlar metodudur. Çalışmada bu metot kullanıldığından, sadece bu tekniğin prensipleri

anlatılacaktır. Detektör iğne uçlu yüzey pürüzlülük cihazının şematik yapısı

EK-1. (Devam) Yüzey pürüzlülük parametreleri ve tanımları

Şekil 1.4.' de verilmiştir. Cihaz, sabit hızla ilerlemesini sağlamak için dişli kutusu ile sürülen bir algılayıcı (pick up), transdüser tarafından gönderilen sinyali yükselten elektrik amplifikatörü ve yükseltilmiş sinyalleri kaydetmeye yarayan bir üniteden oluşmaktadır. Algılayıcı, yüksük (skid) yardımıyla ölçüm esnasında ölçülecek yüzeye paralel tutulan bir tür transdüserdir. Bu transdüser, ucun (stylus) yukarı-aşağı hareketlerini elektrik sinyallerine dönüştürmektedir. Algılayıcı (pick up), ölçüm için yüzey üzerinde hareket ettikçe iğne ucun yüksüğe göre hareketi kaydedilir ve kaydedilen bu bilgiler orantılı olarak dönüştürülür.



Şekil 1.4. Detektör iğne uçlu ölçüm cihazının şematik gösterimi

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GENÇ, Asım
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.08.1969 Kırşehir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 2121010
 Faks : 0 (312) 2121010
 e-mail : gencasim@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Mak. Müh.	1998
Lisans	Selçuk Üniversitesi / Mak. Müh.	1994
Lise	Kırşehir Teknik Lisesi	1987

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1995-2007	Niğde Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2007-	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Genç A, Çoğun C., "Toz Metalurjisi Yöntemi ile Üretilmiş Bor Karbür Elektrotların Elektro Erozyonda İle İşlemede Kullanımı", **5th Powder Metallurgy Conference**, Ankara: 1-9 (2008).

Hobiler

Futbol, Bilgi teknolojileri, Kitap okuma