

**ELEKTROLİTİK ve ALAŞIM BAKIR ELEKTROTLARIN
ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİ**

Ülke ŞİMŞEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2012

ANKARA

Ülke ŞİMŞEK tarafından hazırlanan “ELEKTROLİTİK VE ALAŞIM BAKIR ELEKTROTLARIN ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Bedri TUÇ

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

.....

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ç.Ü

Prof. Dr. İbrahim USLAN

.....

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

.....

Metal Eğitim Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 06/06/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans 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 bana ait olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ülke ŞİMŞEK

ELEKTROLİTİK ve ALAŞIM BAKIR ELEKTROTLARIN ELEKTRO-EROZYON İLE İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ülke ŞİMŞEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2012

ÖZET

Elektro-erozyon ile işlemenin (EEİ) en önemli maliyet unsuru elektrodun üretilmesidir. EEİ’de en yaygın kullanılan elektrot malzemeleri bakır ve alaşımlarıdır. Maliyeti arttırmadan EEİ yapmanın yolu, hammadde maliyeti düşük, işlemesi kolay ve elektriksel aşınma direnci yüksek bakır alaşımlarını tespit etmektir. Bu çalışmada, EEİ’de yaygın kullanılan elektrolitik bakır CuCr1Zr ve CuCo2Be bakır alaşımları için işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağlı aşınma ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü gibi temel EEİ performans karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, CuCr1Zr alaşımına uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası artan elektriksel iletkenliğin EEİ temel performans karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Bu performans karakteristiklerinin alaşım türünden ve uygulanan yaşlandırma işleminden etkilendiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.140

Anahtar Kelimeler : Elektro-erozyon ile işleme (EEİ), maliyet, elektrolitik bakır, CuCr1Zr alaşımı, CuCo2Be alaşımı, yaşlandırma, elektriksel iletkenlik.

Sayfa Adedi : 87

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

**EFFECT OF ELECTROLYTIC COPPER AND COPPER ALLOY TOOL
ELECTRODES ON MACHINING PERFORMANCE IN ELECTRIC
DISCHARGE**

(M.Sc. Thesis)

Ülke ŞİMŞEK

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

JUNE 2012

ABSTRACT

The most important cost element for the process of the electric discharge machining (EDM), is the production cost of electrodes. In EDM process copper and its alloys are commonly used as electrode materials. The way of the processing EDM without increasing the costs is to select the copper alloy having low material costs and high electrical wear resistance. In this study, effect of electrolytic copper, CuCr1Zr and CuCo2Be alloys, which are commonly used as electrode materials in EDM applications, on EDM performance outputs, namely, workpiece removal rate, relative wear and workpiece surface roughness were experimentally investigated. Also, effect of aging of CuCr1Zr alloys (results in increasing electrical conductivity) on the performance outputs in EDM process were examined. The performance outputs found to be affected by the types of copper alloy and the applied aging treatment.

Science Code : 914.1.140

Keywords : Electro discharge machining (EDM), costs, electrolytic copper, CuCr1Zr alloy, CuCo2Be alloy, aging, electrical conductivity.

Page Number : 87

Adviser : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince destekleyici ve teşvik edici yardım ve katkılarını benden esirgemeyen, deneyim ve bilgilerini benimle paylaşan, bu çalışmanın gerçekleşmesinde yardımcı olan ve yol gösteren saygı değer hocam Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a; çalışmamın mikroyapı incelemesi bölümünde değerli yorumlarıyla katkıda bulunan hocam Prof. Dr. Faruk ELALDI'ya ve Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e; çalışmamın ısıtma işlem bölümünde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan hocam Prof. Dr. İbrahim USLAN'a; SEM incelemelerinde yardımcı olan sayın Prof. Dr. Ali KALKANLI'ya; elektro-erozyon deneylerinde tecrübelerini benimle paylaşan sayın Dr. Asım GENÇ'e; manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim...

Ülke ŞİMŞEK

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLoların LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER ve KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. EEİ YÖNTEMİNİN TEMEL PRENSİPLERİ.....	6
2.1. EEİ Yöntemi.....	6
2.2. EEİ Tipleri	7
2.3. EEİ'nin Fiziksel Prensibi	9
2.4.1. Elektriksel parametreler [6,7]	11
2.5. EEİ'de Performans Karakteristikleri	17
3. BAKIR VE ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ	19
3.1. Çökelme Sertleşmesi.....	19
3.2 Bakır-Kobalt-Berilyum Alaşımı (CuCo ₂ Be) [11]	21
3.3 Bakır-Krom(CuCr) ve Bakır-Krom-Zirkonyum(CuCrZr) Alaşımları [11]	23

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
4.1 İşparçası ve Elektrotlar	29
4.2 EEİ Deneyleri.....	32
4.3 Isıl İşlem Deneyleri	36
4.4 Metalografik Görüntüleme	37
4.5 Elektrik İletkenliğinin Tespiti.....	38
4.6 Sertlik Ölçümleri.....	38
4.7 SEM Analizi	38
5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	39
5.1 CuCr1Zr ve Isıl İşlem Uygulanmış CuCr1Zr Elektrotların İletkenlik Ölçümleri	39
5.2 Yaşlandırma İşleminin CuCr1Zr Alaşımının Sertliği Üzerindeki Etkisi.	40
5.3 Elektroerozyon İle İşleme Deneylerinin Sonuçları :.....	40
5.3.2 Vurum süresi ve boşalım akımının EAH'na etkisi	45
5.3.3 Vurum süresi ve boşalım akımının BA'ya etkisi	49
5.4 Mikroyapı İnceleme Sonuçları.....	53
5.5 Elektrot Maliyet Analizi.....	55
6. SONUÇ ve YORUM.....	58
KAYNAKLAR	59

EKLER.....	63
EK-1. Bakır Alaşımlarının Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	64
EK-2 Deney Sonuçları	66
EK-3 Metalografik Resimler	73
EK-4 SEM Analizi Sonuçları	79
ÖZGEÇMİŞ.....	86

TABLOLARIN LİSTESİ

Tablo 2.1. Farklı malzemelere göre kutuplama	13
Tablo 4.1 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi	29
Tablo 4.2 1040 Çeliğinin mekanik ve fiziksel özellikleri	29
Tablo 4.3 EEİ tezgâhı teknik özellikleri	33
Tablo 4.4 Deneylerde kullanılan işleme parametreleri	34
Tablo 5.1 Deneyisel sonuçlar (Ortalaması alınmış)	41
Tablo 5.2 50 kg fırın dolumu için uygulanan ısı işlemlerin maliyetleri.....	55
Tablo 5.3 Deneylerde kullanılan elektrotlar ve maliyetleri	56

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 1.1. E-bakırının iletkenliğine alaşımların etkisi [3]	2
Şekil 1.2. Alaşım Elementlerinin Etkileri.....	3
Şekil 2.1. EEİ' nin şematik görünüşü.....	6
Şekil 2.2. EEİ ile delme ve oyma yöntemi	8
Şekil 2.3. EEİ ile kesme yöntemi.....	8
Şekil 2.4. EEİ ile taşlama yöntemi.....	8
Şekil 2.5. EEİ ile işlemenin fiziksel prensibi [5]	9
Şekil 2.6. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri	11
Şekil 2.7. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri	15
Şekil 2.8. Elektrot ve işparçası boyutları arasındaki ilişki [8]	16
Şekil 3.1. A ve B metallerine ait ikili faz çizgesi.....	19
Şekil 3.2. Cu-Co-Be alaşımının denge-faz diyagramı [11]	22
Şekil 3.3. CuCo ₂ Be alaşımının İletkenlik, kopma mukavemeti (R), elastik sınır (E) ve kopma uzaması (A)'nın su verme ve %50 yoğrulmadan sonra 450 ⁰ C sıcaklıkta yaşlandırma süresinin bir fonksiyonu olarak gösterilmesi	22
Şekil 3.4. Bakır-Krom denge faz diyagramı.....	24
Şekil 3.5. Bakır-Zirkonyum denge faz diyagramı.....	24
Şekil 3.6. Su verilmiş-yoğrulmuş-menevişlenmiş halde kromlu bakırın sıcakta darbe mukavemeti üzerine %0,04 zirkonyum ilavesinin etkisi	25
Şekil 3.7. SSA'da sertlik vs yaşlandırma süresi ve sıcaklığı [14].....	27
Şekil 3.8. RSA'da sertlik vs yaşlandırma süresi ve sıcaklığı	27
Şekil 3.9. RSA ve SSA'nın 450 ⁰ C ve 500 ⁰ C deki iletkenliği	28
Şekil 4.1 EDM M 25 A EEİ Tezgahı	32

Şekil 5.1 Değişik yaşlandırma süreleri için CuCr1Zr bakır alaşımının elektriksel iletkenliğinin değişimi	39
Şekil 5.2 Değişik yaşlandırma süreleri sonucunda CuCr1Zr bakır alaşımının mikrosertiliğinin değişimi.....	40
Şekil 5.3 (a) 12 A boşalım akımı ve (b) 6 A boşalım akımı için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının İİH değerlerinin vurum süresi ile değişimi.....	43
Şekil 5.4 (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum sürelerinde E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının İİH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi	44
Şekil 5.4 (Devam) (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum sürelerinde E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının İİH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi	45
Şekil 5.5 (a) 6 A boşalım akımı ve (b) 12 A boşalım akımı için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin vurum süresi ile değişimi.....	46
Şekil 5.5 (Devam) (a) 6 A boşalım akımı ve (b) 12 A boşalım akımı için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin vurum süresi ile değişimi.....	47
Şekil 5.6 (a) 50 μ s, (b)100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi	47
Şekil 5.6 (Devam) (a) 50 μ s, (b)100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi	48

Şekil 5.7 (a) 6 A ve (b) 12 A boşalım akımları için E-bakır, CuCr1Zr, CuCoBe2 ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının BA değerlerinin vurum süresi ile değişimi.....	50
Şekil 5.8 (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCoBe2 ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının BA değerlerinin boşalım akımı ile değişimi	51
Şekil 5.8 (Devam) (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCoBe2 ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının BA değerlerinin boşalım akımı ile değişimi	52
Şekil 5.9 Yaşlandırma işlemi uygulanmamış ve yaşlandırılmış CuCr1Zr elektrotların mikroyapıları a) CuCr1Zr alaşımlı b) 980 ⁰ C'de su verilmiş CuCr1Zr, c) 500 ⁰ C'de 2 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr, d) 500 ⁰ C'de 4 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr, e) 500 ⁰ C'de 12 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr, f) 500 ⁰ C'de 24 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr.....	53

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 1.1. Çeşitli Uygulamalar İçin Bakır-Tungsten Alaşımından Yapılmış Erozyon Elektrotları.....	4
Resim 4.1 İşparçaları	30
Resim 4.2. İşparçalarının birleştirilmesi a) birleştirme, b)EEİ, c) işleme sonrası parçaların ayrılması.....	30
Resim 4.3 Elektrotlar.....	31
Resim 4.4 985 ⁰ C Sıcaklıkta CuCr1Zr alaşım elektrotların görünümü	36
Resim 4.5 Kesilmiş ve bakalite gömülmüş numuneler	38

SİMGELER ve KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
C_e	Kohezyon enerjisi
C_s	Özgül ısı, kJ/K
f_c	Vurum frekansı, vurum/san.
i	Ortalama çalışma akımı, amper
i_d	Boşalım akımı, amper
k	Isıl iletkenlik katsayısı, W/m°K
L_v	Buharlaştırma gizli ısı, kJ/kg
n	Kullanılan elektrot sayısı
P	Dielektrik sıvı basıncı, bar
P_d	Boşalım gücü, watt
r	Elektrot köşe yarıçapı, mm
R	Korelasyon katsayısı
R^2	Regrasyon katsayısı
R_a	İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü, μm
$r_{dış}$	Elektrot dış köşe yarıçapı, mm
$r_{iç}$	Elektrot iç köşe yarıçapı, mm
t_c	Vurum çevrim süresi, μs

t_d	Boşalım süresi, μs
$t_{işleme}$	İşleme süresi, dak.
t_l	Gecikme süresi, μs
T_m	Ergime sıcaklığı, $^{\circ}C$
t_p	Bekleme süresi, μs
t_s	Vurum süresi, μs
V	Ortalama çalışma gerilimi, volt
V_d	Boşalım gerilimi, volt
V_o	Açık devre gerilimi, volt
W_s	Vurum enerjisi, joule

Kısaltmalar

BA	Bağıl aşınma, %
EAH	Elektrot aşınma hızı, $mm^3/dak.$
EEİ	Elektro-erozyon ile işleme
İİH	İşparçası işleme hızı, $mm^3/dak.$

1. GİRİŞ

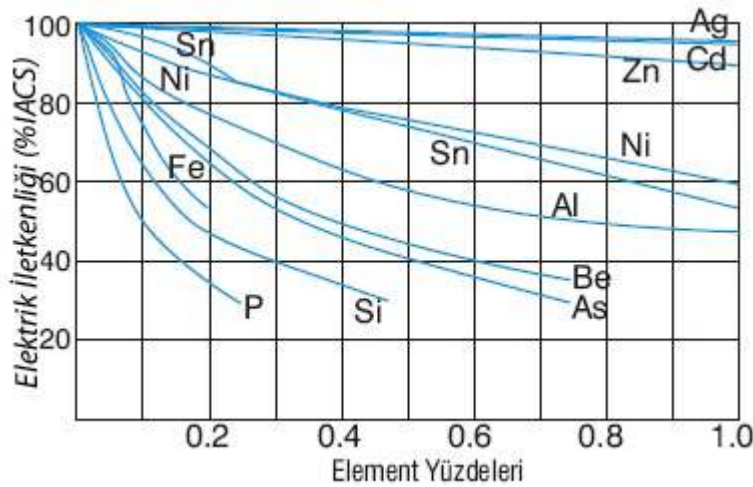
Günümüz kalıpcılık teknolojisinde yaygın kullanıma sahip olan elektroerozyon ile işleme (EEİ) yöntemi, karmaşık kalıp işlerinin yapılmasında sağladığı imkânlar ve yüksek boyutsal tamlik sebebiyle geniş kullanım alanlarına sahip olmuştur. Özellikle, metal alaşımlarından imal edilen kalıpların işlenmesinde, uçak, gemi ve uzay endüstrisinde kullanılan makine parçalarının imalinde elektroerozyon tekniğinden yararlanılmaktadır [1]. EEİ tekniğinin başarısını, geleneksel metotlarla işlenemeyen sertlikte ve karmaşık geometrideki metallerin herhangi bir kesme kuvveti uygulamadan kolayca işlenmesine bağlamak mümkündür. Diğer taraftan EEİ yöntemi, geleneksel işleme metotlarıyla üretilemeyen iç yüzey şekillendirmelerini (keskin köşeler ve düz dip profilleri gibi) istenen toleranslarda gerçekleştirebilmektedir. Çok sert, yüksek mukavemetli ve ısıya karşı dayanıklı metal malzemelerin kullanılma sıklığı günümüzde arttığı için EEİ metodu vazgeçilmez hale gelmiştir. Endüstride EEİ metotları içinde en yaygın kullanılanları dalma-EEİ ve tel-EEİ'dir. Dalma-EEİ metodu, dielektrik sıvı içine batırılmış elektrik iletkenliğe sahip elektrot ile işparçası yüzeyinden küçük bir bölgenin ergitilmesi, buharlaştırılması ve bu malzemelerin dielektrik sıvı yardımıyla uzaklaştırılması esasına dayanır. Tel-EEİ metodu ise, 0,05 ile 0,4 mm çaplı, elektrik iletken, sabit hızda sürülen tel elektrot ile işparçası arasında oluşturulan elektriksel boşalımlar ile işparçasının ergitilmesi veya buharlaştırılması prensibi ile işparçalarını istenen geometride kesmektedir.

Elektriksel boşalımının aşındırma etkisine ilk referans olarak, Priestley'in 1768 yılındaki ön çalışması gösterilebilir. 1889'da da Paschen yöntemi matematiksel modele oturtmaya çalışmıştır. Lazarenko'nun 1943'de yaptığı çalışmalarla elektriksel boşalımla aşındırma etkisi kontrol altına alınabilmektedir. Daha sonraki çalışmalarda, araştırmacılar bu metodun daha yaygın kullanılması için çaba harcamışlardır. Yapılan çalışmaların başında, elektrot üretim teknolojisinin geliştirilmesi gelmektedir. Elektrot üretiminin zorluğu ve maliyetinin yüksek olması bu konudaki yoğun çalışılmaların temel sebeplerini

oluşturmaktadır [2].

Günümüzde bakır ve alaşımları uygun fiziksel özellikleri, işleme kolaylığı ve makul hammadde maliyetleri açısından elektroerozyonda en çok kullanılan elektrot malzemeleridir. Bakır elektrotların, iletkenliği EEİ açısından önemli olup bakırın saflık derecesine bağlıdır. Bu sebeple elektrolitik bakır (E-bakır) en yaygın kullanılan takım elektrot malzemesidir. Bakıra diğer elementlerin az miktarlarda ilavesi, bakır malzemenin elektriksel iletkenliğini önemli miktarlarda değiştirmektedir (Şekil1.1). Fosfor ve demir elementlerinin bakıra katılması, elektriksel iletkenliği olumsuz etkilemektedir.

E-bakırın iletkenliği plastik şekil verme işlemlerine göre de değişebilmektedir. Örneğin, soğuk şekillendirme bakırın elektriksel iletkenliğini azaltmaktadır.

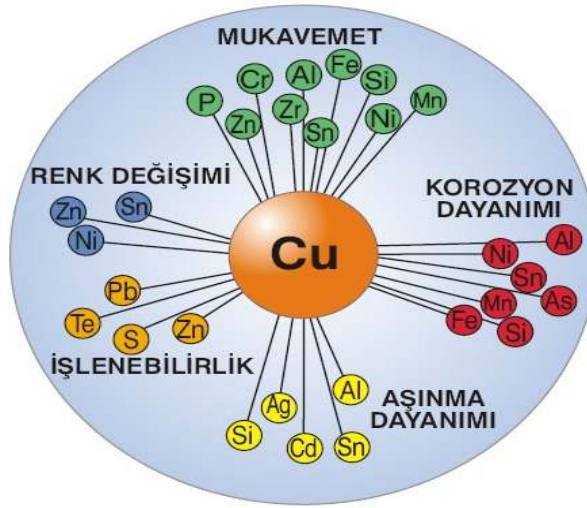


Şekil 1.1. E-bakırın iletkenliğine alaşımların etkisi [3]

Saf bakıra ilave edilebilen elementler; alüminyum, arsenik, berilyum, kadmiyum, krom, kobalt, demir, kurşun, manganez, nikel, oksijen, fosfor, silisyum, gümüş, kükürt, tellür, kalay, çinko ve zirkonyumdur. Bu element ilavelerinin saf bakırın fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkileri Şekil 1.2'de görülmektedir [4]. İlave edilen elementler ve miktarları bakır elektrotun maliyetinde de önemli artışlara neden olmaktadır. EEİ performansı, genelde

elektrot aşınma hızı (EAH), iş parçası işleme hızı (İİH) ve bağıl aşınma (BA, EAH'nın İİH'na oranı) gibi performans çıktıları ile değerlendirilmektedir.

EAH ve BA değerleri ne kadar düşük olursa elektrot tüketimi de (dolayısıyla elektrot üretim maliyeti) o kadar azalmaktadır. EEİ'de işleme süresinin kısalması için İİH değerinin yüksek olması gerekir. Düşük maliyetli ve belirtilen yüksek İİH performans kriterlerini sağlayan elektrotların geliştirilmesi için günümüzde araştırmalar devam etmektedir.



Şekil 1.2. Alaşım Elementlerinin Etkileri [4]

Literatürde dalma EEİ'de elektrot malzemesi olarak kullanılan CuCrZr bakır alaşımının, elektrolitik bakıra göre 5-6 kat daha uzun ömürlü olduğu ve işleme hızının bakır elektroda oranla daha yüksek olduğundan bahsedilmektedir. Bu farkın yapılan işlemeye göre değiştiği, CuCrZr alaşımının E-bakıra göre daha fazla ilgi gördüğü ve E-bakıra göre aşınma dayanımının daha yüksek olduğu söylenmektedir [4]. Yapılan tez çalışmasını motive eden beyanlardan biri, bu bilgidir.

Yüksek hassasiyetteki parçaların, karmaşık geometrili şekillerin ve narin işparçalarının işlenmesinde tungstenli bakırdan yapılmış elektrotlar, bakır ve grafit elektrotlardan daha ekonomiktir [4].

Elektrot malzemesi seçiminde üç etmen göz önüne alınır: Bunlar elektrodun aşınma davranışı, işparçası işleme performansı ve elektrodun işlenebilirliğidir [4].

1) Elektrot Aşınma Davranışı: Tungsten ve tungsten alaşımlı bakırdan yapılmış elektrotlar, yüksek ergime ve buharlaşma sıcaklığından dolayı E-bakır elektrotlardan daha uzun ömürlüdürler. Bu nedenle tungsten alaşımlı bakırdan yapılmış bir elektrot, birçok E-bakır elektrodun işini görür. Bu gibi durumlarda karmaşık şekilli bir işparçasının işleme maliyeti, elektrot malzemesinin maliyetinden daha fazla olacağından tungsten-bakır elektrotların kullanımı ekonomik açıdan makul hale gelebilmektedir [4].



Resim 1.1. Çeşitli Uygulamalar İçin Bakır-Tungsten Alaşımından Yapılmış Erozyon Elektrotları

2) İşparçası İşleme Performansı:

- **Yüzey Kalitesi:** Tungsten-bakır elektrot kullanıldığında, işlem sonunda daha iyi işparçası yüzey kalitesi elde edilebilir. Bu sonuç tungsten-bakır alaşımının ince taneli, homojen ve gözeneksiz yapısından ileri gelmektedir. Erozyon akımı, birçok kanala dağılacığından daha düşük enerjili kıvılcımlar daha sık ve küçük kraterler oluşturarak daha iyi bir yüzey oluşmasını sağlarlar [4].

- **Profillerin Keskinliği:** EEİ'de elektrottaki köşe-kenar aşınmalarının ve desenli yüzeylerin, elde edilecek yüzey kalitesine belirgin etkisi vardır. Keskin köşelerde ve kenarlarda, akım yoğunluğu daha fazla olduğundan bu bölgelerde elektrotta aşınma daha belirgindir. Tungsten alaşımlı bakır elektrotların yüksek aşınma dayanımı, akımı yavaş arttırdığından, yüzey kalitesi de belirli bir oranda iyileşmektedir [4].
- **Boyutsal Toleranslar ve Hassasiyet:** Bakır-Tungsten alaşımlı elektrotların ısı genleşmeleri daha az olduğu için, yüksek hassasiyetli işlemlere olanak sağlar. Bu avantaj özellikle dar kesitli geometrilerde önemlidir [4].

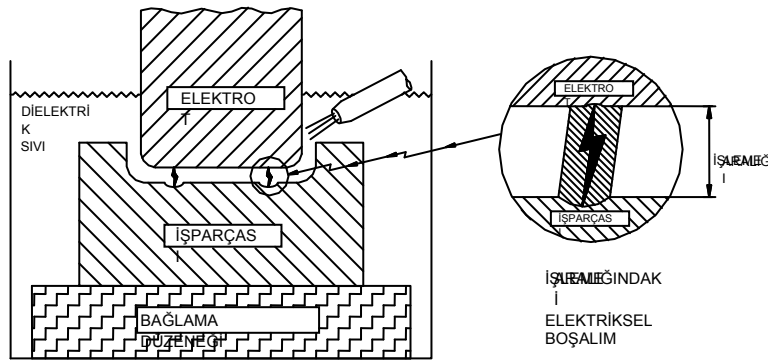
3) **Elektrodun İşlenebilirliği:** Bakır-Tungsten alaşımlı elektrotlar, bakır elektrotlarla kıyaslandığında oldukça yüksek elastisite modülüne sahip olduğundan bakır elektrotlardan daha rijittirler. Bu durum talaşlı imalatta, işparçasında daha az çapak oluşmasına neden olur [4].

Yukarıda belirtildiği üzere elektrot malzemesi seçimi ve üretimi EEİ'nin en önemli maliyet unsuru olup, bu maliyetin azaltılabilmesi için uygun bakır alaşımının seçimi önemlidir. Maliyeti artırmadan EEİ yapmanın yolu ham madde maliyeti düşük, işlemesi kolay ve elektriksel aşınma direnci yüksek bakır veya alaşımlarının tespitidir. Bu amaçla, E-bakır, CuCr1Zr ve CuCo2Be bakır alaşımlarından üretilmiş elektrot kullanımının İİH, EAH, BA ve işlenmiş işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), gibi performans çıktılarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, bakır alaşımlarına uygulanan yaşlandırma işleminin EEİ performansına etkileri de deneysel olarak incelenmiştir.

2. EEİ YÖNTEMİNİN TEMEL PRENSİPLERİ

2.1. EEİ Yöntemi

EEİ yöntemi (Şekil 2.1) dielektrik sıvı içerisinde daldırılmış, elektriksel iletkenliğe sahip elektrot ile işparçası arasındaki sabit bir işleme aralığında, vurum jeneratörü tarafından kontrollü bir şekilde oluşturulan elektriksel boşalımların işparçası yüzeyinden küçük bir bölgeyi eritmesi ve buharlaştırması esasına dayanır. Elektriksel boşalım enerjisi nedeniyle ısınan elektrot ile işparçası yüzeylerinin soğutulması ve işleme atıklarının işleme aralığından uzaklaştırılması dielektrik sıvı tarafından sağlanır. İşleme aralığının sabit tutulması ise elektrodun servo kontrollü besleme mekanizması ile işparçasına doğru hareket ettirilmesi ile gerçekleşir.



Şekil 2.1. EEİ' nin şematik görünüşü

EEİ tezgâhının ana kısımları; vurum jeneratörü, kontrol paneli, servo kontrol mekanizması, elektrot besleme (ilerleme) sistemi, elektrot bağlama adaptörü, işparçası bağlama düzeneği, dielektrik sıvı tankı, dielektrik sıvı pompası, dielektrik sıvı filtresi ve alt tabladır.

2.2. EEİ Tipleri

EEİ tipleri işleme prensiplerine göre üç ana grup altında toplanabilir.

(i) EEİ ile delme ve oyma

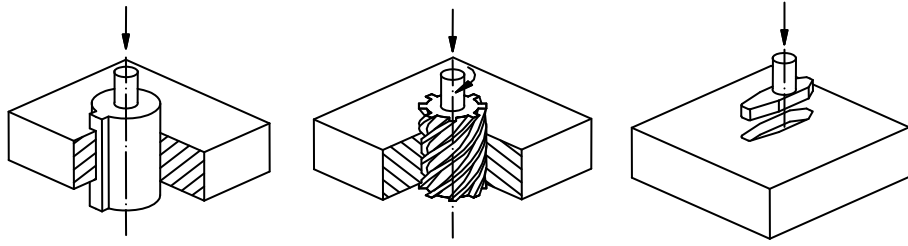
(ii) EEİ ile kesme

(iii) EEİ ile taşlama

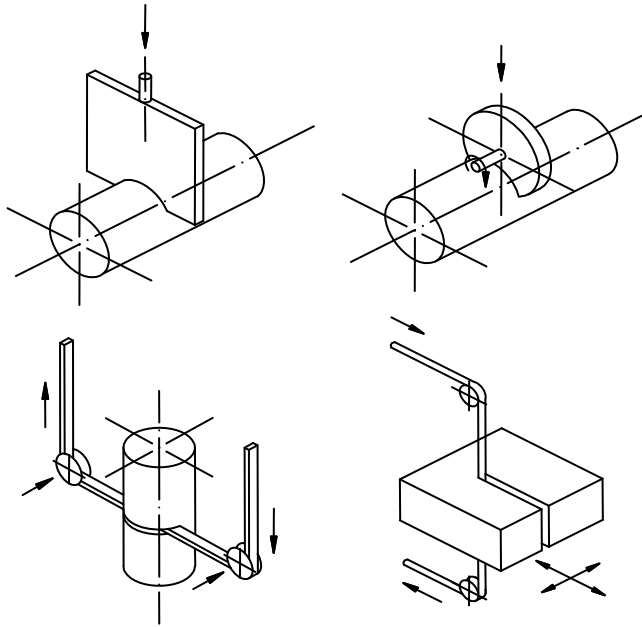
(i) EEİ ile delme ve oyma yöntemi, işparçasının derinlik doğrultusunda sabit kesitli bir elektrot ile delinmesi veya elektrodun işparçasına belirli bir işleme derinliğine daldırılması ile yapılan işlemdir (Şekil 2.2).

(ii) EEİ ile kesme yöntemi, işparçasının levha, disk, tel veya şerit formundaki elektrotlar ile çeşitli profillerde kesilmesi veya elektrodun işparçası üzerinde çentik oluşturulması amacıyla yapılan operasyonlardır (Şekil 2.3).

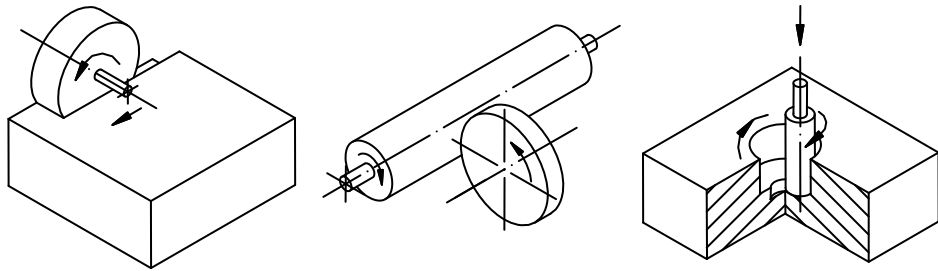
(iii) EEİ ile taşlama yöntemi, işparçasının kendi eksenı etrafında dönen silindirik veya konik şekilli elektrotlar ile dış yüzeylerinin veya iç deliklerinin taşlanmasıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.2. EEİ ile delme ve oyma yöntemi



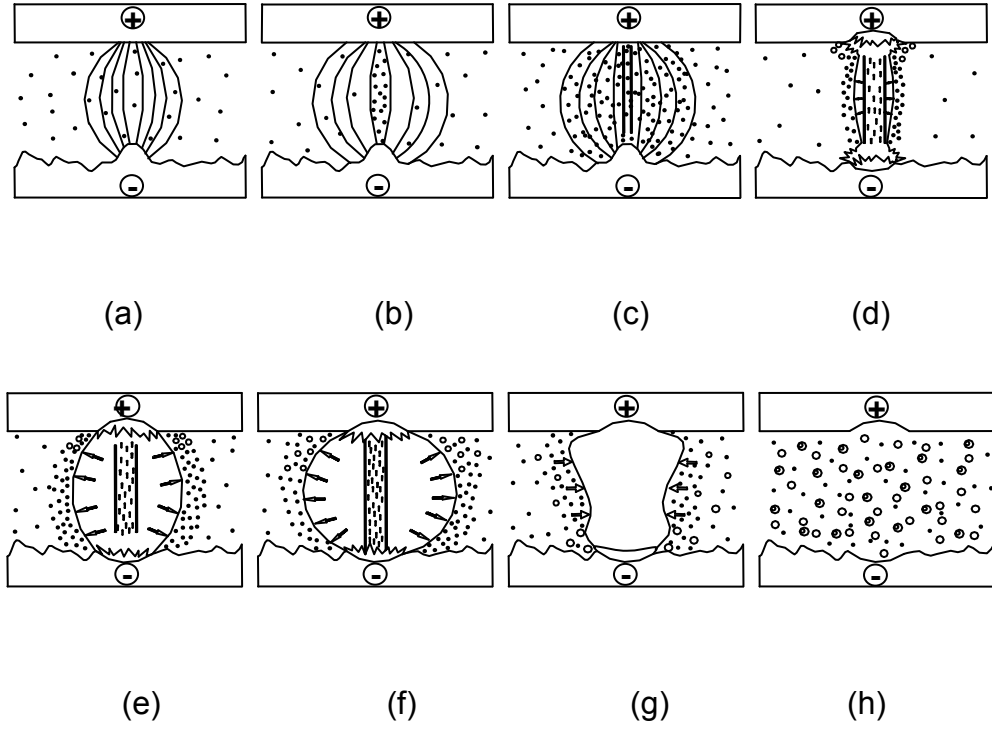
Şekil 2.3. EEİ ile kesme yöntemi



Şekil 2.4. EEİ ile taşlama yöntemi

2.3. EEİ'nin Fiziksel Prensibi

Bir elektriksel boşalım sırasında, elektrot, işparçası ve dielektrik sıvı arasında fiziksel olaylar oluşmaktadır (Şekil 2.5) [5].



Şekil 2.5. EEİ ile işlemenin fiziksel prensibi [5]

Elektrot ile işparçası arasını dolduran dielektrik sıvı çok küçük partiküller içermektedir (Şekil 2.5 (a)). 10-40 μm 'lik işleme aralığı boyunca uygulanan 80-200 V'luk doğru akım gerilimi işparçası ve elektrot arasında manyetik alan oluşmasına sebep olur. İşlemenin başlangıcında akım akışı olmaz. Bunun nedeni, dielektrik sıvının elektrodu ve işparçasını yalıtmış olmasıdır. Elektriksel alan dielektrik sıvı içerisindeki küçük parçacıkların elektriksel alan içinde bir hat üzerinde dizilmesini ve işleme aralığı boyunca bir köprü oluşturmasını sağlar (Şekil 2.5 (b)).

Köprü boyunca dielektrik sıvı elektriksel olarak kırılarak iyonlaşır ve elektriksel iletkenliğe sahip olur. Bu nedenle işleme aralığındaki gerilim

değeri düşer ve akım değeri operatör tarafından ayarlanmış olan üst değere kadar yükselir (Şekil 2.5 (c)).

Akımın artmasıyla bu bölgede ısı artar, plazma kanalı oluşur, elektrot ile işparçasının bir kısmı ergir ve buharlaşır. (Şekil 2.5 (d)).

Şekil 2.5 (d)'deki plazma kanalı vurum süresi boyunca genişler (Şekil 2.5 (e)).

Plazma kanalının içindeki buhar kabarcıkları dışarıya doğru genişler. Plazma kanalının etrafındaki dielektrik sıvı yoğunluğunun etkisiyle oluşan basınç plazma kanalının daha fazla genişlemesini sınırlar ve plazma kanalı enerjisini çok küçük bir hacimde yoğunlaştırılmış halde tutar (Şekil 2.5 (f)).

3 J/mm^3 'e kadar olan enerji yoğunlukları, yerel plazma sıcaklıklarının 40.000 K'e kadar ulaşmasına neden olur. Dinamik plazma enerjisi işparçası ve elektrot çiftini termal iletimle ertirir. Ancak yüksek plazma basıncı sebebiyle sınırlı elektrot malzemesi buharlaşır. Akım durduğunda plazma kanalı söner ve buhar kabarcıkları yok olur. Bu durum, elektrot ve işparçası yüzeylerindeki aşırı ısınmış sıvı partiküllerinin dielektrik sıvı içersine patlayarak dağılmasına sebep olur (Şekil 2.5 (g)). Dielektrik sıvı ergimiş malzemeyi soğutup katılaştırır ve ortamdan uzaklaştırır.

Bu çevrim işlemenin sonuna kadar her bir boşalım için tekrarlanır. Her boşalımda işparçası yüzeyinde $10 \text{ }\mu\text{m}$ - $150 \text{ }\mu\text{m}$ genişliğinde kraterler oluşur.

Vurum süresinin başlangıcında hızlı hareket eden elektrotların bombardımanı sebebiyle elektrot malzemesi hızla ergimesine rağmen, plazma basıncının artması yerel ısı akışında azalmaya neden olur. Bu ise hızla ergiyen elektrot malzemesinin birkaç mikro saniye içerisinde ısı transferi nedeniyle tekrar katılaşmasına neden olur. Büyük kütleli pozitif iyonların daha düşük hareket kabiliyetleri sebebi ile işparçasının ergimesi daha geç olur.

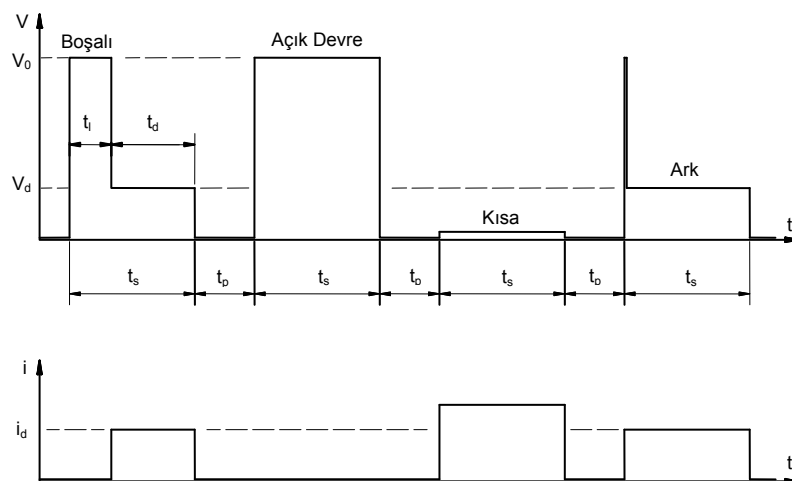
2.4. EEİ'nin Temel Parametreleri

EEİ'nin temel parametreleri aşağıda verilmiştir:

1. Elektriksel parametreler,
2. Vurum jeneratörü karakteristikleri,
3. Dielektrik sıvı parametreleri,
4. İşparçası malzemesi fiziksel ve mekanik özellikleri,
5. Elektrot malzemesi fiziksel ve mekanik özellikleri,
6. İşparçası ve elektrodun boyutsal ve geometrik özellikleri,

2.4.1. Elektriksel parametreler [6,7]

İşleme aralığındaki boşalım işleminin tipik gerilim $u(t)$ ve akım değişimleri $i(t)$ tarafından karakterize edilirler. Bu değişimler Şekil 2.6'da gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri [6]

EEİ'nin elektriksel parametreleri aşağıda verilmiştir;

- a) Boşalım süresi (t_d): Gerilim uygulanması sonrası işleme aralığı boyunca oluşan boşalımın süresi.
- b) Gecikme süresi (t_l): Gerilim uygulanması öncesinde dielektrik sıvının iyonlaşma (elektrik iletkenleşme) süresi.
- c) Vurum süresi (t_s): İşleme aralığına gerilimin ilk uygulanması anı ile boşalımın bitiş anı arasındaki toplam süre.

$$t_s = t_d + t_l \quad (2.1)$$

- d) Bekleme süresi (t_p): İki vurum arasında vurum jeneratörü tarafından bırakılan ara süresi.
- e) Vurum çevrim süresi (t_c): Jeneratör tarafından uygulanan vurum ve bekleme süresinin toplamı.

$$t_c = t_s + t_p \quad (2.2)$$

- f) Vurum frekansı (f_c): Jeneratör tarafından elektrotlar arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısı.
- g) Açık devre gerilimi (V_o): Akım boşalımı olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilim.
- h) Boşalım gerilimi (V_d): Boşalımın devam ettiği sürece ölçülen gerilim.
- i) Boşalım akımı (i_d): Boşalım süresince işleme aralığından geçen akım.
- j) Boşalım gücü (P_d): Bir boşalım süresince uygulanan güç.

$$P_d = V_d(t) \cdot i_d(t) \quad (2.3)$$

- k) Vurum enerjisi (W_s): Boşalım süresince işleme aralığına uygulanan enerji

$$W_s = \int_t V_d(t) \cdot i_d(t) \cdot dt \approx V_d \cdot i_d \cdot t_d \quad (2.4)$$

l) Ortalama çalışma gerilimi (V): İşleme süresince işleme aralığında ölçülen gerilimin aritmetik ortalaması.

m) Ortalama çalışma akımı (i): İşleme süresi boyunca işleme aralığından geçen akımın aritmetik ortalaması.

n) Kutuplama (Polarite): Kutuplama, elektrota göre kıvılcımın akış yönünü belirleyen durumdur (Tablo 2.1). Kutuplama, işleme ve aşınma hızını belirleyici bir faktördür.

Tablo 2.1. Farklı malzemelere göre kutuplama

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

Uygulamanın tipine ve elektrot veya iş parçası malzemelerine bağlı olarak kutup seçimi kaba ve hassas işleme için önem arz etmektedir. Tablo 2.1’de farklı elektrot malzemeleri ve kaba veya hassas işleme koşulları için kutuplama tipleri görülmektedir. EEİ’de elektrot (+) veya (-) kutuba bağlanabilmektedir.

2.4.2. Dielektrik sıvı parametreleri

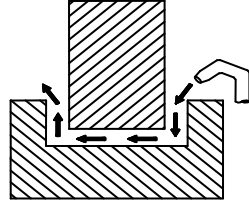
EEİ'de dielektrik sıvının görevleri;

- i) Dielektrik sıvı elektrotlar üzerinde toplanan elektriksel yükü belirli bir süre için tutar. Bu süre işleme aralığı şartları ile belirlenir. İşleme aralığı şartları uygun olduğunda dielektrik sıvı elektrik akımının çok küçük bir dirençle artmasına izin verir.
- ii) Dielektrik sıvı, boşalımı dar bir kanalda tutar. Böylece elektrot yüzeyi üzerindeki boşalımsal güç yoğunluğu ve işleme hızı artar.
- iii) Boşalım sonrasında açığa çıkmış ısı hemen uzaklaştırılmalıdır. Çünkü bu ısı erozyona katkıda bulunmaz. Aksine elektrot ve işparçası yüzeylerinde zarara sebep olur. Dielektrik sıvı ısıyı yüzeylerden boşalım biter bitmez uzaklaştırır.
- iv) Boşalım sonrası işleme aralığında oluşan işleme atıkları dielektrik sıvı ile işleme aralığından uzaklaştırılır. Bu işlem kısa devre ve elektrot aşınmasını önleme açısından çok önemlidir [7].

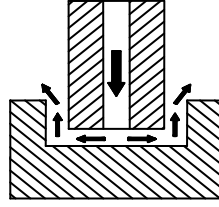
Dielektrik sıvının elektrot ile işparçası arasına uygulanmasında kullanılan teknikler Şekil 2.7'de görülmektedir.

2.4.3. İşparçası malzemesinin fiziksel özellikleri

EEİ'de elektriksel iletken tüm metaller işparçası olarak işlenebilir. İşparçası malzemesinin işlenebilirlik derecesi işparçası malzemesinin bazı ısı özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklerden en önemlileri yoğunluk, ısı kapasite ve ergime sıcaklığıdır. Bu değerler ile işleme hızı ters orantılıdır [13].

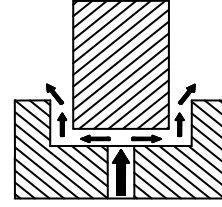


a) Yanal püskürtme



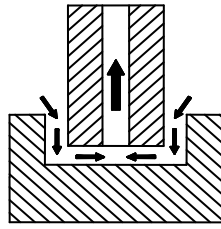
b) Elektrot içinden

püskürtme



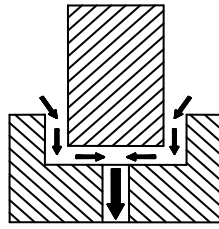
c) İşparçası içinden

püskürtme



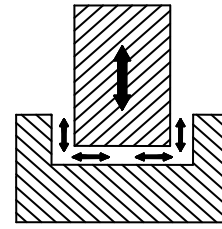
d) Elektrot içinden

emme

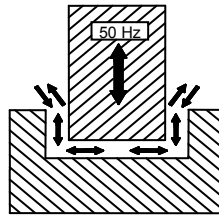


e) İşparçası içinden

emme



f) Statik

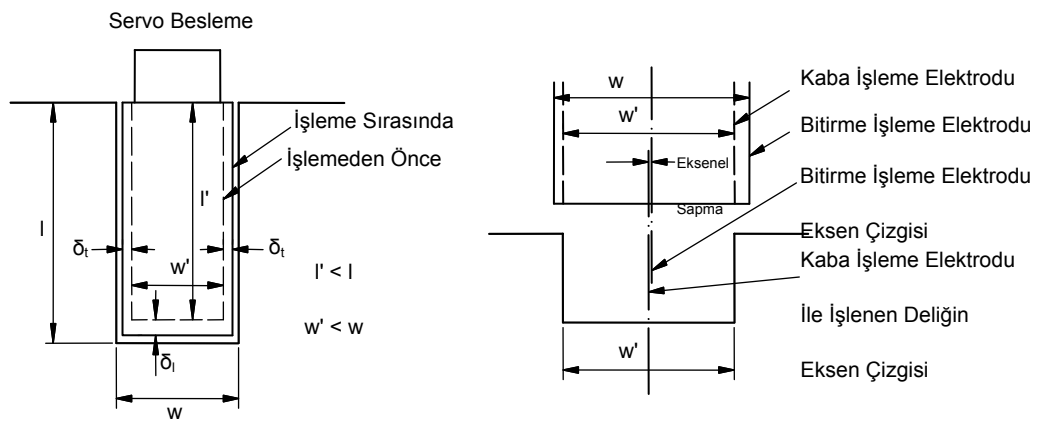


g) Titreşimli

Şekil 2.7. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri

2.4.4. İşparçası ve elektrodun boyutsal ve geometrik özellikleri

EEİ'de kullanılan bakır elektrotlar işleme esnasında işparçası olarak yaygın kullanılan çelik malzemelerden daha fazla genişir. Bundan dolayı elektrot tasarımı yapılırken ısı genleşmeyi göz önünde bulundurmak gerekir (Şekil 2.8 (a)). Kademeli olarak yapılan işlemlerde ise elektrot değişimi esnasında oluşan aksel sapmaların da engellenmesi gerekir (Şekil 2.8 (b)) [8].



(a) Termal genleşmenin etkisi (b) Aksel sapmanın etkisi

Şekil 2.8. Elektrot ve işparçası boyutları arasındaki ilişki [8]

İşleme yüzey alanı küçük olan elektrotlar yüksek enerji yoğunlukları sebebi ile daha fazla aşınır [9]. Ayrıca keskin köşe ve kenarlı elektrotlarda köşe ve kenar aşınmasının özellikle işleme başlangıcında çok hızlı olduğu bilinmektedir.

2.4.5. Elektrot malzemesinin fiziksel özellikleri

Elektrot malzemeleri iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olmalı, az aşınmalı ve kolay imal edilebilmelidir. EEİ ile işlemede elektrot malzemelerinin sahip olması istenen ısı-fiziksel özellikler; yüksek ısı kapasite, yüksek ergime sıcaklığı ve yüksek elektrik iletkenliktir. Bunun nedeni ise EEİ'de elektrot aşınmasının bu değerler ile ters orantılı olmasıdır [2].

2.5. EEİ'de Performans Karakteristikleri

2.5.1 İşparçası işleme hızı (İİH)

İİH, birim zamanda işparçası yüzeyinden kaldırılan malzeme hacmidir (Eş. 2.5). 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.

$$\text{İİH [mm}^3\text{/dk]} = \frac{\text{İşparçasından kaldırılan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{İşleme süresi [dk]}} \quad (2.5)$$

2.5.2. Elektrot aşınma hızı (EAH)

Oluşan her kıvılcım işparçasından olduğu gibi elektrottan da bir miktar malzeme kaybına neden olmaktadır. İşleme tamamlandığında elektrotta da belirgin bir aşınma meydana gelmektedir. EAH, birim zamanda elektrotta meydana gelen aşınma miktarıdır (Eş. 2.6).

$$\text{EAH [mm}^3\text{/dk]} = \frac{\text{Elektrottaki aşınan hacim [mm}^3\text{]}}{\text{İşleme süresi [dk]}} \quad (2.6)$$

2.5.3. Bağıl aşınma (BA)

BA, EAH değerinin İİH değrine oranı şeklinde tanımlanmaktadır:

$$BA [] = \frac{EAH [mm^3/dk]}{İİH [mm^3/dk]} \quad (2.7)$$

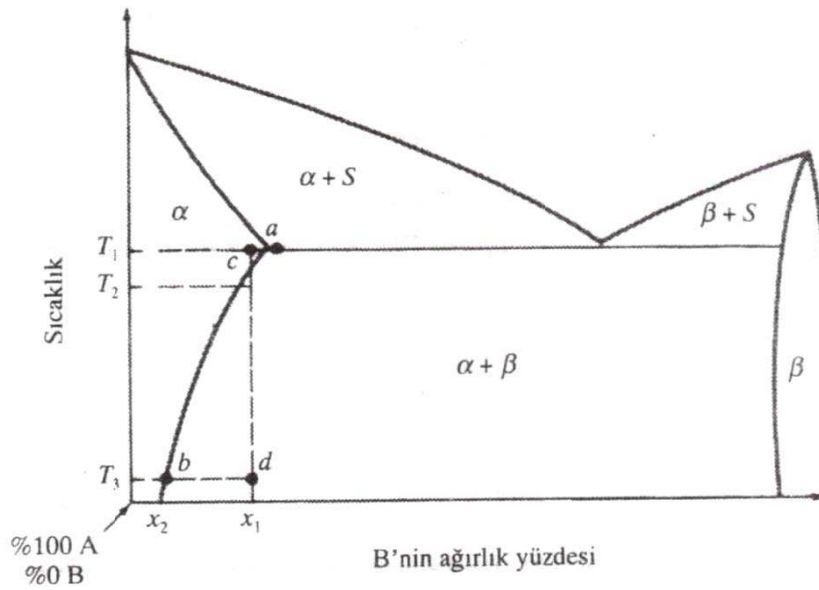
Boşalım akımı ve vurum süresi BA'yı etkileyen en önemli parametrelerdir. Düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemeleri, yüksek ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerine göre daha fazla aşınır. Bundan dolayı düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerinin kullanımında elde edilen BA değerleri daha yüksektir. Ayrıca, elektrotun negatif kutuplanmasında işleme akımı artıkça BA değerleri pozitif kutuplamaya göre daha düşük çıkmaktadır.

3. BAKIR VE ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ

3.1. Çökelme Sertleşmesi (Yaşlandırma)

Çökelme sertleşmesinin amacı ısıtılmış bir metalin biçim değiştirebilir ana fazı içinde, yoğun ve ince çökelmiş parçacık dağılımı elde etmektir. Çökelen parçacıklar malzemenin kafes yapısındaki kristal kusurlarının hareketine engel oluşturarak alaşımın dayanımını artırır [10].

Çökelme sertleşmesi süreci Şekil 3.1'de A ve B metallerine ait ikili faz diyagramı ile açıklanmaktadır. Çökelme sertleşmesinin olabilmesi için, sıcaklık düştükçe çözünürlüğü azalan bir katı çözeltilerin var olması gerekir. Şekilde α katı çözeltilisi, çözen boyuna a noktasından b noktasına ilerlerken azalan bir katı çözünürlük göstermektedir [10].



Şekil 3.1. A ve B metallerine ait ikili faz çizgesi [10]

Şekilde, x_1 bileşimindeki alaşımın çökelme sertleşmesi incelenirse, T_2 sıcaklığından T_3 sıcaklığına düşerken α katı çözeltilisinin çözünürlüğünde büyük bir azalma olmaktadır [10].

Çökelme sertleşmesi süreci üç temel basamaktan oluşur [10].

1. Çözelti ısıtıl işlemi, çökelme sertleşmesi sürecinde ilk basamaktır. Bu işleme bazen “çözeltiye alma” da denir. Dövülmüş veya döküm halindeki numune, çözenle katı faz arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve tek fazlı bir katı çözelti elde edilinceye kadar bu sıcaklıkta bekletilir. Şekil 3.1’de, c noktasındaki x_1 alaşımı için T_1 sıcaklığının seçilmesinin nedeni, katı çözelti α ’nın faz sınırlarının çözen ve katıgenin ortalarında bir yerde yer almasıdır.
2. Su verme, çökelme sertleşmesi sürecinde ikinci basamaktır. Numune hızla düşük bir sıcaklığa (genellikle oda sıcaklığına) soğutulur ve soğutma ortamı çoğunlukla oda sıcaklığındaki sudur. Su verme işleminden sonraki alaşım numunesinin yapısı aşırı doymuş katı çözeltisidir. Dolayısıyla, x_1 alaşımının su verilerek T_3 sıcaklığına (şekil 3.1’deki d noktasına) soğutulmasından sonraki yapısı aşırı doymuş α fazı katı çözeltisi olacaktır.
3. Yaşlandırma, çökelme sertleşmesi sürecinde üçüncü basamaktır. İnce dağılmış çökeltilerin oluşabilmesi için çözelti ısıtıl işlemi uygulanmış ve su verilmiş alaşım numunesini yaşlandırmak gereklidir. Çökelme sertleşmesi sürecinin amacı, alaşım içinde ince ve dağılmış çökelti oluşturmadır. Alaşımdaki ince çökelti, biçim değiştirme sırasında dislokasyonları ya çökelti kesmek ya da etrafından dolanmak zorunda bırakarak onların hareketini engeller. Biçim değiştirme sırasında kristal kusurlarının hareketlerinin sınırlandırılması alaşımın dayanımını artırır.

Oda sıcaklığındaki yaşlandırmaya doğal yaşlandırma, yüksek sıcaklıkta yapılanlara ise yapay yaşlandırma denir. Alaşımların çoğu yapay yaşlandırmaya ihtiyaç gösterir. Yapay yaşlandırma sıcaklığı, yaşlandırma sıcaklığı ile çözelti ısıtıl işlemi arasındaki sıcaklığın yaklaşık %15 ile % 25’i arasındadır.

3.2 Bakır-Kobalt-Berilyum Alaşımı (CuCo₂Be) [11]

Bakır-kobalt-berilyum alaşımında, denge çökeltisi CoBe fazı olup, bu faz hacim merkezli kübik sistemde kristalleşir ve çevre sıcaklığından, ergimenin başlangıcına kadar dengededir.

CoBe fazının bakır içinde ergiyebilme kabiliyeti 20⁰C sıcaklıkta pratik olarak sıfır olup 1010⁰C sıcaklıkta yaklaşık % 2,7 ye çıkarmaktadır (Şekil 3.2).

Temperlemenin yumuşatıcı etkisi genellikle, ergiyik halde bulunan ilave element miktarı su verme sırasında ne kadar fazla olursa o kadar artar. Bu durumda CoBe oranının en az % 2,5 olması beklenir.

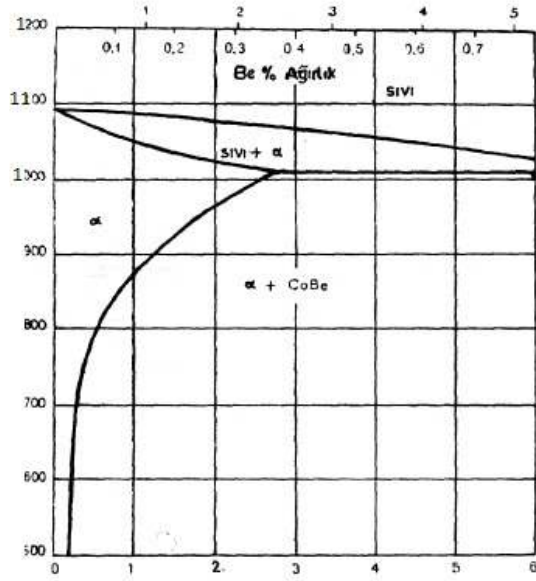
Bununla birlikte, çözeltiye alma işleminin yapıldığı yüksek sıcaklıklarda tane tek faz halinde hızla irileşir. Bu nedenle tane sınırlarının yer değiştirmesini engelleyen yeter miktarda ergimiş tanecik bulunması için CoBe oranının teorik sınır değerinin üstünde olması gerekir.

Çözeltiye alma ve su verme:

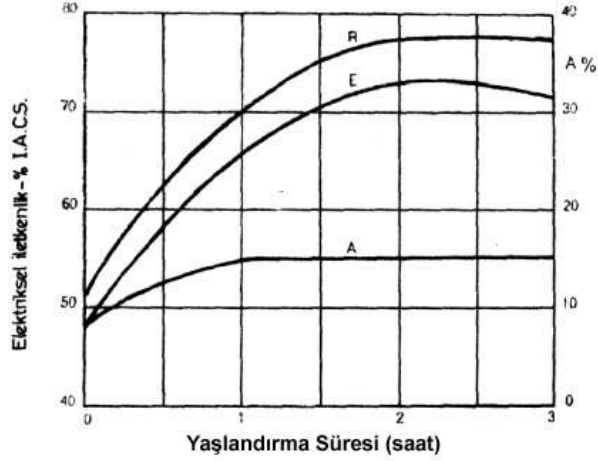
CoBe fazından en az miktarda ergitmek ve yanma tehlikelerinden kaçınmak için, ergiyik haline getirme 900⁰C ile 950⁰C arasında gerçekleştirilir.

Yaşlandırma işlemi:

Yaşlandırma işlemi, 450⁰C ile 500⁰C arasında (yaygın olarak 480⁰C sıcaklıkta) uygulanır. Bu sıcaklıkta tutma süresi su verilmiş parçalarda 3 saat, su verilmiş-plastik şekillendirme yöntemleri ile üretilmiş parçalarda ise 2 saattir. Yaşlandırma işlemi sonrası CuCo₂Be alaşımının fiziksel ve mekanik özelliklerinin değişimi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Cu-Co-Be alaşımının denge diyagramı [11]



Şekil 3.3. CuCo₂Be alaşımının iletkenlik, kopma mukavemeti (R), elastik sınır (E) ve kopma uzaması (A)'nın su verme ve %50 yoğrulmadan sonra 450°C sıcaklıkta yaşlandırma süresinin bir fonksiyonu olarak gösterilmesi [11]

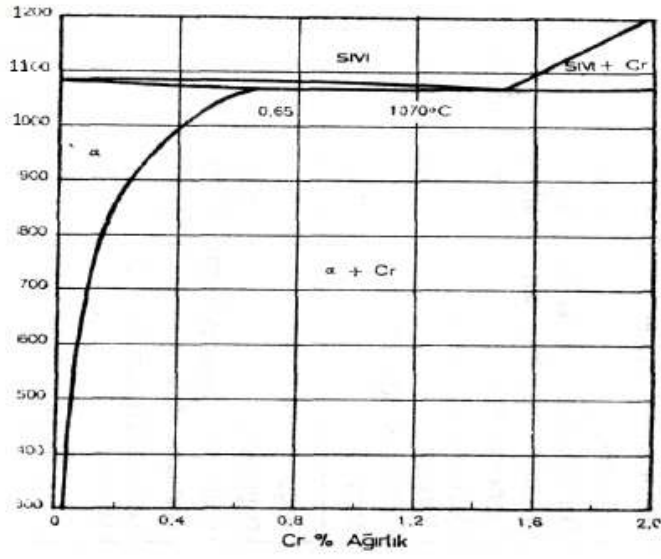
3.3 Bakır-Krom(CuCr) ve Bakır-Krom-Zirkonyum(CuCrZr) Alaşımları [11]

Bu iki alaşımanın genel karakteristikleri arasındaki fark çok az olduğundan aynı başlık altında incelenmiştir. Özellikle bu iki alaşımanın ısıtma işlemleri aynı koşullar altında gerçekleştirilebilmekte ve çevre sıcaklığındaki mekanik özellikleri, aynı koşullar altında birbirlerine yakın olmaktadır.

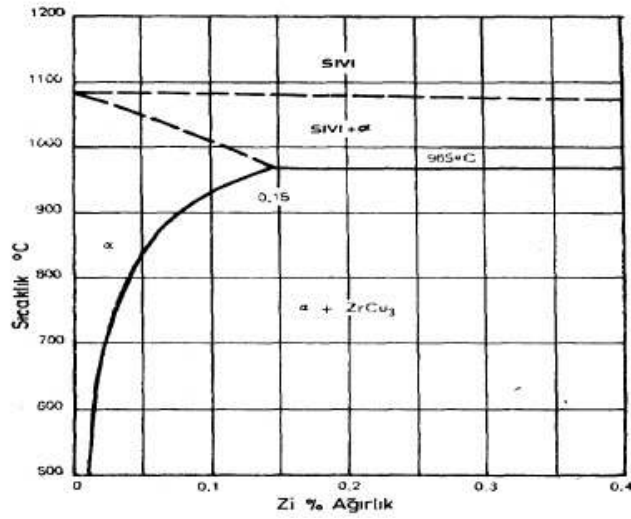
Krom alaşımlı bakıra az miktarda zirkonyum ilavesi, bu alaşımanın yüksek sıcaklık değerlerinde mekanik mukavemetinin iyileşmesini sağlar. Krom oranı her iki alaşım için ağırlık olarak %6 ile %1 arasındadır. Üçlü alaşımanın zirkonyum oranı ise ağırlık olarak %0,08'dir.

Krom ve zirkonyum oda sıcaklığında bakır içinde çok az çözünür. Çözünme kabiliyetleri sıcaklıkla artar. Kromun ergime kabiliyeti 1070°C sıcaklıkta %0,7'ye zirkonyumun ise 980°C sıcaklıkta %0,15'e kadar artar.

Bakır-Krom (Şekil 3.4) ve Bakır-Zirkonyum (Şekil 3.5) denge faz diyagramları sayesinde, yapısal sertleştirme olanakları iki ikili alaşımanın ortaya çıkmasına yardımcı olmuştur. Bunlardan biri %0,6 ile %0,1 kromlu diğeri ise %0,10 ile %0,15 zirkonyumlu alaşımdır. Zirkonyum elementinin sertleştirici etkisi krom elementinden daha az olduğundan bu iki alaşımanın çevre sıcaklığında kıyaslanabilir mekanik karakteristikler elde etmek için, zirkonyum alaşımlı bakırda, krom alaşımlı bakırın su verme ve yaşlandırma işlemleri arasında daha yüksek bir plastik şekil verme işlemi gerçekleştirilmelidir. Bakır-Zirkonyum alaşımı sadece 250°C ile 450°C sıcaklıklar arasında krom alaşımlı bakıra göre belirgin bir avantaj sağlar. Zirkonyum alaşımlı bakır bu sıcaklıklarda, kopma mukavemeti ve süneklik gibi mekanik özelliklerini korur. Bununla birlikte hazırlanması zirkonyumun havayla kuvvetli reaktivitesi (oksitlenme, nitrürleme vb.) nedeniyle zordur.



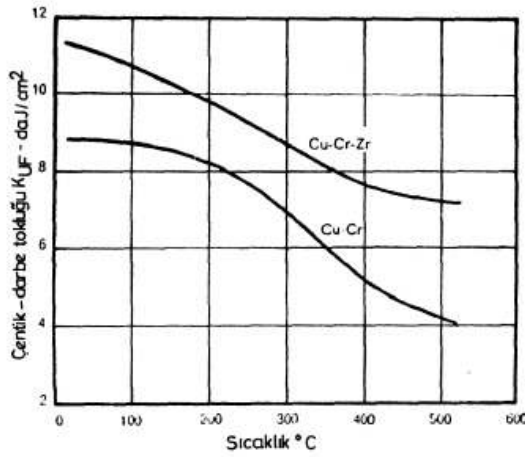
Şekil 3.4. Bakır-Krom denge faz diyagramı [11]



Şekil 3.5. Bakır-Zirkonyum denge faz diyagramı [11]

Bakır-krom-zirkonyum alaşımlarının hazırlanabilmesi için vakum altında ergitme ve döküm yapılmaktadır. Böylece zirkonyum oranı yarı yarıya azaltılarak yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruma kabiliyeti, bakır-krom alaşımına kazandırılmaktadır (Şekil 3.6). İşlem görmüş halde üçlü Cu-

Cr-Zr alaşımı böylece düşük sıcaklıklarda, kromlu bakırın niteliklerinden daha üstün karakteristikler ve yüksek sıcaklıklarda da bu karakteristikleri koruma kabiliyeti kazanır.



şekil 3.6. Su verilmiş-yğrulmuş-menevişlenmiş halde kromlu bakırın sıcakta darbe mukavemeti üzerine %0,04 zirkonyum ilavesinin etkisi [11]

zeltiye alma ve su verme:

Bakır-krom ve bakır-krom-zirkonyum alaşımının ısı ışlemi 1000°C civarında yapılarak oda sıcaklığında su verilir. Kritik soğuma hızı 17°C/s'dir. İşlem görecek parçaların boyutlarına göre zeltiye alma sıcaklığında parçayı tutma süresi 15 ile 60 dakikadır. Bu süreç içersinde oksijen, alaşım içinde yayılır ve kromlu zirkonyumu oksitler. Bu nedenle bu alaşımın kontrolsüz atmosferlerde yapılan zeltiye alma işlemlerinde alaşımın sertleştirici etkisi azalır veya yok olur. Örneğın 1 saat 1000°C sıcaklıkta havada oksitlenmiş bir kromlu bakırda oksijenin yayıldığı yüzeye yakın tabakalarda (0,35 mm derinlik) mikro sertlik 188 HV'den 72 HV'ye düşmüştür. İ oksitlenme tabakasıyla yüzeysel bakır oksit tabakasının kalınlığı tutma süresinin kareköküyle orantılıdır.

Yaşlandırma işlemi:

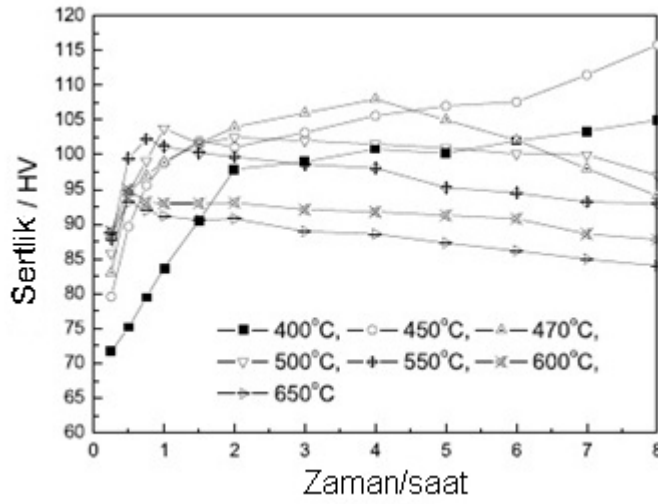
Bakır-krom ve Bakır-krom-zirkonyum alaşımının yaşlandırma işlemi 450°C ile 500°C arasında 2 ile 4 saat arasında değişen tutma süresiyle gerçekleştirilir. Az miktarda soğuk işlem görmüş parçaların yaşlandırma sıcaklığı 500°C sıcaklıkta 2 saat süresince yapılır.

Büyük kütleli ve önemli kalınlık farkına sahip parçalarda 450°C sıcaklık civarında çalışılması gerekir. Bu sıcaklıkta tutma süresi 4 saat veya daha fazladır. Bu sıcaklıkta yüzeysel oksitlenmenin etkisi ihmal edilebilir.

Hızlı soğutma ve solüsyonlu soğutma kullanılarak yapılan yaşlandırma işleminden sonra bakır-krom-zirkonyum alaşımının mikro yapısı ve özellikleri [14]:

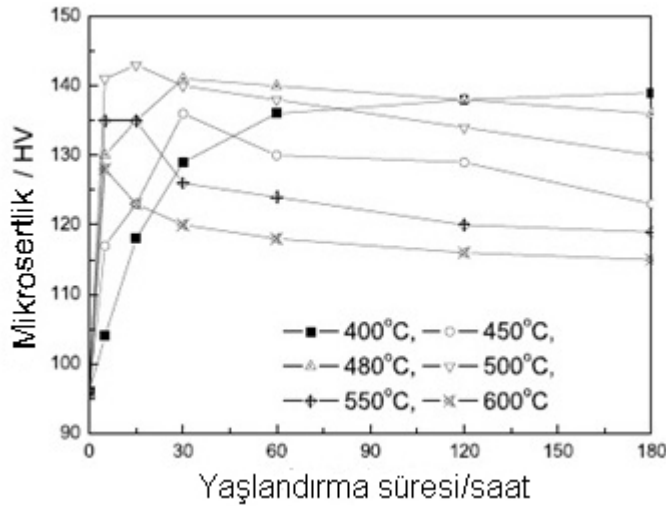
[14] nolu çalışmada solüsyon kullanılarak (SSA) ve oda sıcaklığında su ortamında hızlı soğutma yapılarak (RSA) uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası CuCrZr alaşımının yapısı ve özellikleri üstüne çalışılmıştır. 500°C sıcaklıkta 15 dakika tutularak yapılan yaşlandırma işleminde, RSA sonrası sertlik 143 HV ve iletkenlik %72 IACS olarak gözlemlenmiştir. Aynı koşullar altında yapılan SSA sonrası sertlik 86 HV ve iletkenlik %47 IACS'ye ulaşmıştır. Mikro yapı analizi yapılmış ve bu analiz sonucunda tane yapılarının RSA ortamında, SSA ortamına göre çok daha küçük olduğu analiz edilmiştir. RSA koşullarında tane içersindeki çökelmelerin, tane sınırları boyunca daha iyi dağıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte SSA ortamında ise tane sınırları boyunca büyük Cr tanecikleri olduğu gözlemlenmiştir.

SSA'dan sonra CuCrZr alaşımının sertliği, artan yaşlandırma sıcaklığıyla birlikte Şekil 3.7'de gösterildiği gibi belirli bir noktaya kadar artış gösterir. Bu tepe noktası artan sıcaklıkla düşmektedir.



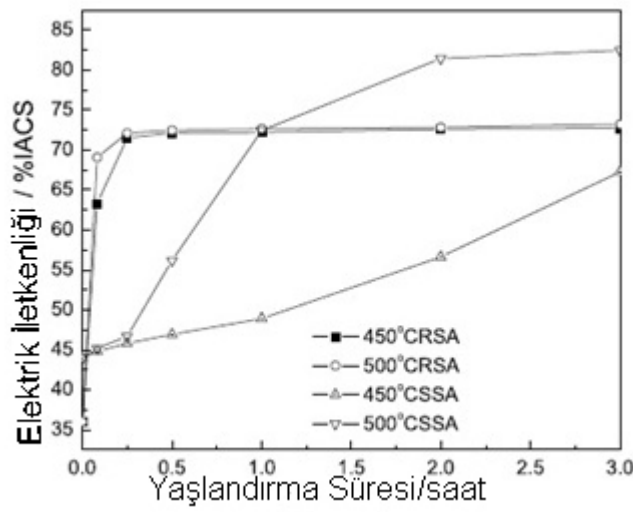
Şekil 3.7. SSA'da sertlik vs yaşlandırma süresi ve sıcaklığı [14]

Şekil 3.8 CuCrZr alaşımının sertliğinin RSA şartlarında, farklı yaşlandırma sıcaklığı ve zamanlarında nasıl değiştiğini göstermektedir. 400°C sıcaklıkta sertlik süreyle birlikte hızla artmaktadır. Sıcaklık 450°C'nin üzerine çıkarıldığında ise sertlik başlangıçta hızla artmakta daha sonra geçen süreyle hızla düşmektedir.



Şekil 3.8. RSA'da sertlik vs yaşlandırma süresi ve sıcaklığı [14]

Şekil 3.9 yaşlandırmada farklı soğutma şartlarının CuCrZr alaşımının elektrik iletkenliğine etkisini göstermektedir. Şekil 3.9'dan görülebildiği gibi RSA sonrası elektrik iletkenliği %36 civarında, SSA sonrası %44 civarında artmıştır. Bunun nedeni RSA da çözünmeden kalan Cr atomlarının daha fazla oluşudur. Bu atomlar CuCrZr alaşımında elektrik iletiminin önünde bir engel teşkil ederler ve kafes yapısı içerisindeki kusurların yoğunluğunu artırırlar.



Şekil 3.9. RSA ve SSA'nın 450°C ve 500°C deki iletkenliği [14]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 İşparçası ve Elektrotlar

4.1.1 İşparçası numunelerinin hazırlanması

Endüstride EEI’de işlenen çoğu parça kalıp ve takım çeliği olduğundan, takım çeliklerine benzer özellikler taşıyan ve daha ucuz olan SAE 1040 çeliği işparçası olarak seçilmiştir. SAE 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 4.1 de, mekanik ve fiziksel özellikleri ise Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.1 1040 çeliğinin 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

Tablo 4.2 1040 Çeliğinin mekanik ve fiziksel özellikleri

Özellikler	
Elastik Modül [GPa]	207
Çekme Mukavemeti [MPa]	590
Akma Mukavemeti [MPa]	490
Yoğunluk [g/cm ³]	7,85
Elektrik Direnci [ohm/cm]	0,0000223
Isıl İletkenlik [W/m.K]	51,9

40×10 mm kesitli lama şeklindeki 1040 çeliği, HSS dairesel testere ile 20 mm uzunlukta parçalara kesilmiştir. Parçaların geniş yüzeyleri (alt ve üst yüzeyler) taşlama işlemine tabii tutulmuştur (Resim 4.1).



Resim 4.1 İşparçaları

Deneylerde işparçaları 40×10 mm boyutlarındaki yüzeylerinden birbirlerine dayandırılarak mengenede sıkıştırılmış (Resim 4.2 (a)) ve EEİ bu iki parçanın ortasından gerçekleştirilmiştir (Resim 4.2 (b)). Böylece deney sonrası ölçümler (yüzey pürüzlülüğü, yüzey katmanları vb.) için iş parçasının kesilmesine gerek kalmamıştır (Resim 4.2 (c)).



(a)



(b)



(c)

Resim 4.2 İşparçalarının birleştirilmesi a) birleştirme, b) işleme, c) işleme sonrası parçaların ayrılması

4.1.2 Elektrot malzemesi seçimi ve elektrotların hazırlanması

Elektrot seçiminde göz önüne alınan kriterler; kolay temin edilebilmesi, bakır alaşımı olması, ucuz olması, ısıt işlemlere uygunluk ve elektroerozyonda dalma elektrot olarak kullanılabilmesidir. Bu kriterlere göre elektrot malzemesi olarak E-bakır (elektrolitik-bakır), CuCr1Zr (bakır-krom-zirkonyum alaşımı, CUPROMAX) ve CuCo2Be (bakır-kobalt-berilyum alaşımı, CUPRO CB) bakır alaşımları seçilmiştir. Kullanılan bakır alaşımlarının mekanik ve fiziksel özellikleri EK-1’de verilmiştir.

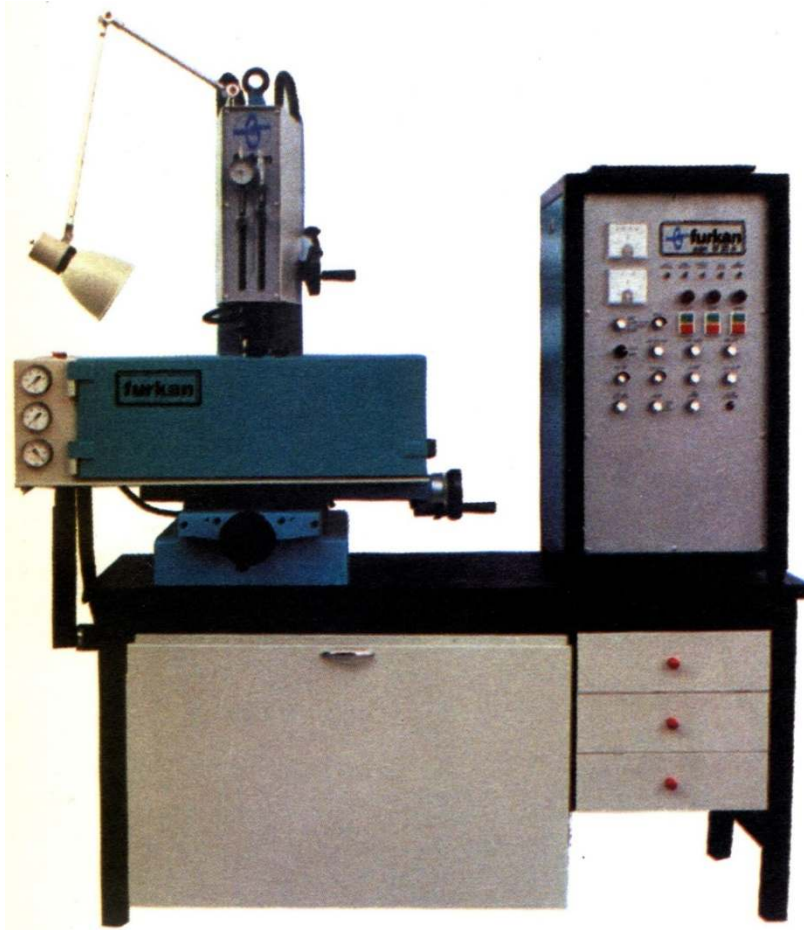
E-bakır, CuCr1Zr ve CuCo2Be elektrotlar 16 mm çapındaki çubuk malzemelerden HSS dairesel testere ile (düşük hızda) 41 mm uzunluğunda kesilmiştir. Elektrotların düz alınları tornalanarak 40 mm boya getirilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.3 Elektrotlar

4.2 EEİ Deneyleri

Deneyisel alışmalar, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakltesi Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezghları Laboratuvarı'nda bulunan Furkan EDM M 25 A tipi EEİ tezghında gerçekleştirilmiştir (şekil 4.1). Tezgaha ait teknik zellikler Tablo 4.3'de verilmiştir.



şekil 4.1 EDM M 25 A EEİ Tezgahı

Tablo 4.3 EEİ tezgâhı teknik özellikleri

Jeneratör	
Güç [KVA]	3 (220 V, 50 Hz, 3f)
Boşalım Akımı Kademeleri [A]	1,5-3-6-12-25
Vurum Süresi Kademeleri [μ s]	3-6-12-25-50-100-200-400-800-1600
Bekleme Süresi Kademeleri [μ s]	3-6-12-25-50-100-200-400-800-1600
Tezgah Gövdesi	
İş Tablası Ölçüleri (XxY) [mm]	550 x 250
Tabla Hareket Ölçüleri (XxY) [mm]	300 x 200
Tabla Hareket Hassasiyeti (X-Y) [mm]	0,02
İşleme Haznesi Ölçüleri (XxYxZ) [mm]	860 x 470 x 280
Maksimum İşparçası Ölçüleri (XxYxZ) [mm]	660 x 470 x 280
Z - Ekseni Kontrol Mekanizması	Servo Kontrol
Z - Ekseni Hareket Kursu [mm]	160
Z - Ekseni Hareket Hassasiyeti [mm]	0,01
Dielektrik Sıvı Sistemi	
Depo Ölçüleri (XxYxZ) [mm]	950 x 580 x 600
Pompa Kapasitesi [lt/dak]	50

4.2.1 Dielektrik sıvı

Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmış ve yandan püskürtme uygulaması yapılmıştır.

4.2.2 Deneysel parametreler

Deneylerde üç farklı vurum süresi (50 μ s, 100 μ s ve 200 μ s), iki farklı boşalım akımı (6 A ve 12 A) ve üç farklı elektrot cinsi (E-bakır, CuCr1Zr ve CuCo2Be) kullanılmıştır. Dielektrik sıvı cinsi, işparçası malzemesi, kutuplama, işleme derinliği, bekleme süresi, püskürtme tipi ve basıncı sabit tutulmuştur (Tablo 4.4).

Tablo 4.4 Deneylerde kullanılan işleme parametreleri

İşleme Parametreleri	Değerler
Vurum Süresi [μ s]	50, 100, 200
Boşalım Akımı [A]	6, 12
Dielektrik sıvı	Gaz Yağı
Püskürtme Seçimi	Yandan
Vurum Ara Süresi [μ s]	50 μ s
İşleme Derinliği [mm]	5
Püskürtme Basıncı [bar]	0.1

E-bakır elektrot, CuCr1Zr ve CuCo2Be alaşımları ve yaşlandırılmış (2, 4, 12, 24 saat) CuCr1Zr alaşımı elektrotlarla deneyler iki kere tekrar edilerek deneylerin güvenilirliği artırılmıştır. Kullanılan değerler iki deneyin ortalamasıdır.

4.2.3 İİH, EAH ve Ra ölçümleri

İİH ve EAH Tespiti

İşparçaları ve elektrotlar istenen ölçülerine getirildikten sonra gaz yağı ile temizlenerek basınçlı hava ile kurutulmuştur. 0,005 g hassasiyete sahip HANA 330 marka dijital terazi ile üçer kez tartılmıştır. Bu üç ölçümün aritmetik ortalaması kaydedilmiştir. EEİ tamamlandıktan sonra işparçaları ve elektrotlar aynı temizleme ve kurutma işlemine tabi tutularak üçer kez tartılmış ve bu üç ölçümün ortalaması alınmıştır. Önceden hesaplanmış işparçası ve elektrotların ortalama yoğunluk değerleri kullanılarak her işparçası ve elektrot için deney sonrası işleme ve aşınma hacimleri hesaplanmıştır. İşleme ve aşınma hacimleri işleme sürelerine bölünerek İİH [mm^3/dk] ve EAH [mm^3/dk] değerleri hesaplanmıştır.

Elektrot Boy Aşınmasının Tespiti

Elektrotun ilk boyu ve işleme sonrası boyu BMI 770200 marka 0,01mm hassasiyete sahip dijital kumpas ile ölçülmüştür. Ölçümler her elektrot için üç ayrı yerden yapılarak elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

Ra Ölçümü

İşparçalarının işlenmiş yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerlerinin ölçümleri Rank Taylor-Hobson marka Surtronic 3 + HB-103 tipi portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Ölçümlerde 2CR tipi filtre kullanılmıştır. Örnekleme uzunluğu (cut-off) 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu (traverse length) 4 mm olarak alınmıştır. Her ölçüm altı farklı bölgeden yapılarak elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır.

4.3 Isıl İşlem Deneyleri

CuCr1Zr alaşımına uygulanan ısıt işlemler Protherm PLF 120/7 tipindeki ısıt işlem laboratuvar fırınında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar fırınının iç ölçüleri 14×20×25 cm olup iç hacmi 7,30 litredir. Fırının ulaşabildiği en yüksek sıcaklık değeri 60 dakika içerisinde 1200°C ve sıcaklık hassasiyeti ise $\pm 1^\circ\text{C}$ 'dir (Resim 4.4).

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki faz diyagramlarından yararlanılarak çözeltiye alma işlemi 985°C sıcaklıkta 30 dakika süreyle yapılmıştır. Çözeltiye alma işleminden sonra parçalar hızla fırından çıkartılıp oda sıcaklığındaki suda yaklaşık 80 dakika bekletilmiştir. Su verilen parçalar daha sonra havada kurutulmaya bırakılmıştır.



Resim 4.4 985°C sıcaklıkta CuCr1Zr alaşım elektrotların görünümü

Elektrotlar Bölüm 3'de anlatılan koşullara uygun olarak, 500°C'de 2, 4, 12 ve 24 saat sürelerinde yaşlandırma işlemine tabii tutulmuştur. Yaşlandırılan parçalar daha sonra hava ortamında soğutulmaya bırakılmışlardır. Yüzeyde oluşan oksidasyonu temizlemek için elektrotlar tornaya bağlanmış, 400 ve 800 numaralı zımparalar kullanılarak zımparalama işlemi yapılmıştır.

4.4 Metalografik Görüntüleme

Metalografik fotoğraflar Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan Olympus-GX model metalürji mikroskobunda çekilmiştir. Metalürji mikroskobu 1.25x-150x objektif aralığında görüntü özelliğine ve dijital kameraya sahiptir.

Metalografi Öncesi Elektrotlara Uygulanan İşlemler:

1. Zımparalama:

Elektrot numuneleri sırası ile 200, 400, 600 ve 800 numaralı zımparalar kullanılarak, 15 dakika süreyle, su zımparasıyla zımparalanmıştır.

2.Parlatma İşlemi:

Parlatma işlemi Struers LaboPol-1 tipindeki parlatma cihazı kullanılarak yapılmıştır. Elmas tozu, sprey yardımıyla zımpara bölgesine püskürtülüp her bir numunenin, mikro yapı incelemesi yapılacak alın bölgesi, 15 dakika boyunca parlatılmıştır.

3. Dağlama İşlemi:

1. 80 ml saf su,
2. 5 ml Sülfirik asit (H_2SO_4),
3. 10 g Potasyumdikromat ($K_2Cr_2O_7$),
4. İki damla hidroklorikasit (HCl) ,

malzemelerinin karıştırılması sonucu elde edilen çözelti kullanılarak yapılmıştır. Bu karışım numunenin alın bölgesine 6-30 saniye aralığında uygulanmıştır. Uygulama sonrası suyla temizlenip, numuneler kurutularak mikro yapı incelemesine hazır hale getirilmiştir.

4.5 Elektrik İletkenliğinin Tespiti

Elektrotların elektrik iletkenlikleri, Autosigma 3000 DL cihazı ile %IACS birimi cinsinden ölçülmüştür.

4.6 Sertlik Ölçümleri

Elektrotların sertlikleri, MEBA MHT 150-RB dijital sertlik ölçme cihazı kullanılarak Vickers sertliği (HV) cinsinden ölçülmüştür. Deney öncesi elektrotların alın kısımlarından yeteri miktar kesilerek alınan numune parçaları zımparalanarak, parlatılmıştır. Daha sonra bakalite gömme işlemi uygulanmıştır (Resim 4.5). Her bir numunenin İki farklı noktasından sertlik değeri ölçülmüştür. Bulunan değerlerin ortalaması alınmıştır.



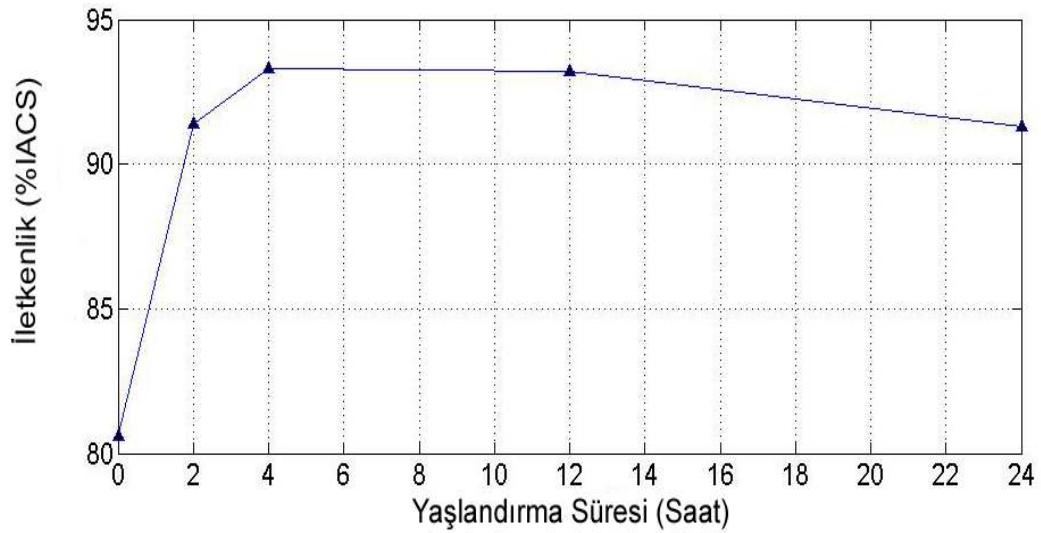
Resim 4.5 Kesilmiş ve bakalite gömülmüş elektrot numuneleri

4.7 SEM Analizi

Yaşlandırma işlemi sonrası elde edilen malzemelerin SEM analizleri 2592 × 1944 - HR-SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile yapılmıştır.

5. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

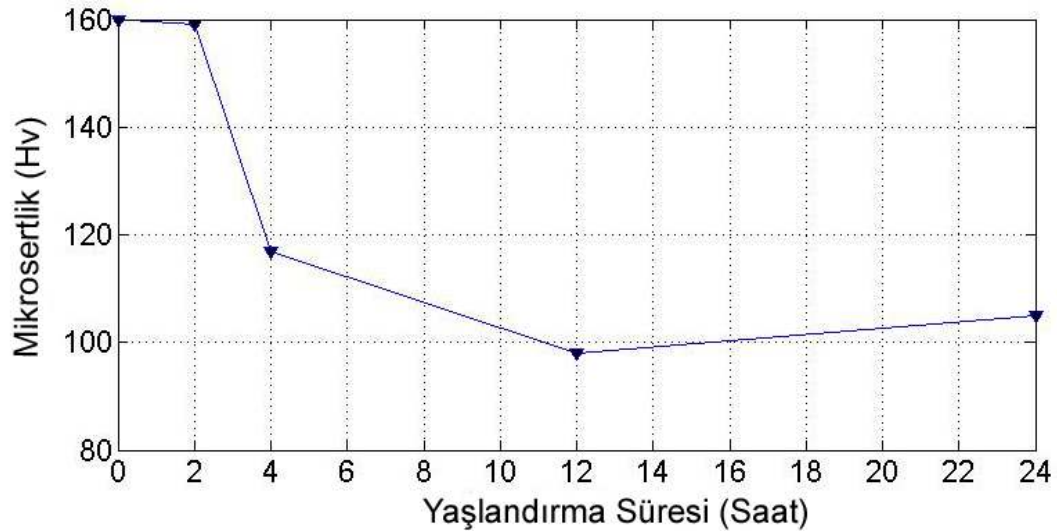
5.1 CuCr1Zr ve Isıl İşlem Uygulanmış CuCr1Zr Elektrotların İletkenlik Ölçümleri



Şekil 5.1 Değişik yaşlandırma süreleri için CuCr1Zr bakır alaşımının elektriksel iletkenliğinin değişimi

Şekil 5.1, CuCr1Zr bakır alaşımı için 500°C sıcaklık ve değişik süreler için uygulanan yaşlandırma işleminin elektriksel iletkenlik üzerindeki etkisini göstermektedir. Yaşlandırma işlemi öncesinde CuCr1Zr alaşımının elektriksel iletkenliği %80,6 IACS iken, 2 saat süresince uygulanan yaşlandırma işlemi sonrasında belirgin bir artış göstererek % 91,4 IACS değerine yükselmiştir. Bunun olası nedeni malzeme içerisindeki kusurların yaşlandırma işlemi sonrası hızla azalmaya başlamasıdır [24]. 4 saat uygulanan yaşlandırma işlemi sonrasında 2 saat yaşlandırma işleminde olduğu kadar belirgin bir artış olmasa da iletkenlik, %93.8 IACS değerine ulaşmıştır. 12 saatlik yaşlandırılmış alaşımın elektriksel iletkenliğinde 4 saatlik yaşlandırmaya göre artış görülmemiştir. 24 saatlik yaşlandırma işleminde ise elektriksel iletkenlik düşmüştür. Bunun muhtemel sebebi malzeme içerisindeki çökeltilerin kümeleşmesi ve irileşmesi sonucu meydana gelen aşırı yaşlanmış yapıdır [22, 26].

5.2 Yaşlandırma İşleminin CuCr1Zr Alaşımının Sertliği Üzerindeki Etkisi



Şekil 5.2 Değişik yaşlandırma süreleri sonucunda CuCr1Zr bakır alaşımının mikrosertliğinin değişimi

CuCr1Zr alaşımına 500°C'de yapılan yaşlandırma işlemi artan yaşlandırma süresiyle birlikte (12 saat yaşlandırma işlemine kadar) malzemenin sertliğini azaltmıştır (Şekil 5.2). Yaşlandırma işlemi uygulanmamış malzemede 160 HV olan sertlik değeri 2 saat süreyle uygulanan yaşlandırma işleminden sonra 159 HV'ye, 12 saat sonunda ise 98 HV' ye kadar düşmüştür. Sertlikteki bu düşüş yaşlandırma işlemi yapılan fırın atmosferindeki oksijenin krom zirkonyum alaşımına nüfus ederek yaşlandırma işleminin sertleştirici etkisini engellemesine bağlanabilir [23]. 12 saatlik yaşlandırma işlemi sonrası yaşlanmış yapının sertlik değeri 24 saatlik aşırı yaşlandırma sonucunda bir miktar artmıştır.

5.3 Elektroerozyon İle İşleme Deneylerinin Sonuçları :

Yapılan EEİ deneylerinin sonuçları (EAH, İİH, Ra, BA) Tablo 5.1'de toplu olarak sunulmuştur. Detaylı olarak deneyler ve ölçümler EK-2'de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Deneysel sonuçlar (ortalaması alınmış)

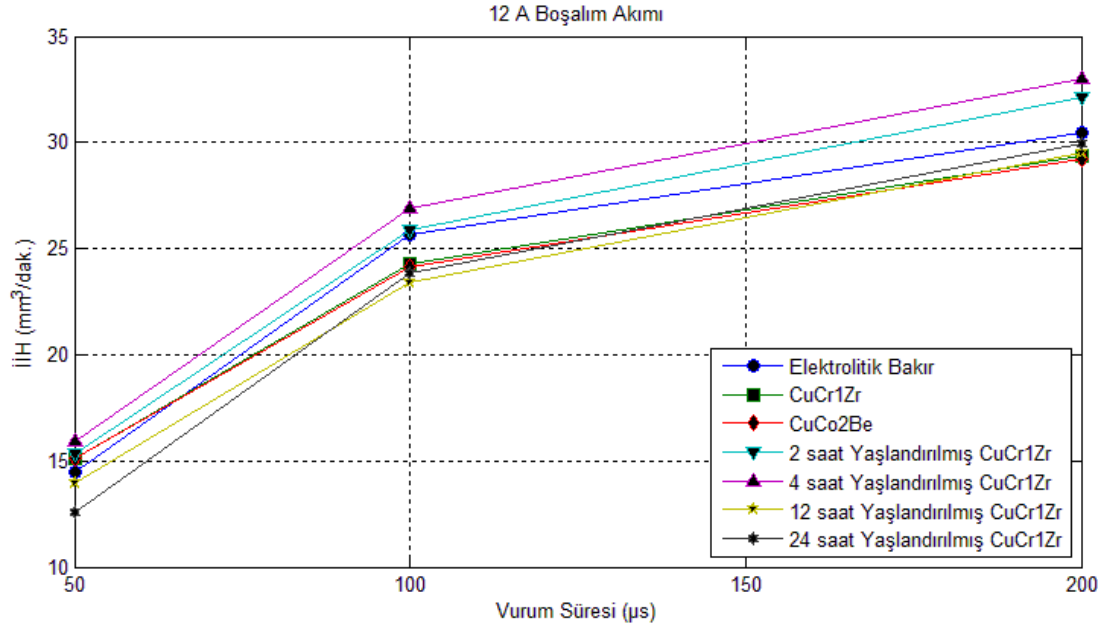
Elektrot Cinsi	Vurum Süresi [μs]	Boşalım Akımı [A]	EAH [mm ³ /dak]	MRR [mm ³ /dak]	Ra [μm]	BA [%]
E-Bakır	50	6	0,09	4,41	4,4	1,9
	50	12	1,70	14,46	6,3	11,7
	100	6	0,04	5,81	5,7	0,7
	100	12	0,50	25,68	7,0	1,9
	200	6	0,01	4,94	5,9	0,2
	200	12	0,14	30,47	8,7	0,5
CuCo2Be	50	6	0,32	5,51	4,8	5,8
	50	12	3,68	15,15	5,9	24,3
	100	6	0,15	7,76	6,0	1,9
	100	12	1,91	24,12	7,0	7,9
	200	6	0,05	7,66	6,7	0,6
	200	12	0,64	29,21	8,4	2,2
CuCr1Zr	50	6	0,10	4,99	4,7	2,0
	50	12	2,01	15,10	6,1	13,3
	100	6	0,06	6,60	5,9	0,8
	100	12	0,74	24,25	7,0	3,1
	200	6	0,01	5,96	6,8	0,2
	200	12	0,22	29,39	8,5	0,8
2 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	50	6	0,11	5,53	5,0	1,9
	50	12	1,81	15,31	6,1	11,8
	100	6	0,05	7,31	6,2	0,7
	100	12	0,70	25,90	7,2	2,7
	200	6	0,02	7,69	6,3	0,2
	200	12	0,14	32,13	8,7	0,4
4 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	50	6	0,09	5,04	4,8	1,8
	50	12	2,04	15,98	5,8	12,8
	100	6	0,05	7,65	6,5	0,7
	100	12	0,85	26,90	8,1	3,2
	200	6	0,01	7,04	6,9	0,1
	200	12	0,19	33,04	7,4	0,6
12 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	50	6	0,08	4,24	4,8	1,8
	50	12	1,58	13,98	5,9	11,3
	100	6	0,04	5,79	6,6	0,8
	100	12	0,71	23,40	7,5	3,1
	200	6	0,01	4,50	5,4	0,1
	200	12	0,13	29,52	8,0	0,4
24 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	50	6	0,09	4,51	4,8	1,9
	50	12	1,30	12,61	5,9	10,3
	100	6	0,05	6,18	5,7	0,7
	100	12	0,73	23,82	7,3	3,0
	200	6	0,01	6,40	5,9	0,2
	200	12	0,13	29,95	7,7	0,4

5.3.1 Vurum süresi ve boşalım akımının, İİH üzerine etkisi

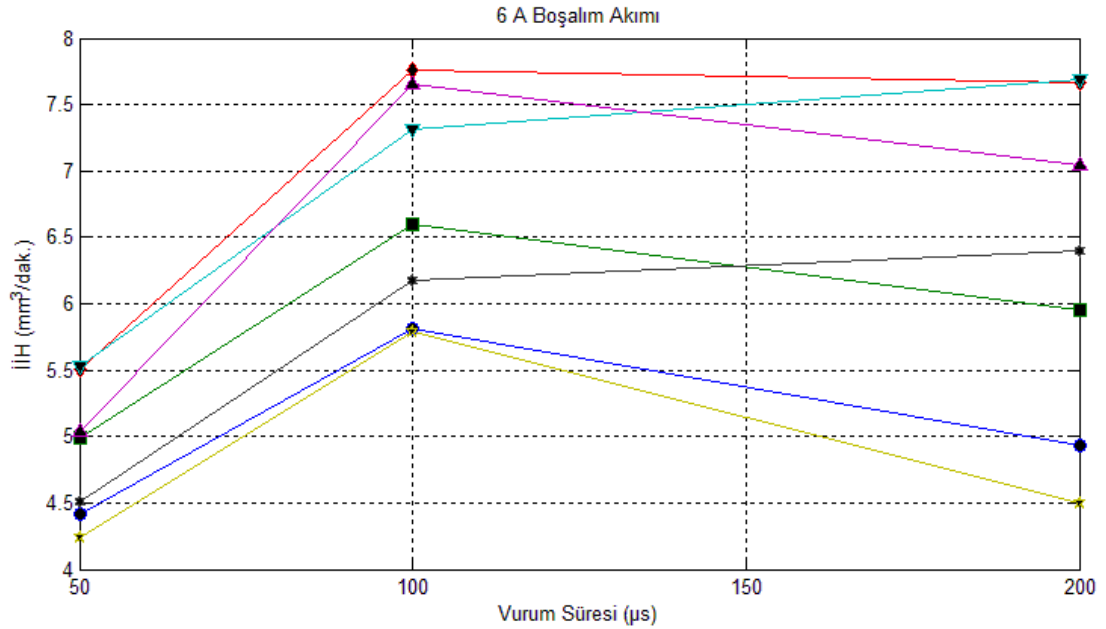
Boşalım akımının 6 A ile 12 A değerleri için elde edilen İİH sonuçları Şekil 5.3'de verilmiştir. Şekil 5.3 (b)'de görüldüğü üzere, 6 A boşalım akımı ve 100 μ s vurum süresi için CuCo2Be'nin İİH performansı en yüksek değere sahiptir. Artan iletkenlikle birlikte (Şekil 5.1), 2 saat ve 4 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşım elektrotları, işlem uygulanmamış CuCr1Zr alaşımından daha yüksek İİH vermektedir. 2 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış elektrotlar, CuCo2Be alaşımının 50 ve 200 μ s vurum sürelerinde verdiği İİH değerlerini verebilmiştir (Şekil 5.4 (a) ve (c)). E-bakır, 12 ve 24 saat yaşlandırma işlemine tabii tutulmuş (aşırı yaşlandırılmış) CuCr1Zr alaşımlarının ise daha düşük İİH değerleri verdiği görülmüştür. Boşalım akımının artışı ile (artan boşalım enerjisinin) işparçası yüzeyinden ergiyerek buharlaşan malzeme miktarının artması sonucunda İİH değeri de artmıştır. Boşalım akımı 12 A değerine arttırıldığında (Şekil 5.3 (a)), farklı elektrotların İİH değerleri birbirlerine oldukça yaklaşmış olmakla birlikte 2 saat ve 4 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr elektrotların diğer elektrotlara göre yüksek İİH değerlerini korudukları görülmektedir. 6 A boşalım akımında en yüksek İİH değerine sahip olan CuCo2Be alaşımının İİH performansı, boşalım akımı 12 A çıkarıldığında, E-bakırın İİH performansının altına düştüğü görülmektedir. Isıl işlem görmemiş ve aşırı yaşlandırılmış CuCr1Zr elektrotların ise İİH performanslarının diğer elektrotlara göre daha düşük olduğu görülmektedir.

İşparçası yüzeyine uygulanan boşalımların daha uzun süreli olması (vurum süresinin artması), ergitilen ve buharlaştırılan malzeme miktarını arttırmaktadır. Bu da İİH'nın vurum süresi ile artmasına neden olmaktadır. Yapılmış olan deneysel çalışmada da artan vurum süresi ile İİH değerleri artmıştır (Şekil 5.4). Deneylerde en yüksek İİH değerine sahip olan 4 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı elektrot için boşalım akımı 12 A'de sabit tutulup, vurum süresi 50 μ s'den 100 μ s'ye çıkarıldığında İİH değeri yaklaşık

%78 artış göstermiştir. Vurum süresi 200 μ s'ye çıkarıldığında ise 50 μ s vurum süresine göre %110'luk artış görülmüştür (Şekil 5.4).

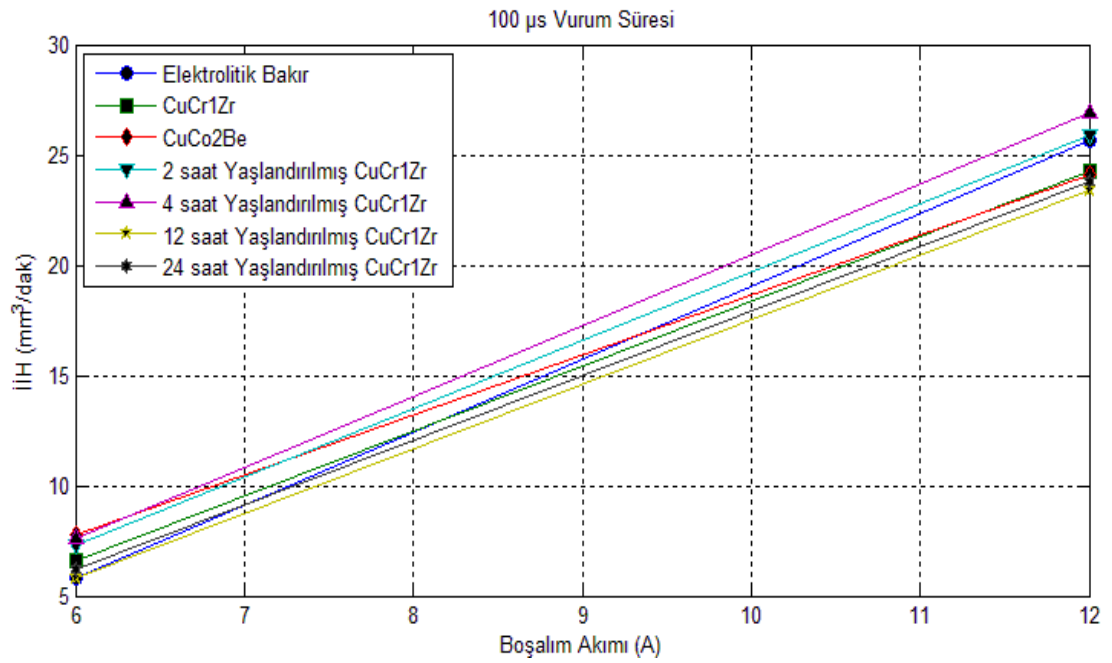
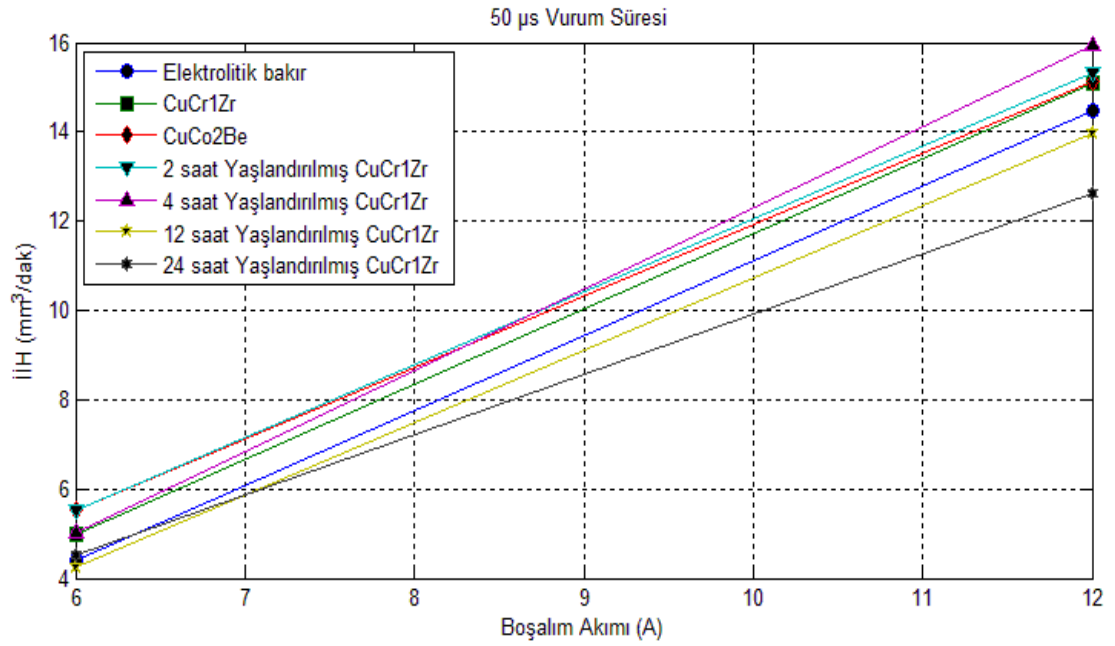


(a)

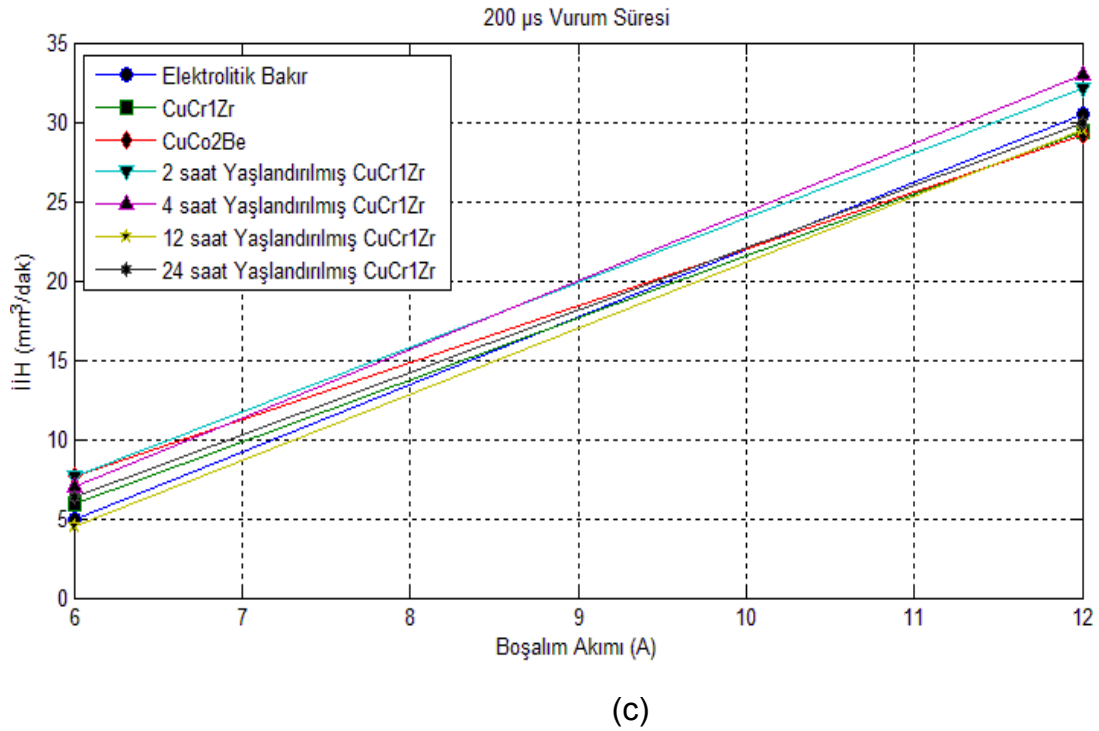


(b)

Şekil 5.3 (a) 12 A boşalım akımı ve (b) 6 A boşalım akımı için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının İH değerlerinin vurum süresi ile değişimi



Şekil 5.4 (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum sürelerinde E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının İH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi

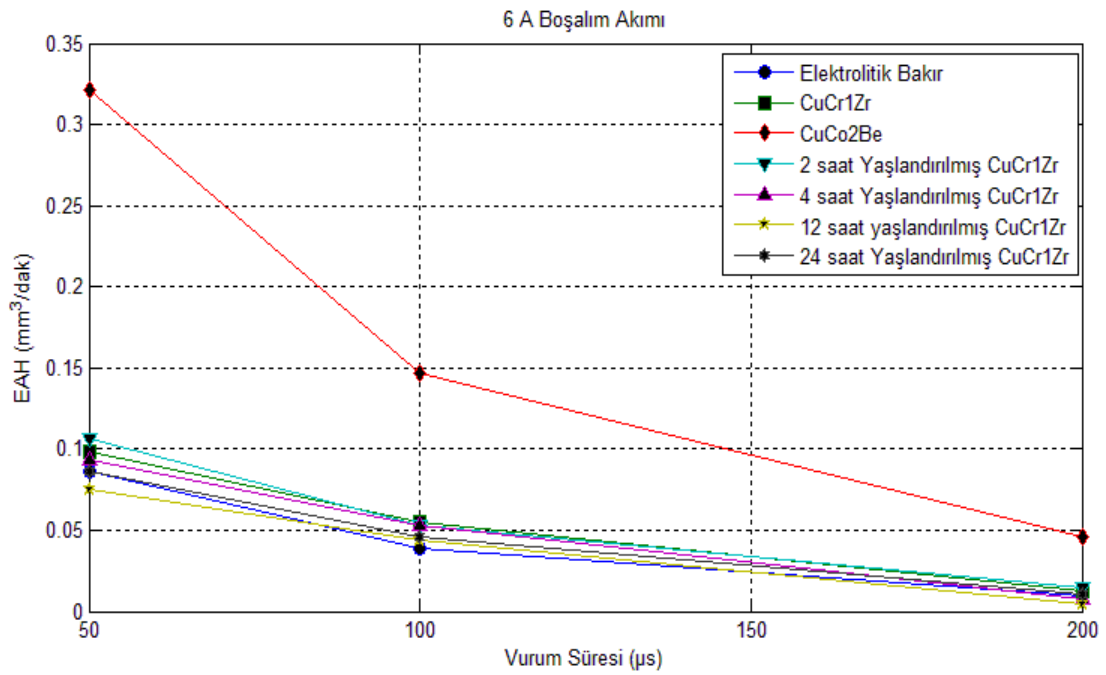


Şekil 5.4 (Devam) (a) 50 µs, (b) 100 µs ve (c) 200 µs vurum sürelerinde E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının İH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi

5.3.2 Vurum süresi ve boşalım akımının EAH'na etkisi

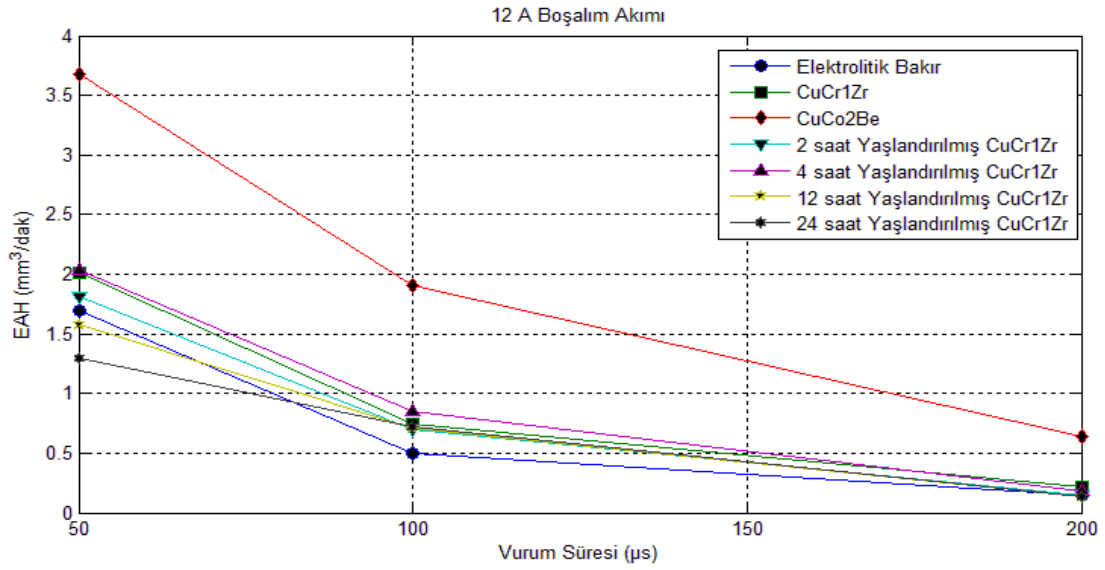
Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilen, vurum süresinin artması ile EAH değerinin azalması bulgusu (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6) daha önceki deneysel çalışmalarla uyumludur [9, 31]. EAH değerinin 50 µs'lık vurum süresinden sonraki azalması (Şekil 5.5) araştırmacılar tarafından; a) uzun vurum sürelerinde, gazyağının bozunumu ve işparçasının ergimesi ile açığa çıkan karbonun elektrot yüzeyine yapışarak elektrodun aşınma direncini arttırması, b) bakır elektrodun çok iyi bir iletken olmasından dolayı uzun vurum sürelerinde verilen boşalım enerjisinin daha büyük bir kısmını elektrot gövdesine ısı transferi olarak iletmesi ve dolayısıyla oluşan plazma kanalının süresiyle orantılandığında daha az malzemeyi ergitebildiği ve buharlaştırabildiği sebeplerine dayandırılmıştır. Şekil 5.5'de görüldüğü üzere E-bakır ve aşırı yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı elektrotlar değişik vurum

sürelerinde diğer elektrotlardan az da olsa daha düşük EAH değerleri vermişlerdir. Bununla birlikte Şekil 5.5(a)'da CuCo2Be alaşım elektrotların 6 A boşalım akımında diğer elektrotlara göre daha hızlı aşındığı (daha yüksek EAH değeri) görülmüştür. Boşalım akımının artmasıyla birlikte, İİH değerindeki artışlara paralel olarak EAH değerlerinde de artışlar görülmüştür. Bunun literatürde bahsedilen muhtemel sebebi ise, artan akım değeri ile birlikte İİH değerinin artması ve takımdan kopan elektron sayısının ve hızının artmasıdır [5]. Şekil 5.6'dan görüldüğü üzere, boşalım akımının 12 A değerine yükseltilmesi sonucunda EAH değerlerinde genel bir artış görülmekle beraber E-bakır ve aşırı yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımları diğer elektrotlara göre daha düşük EAH değerleri vermişlerdir. CuCo2Be alaşımı elektrodun en yüksek EAH değerini verdiği görülmüştür.



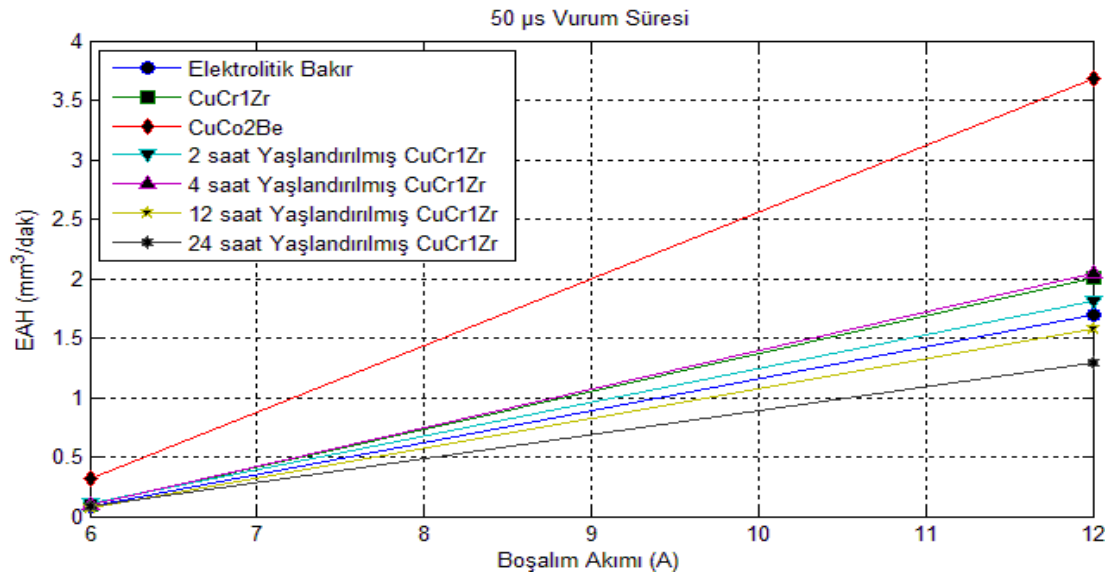
(a)

Şekil 5.5 (a) 6 A boşalım akımı ve (b) 12 A boşalım akımı için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin vurum süresi ile değişimi



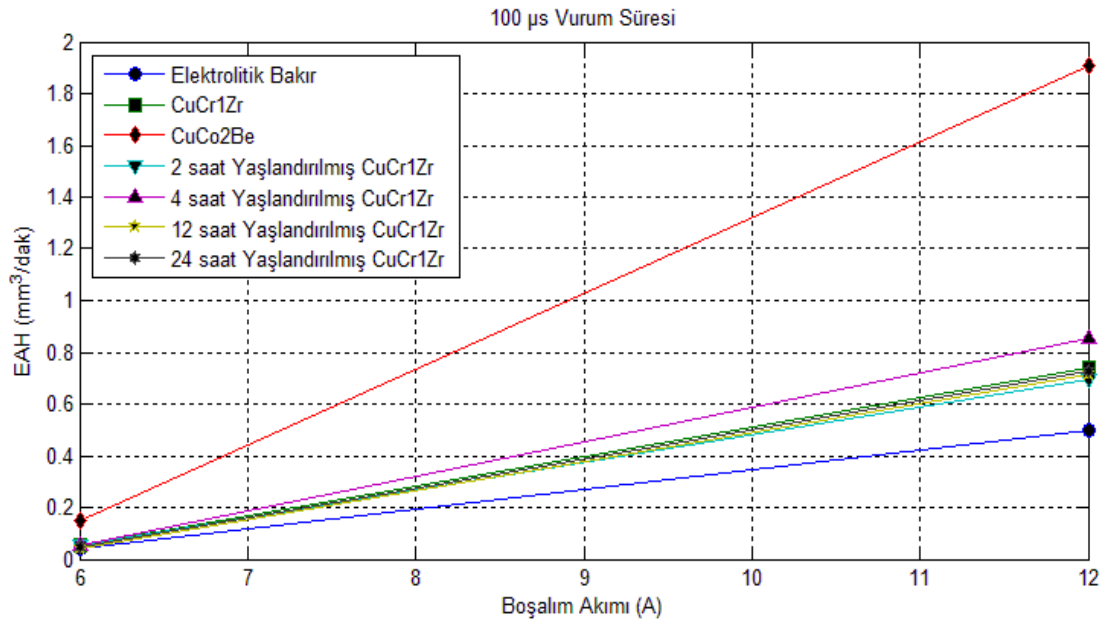
b)

Şekil 5.5 (Devam) (a) 6 A boşalım akımı ve (b) 12 A boşalım akımı için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin vurum süresi ile değişimi

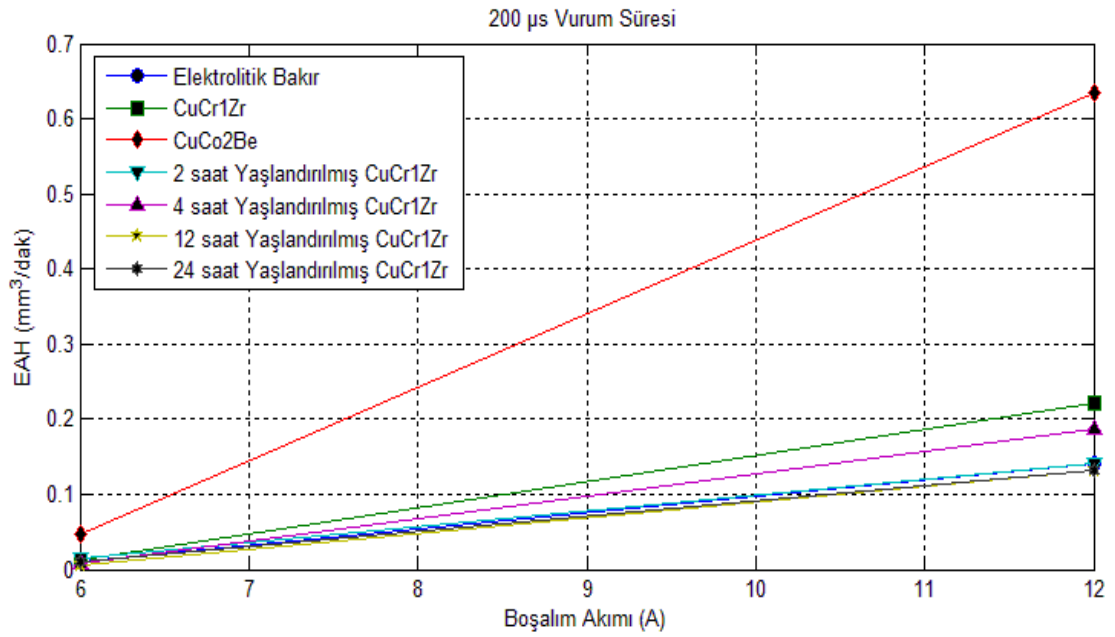


(a)

Şekil 5.6 (a) 50 µs, (b) 100 µs ve (c) 200 µs vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi



(b)



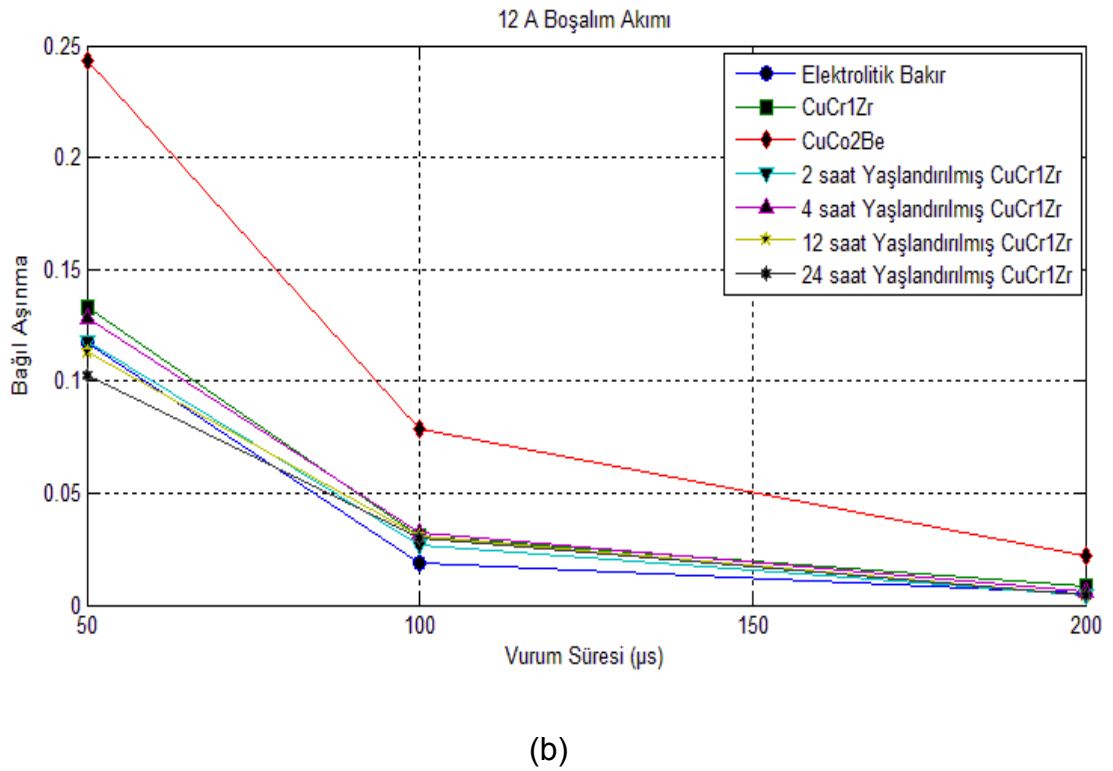
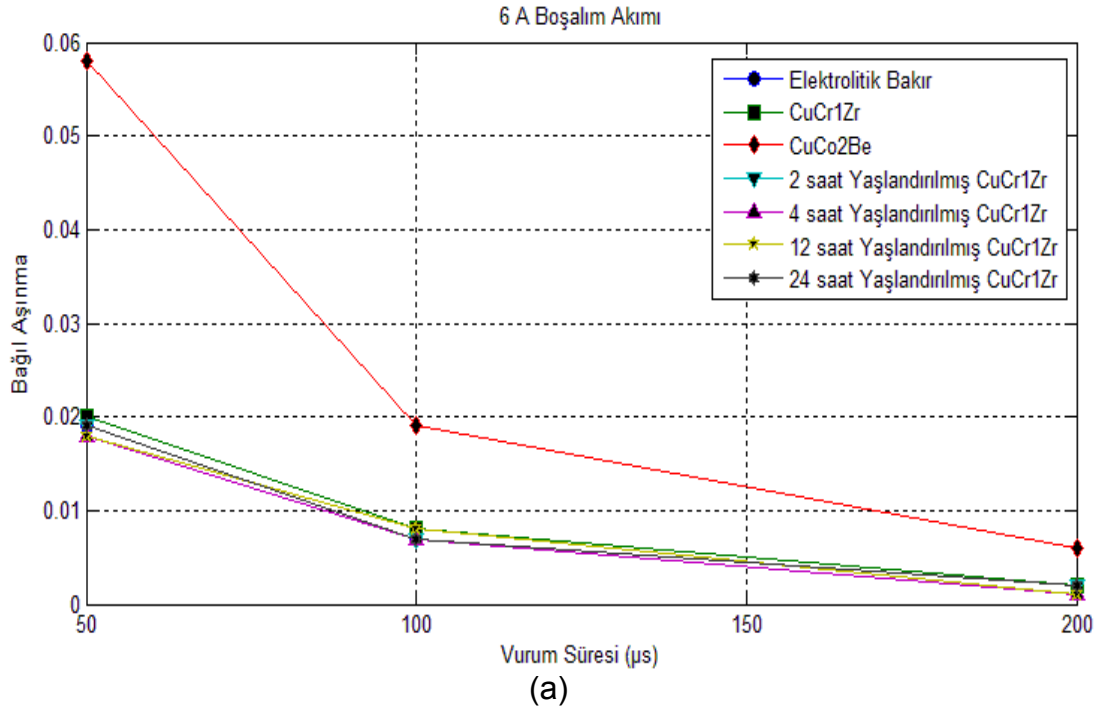
(c)

Şekil 5.6 (Devam) (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCo2Be ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının EAH değerlerinin boşalım akımı ile değişimi

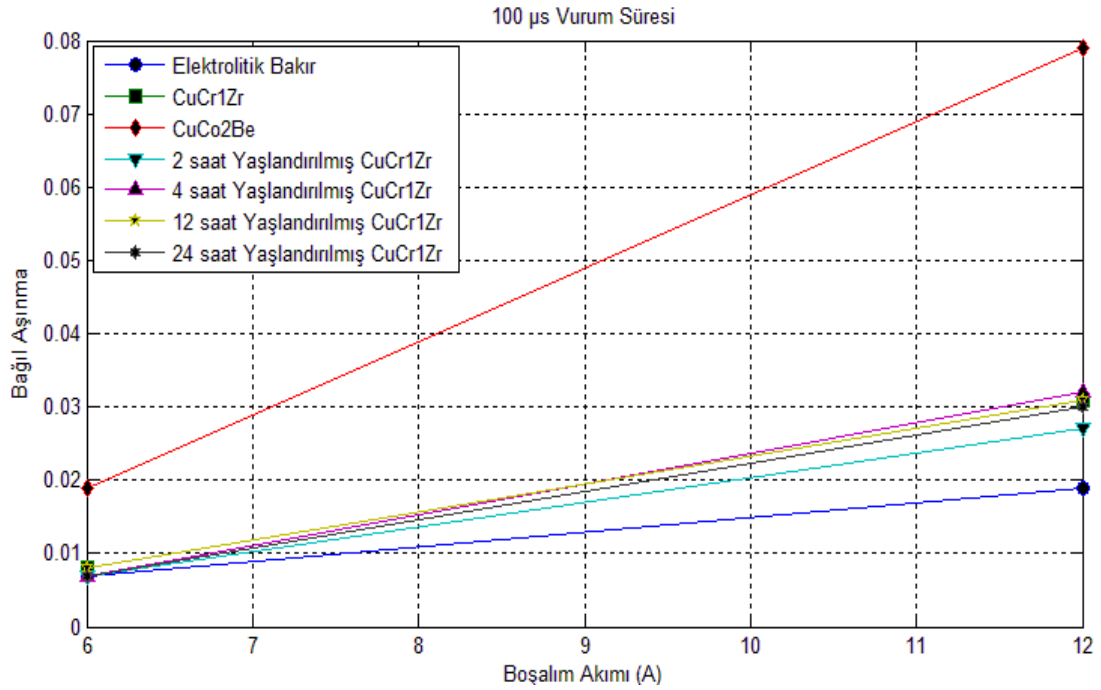
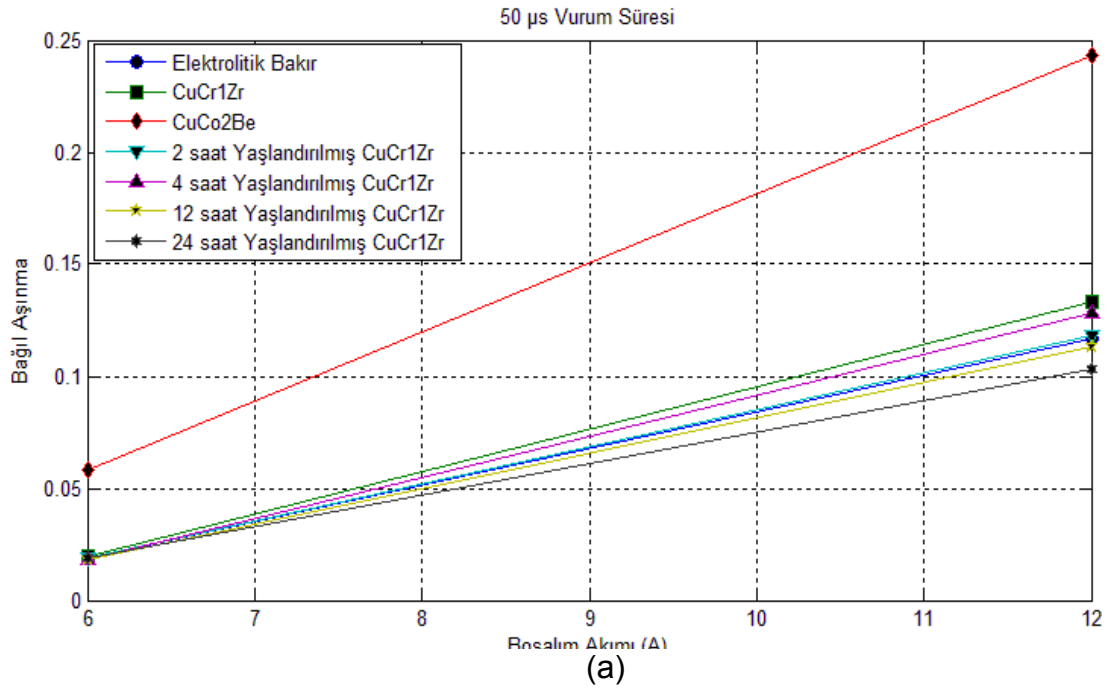
5.3.3 Vurum süresi ve boşalım akımının BA'ya etkisi

6 A ve 12 A akım değerlerinde vurum süresinin artışı ile deneylerde kullanılan tüm elektrotlar için BA değerinin belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir (Şekil 5.7). Bunun nedeni vurum süresi artışı ile İİH değerinin hızlı artışına karşın EAH değerinin İİH değerine göre daha yavaş artışı ve daha sonra belirgin bir oranda azalmasıdır. 6 A boşalım akımında en yüksek EAH değerlerine sahip olan CuCo2Be alaşımının BA değeri de diğer elektrotlara göre daha yüksektir (Şekil 5.7 (a)). Diğer elektrotlarda BA değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. CuCo2Be elektrot 12 A boşalım akımında 6 A'dekine benzer şekilde en yüksek BA değerini vermiştir. 24 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı ve E-bakır elektrotlar ise en düşük BA değerine sahip elektrotlardır (Şekil 5.7 (b))

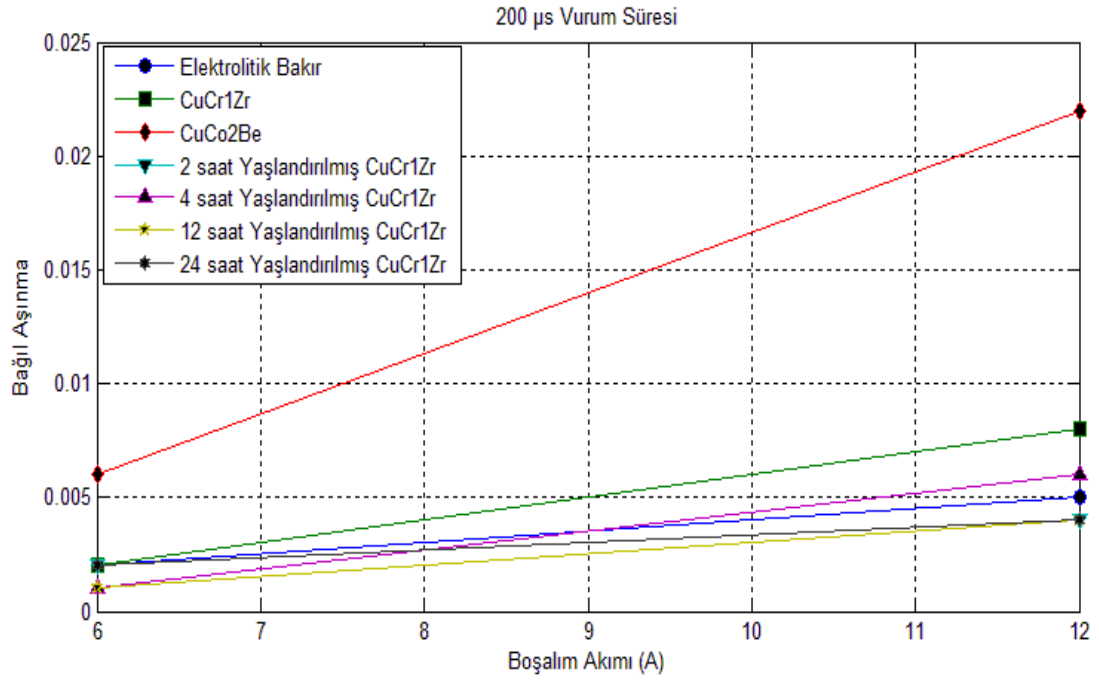
50, 100 ve 200 μ s vurum sürelerinde BA değeri İİH ve EAH değerlerine bağlı olup, akımın artışı ile artmaktadır (Şekil 5.8). Bu artış düşük akım değerinde daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni EAH değerinin düşük akımlarda oransal olarak İİH değerine göre daha fazla artış göstermesidir. Şekil 5.8'de görüldüğü üzere boşalım akımının artması ile birlikte elektrotların genel performans karakteristikleri değişmemiş olup, CuCo2Be alaşımının BA değeri diğer elektrotlardan daha yüksek çıkmıştır. Aşırı yaşlandırılmış elektrotların E-bakırdan az da olsa daha düşük BA değerleri verdiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.7 (a) 6 A ve (b) 12 A boşalım akımları için E-bakır, CuCr1Zr, CuCoBe2 ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının BA değerlerinin vurum süresi ile değişimi



Şekil 5.8 (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCoBe2 ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının BA değerlerinin boşalım akımı ile değişimi



(c)

Şekil 5.8 (Devam) (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCoBe2 ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının BA değerlerinin boşalım akımı ile değişimi

5.4 Mikroyapı İnceleme Sonuçları



(a)



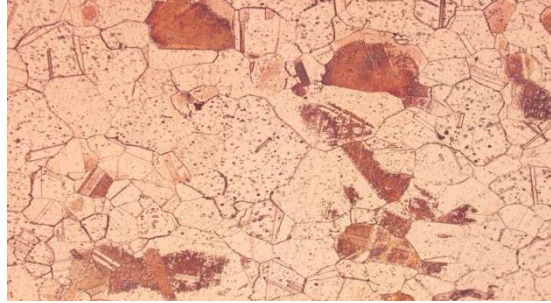
(b)



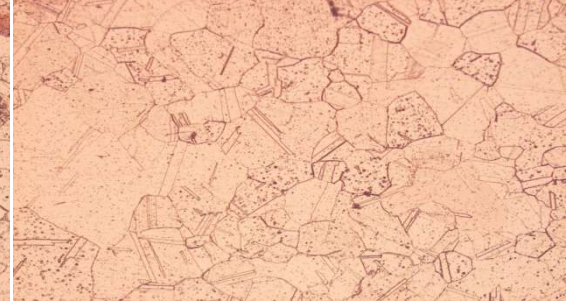
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 5.9 Yaşlandırma işlemi uygulanmamış ve yaşlandırılmış CuCr1Zr elektrotların mikroyapıları (20 X büyütme) a) CuCr1Zr alaşımı b) 980⁰C'de su verilmiş CuCr1Zr, c) 500⁰C'de 2 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr, d) 500⁰C'de 4 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr, e) 500⁰C'de 12 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr, f) 500⁰C'de 24 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr.

Mikroyapı incelemelerinde Şekil 5.9 (a) ısıtılma işlemi uygulanmamış CuCr1Zr alaşımının mikroyapısını göstermektedir. Malzemenin alaşım bileşenleri Ek-1 de detaylı sunulduğu üzere %98,7 Cu, %1 Cr, % 0.1 Zr ve %0,2 diğer elementlerden oluşmaktadır. İşlem görmemiş tane yapılarının küçük olduğu ve tanelerin düzensiz bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Yapıda tane sınırlarının yoğun olması elektrik iletkenliğini düşürmektedir. CuCr1Zr alaşımının 980⁰C'ye ısıtılıp oda sıcaklığında su verilmesi ile tane yapıları büyümüş ve tane sınırlarının yoğunluğu azalmıştır. Ancak yüksek sıcaklıktan kaynaklanan ikizlemeler oluşmuştur. Mikro yapıdaki renk değişimi yapıdaki atomların oryantasyonuna bağlı olarak farklı bir görüntü oluşmuştur. (Şekil 5.9 (b)). 980⁰C'de çözeltiye alındıktan sonra 500⁰C sıcaklıkta 2 saat yaşlandırma işlemi uygulanması (Şekil 5.9 (c)) sonrasında SEM analizinden matrisin ağırlıkça %98,81 Cu ve %1,19 Cr den oluştuğu tespit edilmiştir (EK-4). Yaşlandırma işlemi sonrası α +ZrCu₃ çökeltileri meydana gelmeye başlamıştır. Tanelerin irileşmesi (tane sınır yoğunluğunun azalması) ve küçük çökelti parçacıklarının oluşması ayrıca malzemede bulunan ikizleme teşekküllerinin azalmaya başlaması ile elektrik iletkenliği artmaya başlamıştır. Alaşıma 500⁰C de 4 saatlik yaşlandırma işlemi uygulandıktan sonra matrisin ağırlıkça %99,21 Cu ve %0,79 Cr elementlerinden oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.9 (d)). Şekil 5.9 (c)' deki belirgin bakır dominant taneler 4 saatlik yaşlandırma işleminden sonra tane sınırlarına doğru ayrışma göstermektedir. Bu aşamada gerek partiküllerde meydana gelen büyümeler, gerek dislokasyonlarda oluşan düzelmeler ve tanelerdeki gerilmelerin azalması elektrik iletkenliğini en yüksek değere taşımıştır. Alaşıma 500⁰C de 12 saat yaşlandırma işlemi uygulanmasından sonra matrisin ağırlıkça %98,95 Cu, %0,89 Cr ve %0,17 Zr elementlerinden oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.9 (e)). Mikroyapıda tane sınırlarına doğru olan çökelti segregasyonun devam ettiği görülmektedir. Şekil 5.(f)'de 500⁰C de 24 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış ve aşırı yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımında çökelti taneleri irileşmiştir. Çökeltilerin büyümesi elektrik iletkenliğini olumsuz etkilemekte ve elektron akışını engellemektedir. Malzemenin matrisi ağırlıkça %99,43 Cu ve %0,57 Cr den oluşmaktadır.

5.5 Elektrot Maliyet Analizi

İşleme öncesi elektrotlara uygulanan tornalama ve kesme işlemlerinin işçilik maliyetleri her elektrot için aynı olduğundan elektrotların maliyet analizinde hesaba katılmamıştır. 50 kg'a kadar yaşlandırma işleminde kullanılan (fırına yüklenen) elektrot miktarı, yaşlandırma işleminin maliyetini değiştirmemektedir. Bu nedenle yaşlandırma işlemlerinin 50 kg CuCr1Zr malzemesi için aynı anda (aynı fiyatla) yapılacağı varsayılarak Tablo 5.3'deki elektrot başı maliyetler hesaplanmıştır. Yaşlandırma süresine göre 50 kg (fırın dolumu) malzeme maliyeti Tablo 5.2'de sunulmuştur. Yaşlandırma işlemi öncesi yapılan çözeltiye alma işlemi ve yaşlandırma işlemlerinin maliyetleri de yaşlandırılmış elektrodun birim maliyetine ilave edilmiştir. Elektrot malzemelerinin birim fiyatları elektrotların temin edildiği Öz-ka firmasına, yaşlandırma işleminin fiyatları ise Ankasheat ve Alper Isıl İşlem firmalarına aittir.

Tablo 5.2 50 kg fırın dolumu için uygulanan ısı işlemlerin maliyetleri

Uygulanan Isıl İşlemler	Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Maliyet (50 kg fırın dolumu için) [TL]
Çözeltiye Alma Maliyeti	980	200
2 Saat Yaşlandırma Maliyeti	500	40
4 Saat Yaşlandırma Maliyeti	500	80
12 Saat Yaşlandırma Maliyeti	500	120
24 Saat Yaşlandırma Maliyeti	500	240

Tablo 5.3 Deneylerde kullanılan elektrotlar ve maliyetleri

Elektrot Cinsi *	Bir elektrodun Hammadde maliyeti [TL/cm]	Bir Elektrot İçin Yaşlandırma Maliyeti				Bir Elektrodun Toplam Maliyeti [TL/cm]	Performans Endeksi**					
		2 saat	4 saat	12 saat	24 saat		6 A			12 A		
							50 µs	100 µs	200 µs	50 µs	100 µs	200 µs
E-bakır	0,418	-	-	-	-	0,418	0,79	0,29	0,08	4,89	0,79	0,21
CuCo2Be	1,980	-	-	-	-	1,980	11,48	3,76	1,190	24,10	15,64	4,36
CuCr1Zr	0.990	-	-	-	-	0.990	1.98	0.79	0.198	13.17	3.07	0.79
2 saat Yaş. CuCr1Zr	0,990	+	-	-	-	1,078	2,048	0,755	0,216	12,720	2,911	0,431
4 saat Yaş. CuCr1Zr	0,990	-	+	-	-	1,092	1,966	0,764	0,109	13,978	3,494	0,655
12 saat Yaş. CuCr1Zr	0,990	-	-	+	-	1,107	1,993	0,886	0,111	12,509	3,432	0,443
24 saat Yaş. CuCr1Zr	0,990	-	-	-	+	1,151	2,187	0,806	0,230	11,855	3,453	0,460

* Elektrotların çapları 16 mm'dir

** P.E= Σ Maliyet $\times$ %BA

Elektrottaki BA değeri elektrodun kullanım süresini doğrudan etkileyeceğinden bu çalışmada elektrodun performans endeksi olarak (Elektrodun toplam maliyeti $\times$ BA) tanımlanmıştır. Bu endeksin daha küçük olduğu elektrotların seçilmesi toplam elektrot maliyeti açısından uygun olacaktır. Çünkü maliyeti yüksek olmakla beraber BA değeri küçük olan bir elektrot daha uzun süre işlemede kullanılabileceğinden diğer ucuz ama daha büyük BA değerli elektrotlardan ekonomik açıdan daha faydalı olabilecektir. Bu nedenle performans endeksi küçük olan elektrotların kullanımı endüstride tercih edilecektir. Bu koşullar altında Tablo 5.3 incelendiğinde, E-bakırın 6 A ve 12 A boşalım akımı değerlerindeki üç farklı vurum sürelerinin (50, 100, 200 μ s) her birinde en düşük performans endeksine sahip elektrot olduğu görülmektedir. En yüksek endeks değerine sahip elektrot ise CuCo2Be alaşımıdır. Bu durumda çelik iş parçasının EEI'sinde öncelikli tercih E-bakır elektrot olmalıdır. E-bakır dışındaki elektrotlar incelendiğinde, 6 A boşalım

akımı ve 50 μ s vurum süresinde en düşük performans değerine sahip elektrot 4 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımıdır. Vurum süresi 50 μ s'de sabit tutulup boşalım akımı 12 A değerine çıkarıldığında 24 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı en düşük endeks değerini verdiği görülmektedir. Yüksek maliyetine rağmen 24 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımının en düşük endeks değerine sahip olmasının nedeni 50 μ s ve 12 A değerlerinde elektrotun E-bakırdan daha düşük BA değerine sahip olmasıdır. 6 A ile 12 A boşalım akımlarında ve 100 μ s ile 200 μ s vurum sürelerinde en düşük performans endeksine sahip elektrot 2 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımıdır.

6. SONUÇ ve YORUM

Deneyler sonucunda boşalım akımındaki artışın İİH, EAH, BA ve işparçası Ra değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Artan vurum süresinin yüksek boşalım akımlarında İİH'nı arttırdığı düşük boşalım akımlarında ise 100 μ s vurum süresine kadar arttırdığı daha sonra İİH'nın düştüğü gözlemlenmiştir. Düşük boşalım akımlarında CuCo2Be ile 2 saat ve 4 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr elektrotların en yüksek İİH değerlerini verdiği, boşalım akımı artırıldığında ise elektrolitik bakır (E-bakır) ile 2 ve 4 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımlarının daha yüksek İİH değerleri verdiği görülmüştür. 24 saat yaşlandırılmış CuCr1Zr ve E-bakır elektrotlar en düşük EAH değerlerini vermiştir. 12 saat ve 24 saat yaşlandırılmış elektrotlar daha düşük BA değerleri vermiştir. Uygulanan yaşlandırma işlemi elektriksel iletkenliği artırmış ve yüksek boşalım akımlarında, EAH değerlerinde %35, İİH değerlerinde %12 ve BA değerlerinde ise %50 iyileşmeler sağlamıştır. Mikroyapı incelemeleri, partiküllerde meydana gelen büyümeler, dislokasyonlarda oluşan düzelmeler ve tanelerdeki gerilmelerin azalmasının elektrik iletkenliğini arttırdığını göstermektedir.

E-bakırın düşük BA değerleri ve düşük malzeme maliyeti (ve ikisinin çarpımından elde edilen düşük performans indeksi) diğer elektrotlar arasında bu elektrotun EEİ yönteminde en uygun elektrot malzemesi olduğunu göstermiştir. CuCr1Zr elektrotlara uygulanan yaşlandırma işleminin elektrot birim maliyetlerini arttırmasına rağmen yüksek sayıda elektrotta uygulan yaşlandırma işleminin CuCr1Zr elektrotların maliyet ve performans açısından tercih edilebilirliğini arttırdığı görülmüştür.

Performans değerlerinin alaşım türünden ve uygulanan yaşlandırma işleminden etkilendiği gözlemlenmiştir. Elektriksel iletkenliği fazla olan elektrotların EAH değerleri düşük çıkmıştır. İİH değerlerinin ise artan veya azalan elektriksel iletkenlikten çok fazla etkilenmediği görülmüştür. Dolayısıyla BA değerleri elektrik iletkenliği fazla olan elektrotlarda daha düşük çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Kırmızı, C., “Kıvılcımla Aşındırma Metodu”, **Milli Endüstriyel Eğitim Geliştirme Projesi**, Ankara, 8-20 (1975).
2. Pandey, P. C., Shan, H. S., “Modern Machining Processes”, **Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited**, , New Delhi, 84-114 (1980).
3. Keller, H., Eickhoff, K., (Çev: Güleç, Ş.), “Bakır ve Alaşımları”, **İ.T.Ü, Türk Teknik Haberleşme Merkezi Yayını**, İstanbul, 5-55, (1969).
4. Koçak, H., “ Bakır Alaşımları El Kitabı”, **Sağlam Metal, Ofset Matbacılık**, 1-128, (1997).
5. Petrofes, N. F., Gadalla, A. M., “Processing aspects of shaping advanced materials by electrical discharge machining”, **Advanced Materials & Manufacturing Processes**, 127-153, (1988).
6. CIRP, “Cirp Unified Terminology”, Edition 1986, (1986).
7. Çoğun, C., Erden, A., “Elektro erozyon ile işleme (EDM) performansının bilgisayarlı denetiminin gerçekleştirilmesi”, **2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi**, 17-19 Eylül 1986, 105-112, (1986).
8. Erden, A., Temel, D., “Investigation on the use of water as a dielectric liquid in E.D.M.”, **Proceedings, 22nd Machine Tool Design and Research Conference**, 437-440, (1981).
9. Tlusty, G., “Manufacturing Processes and Equipment”, **Prentice Hall**, 859-862, (2000).
10. Kınıklıoğlu, N., G., “Malzeme Bilimi ve Mühendiliği”, **Yıldız Teknik Üniversitesi, Literatür Yayıncılık**, İstanbul, 492-495 (2006).
11. Oğuz, B., “Demir Dışı Metallerin Kaynağı”, **Oerlikon Yayını**, 1-18, (1990).

12. König, W., Jörres, L., "Aqueous solutions of organic compounds as dielectrics for EDM sinking", **Annals of the CIRP**, 36, 1, 105-109, (1987).
13. Kunieda, M., Yoshida, M., Taniguchi, N., "Electrical discharge machining in gas", **Annals of the CIRP**, 46, 1, 143-146, (1997).
14. Liu, P., Su, J., Dong, Q., Li, H., " Microstructure and Properties of Cu-Cr-Zr Alloy after Rapidly Solidified Aging and Solid Solution Aging" ,**J.Mater. Sci. Technol.**, 21, 4, (2005).
15. Wong, Y. S., Lim, L. C., Lee, L. C., "Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces", **Journal of Materials Processing Technology**, 48, 299-305, (1995).
16. Wells, P.W., Willey, P.C.T., "The effects of variation in dielectric flow rate in the gap on wear ratio and surface finish during electro-discharges", **Conf. of Elect. Meth. of Mach., IEEE Publ.**, 133, 110-117, (1975).
17. Çoğun, C., Akaslan, Ş., "The effect of machining parameters on tool electrode wear and machining performance in electric discharge machining", **KSME International Journal**, 16, 1, 46-59, (2002).
18. Leonardo, P. M., Bruzzone, A. A., "Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM", **Annals of the CIRP**, 48, 1, 123-126, (1999).
19. Yan, B. H., Wang, C. C., The machining characteristics of Al₂O₃/6061Al composite using rotary electro-discharge machining with a tube electrode, **Journal of Materials Processing Technology**, 95, 107-111 (1999).
20. DiBitonto, D.D., Eubank, P.T., Barrufet, M.A., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model", **Journal of Applied Physics**, 66, 9, 4095-4103, (1989)

21. oun, C., “Keeping electric discharge machining under control”, **Machine Design**, April 26, 105-108, (1990).
22. Dennis, W., H., ev: Tulgar, H., E., “Demirden Gayrı Metaller Metalürjisi”, **İ.T.Ü. Kimya-Metalürji Faköltesi**, Ofset Atölyesi, 96-222 (1987).
23. Liu, P., Su, J., Dong, Q., Li, H., “ Microstructure and Properties of Cu-Cr-Zr Alloy after Rapidly Solidified Aging and Solid Solution Aging”, **J.Mater. Sci. Technol.**, .21, 4, (2005).
24. Salman, S., Gülsoy, Ö., “ Metalografi Bilimi” , **Nobel Yayıncılık**, Ankara, 1-70, (2004).
25. Callister, W. D., “Fundamentals of Materials Science and Engineering” **Jhon Willey & Sons, Inc.** ,Utah, 365-376 (2001).
26. Davis, J. R., “Copper and Copper Alloys”, **ASM Specialty Handbook**, The Materials of İnformation Society, 125-490, (2001).
27. Incropera, P. F., DeWitt D. P., “İsı ve Kütlev Geişinin Temelleri”, **Literatür Yayıncılık**, İstanbul, 3-5, (2000).
28. Şahin, Y., “İmal Usulleri”, **Gazi Kitabevi**, Ankara, 103-105, (2003).
29. Mohri, N., Saito, N., Suzuki, M., Takawashi, T., “Surface modification by EDM-an innovation in EDM with semi-conductive electrodes”, **The American Society of Mechanical Engineers, Research and Technological Developments in Nontraditional Machining**, 34, 21-30 (1988).
30. Mohri, N., Suzuki, M., Furuya, M., Saito, N., “Electrode wear process in electrical discharge machining”, **Annals of the CIRP**, 44, 1, 165-168 (1995).

31. Wong, Y. S., Lim, L. C., Lee, L. C., "Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces", **Journal of Materials Processing Technology**, 48, 299-305, (1995).
32. Furkan A.Ş., "Furkan Elektroerozyon Tezgahı Kullanma Klavuzu", Ankara, 1-72, (2000).
33. Lin, J. L., Lin, C. L., "The use of the orthogonal array with grey relational analysis to optimize the electrical discharge machining process with multiple performance characteristics", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 42, 237-244, (2002).
34. Appello, M., Fennici, P., " Solution Heat Treatment of a Cu-Cr-Zr Alloy" , **Materials Science and Engineering** , 102, 69-75, (1988)
35. Barabash,V.R., Kalinin G. M., Fabritsiev S. A., Zinkle, S.J., " Specification of CuCrZr alloy properties after various thermo-mechanical treatments and design allowables including neutron irradiation effects " **Journal of Nuclear Materials**, 417, 904-907, (2011)
36. Ozgowicz, W., Kalinowska, E., Grzegorzczak, B. " The influence of the temperature of tensile test on the structure and plastic properties of copper alloy type CuCr1Zr", **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, 29, 143-146, (2008)
37. Olivier, G., Laurent, B., Isabelle, C., Patrick, L., Emmanuel, R., Alan, P., "Characterization of CuCrZr and CuCrZr/SS joint strength for different blanket components manufacturing conditions", **Journal of Nuclear Materials**, 30, 830-833, (2009)
38. Park, J. Y., Jung, Y., Choi, B. K., Lee, J. S., Jeong, Y. H., Hong, B. G. "Investigation on the microstructure and mechanical properties of CuCrZr after manufacturing thermal cycle for plasma facing component", **Journal of Nuclear Materials**, 417, 1, 916-919, (2011)

EKLER

EK-1. Bakır Alaşımlarının Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

CUPRO CB

Kimyasal Bileşimi (%)	Be	Co+Ni	Diğerleri	Cu
	0.50	2.00	0.50	Kalanı
Kodu	DIN 17666 - W. Nr. 2.1285, EN: CW 103C, AFNOR: UK2Be, USA: CDA: C17500, RWMA: Class 3			
Malzeme Özellikleri	Hem bakırın fiziksel özelliklerinden doğan avantajlarını hem de orta derecede mekanik özelliklerini barındıran çok amaçlı bir alaşımdır.			
Kullanım Alanları	• Paslanmaz çelik, monel ve nikel alaşımlarının punta kaynak elektrotlarında • Plastik enjeksiyon kalıplarında kalıbın tümü veya geçme olarak • Plastik şişirme kalıplarında soğutma çekirdekleri ve diğer parçalarda • Plastik ambalajında dikiş başları olarak • Bakır, pirinç, bronz gibi alaşımların dökümünde, kokil kalıp olarak • Çelik hasır makinelerinin elektrotlarında			
Isıl İşlem	Üretici tarafından sertleştirme işlemi yapılarak teslim edilir.			
Mekanik Özellikleri	Sertlik	HB	200-240	
	Çekme Dayanımı	N/mm ²	700-900	
	Akma Dayanımı	N/mm ²	490-550	
	Uzama L= 5D	%	10-15	
	Elastisite Modülü (20 °C)	kN/mm ²	130	
Fiziksel Özellikleri	Elektrik İletkenliği	%	52	
	Isıl Genleşme Katsayısı (273 - 573 K)	$\frac{1}{K}$	$17 \cdot 10^{-6}$	
	Isıl İletkenlik (20 °C)	(W/mK)	200-230	
	Yoğunluk	(g/cm ³)	8.75	

EK-1. (Devam) Bakır Alaşımlarının Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

CUPROMAX

Kimyasal Bileşimi (%)	Cr	Zr	Diğerleri	Cu
	1.00	0.10	0.20	Kalanı
Kodu	DIN 17666 - W. Nr. 2.1293 - 44759, A2/2, EN: CW 106C, AFNOR: UC1Zr, USA: CDA: C18150, C18200, C18400, RWMA: Class 2, CuCr1Zr			
Malzeme Özellikleri	Elektrik iletkenliği en yüksek olan bakır alaşımlarından birisidir. Krom ve Zirkonyum ile alaşımlandırırsa aşınma dayanımı artar. Tel erezyon ile şekillendirilebilir.			
Kullanım Alanları	•Direnç kaynağında düşük karbonlu çeliklerin ve galvanizli sacların elektrot uçları ve diskleri •Çelik ve alüminyumun sürekli döküm kalıplan •Dalma elektro erozyon makinelerinin elektrotlarında, •Demir dışı metallerin dökümünde soğutma parçaları ve kalıplan, •Alüminyum enjeksiyon makinelerinin pistonlarında, •Plastik ambalajlamada kaynak ve dikiş uçlarında, •Plastik enjeksiyon makinelerinin püskürtme memelerinde, •Galvano teknikte katot taşıyıcı ve sevk plakası olarak, •Plastik ekstrüzyonunda şekillendirme ve soğutma takımlarında kullanılır. •Elektrik ekipmanlarında, kontaklar, saplamalar, irtibat baraları			
Isıl İşlem	Isıl işlemleri durumdateslim edilir.			
Mekanik Özellikleri	Sertlik	HB	120-140	
	Çekme Dayanımı	N/mm ²	370-400	
	Akma Dayanımı	N/mm ²	300-320	
	Uzama L=5D	%	18	
	Elastisite Modülü (20 °C)	kN/mm ²	122	
Fiziksel Özellikleri	Elektrik İletkenliği	%	86	
	Isıl Genleşme Katsayısı (273 - 573 K)	$\frac{1}{K}$	17	
	Isıl İletkenlik (20 °C)	(W/mK)	320	
	Yoğunluk	(g/cm ³)	8.9	

EK-2 Deney Sonuçları

					İş Parçası				
Elektrot Cinsi	Yoğunluk [gr/mm ³]	Deney No:	Vurum Süresi [μs]	Boşalım Akımı [A]	İşleme Öncesi Ağırlık [gr]	İşleme Sonrası Ağırlık [gr]	Ağırlık Farkı	İşlenen Hacim [mm ³]	Ra [μm]
Elektrolitik Bakır	0.00889	1	50	6	95,871	89,315	6,556	835,159	4,4
		1	50	12	95,970	88,710	7,260	924,841	6,5
		1	100	6	95,880	87,810	8,070	1028,025	5,7
		1	100	12	95,980	86,825	9,155	1166,242	6,9
		1	200	6	95,935	88,620	7,315	931,847	6,0
		1	200	12	95,860	87,605	8,255	1051,592	8,8
		2	50	6	95,950	88,270	7,680	978,344	4,5
		2	50	12	95,825	89,130	6,695	852,866	6,0
		2	100	6	95,835	87,630	8,205	1045,223	5,8
		2	100	12	95,055	87,910	7,145	910,191	7,1
		2	200	6	95,855	88,200	7,655	975,159	5,8
		2	200	12	95,870	88,095	7,775	990,446	8,7
CuCo2Be	0.00875	1	50	6	95,875	88,990	6,885	877,070	4,6
		1	50	12	95,930	89,725	6,205	790,446	5,9
		1	100	6	95,970	88,020	7,950	1012,739	5,8
		1	100	12	95,990	87,940	8,050	1025,478	7,2
		1	200	6	96,095	87,810	8,285	1055,414	6,1
		1	200	12	95,825	87,760	8,065	1027,389	9,3
		2	50	6	95,865	88,335	7,530	959,236	5,0
		2	50	12	95,935	89,295	6,640	845,860	5,9
		2	100	6	95,950	88,065	7,885	1004,459	6,2
		2	100	12	95,845	88,180	7,665	976,433	6,8
		2	200	6	95,810	87,565	8,245	1050,318	7,2
		2	200	12	95,995	87,780	8,215	1046,497	7,5

EK-2 (Devam) Deney Sonuçları

Elektrot Cinsi	Yoğunluk [gr/mm ³]	Deney No:	Vurum Süresi [µs]	Boşalım Akımı [A]	İş Parçası				
					İşleme Öncesi Ağırlık [gr]	İşleme Sonrası Ağırlık [gr]	Ağırlık Farkı	İşlenen Hacim [mm ³]	Ra [µm]
CuCr1Zr	0.0089	1	50	6	95,590	87,510	8,080	1029,299	4,6
		1	50	12	95,885	88,610	7,275	926,752	6,2
		1	100	6	95,850	87,865	7,985	1017,197	6,1
		1	100	12	95,875	87,810	8,065	1027,389	7,3
		1	200	6	95,865	87,505	8,360	1064,968	6,9
		1	200	12	96,040	87,515	8,525	1085,987	9,0
		2	50	6	96,125	89,710	6,415	817,197	4,8
		2	50	12	95,760	88,460	7,300	929,936	6,0
		2	100	6	95,980	88,940	7,040	896,815	5,6
		2	100	12	96,010	87,360	8,650	1101,911	6,6
		2	200	6	95,945	87,515	8,430	1073,885	6,6
		2	200	12	95,980	86,500	9,480	1207,643	8,0
2 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	0.0089	1	50	6	96,000	88,725	7,275	926,752	5,2
		1	50	12	95,890	89,545	6,345	808,280	6,4
		1	100	6	96,035	88,455	7,580	965,605	6,3
		1	100	12	96,055	88,385	7,670	977,070	7,2
		1	200	6	95,870	88,090	7,780	991,083	5,9
		1	200	12	95,760	87,685	8,075	1028,662	9,0
		2	50	6	95,985	88,265	7,720	983,439	4,8
		2	50	12	95,830	88,830	7,000	891,720	5,8
		2	100	6	95,915	88,330	7,585	966,242	6,1
		2	100	12	95,865	88,090	7,775	990,446	7,2
		2	200	6	95,995	88,150	7,845	999,363	6,6
		2	200	12	95,785	87,995	7,790	992,357	8,3
4 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	0.0089	1	50	6	116,665	109,000	7,665	976,433	4,8
		1	50	12	116,655	109,930	6,725	856,688	6,0
		1	100	6	116,745	109,585	7,160	912,102	7,5
		1	100	12	116,905	109,515	7,390	941,401	8,1
		1	200	6	116,595	108,800	7,795	992,994	6,9
		1	200	12	116,690	108,910	7,780	991,083	7,4
		2	50	6	116,625	108,915	7,710	982,166	4,9
		2	50	12	116,545	109,900	6,645	846,497	5,7
		2	100	6	116,795	109,425	7,370	938,854	5,4
		2	100	12	116,905	109,515	7,390	941,401	8,1
		2	200	6	116,595	108,800	7,795	992,994	6,9
		2	200	12	116,690	108,910	7,780	991,083	7,4

EK-2 (Devam) Deney Sonuçları

						İş Parçası			
Elektrot Cinsi	Yoğunluk [gr/mm ³]	Deney No:	Vurum Süresi [µs]	Boşalım Akımı [A]	İşleme Öncesi Ağırlık [gr]	İşleme Sonrası Ağırlık [gr]	Ağırlık Farkı	İşlenen Hacim [mm ³]	Ra [µm]
12 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	0.0089	1	50	6	95,905	88,125	7,780	991,083	4,9
		1	50	12	95,900	88,800	7,100	904,459	5,0
		1	100	6	95,970	88,575	7,395	942,038	6,3
		1	100	12	95,940	88,635	7,305	930,573	7,8
		1	200	6	95,870	87,780	8,090	1030,573	5,4
		1	200	12	95,960	88,155	7,805	994,268	8,6
		2	50	6	116,610	109,400	7,210	918,471	4,8
		2	50	12	116,550	109,840	6,710	854,777	6,9
		2	100	6	116,790	109,040	7,750	987,261	6,8
		2	100	12	116,650	109,075	7,575	964,968	7,3
		2	200	6	95,870	87,780	8,090	1030,573	5,4
		2	200	12	116,845	108,890	7,955	1013,376	7,4
24 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr	0.0089	1	50	6	95,730	88,040	7,690	979,618	4,8
		1	50	12	95,880	89,065	6,815	868,153	5,6
		1	100	6	116,725	109,065	7,660	975,796	5,7
		1	100	12	117,045	109,880	7,165	912,739	7,5
		1	200	6	117,070	109,290	7,780	991,083	5,9
		1	200	12	116,740	109,125	7,615	970,064	7,2
		2	50	6	116,510	108,710	7,800	993,631	4,7
		2	50	12	96,020	89,170	6,850	872,611	6,1
		2	100	6	116,725	109,065	7,660	975,796	5,7
		2	100	12	116,880	109,270	7,610	969,427	7,1
		2	200	6	117,070	109,290	7,780	991,083	5,9
		2	200	12	117,010	109,585	7,425	945,860	8,2

EK-2 (Devam) Deney Sonuçları

Elektr.												
Elektr. Cinsi	Deney No:	Vurum Süresi [μs]	Boşalı m Akımı [A]	İşleme Öncesi Ağırlık [gr]	İşleme Sonrası Ağırlık [gr]	Aşınm a Ağırlığı [gr]	Aşınm a Hacmi [mm ³]	Deney sel Boy Aşınma sı [mm]	BA	iiH [mm ³ /d ak]	EAH [mm ³ /d ak]	İşleme Süresi [dak]
Elektro litik Bakır	1	50	6	74,716	74,572	0,144	16,198	0,02	0,019	4,054	0,079	206
	1	50	12	74,495	73,520	0,975	109,67	0,47	0,119	15,161	1,798	61
	1	100	6	74,920	74,855	0,065	7,312	0,01	0,007	5,711	0,041	180
	1	100	12	74,980	74,795	0,185	20,810	0,05	0,018	25,353	0,452	46
	1	200	6	74,975	74,965	0,010	1,125	0,08	0,001	5,120	0,006	182
	1	200	12	74,840	74,790	0,050	5,624	0,01	0,005	30,929	0,165	34
	2	50	6	74,990	74,820	0,170	19,123	0,09	0,020	4,772	0,093	205
	2	50	12	74,950	74,070	0,880	98,988	0,32	0,116	13,756	1,597	62
	2	100	6	74,950	74,890	0,060	6,749	0,02	0,006	5,905	0,038	177
	2	100	12	78,245	78,075	0,170	19,123	0,33	0,021	26,005	0,546	35
	2	200	6	74,635	74,610	0,025	2,812	0,06	0,003	4,757	0,014	205
	2	200	12	68,225	68,190	0,035	3,937	0,02	0,004	30,014	0,119	33
CuCo2 Be	1	50	6	72,325	71,900	0,425	48,571	0,19	0,055	5,316	0,294	165
	1	50	12	72,550	70,915	1,635	186,85	0,85	0,236	14,638	3,460	54
	1	100	6	72,450	72,275	0,175	20,000	0,09	0,020	7,731	0,153	131
	1	100	12	72,510	71,810	0,700	80,000	0,28	0,078	24,416	1,905	42
	1	200	6	72,405	72,355	0,050	5,714	0,01	0,005	7,818	0,042	135
	1	200	12	72,545	72,375	0,170	19,429	0,09	0,019	29,354	0,555	35
	2	50	6	72,445	71,935	0,510	58,286	0,25	0,061	5,710	0,347	168
	2	50	12	72,480	70,635	1,845	210,85	1,00	0,249	15,664	3,905	54
	2	100	6	72,605	72,445	0,160	18,286	0,1	0,018	7,787	0,142	129
	2	100	12	65,325	64,640	0,685	78,286	0,36	0,080	23,815	1,909	41
	2	200	6	70,375	70,315	0,060	6,857	0,04	0,007	7,502	0,049	140
	2	200	12	59,450	59,225	0,225	25,714	0,05	0,025	29,069	0,714	36

EK-2 (Devam) Deney Sonuçları

Elektr.												
Elektr. Cinsi	Deney No:	Vurum Süresi [µs]	Boşalı m Akımı [A]	İşleme Öncesi Ağırlık [gr]	İşleme Sonrası Ağırlık [gr]	Aşınm a Ağırlığı [gr]	Aşınm a Hacmi [mm ³]	Deney sel Boy Aşınma sı [mm]	BA	iiH [mm ³ /d ak]	EAH [mm ³ /d ak]	İşleme Süresi [dak]
CuCr1 Zr	1	50	6	73,265	73,100	0,165	18,539	0,13	0,018	4,949	0,089	208
	1	50	12	73,200	72,175	1,025	115,16	0,43	0,124	15,193	1,888	61
	1	100	6	73,420	73,355	0,065	7,303	0,03	0,007	6,563	0,047	155
	1	100	12	72,745	72,465	0,280	31,461	0,17	0,031	25,058	0,767	41
	1	200	6	73,150	73,135	0,015	1,685	0,07	0,002	5,950	0,009	179
	1	200	12	73,105	73,045	0,060	6,742	0,01	0,006	28,579	0,177	38
	2	50	6	73,125	72,970	0,155	17,416	0,10	0,021	5,044	0,108	162
	2	50	12	73,215	72,040	1,175	132,02	0,54	0,142	14,999	2,129	62
	2	100	6	73,035	72,960	0,075	8,427	0,04	0,009	6,643	0,062	135
	2	100	12	73,255	72,955	0,300	33,708	0,11	0,031	23,445	0,717	47
	2	200	6	73,145	73,120	0,025	2,809	0,02	0,003	5,966	0,016	180
	2	200	12	73,290	73,195	0,095	10,674	0,09	0,009	30,191	0,267	40
2 Saat Yaşlan. CuCr1 Zr	1	50	6	66,640	66,485	0,155	17,416	0,08	0,019	5,206	0,098	178
	1	50	12	66,750	65,965	0,785	88,202	0,41	0,109	14,968	1,633	54
	1	100	6	66,355	66,295	0,060	6,742	0,03	0,007	7,725	0,054	125
	1	100	12	65,380	65,140	0,240	26,966	0,06	0,028	26,407	0,729	37
	1	200	6	69,315	69,300	0,015	1,685	0,04	0,002	7,866	0,013	126
	1	200	12	69,505	69,460	0,045	5,056	0,03	0,005	31,172	0,153	33
	2	50	6	66,025	65,855	0,170	19,101	0,08	0,019	5,854	0,114	168
	2	50	12	67,260	66,255	1,005	112,92	0,55	0,127	15,644	1,981	57
	2	50	6	66,775	66,710	0,065	7,303	0,02	0,008	6,902	0,052	140
	2	100	12	69,245	69,015	0,230	25,843	0,10	0,026	25,396	0,663	39
	2	100	6	66,540	66,520	0,020	2,247	0,02	0,002	7,514	0,017	133
	2	200	12	66,650	66,615	0,035	3,933	0,03	0,004	33,079	0,131	30

EK-2 (Devam) Deney Sonuçları

Elektr.												
Elektr. Cinsi	Deney No:	Vurum Süresi [μs]	Boşalı m Akımı [A]	İşleme Öncesi Ağırlık [gr]	İşleme Sonrası Ağırlık [gr]	Aşın. Ağırlığı [gr]	Aşın. Hacmi [mm ³]	Deney sel Boy Aşın. [mm]	BA	iiH [mm ³ /dak]	EAH [mm ³ /dak]	İşleme Süresi [dak]
4 Saat Yaşlan. CuCr1 Zr	1	50	6	67,370	67,220	0,150	16,854	0,09	0,017	4,882	0,084	200
	1	50	12	67,125	66,175	0,950	106,74	0,51	0,125	15,576	1,941	55
	1	100	6	67,195	67,140	0,055	6,180	0,01	0,007	7,538	0,051	121
	1	100	12	67,365	67,100	0,265	29,775	0,10	0,032	26,897	0,851	35
	1	200	6	67,270	67,260	0,010	1,124	0,04	0,001	7,043	0,008	141
	1	200	12	67,145	67,095	0,050	5,618	0,03	0,006	33,036	0,187	30
	2	50	6	67,105	66,935	0,170	19,101	0,02	0,019	5,197	0,101	189
	2	50	12	67,830	66,840	0,990	111,23	0,48	0,131	16,279	2,139	52
	2	100	6	67,050	66,990	0,060	6,742	0,08	0,007	7,759	0,056	121
	2	100	12	67,365	67,100	0,265	29,775	0,10	0,032	26,897	0,851	35
	2	200	6	67,270	67,260	0,010	1,124	0,04	0,001	7,043	0,008	141
	2	200	12	67,145	67,095	0,050	5,618	0,03	0,006	33,036	0,187	30
12 Saat Yaşlan. CuCr1 Zr	1	50	6	67,150	66,995	0,155	17,416	0,05	0,018	4,164	0,073	238
	1	50	12	66,555	65,645	0,910	102,24	0,45	0,113	13,704	1,549	66
	1	100	6	67,255	67,190	0,065	7,303	0,10	0,008	5,038	0,039	187
	1	100	12	66,510	66,260	0,250	28,090	0,10	0,030	23,264	0,702	40
	1	200	6	67,315	67,305	0,010	1,124	0,07	0,001	4,500	0,005	229
	1	200	12	67,375	67,335	0,040	4,494	0,02	0,005	29,243	0,132	34
	2	50	6	67,580	67,435	0,145	16,292	0,09	0,018	4,312	0,076	213
	2	50	12	67,465	66,610	0,855	96,067	0,54	0,112	14,246	1,601	60
	2	100	6	67,655	67,590	0,065	7,303	0,05	0,007	6,538	0,048	151
	2	100	12	67,625	67,360	0,265	29,775	0,10	0,031	23,536	0,726	41
	2	200	6	67,315	67,305	0,010	1,124	0,07	0,001	4,500	0,005	229
	2	200	12	67,380	67,340	0,040	4,494	0,04	0,004	29,805	0,132	34

EK-2 (Devam) Deney Sonuçları

Elektr.												
Elektr. Cinsi	Deney No:	Vurum Süresi [µs]	Boşalı m Akımı [A]	İşleme Öncesi Ağırlık [gr]	İşleme Sonrası Ağırlık [gr]	Aşın. Ağırlığı [gr]	Aşın. Hacmi [mm ³]	Deney sel Boy Aşınması [mm]	BA	iiH [mm ³ /dak]	EAH [mm ³ /dak]	İşleme Süresi [dak]
24 Saat Yaşlan. CuCr1 Zr	1	50	6	67,780	67,605	0,175	19,663	0,01	0,020	4,514	0,091	217
	1	50	12	67,265	66,470	0,795	89,326	0,39	0,103	12,582	1,295	69
	1	100	6	68,000	67,935	0,065	7,303	0,04	0,007	6,176	0,046	158
	1	100	12	67,590	67,350	0,240	26,966	0,21	0,030	23,404	0,691	39
	1	200	6	67,755	67,740	0,015	1,685	0,02	0,002	6,394	0,011	155
	1	200	12	67,845	67,810	0,035	3,933	0,02	0,004	29,396	0,119	33
	2	50	6	67,260	67,100	0,160	17,978	0,13	0,018	4,496	0,081	221
	2	50	12	66,940	66,145	0,795	89,326	0,38	0,102	12,647	1,295	69
	2	100	6	68,000	67,935	0,065	7,303	0,04	0,007	6,176	0,046	158
	2	100	12	67,730	67,460	0,270	30,337	0,12	0,031	24,236	0,758	40
	2	200	6	67,755	67,740	0,015	1,685	0,02	0,002	6,394	0,011	155
	2	200	12	67,270	67,230	0,040	4,494	0,02	0,005	30,512	0,145	31

EK-3 Metalografik Resimler



CuCr1Zr Alaşımı 10x büyütme

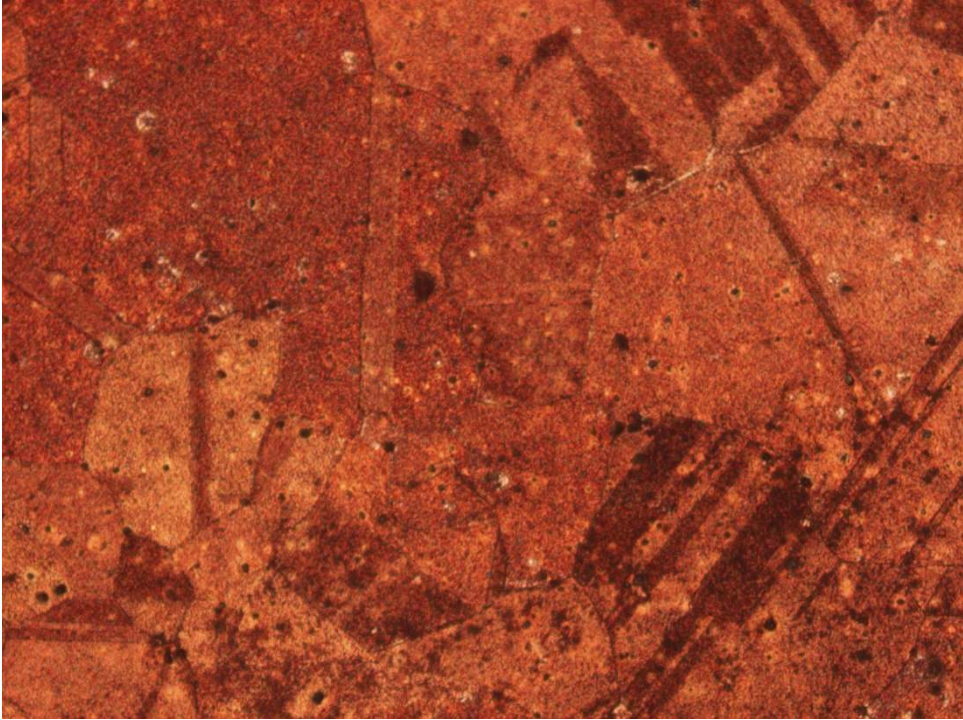


CuCr1Zr Alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler

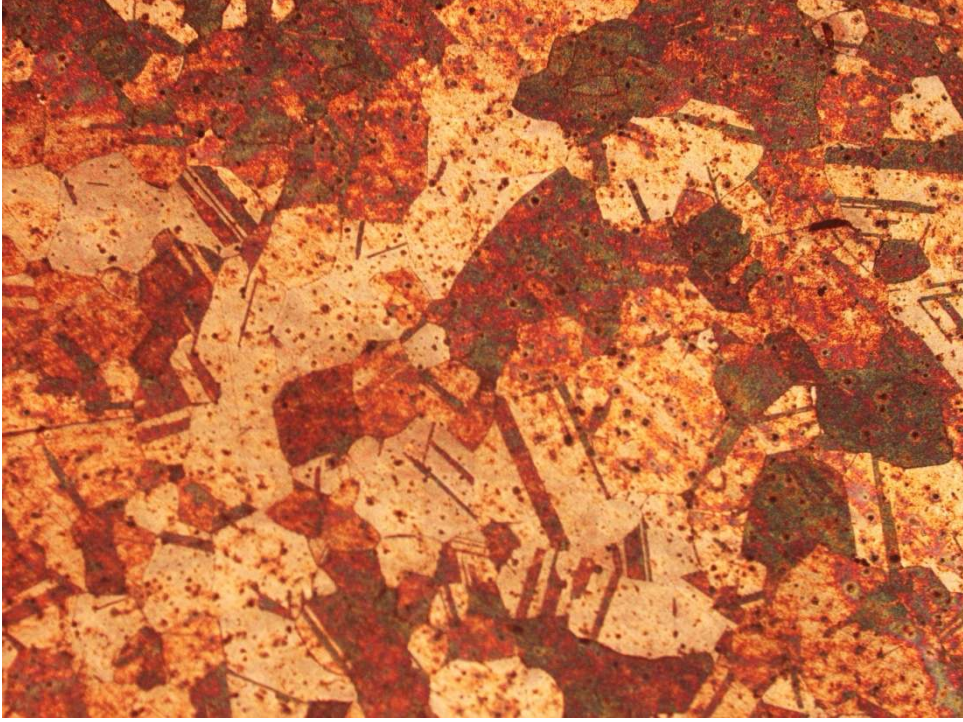


980⁰C de su verilmiş CuCr1Zr Alaşımı 10x büyütme



980⁰C de su verilmiş CuCr1Zr Alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler



500⁰C de 2 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr Alaşımı 10x büyütme



500⁰C de 2 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr Alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler

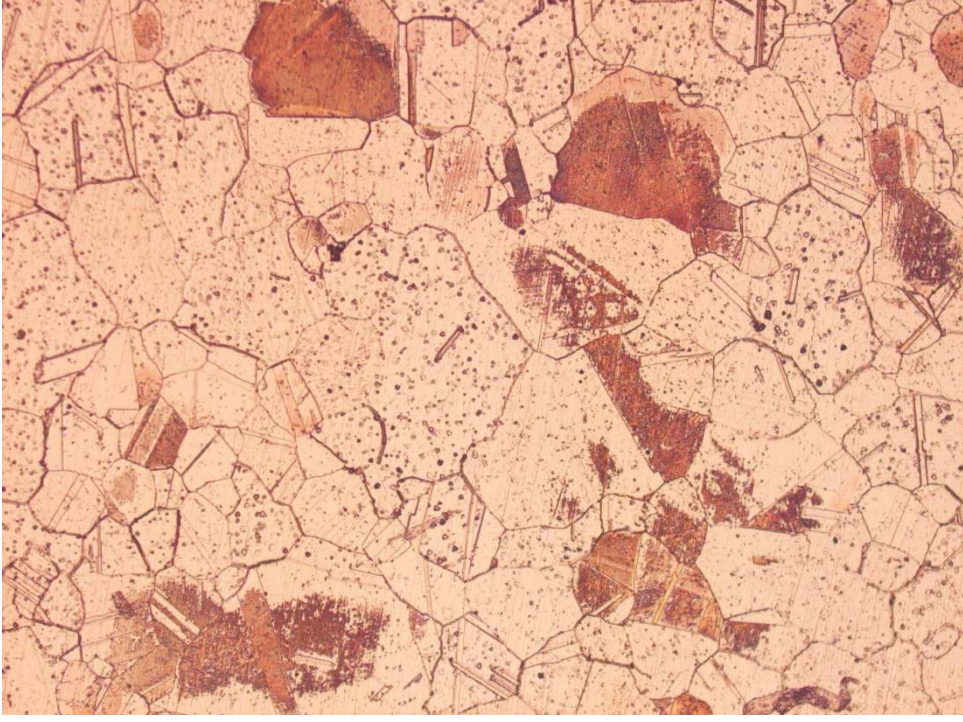


500⁰C de 4 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 10x büyütme

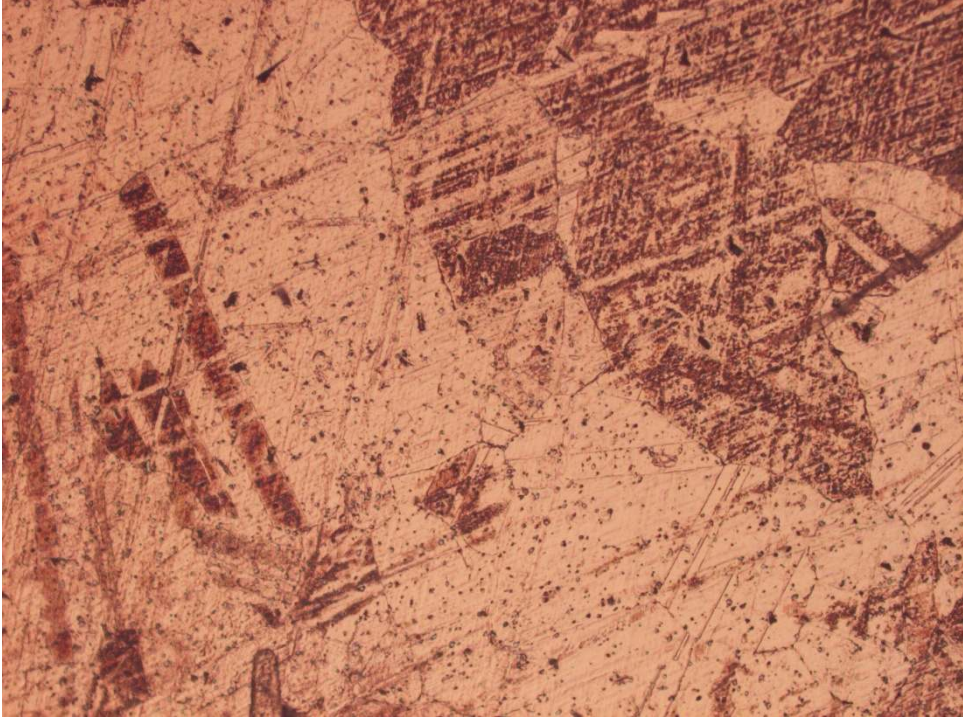


500⁰C de 4 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler

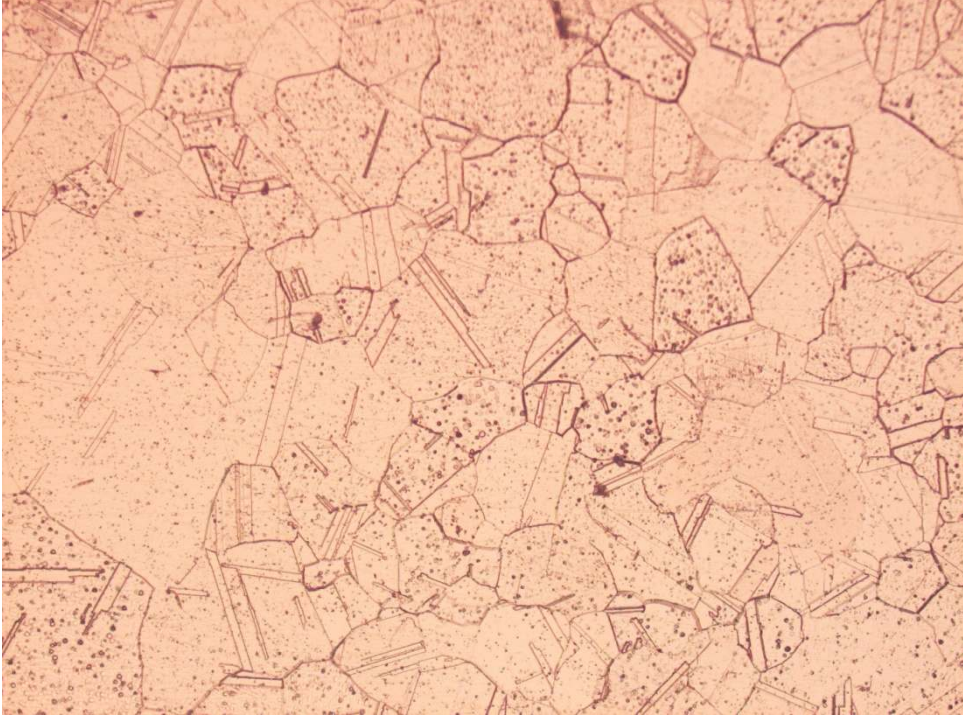


500⁰C de 12 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 10x büyütme

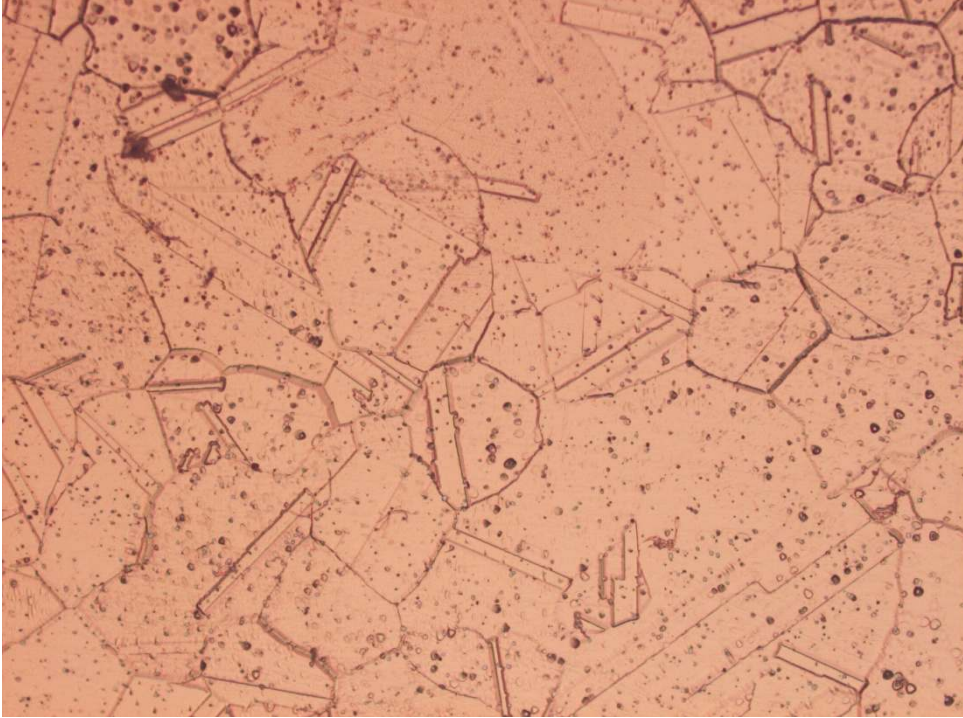


500⁰C de 12 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler



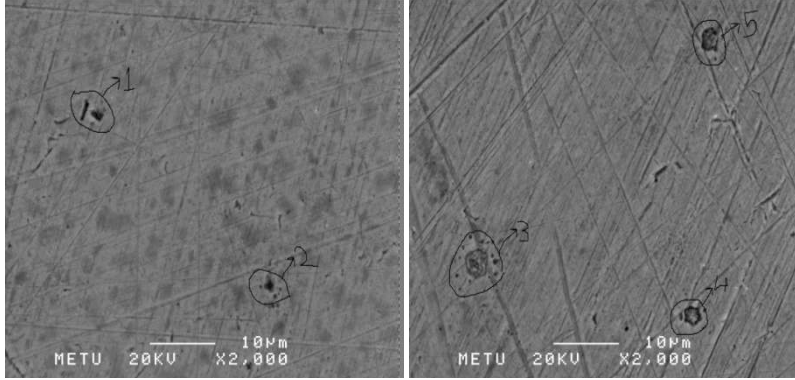
500⁰C de 24 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 10x büyütme



500⁰C de 24 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 20x büyütme

EK-4 SEM Analizi Sonuçları

2 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr SEM



2saatmatricks

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	0.98	1.19
Cu	99.02	98.81

2saatmatricks2

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	1.19	1.45
Cu	98.81	98.55

2saat-1

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Si	26.79	45.23
Cr	0.82	0.75
Cu	72.39	54.02

EK-4 (Devam) SEM Analizi Sonuçları

2saat-2sagalt

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	3.65	4.90
Cu	64.91	71.30
Zr	29.96	22.92
Sn	1.49	0.87

2saat-3solalt

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	11.67	15.82
Cu	47.22	52.40
Zr	41.12	31.78

2ssat-4sagalt

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	1.41	2.26
Cu	19.14	25.11
Zr	79.45	72.63

2saat-5sagust

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	5.37	7.90
Cu	35.26	42.39
Zr	59.36	49.71

EK-4 (Devam) SEM Analizi Sonuçları

4 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr Elektrot SEM



4 saatmatriks-1

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	0.79	0.96
Cu	99.21	99.04

4saatmatriks-2

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	0.79	0.96
Cu	99.21	99.04
Zr	0.00	0.00

4saat-1otabuyuk

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	13.94	19.59
Cu	32.85	37.78
Zr	53.21	42.63

EK-4 (Devam) SEM Analizi Sonuçları

4saat-2 sagalt

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Si	0.03	0.08
Cu	40.25	49.13
Zr	59.72	50.78

4saat-3 solust

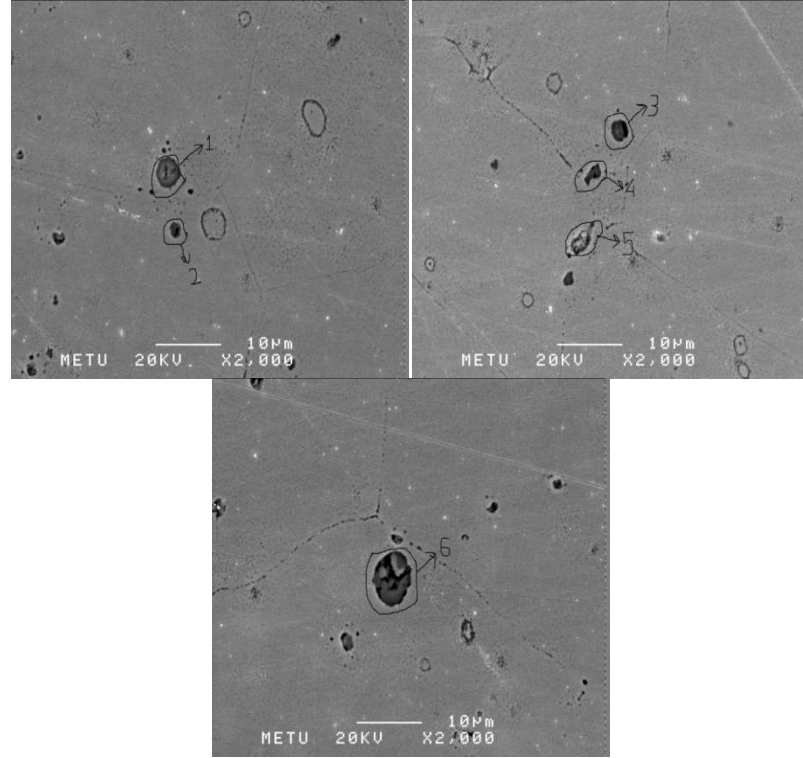
<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	48.94	56.21
Fe	0.81	0.86
Cu	35.17	33.05
Zr	15.08	9.87

4saat-4 sagalt

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Si	49.59	68.95
Cr	0.53	0.40
Cu	49.88	30.65

EK-4 (Devam) SEM Analizi Sonuçları

12 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr SEM



12saatmatrix

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	0.89	1.08
Cu	98.95	98.80
Zr	0.17	0.12

12saat-1 ortasiyah

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Al	2.50	5.47
Ca	0.50	0.74
Cr	34.79	39.57
Cu	49.14	45.74
Zr	13.07	8.48

EK-4 (Devam) SEM Analizi Sonuçları

12saat-2 altsiyah

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
<i>Cr</i>	16.92	21.70
<i>Fe</i>	0.77	0.92
<i>Cu</i>	54.02	56.69
<i>Zr</i>	28.29	20.69

12saat-3.buyuksiyah

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
<i>P</i>	1.38	2.49
<i>Cr</i>	53.02	57.23
<i>Cu</i>	45.60	40.28

12saat-4 atlbuyuksiyah

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
<i>P</i>	2.80	5.23
<i>Cr</i>	32.11	35.72
<i>Cu</i>	64.33	58.57
<i>Zr</i>	0.76	0.48

12saat-5 enalt

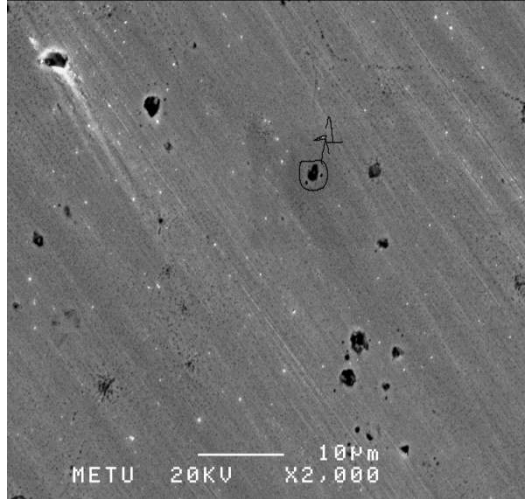
<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
<i>Cr</i>	2.84	4.48
<i>Cu</i>	21.09	27.19
<i>Zr</i>	76.07	68.33

12 saat-6 ortasiyah

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
<i>Cr</i>	18.32	24.62
<i>Fe</i>	0.65	0.81
<i>Cu</i>	37.41	41.14
<i>Zr</i>	43.63	33.43

EK-4 (Devam) SEM Analizi Sonuçları

24 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr SEM



24saatmatrix

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	0.57	0.69
Cu	99.43	99.31
Zr	0.00	0.00

24saat-1 solustkose

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Cr	3.51	4.77
Cu	60.91	67.69
Zr	35.58	27.55

24saat-2 sağalt

<i>Element</i>	<i>Weight Conc %</i>	<i>Atom Conc %</i>
Si	0.06	0.16
Cr	4.17	5.82
Cu	51.82	59.10
Zr	43.95	34.92

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

Soyadı, adı : Şimşek, Ülke
 Tel : 0541 855 06 07
 E-mail : ulke_sim@hotmail.com
 Cinsiyeti : Erkek
 Medeni hali : Bekâr
 Uyrugu : TC
 Doğum yeri : Ankara
 Doğum tarihi : 29.04.1985

Eğitim durumu:

ÖĞRENİM DÖNEMİ	OKUL	ÖĞRENİM ALANI
1991-1996	Çankaya İlköğretim Okulu	İlkokul
1996-2003	TED Ankara Koleji	Ortaokul - Lise
2004-2009	Başkent Üniversitesi	Makine Mühendisliği (Lisans)
2010-2012	Gazi Üniversitesi	Fen Bilimleri Makine Mühendisliği(Y.Lisans)

Staj Yaptığı Yerler

Staj Yapılan Kurum	Staj Tarihi	Staj süresi
TAİ	2008	1 Ay
Türk Traktör	2006	1 Ay

Projeler:

Bitirme projesi : Düşük Hızlarda Çalışan Kesme Makinesi Tasarımı ve İmalatı (2009)

Tezler:

1- Elektrolitik ve Alaşım Bakır Elektrotların Elektro-Erozyon ile İşleme Performansına Etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Tez Danışmanı: Prof. Dr. Can Çoğun, 2012)

Yabancı Dil:

İngilizce, Almanca

Bilgisayar Dili:

C, C++, C#

Bilgisayar Programları:

Catia ,3D Max Studio, Pro Engineer, AutoCad, Patran-Nastran, Proteus, Matlab, MSOffice, Ansys

Mesleki İlgi alanları:

Cisimlerin Mukavemeti, Elastisite teorisi, Plastisite Teorisi, Kırılma Mekaniği, Malzeme Bilimi, Alışılmamış İmal Usülleri, Tensör Analizi ve Uygulamaları, 3-D Tasarım(Catia V5)

Hobiler:

Sinema, Müzik, Futbol, Tenis, Bilgisayar Oyunları, Kitap okumak