

**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 ısıl 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 |
| TABLOLARIN 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) Alaşimleri [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 |

TABLULARIN 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 Deneysel 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 vuruş jeneratöründe vuruşların 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 µs, (b) 100 µs ve (c) 200 µs 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 µs, (b) 100 µs ve (c) 200 µs 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 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 | 47 |
| Şekil 5.6 (Devam) (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 | 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 µs, (b) 100 µs ve (c) 200 µs 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 µs, (b) 100 µs ve (c) 200 µs 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 alaşımı 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, μ m |
| $r_{dış}$ | Elektrot dış köşe yarıçapı, mm |
| $r_{iç}$ | Elektrot iç köşe yarıçapı, mm |
| t_c | Vurum çevrim süresi, μ s |

| | |
|---------------------|---------------------------------|
| t_d | Boşalım süresi, μs |
| $t_{i\text{şleme}}$ | 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

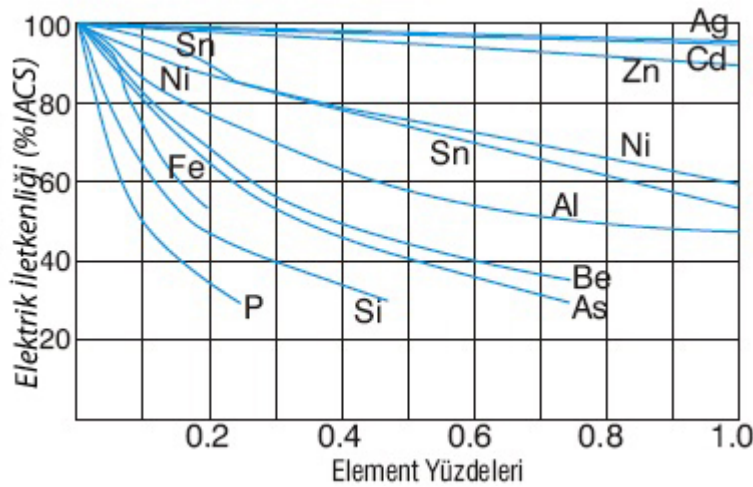
Günümüz kalıpcılık teknolojisinde yaygın kullanıma sahip olan elektroerozyon ile işleme (EEİ) yöntemi, karmaşık kalıp işlerinin yapılmasında sağladığı imkânlar ve yüksek boyutsal tamlik sebebiyle geniş kullanım alanlarına sahip olmuştur. Özellikle, metal alaşımlarından imal edilen kalıpların işlenmesinde, 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 üretilmeyen iç yüzey şekillendirmelerini (keskin köşeler ve düz dip profilleri gibi) istenen toleranslarda gerçekleştirebilmektedir. Çok sert, yüksek mukavemetli ve ısıya karşı dayanıklı metal malzemelerin kullanıma 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 boşalılar ile işparçasının ergitilmesi veya buharlaştırılması prensibi ile işparçalarını istenen geometride kesmektedir.

Elektriksel boşalının 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.

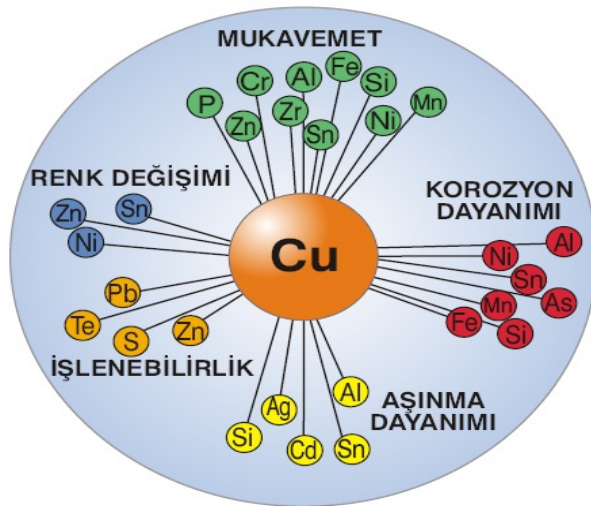


Şekil 1.1. E-bakırın iletkenliğine alaşımların etkisi [3]

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 bağlı 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.



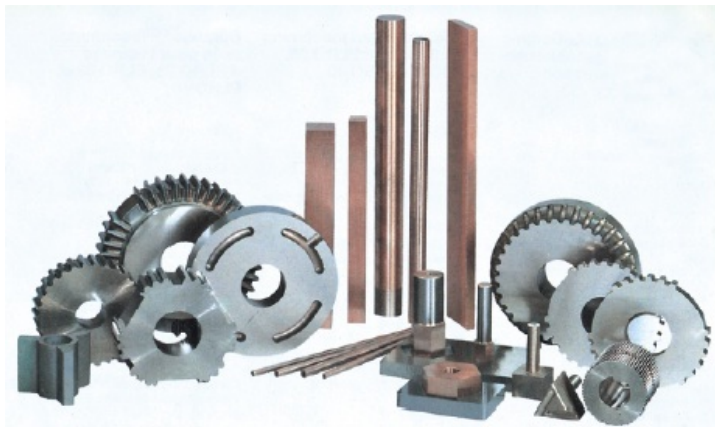
Şekil 1.2. Alaşım Elementlerinin Etkileri [4]

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 alaşımli bakırdan yapılmış elektrotlar, yüksek ergime ve buharlaşma sıcaklığından dolayı E-bakır elektrotlardan daha uzun ömürlüdürler. Bu nedenle tungsten alaşımli 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 sığ 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 ısıl genleşmeleri daha az olduğu için, yüksek hassasiyetli işlemlere olanak sağlar. Bu avantaj özellikle dar kesitli geometrilerde önemlidir [4].

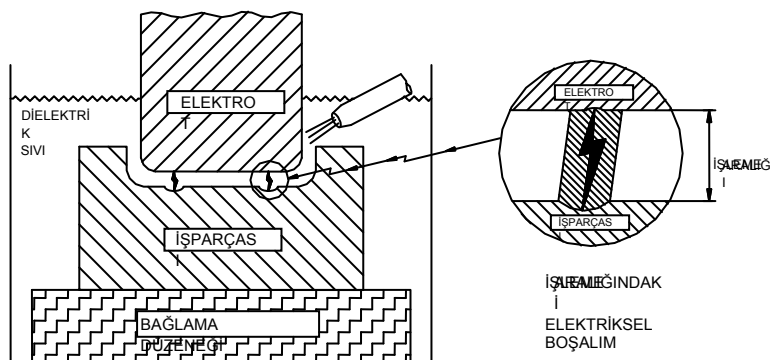
3) Elektrodun İşlenebilirliği: Bakır-Tungsten alaşımlı elektrotlar, bakır elektrotlarla kıyaslandığında oldukça yüksek elastisite modülüne sahip olduğundan bakır elektrotlardan daha rijittirler. Bu durum talaşlı imalatta, işparçasında daha az çapak oluşmasına neden olur [4].

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, vuruş jeneratörü tarafından kontrollü bir şekilde oluşturulan elektriksel boşalmaların işparçası yüzeyinden küçük bir bölgeyi ısıtması 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; vuruş 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

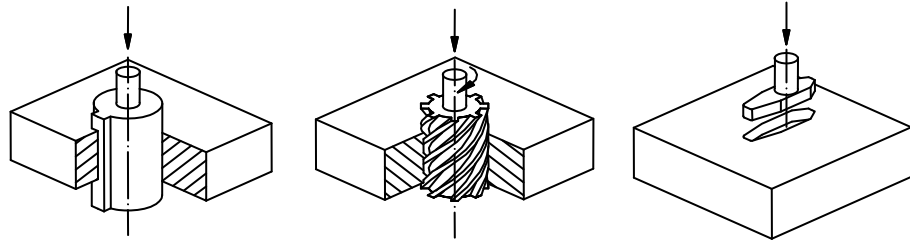
(ii) EEİ ile kesme

(iii) EEİ ile taşlama

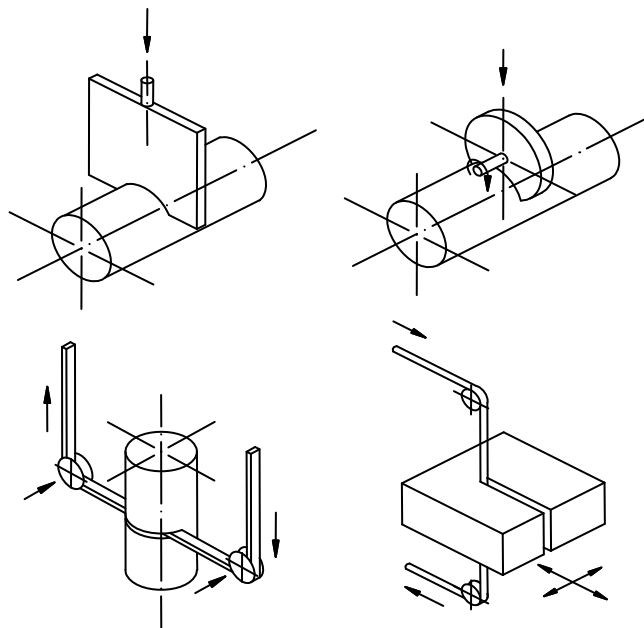
(i) EEİ ile delme ve oyma yöntemi, işparçasının derinlik doğrultusunda sabit kesitli bir elektrot ile delinmesi veya elektrodun işparçasına belirli bir işleme derinliğine daldırılması ile yapılan işlemdir (Şekil 2.2).

(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).

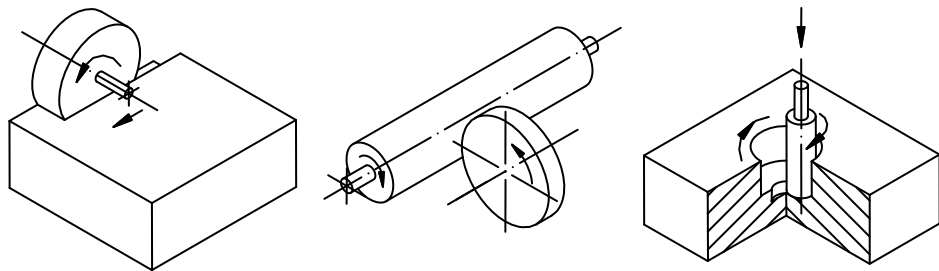
(iii) EEİ ile taşlama yöntemi, işparçasının kendi eksenini etrafında dönen silindirik veya konik şekilli elektrotlar ile dış yüzeylerinin veya iç deliklerinin taşlanmasıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.2. EEİ ile delme ve oyma yöntemi



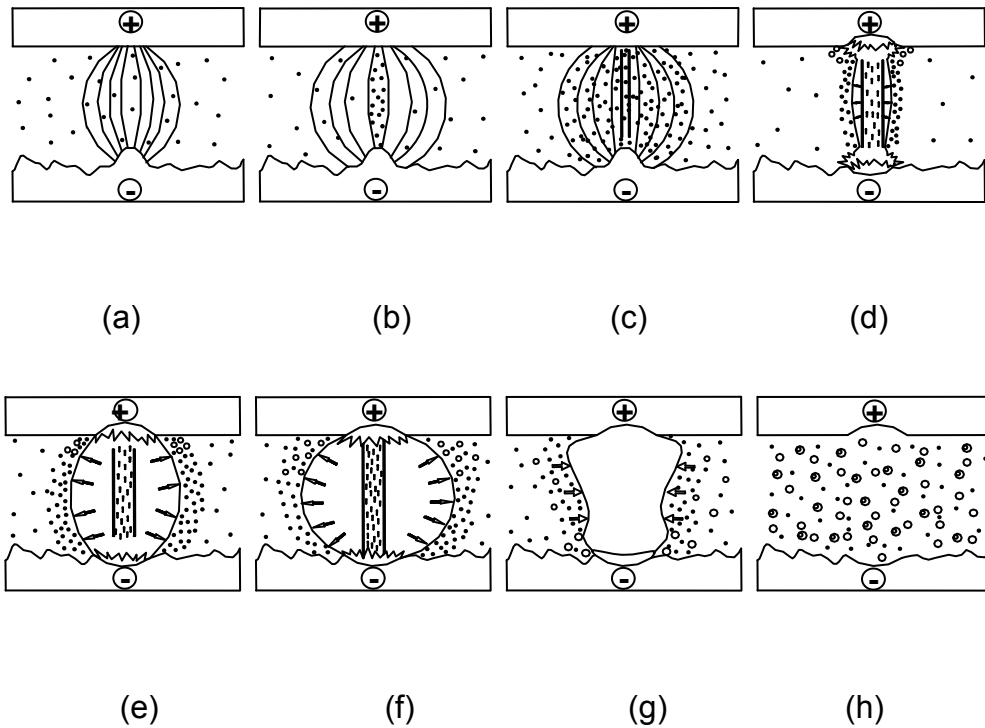
Şekil 2.3. EEİ ile kesme yöntemi



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

Vuruş 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.

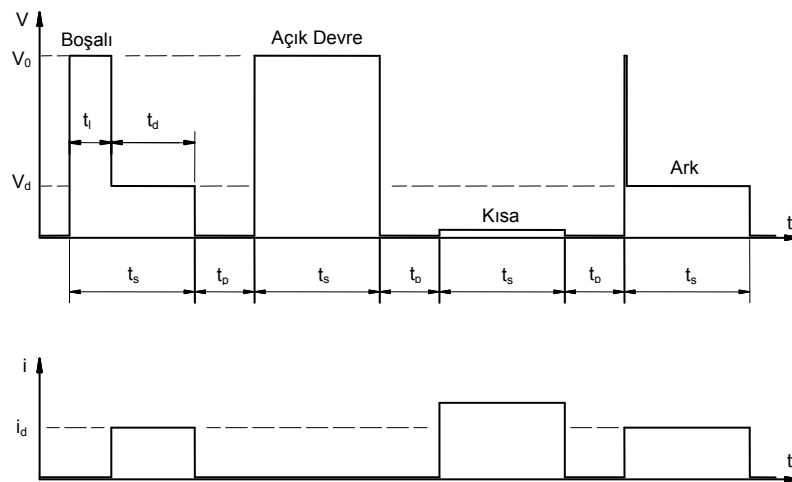
2.4. EEİ'nin Temel Parametreleri

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

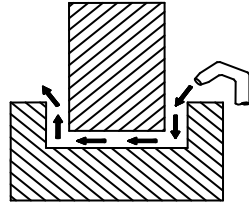
EEI'de dielektrik sıvının görevleri;

- 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].

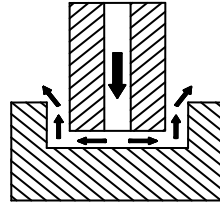
Dielektrik sıvının elektrot ile işparçası arasına uygulanmasında kullanılan teknikler Şekil 2.7'de görülmektedir.

2.4.3. İşparçası malzemesinin fiziksel özellikleri

EEI'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].

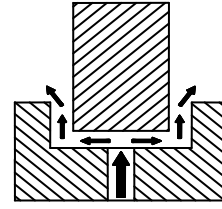


a) Yanal püskürtme



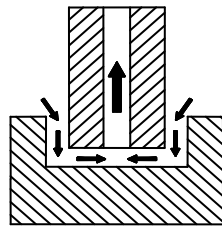
b) Elektrot içinden

püskürtme



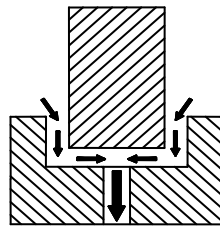
c) İşparçası içinden

püskürtme



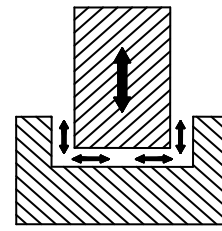
d) Elektrot içinden

emme

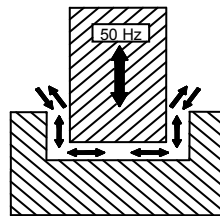


e) İşparçası içinden

emme



f) Statik

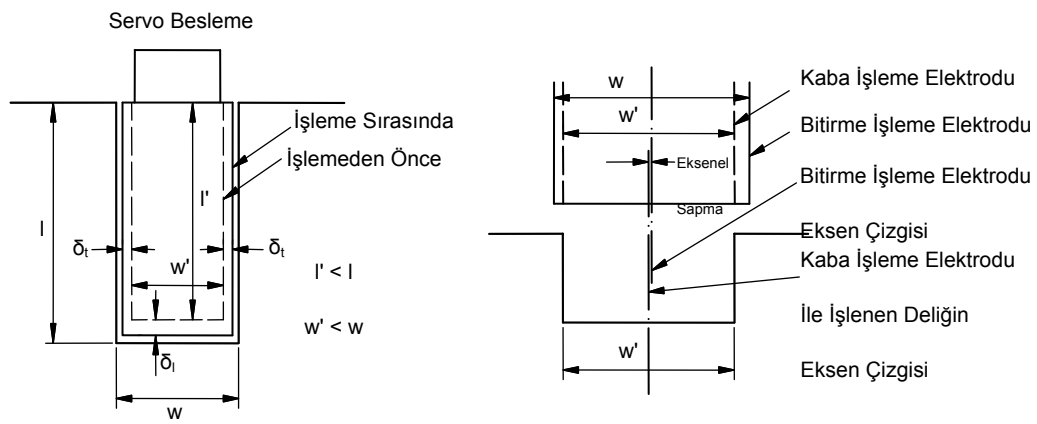


g) Titreşimli

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 ısıl genişlemeyi 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 genişlemenin 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 ısıl-fiziksel özellikler; yüksek ısıl 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 değerine oranı şeklinde tanımlanmaktadır:

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

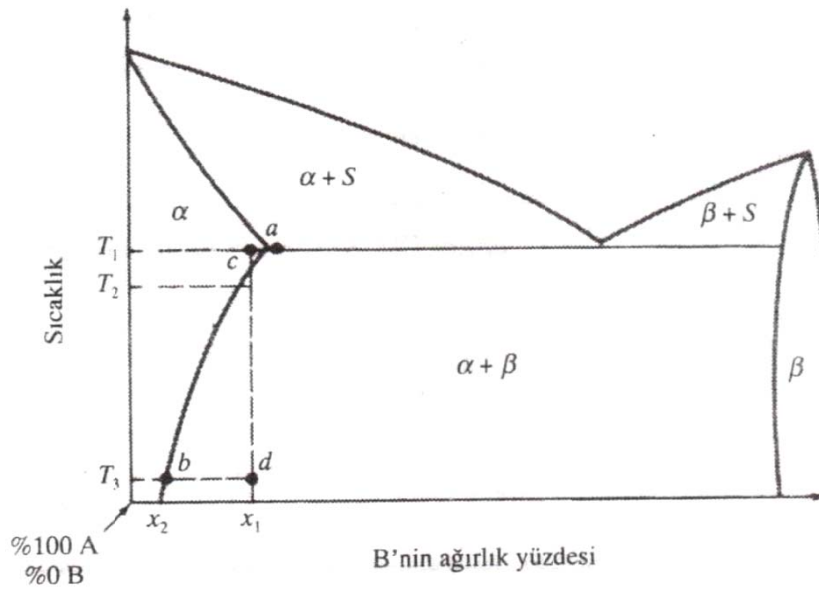
Boşalım akımı ve vurum süresi BA'yı etkileyen en önemli parametrelerdir. Düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemeleri, yüksek ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerine göre daha fazla aşınır. Bundan dolayı düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerinin kullanımında elde edilen BA 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. Çökeltme Sertleşmesi (Yaşlandırma)

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

Çökeltme sertleşmesi süreci Şekil 3.1'de A ve B metallerine ait ikili faz diyagramı ile açıklanmaktadır. Çökeltme sertleşmesinin olabilmesi için, sıcaklık düşüldükçe çözünürlüğü azalan bir katı çözeltilinin var olması gerekir. Şekilde α katı çözeltilisi, çözen boyunca 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 çökeltme sertleşmesi incelenirse, T_2 sıcaklığından T_3 sıcaklığına düşerken α katı çözeltilisinin çözünürlüğünde büyük bir azalma olmaktadır [10].

Çökeltme sertleşmesi süreci üç temel basamaktan oluşur [10].

1. Çözelti ısıtma işlemi, çökeltme 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 katigenin ortalarında bir yerde yer almasıdır.
2. Su verme, çökeltme 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, çökeltme sertleşmesi sürecinde üçüncü basamaktır. İnce dağılmış çökeltilerin oluşabilmesi için çözelti ısıtma işlemi uygulanmış ve su verilmiş alaşım numunesini yaşlandırmak gereklidir. Çökeltme sertleşmesi sürecinin amacı, alaşım içinde ince ve dağılmış çökelti oluşturmasıdır. 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 ısıtma 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.

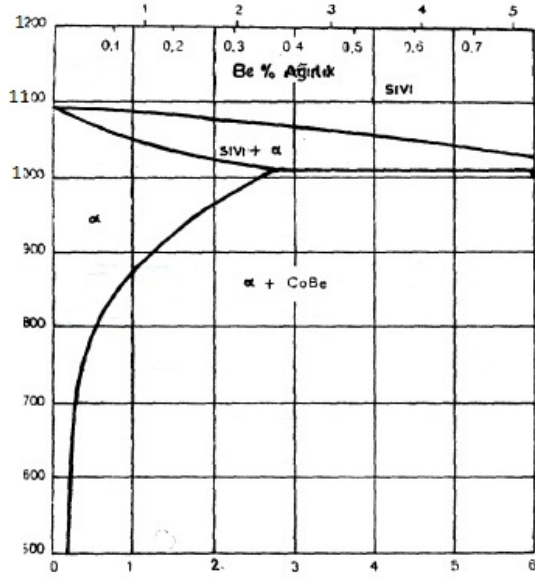
Bununla birlikte, çözeltiliye alma işleminin yapıldığı yüksek sıcaklıklarda tane tek faz halinde hızla irileşir. Bu nedenle tane sınırlarının yer değiştirmesini engelleyen yeter miktarda ergimiş tanecik bulunması için CoBe oranının teorik sınır değerinin üstünde olması gerekir.

Çözeltiliye alma ve su verme:

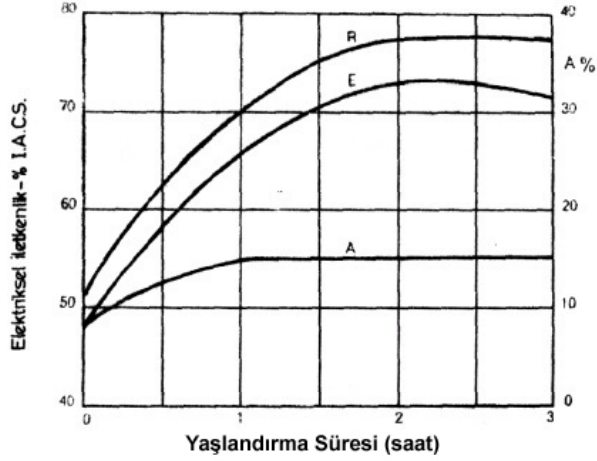
CoBe fazından en az miktarda ergitmek ve yanma tehlikelerinden kaçınmak için, ergiyik haline getirme 900⁰C ile 950⁰C arasında gerçekleştirilir.

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]

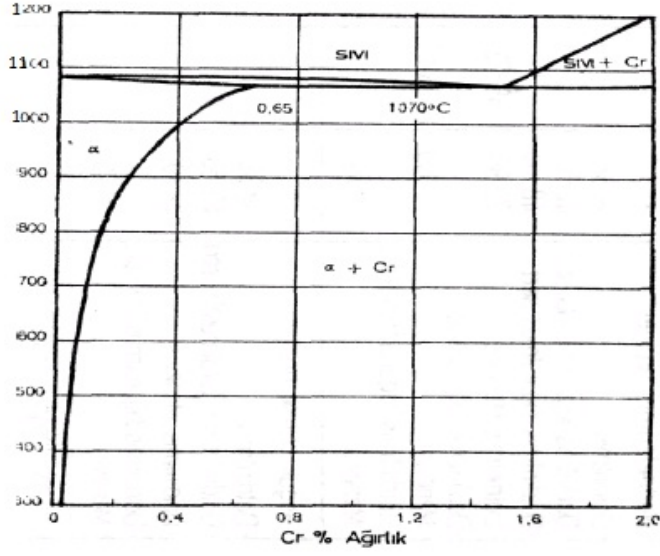
3.3 Bakır-Krom(CuCr) ve Bakır-Krom-Zirkonyum(CuCrZr) Alaşımları [11]

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

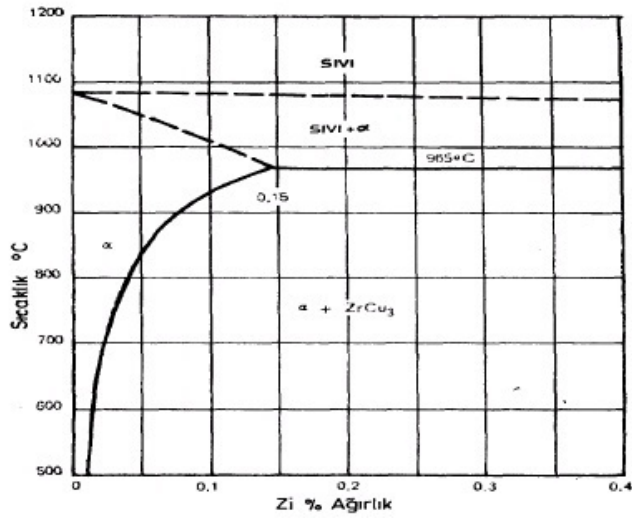
Krom alaşımlı bakıra az miktarda zirkonyum ilavesi, bu alaşımanın yüksek sıcaklık değerlerinde mekanik mukavemetinin iyileşmesini sağlar. Krom oranı her iki alaşım için ağırlık olarak %6 ile %1 arasındadır. Üçlü alaşımanın zirkonyum oranı ise ağırlık olarak %0,08'dir.

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, nitrüleme vb.) nedeniyle zordur.



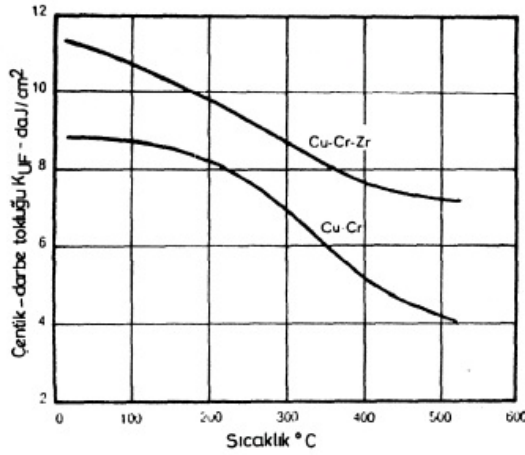
Şekil 3.4. Bakır-Krom denge faz diyagramı [11]



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-yoğrulmuş-menevişlenmiş halde kromlu bakırın sıcakta darbe mukavemeti üzerine %0,04 zirkonyum ilavesinin etkisi [11]

Çözeltiyeye alma ve su verme:

Bakır-krom ve bakır-krom-zirkonyum alaşımının ısıl işlemi 1000°C civarında yapılarak oda sıcaklığında su verilir. Kritik soğuma hızı 17°C/s'dir. İşlem görecek parçaların boyutlarına göre çözeltiyeye 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 çözeltiyeye alma işlemlerinde alaşımın sertleştirici etkisi azalır veya yok olur. Örneğin 1 saat 1000°C sıcaklıkta havada oksitlenmiş bir kromlu bakırda oksijenin yayıldığı yzeyeye yakın tabakalarda (0,35 mm derinlik) mikro sertlik 188 HV'den 72 HV'ye düşmüştür. İ oksitlenme tabakasıyla yzeyesel bakır oksit tabakasının kalınlığı tutma süresinin kareköküyle orantılıdır.

Yaşlandırma işlemi:

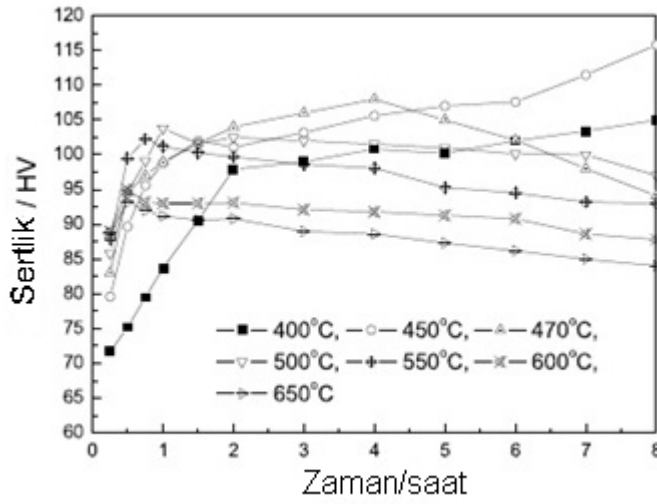
Bakır-krom ve Bakır-krom-zirkonyum alaşımının yaşlandırma işlemi 450°C ile 500°C arasında 2 ile 4 saat arasında değişen tutma süresiyle gerçekleştirilir. Az miktarda soğuk işlem görmüş parçaların yaşlandırma sıcaklığı 500°C sıcaklıkta 2 saat süresince yapılır.

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]:

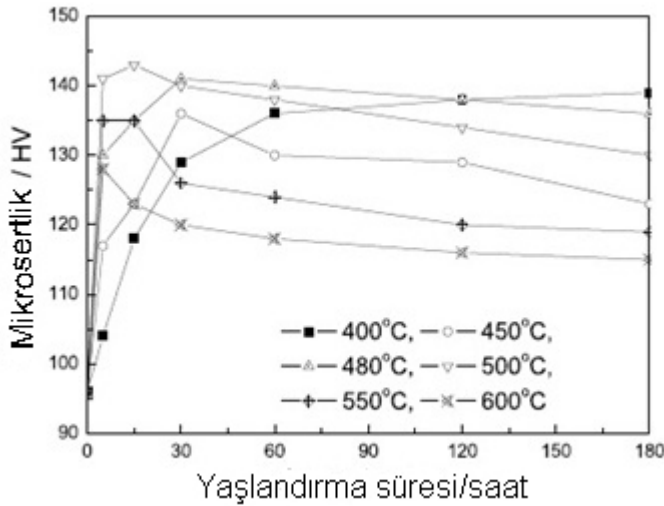
[14] nolu çalışmada solüsyon kullanılarak (SSA) ve oda sıcaklığında su ortamında hızlı soğutma yapılarak (RSA) uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası CuCrZr alaşımının yapısı ve özellikleri üstüne çalışılmıştır. 500°C sıcaklıkta 15 dakika tutularak yapılan yaşlandırma işleminde, RSA sonrası sertlik 143 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.



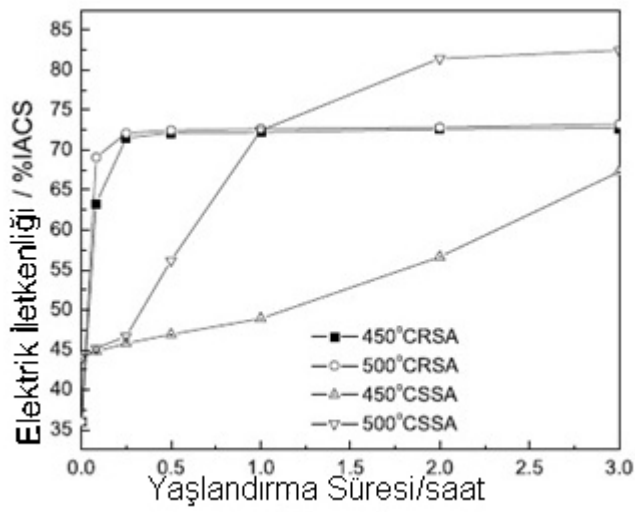
Şekil 3.7. SSA'da sertlik vs yaşlandırma süresi ve sıcaklığı [14]

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.

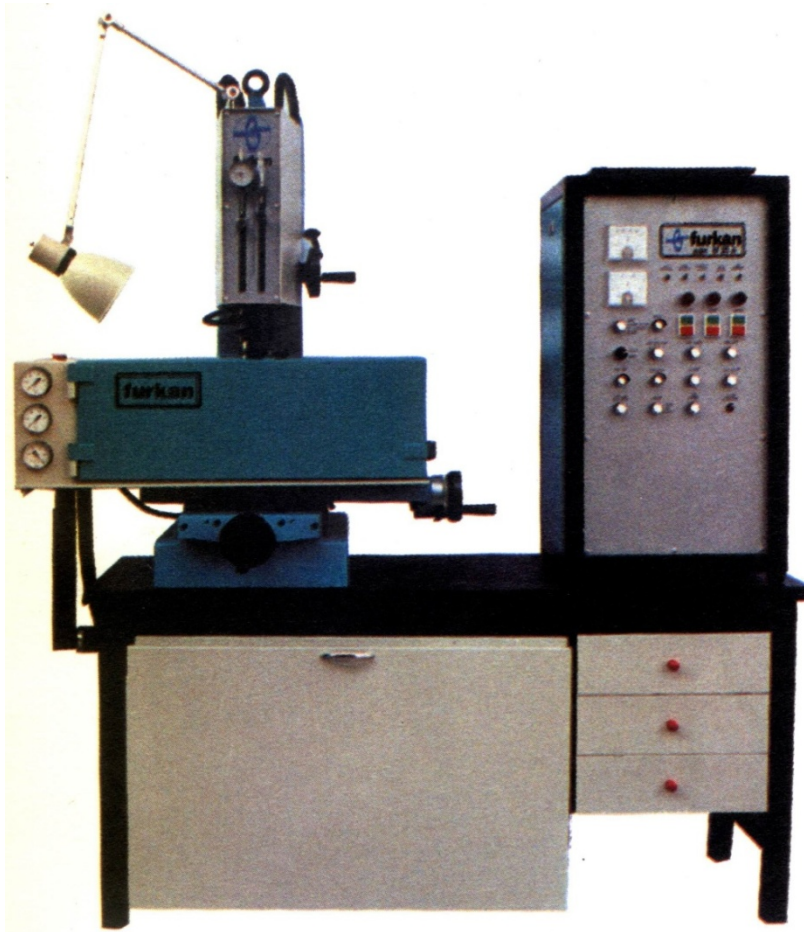
E-bakır, CuCr1Zr ve CuCo2Be elektrotlar 16 mm çapındaki çubuk malzemelerden HSS dairesel testere ile (düşük hızda) 41 mm uzunluğunda kesilmiştir. Elektrotların düz alınları tornalanarak 40 mm boya getirilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.3 Elektrotlar

4.2 EEİ Deneyleri

Deneyel çalışmaları, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezgâhları Laboratuvarı'nda bulunan Furkan EDM M 25 A tipi EEİ tezgâhında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Tezgaha ait teknik özellikler 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 ısıl işlemler Protherm PLF 120/7 tipindeki ısıl 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 içersinde 1200⁰C ve sıcaklık hassasiyeti ise ±1⁰C'dir (Resim 4.4).

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki faz diyagramlarından yararlanılarak çözeltiliye alma işlemi 985⁰C sıcaklıkta 30 dakika süreyle yapılmıştır. Çözeltiliye 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 985⁰C sıcaklıkta CuCr1Zr alaşım elektrotların görünümü

Elektrotlar Bölüm 3'de anlatılan koşullara uygun olarak, 500⁰C'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.



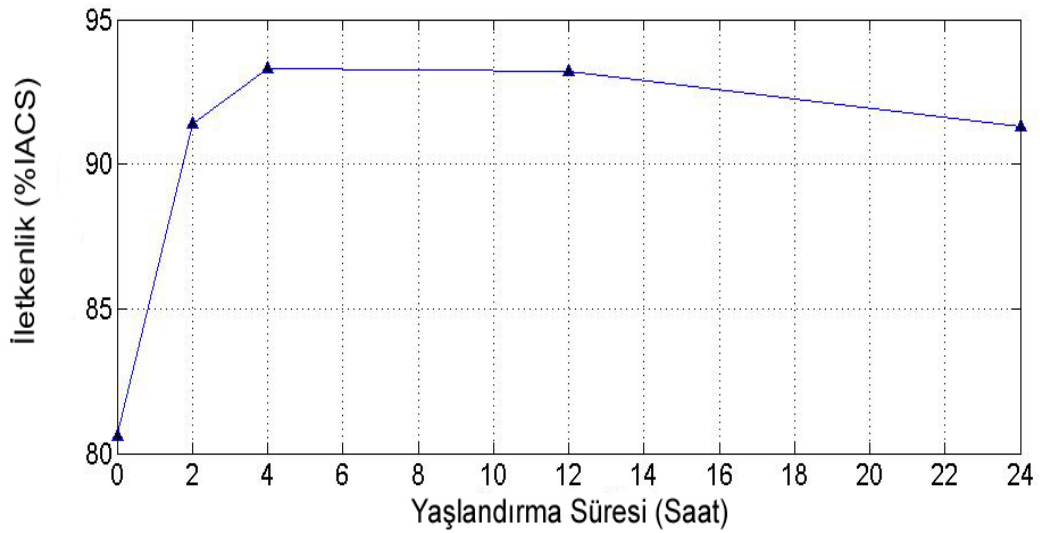
Resim 4.5 Kesilmiş ve bakalite gömülmüş elektrot numuneleri

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

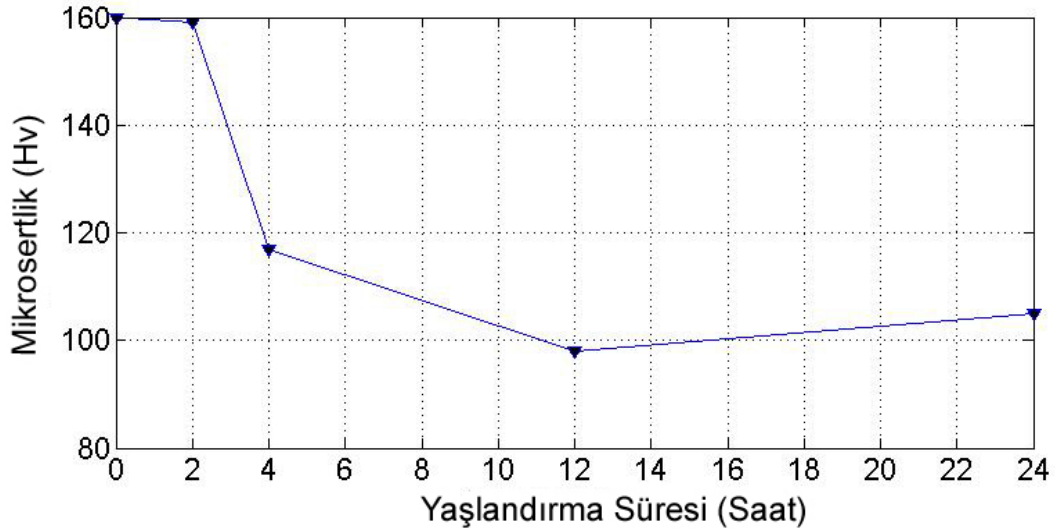
5.1 CuCr1Zr ve Isıl İşlem Uygulanmış CuCr1Zr Elektrotların İletkenlik Ölçümleri



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

Şekil 5.1, CuCr1Zr bakır alaşımı için 500⁰C 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)

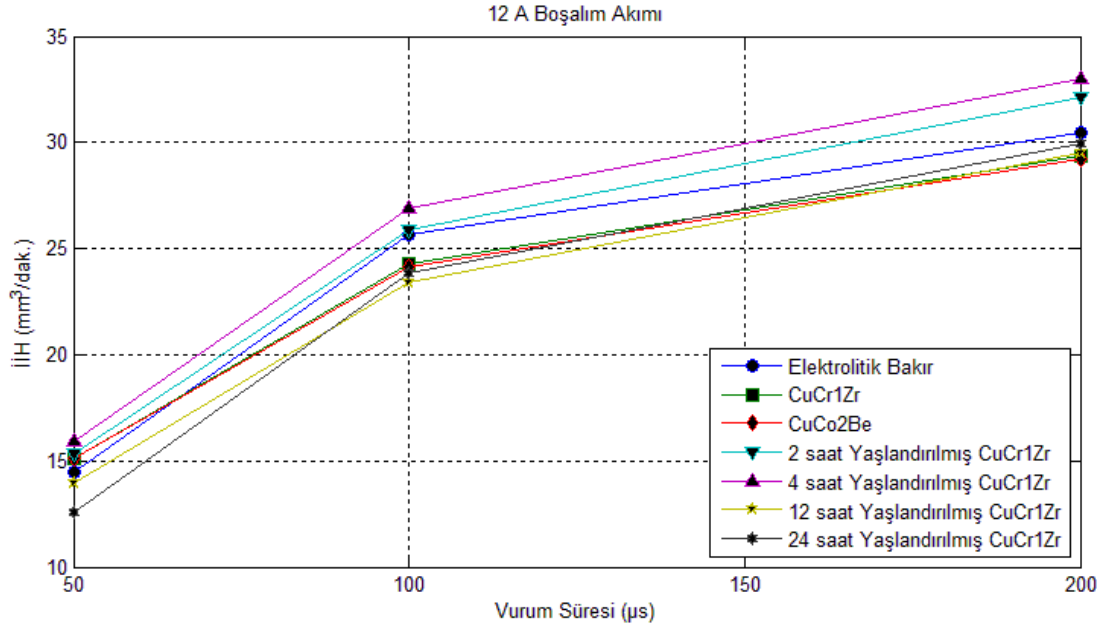
| Elektrot Cinsi | Vurum Süresi [μs] | Boşalım Akımı [A] | EAH [mm ³ /dak] | MRR [mm ³ /dak] | Ra [μm] | BA [%] |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|---------|--------|
| E-Bakır | 50 | 6 | 0,09 | 4,41 | 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

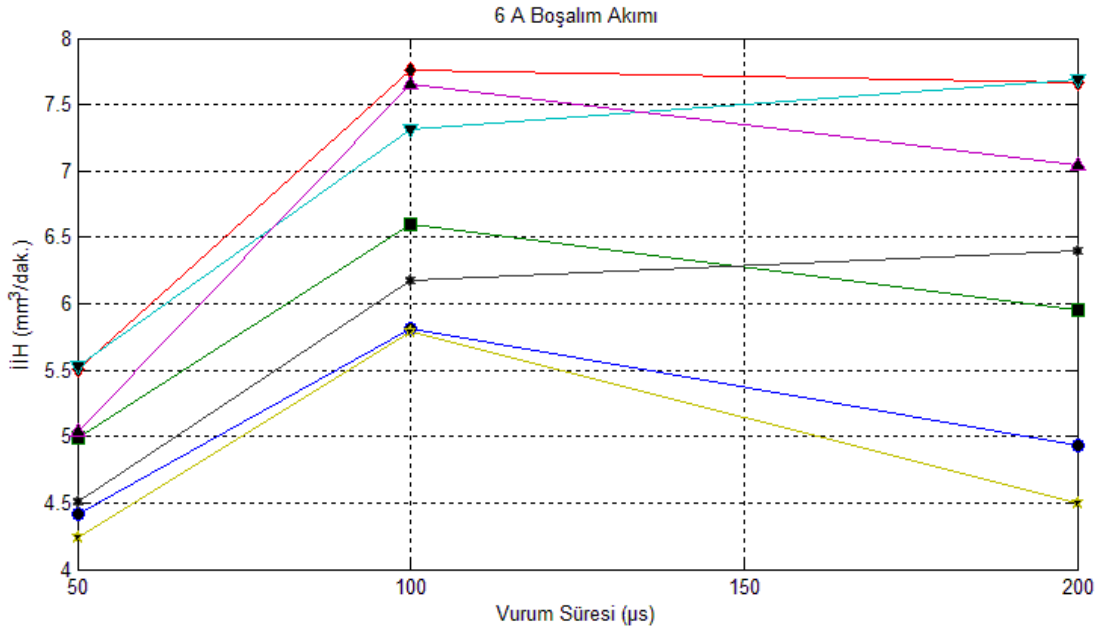
Boşalım akımının 6 A ile 12 A değerleri için elde edilen İİH sonuçları Şekil 5.3'de verilmiştir. Şekil 5.3 (b)'de görüldüğü üzere, 6 A boşalım akımı ve 100 μ s vurum süresi için CuCo2Be'nin İİH performansı en yüksek değere sahiptir. Artan iletkenlikle birlikte (Şekil 5.1), 2 saat ve 4 saat yaşlandırma 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).

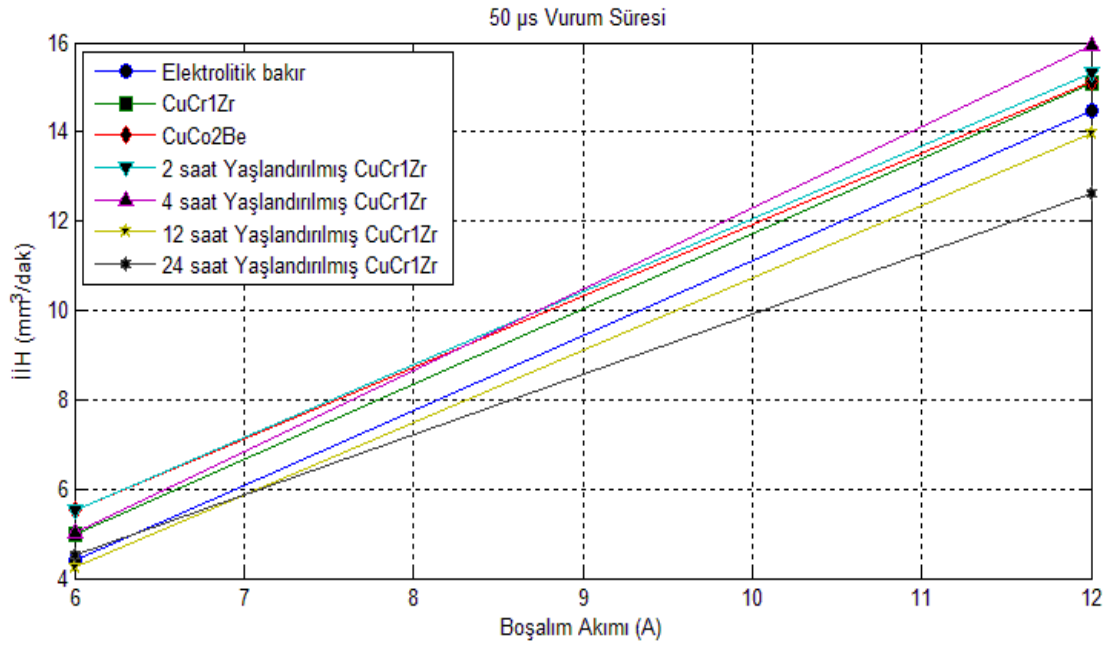


(a)

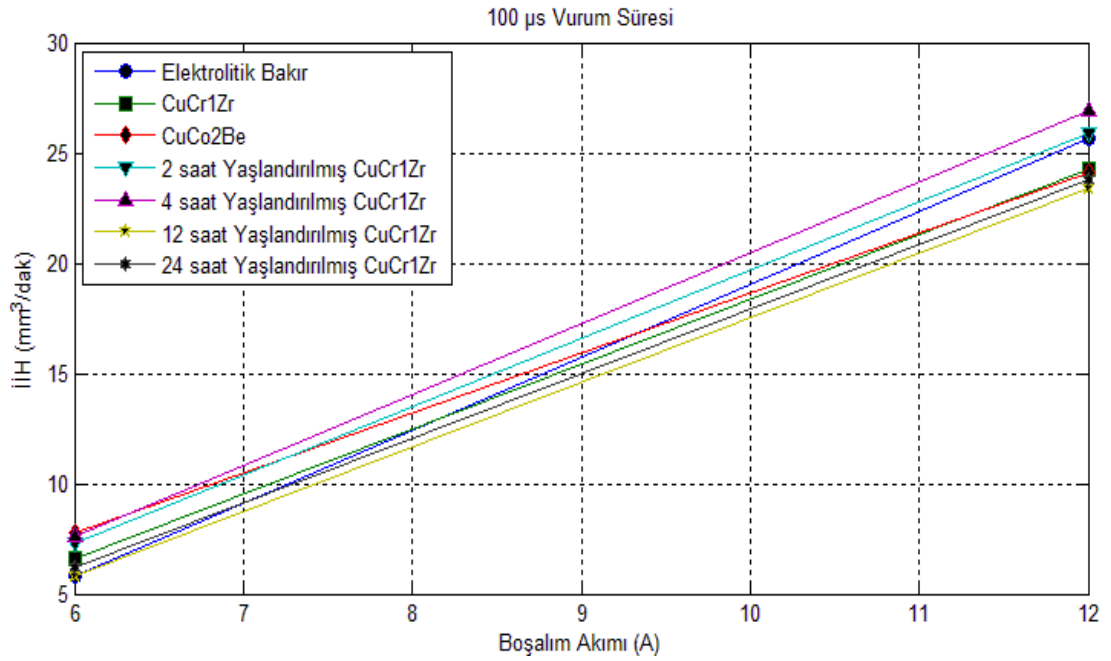


(b)

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 İİH değerlerinin vurum süresi ile değişimi

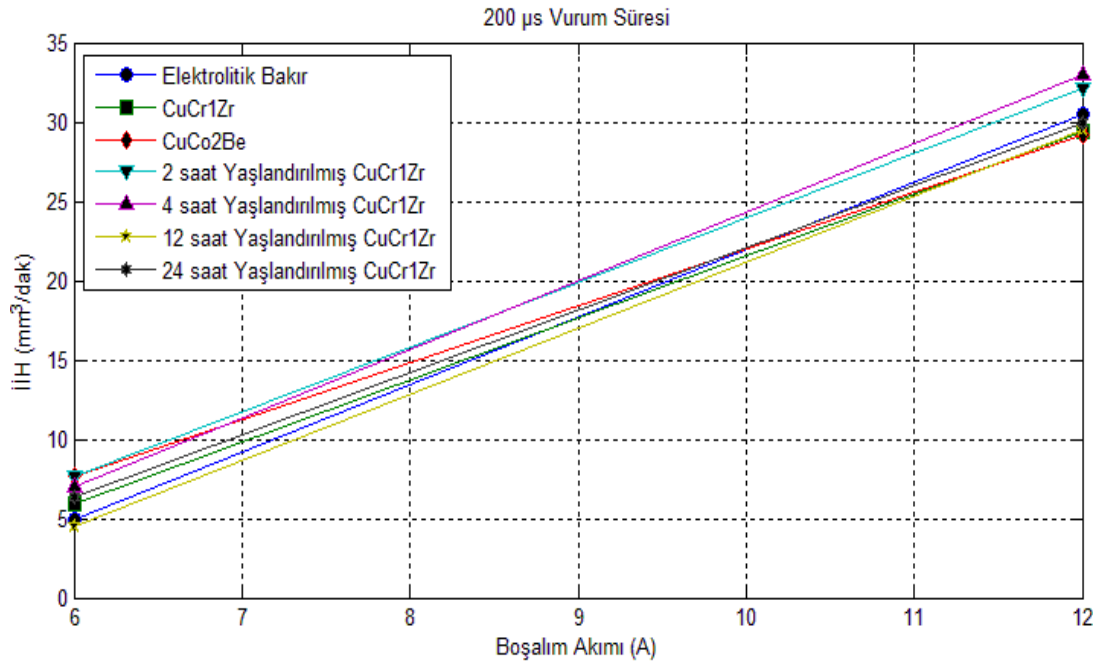


(a)



(b)

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



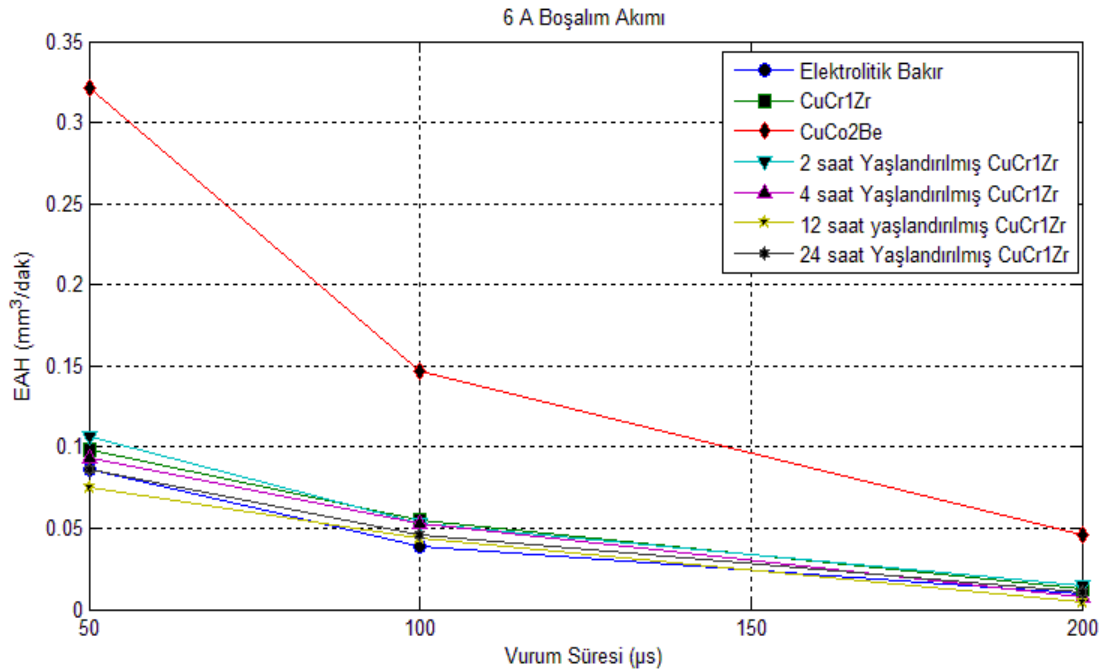
(c)

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

5.3.2 Vurma süresi ve boşalım akımının EAH'na etkisi

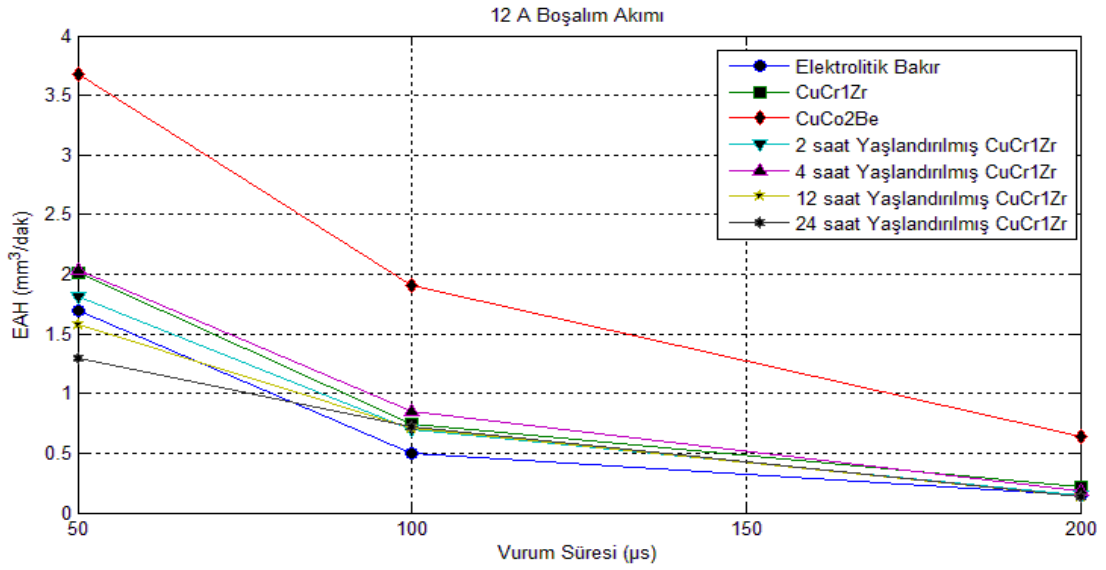
Bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda elde edilen, vurma süresinin artması ile EAH değerinin azalması bulgusu (Şekil 5.5 ve Şekil 5.6) daha önceki deneysel çalışmalarla uyumludur [9, 31]. EAH değerinin 50 μ s'lik vurma süresinden sonraki azalması (Şekil 5.5) araştırmacılar tarafından; a) uzun vurma 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 vurma 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 vurma

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, İH değerindeki artışlara paralel olarak EAH değerlerinde de artışlar görülmüştür. Bunun literatürde bahsedilen muhtemel sebebi ise, artan akım değeri ile birlikte İH 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.



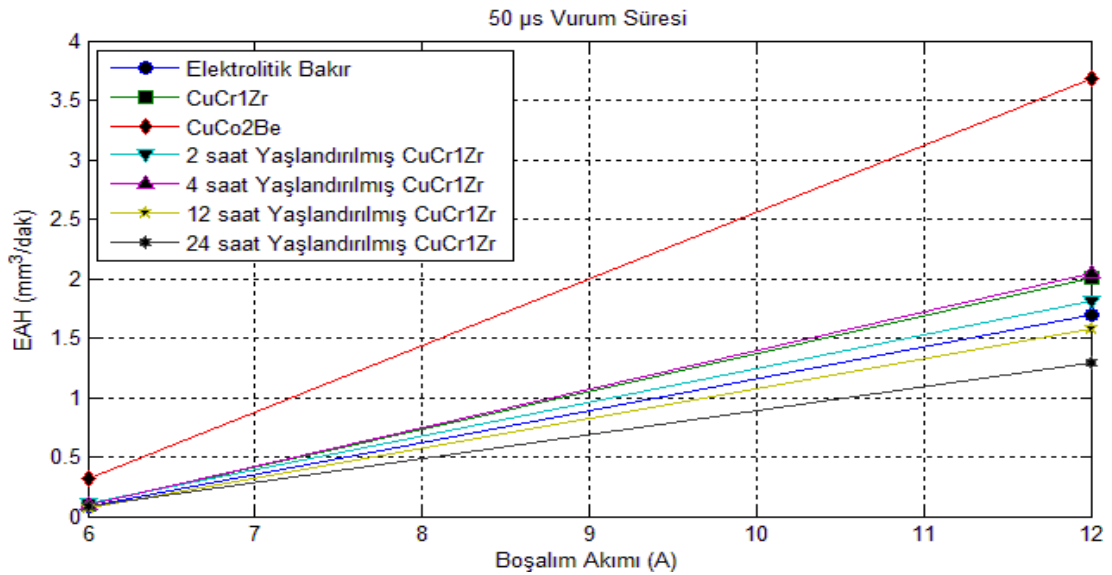
(a)

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



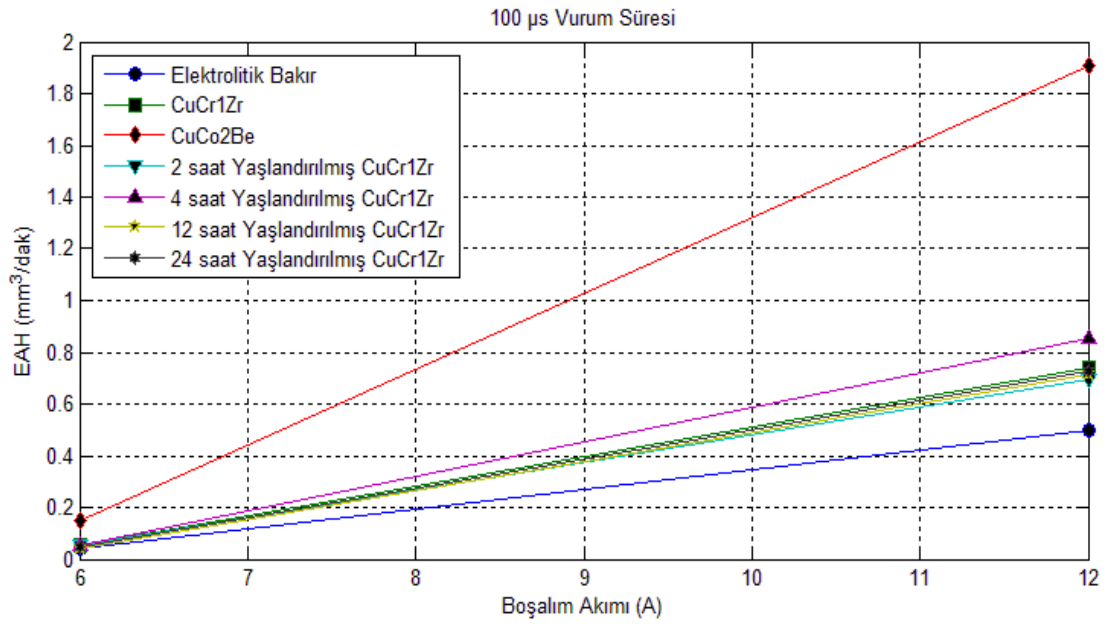
b)

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

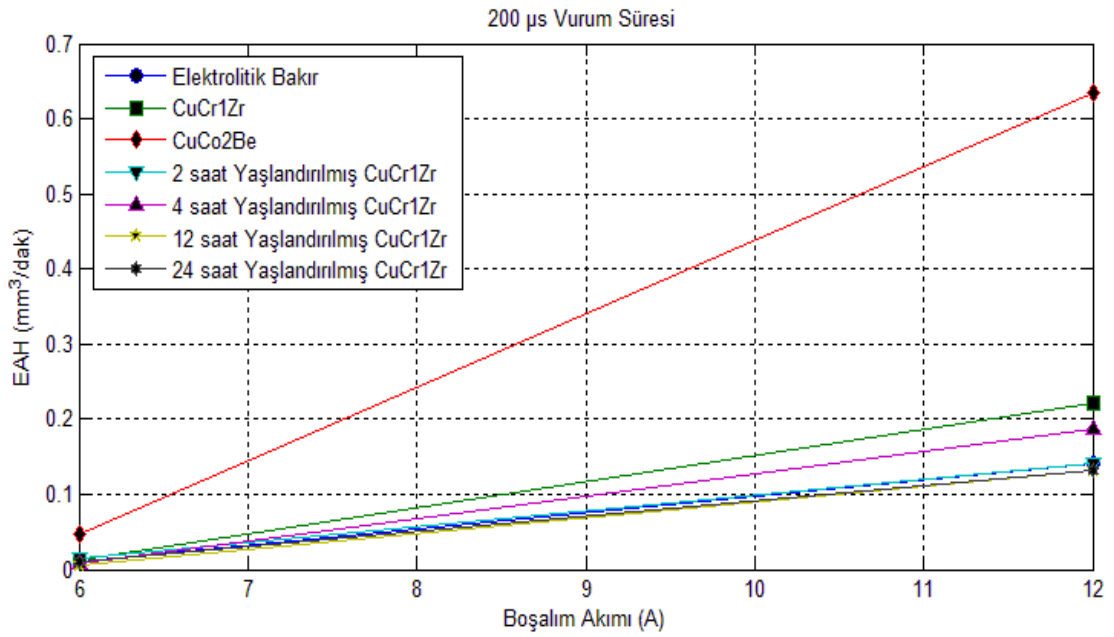


(a)

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)



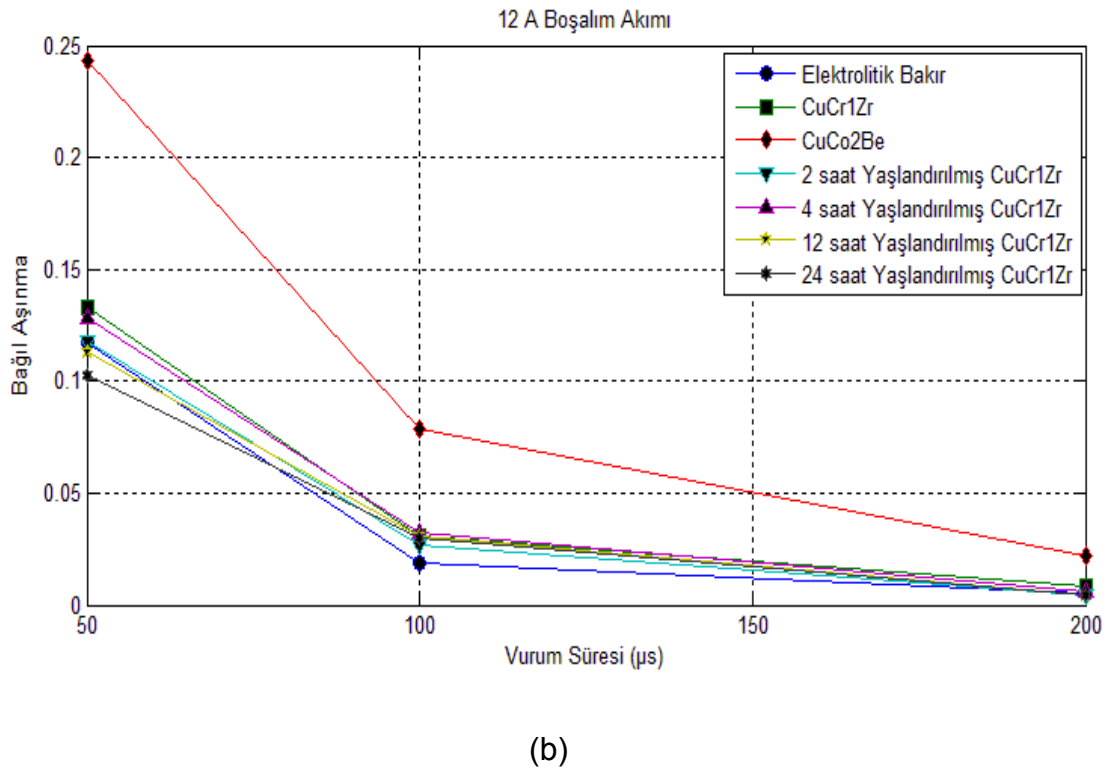
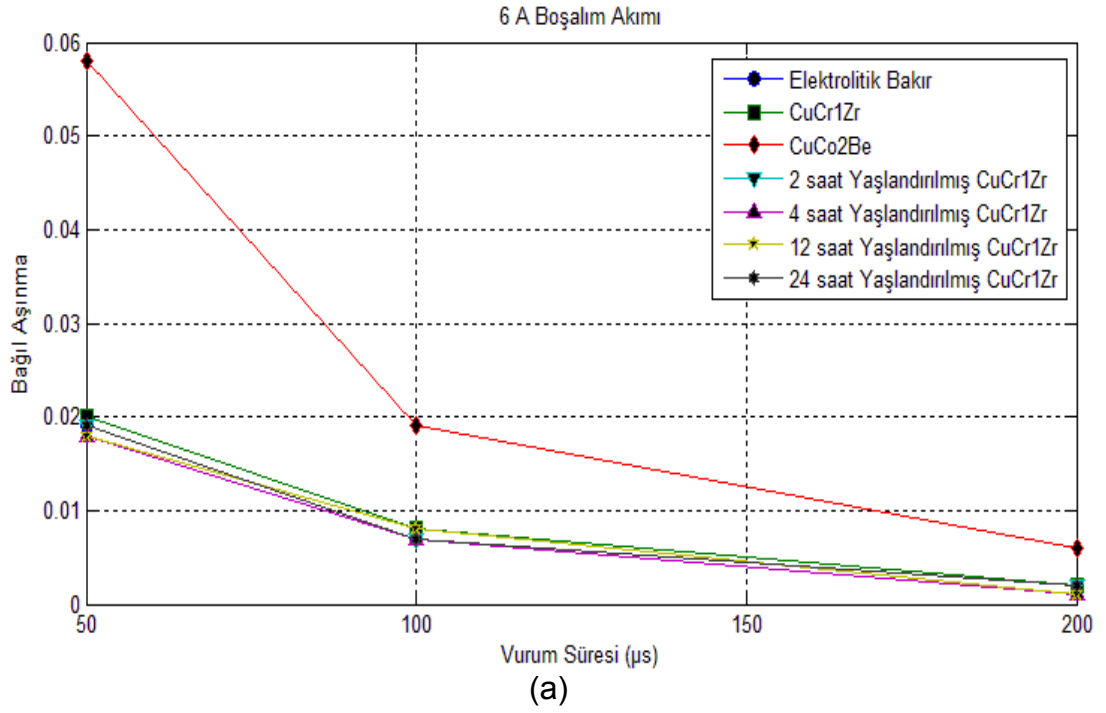
(c)

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

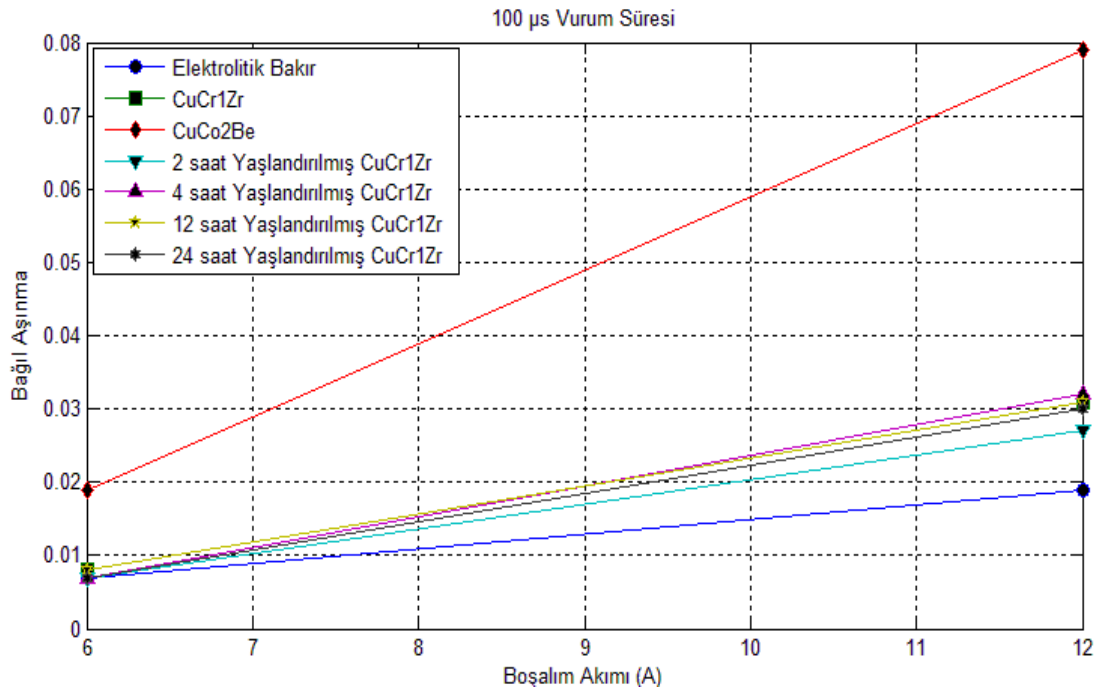
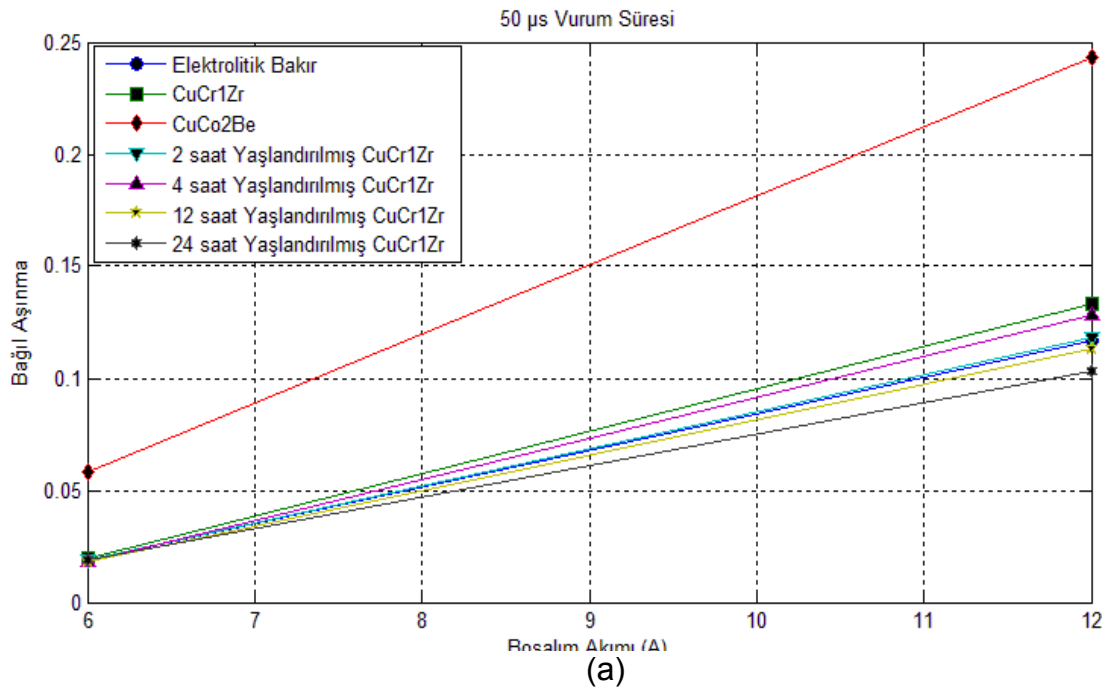
5.3.3 Vurum süresi ve boşalım akımının BA'ya etkisi

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))

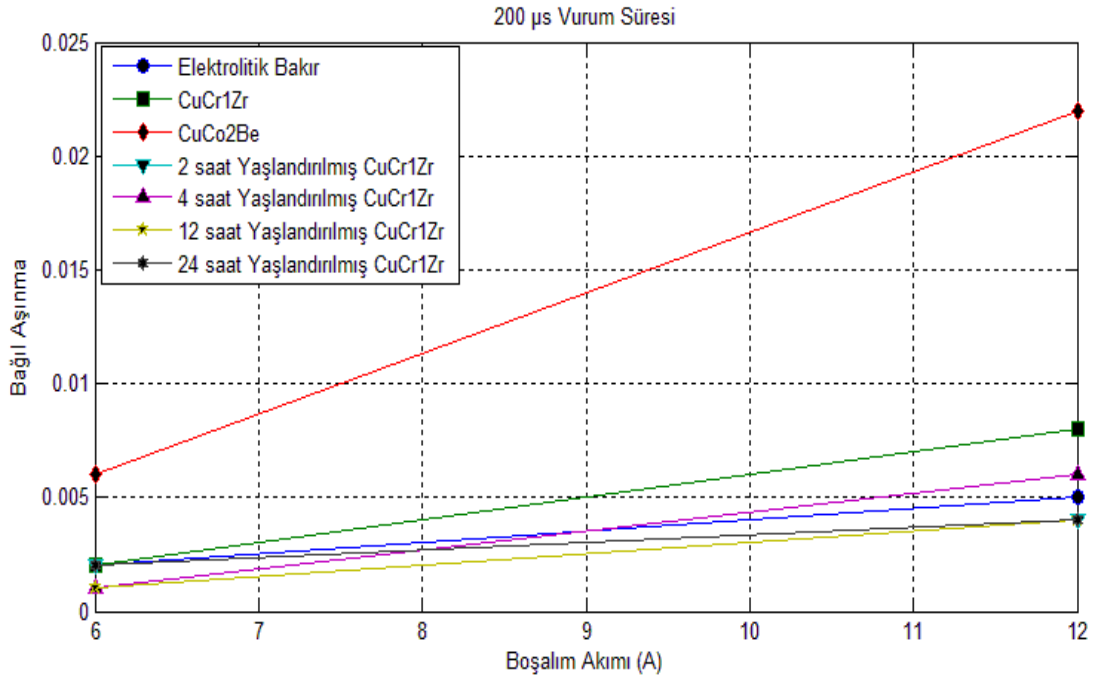
50, 100 ve 200 µs vurum sürelerinde BA değeri İİH ve EAH değerlerine bağlı olup, akımın artışı ile artmaktadır (Şekil 5.8). Bu artış düşük akım değerinde daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni EAH değerinin düşük akımlarda oransal olarak İİH değerine göre daha fazla artış göstermesidir. Şekil 5.8'de görüldüğü 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



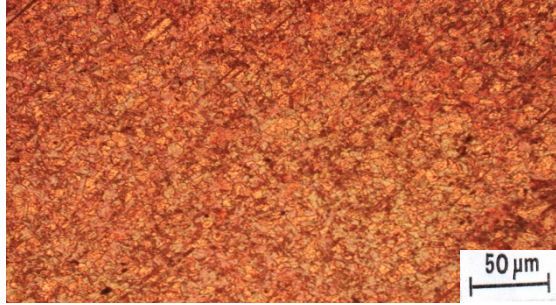
Şekil 5.8 (a) 50 μ s, (b) 100 μ s ve (c) 200 μ s vurum süreleri için E-bakır, CuCr1Zr, CuCoBe2 ve yaşlandırma işlemi uygulanmış CuCr1Zr alaşımlarının BA değerlerinin boşalım akımı ile değişimi



(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)



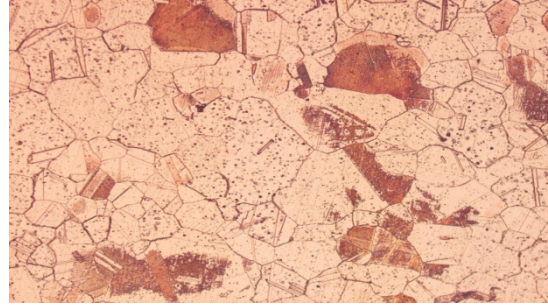
(b)



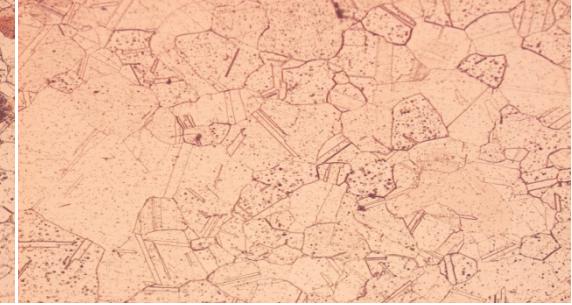
(c)



(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 çözültüye 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 malzemedeki 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 segregasyonunun 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 çözeltiyeye 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 işlemlerinin maliyetleri

| Uygulanan Isıl İşlemler | Isıl İşlem Sıcaklığı [°C] | Maliyet (50 kg fırın dolumu için) [TL] |
|------------------------------|---------------------------|--|
| Çözeltiyeye 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 için Yaşlandırma Maliyeti | | | | Bir Elektrodun Toplam Maliyeti [TL/cm] | Performans Endeksi** | | | | | |
|----------------------|--|--|--------|---------|---------|--|----------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| | | 2 saat | 4 saat | 12 saat | 24 saat | | 6 A | | | 12 A | | |
| | | | | | | | 50 μ s | 100 μ s | 200 μ s | 50 μ s | 100 μ s | 200 μ s |
| 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 Fakültesi**, 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 Information Society, 125-490, (2001).
27. Incropera, P. F., DeWitt D. P., “Isı ve Kütleye Geçişinin 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 Tezgağı 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 Alaşımının 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 erzyon ile şekillendirilebilir. | | | |
| Kullanım Alanları | <ul style="list-style-type: none"> •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

| Elektrot Cinsi | Yoğunluk [gr/mm ³] | Deney No: | Vurum Süresi [µs] | Boşalım Akımı [A] | İşleme Öncesi Ağırlık [gr] | İş Parçası | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------------------|---------|
| | | | | | | 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 [μ s] | 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/dak] | EAH [mm^3/dak] | 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 /dak] | EAH [mm ³ /dak] | 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 |

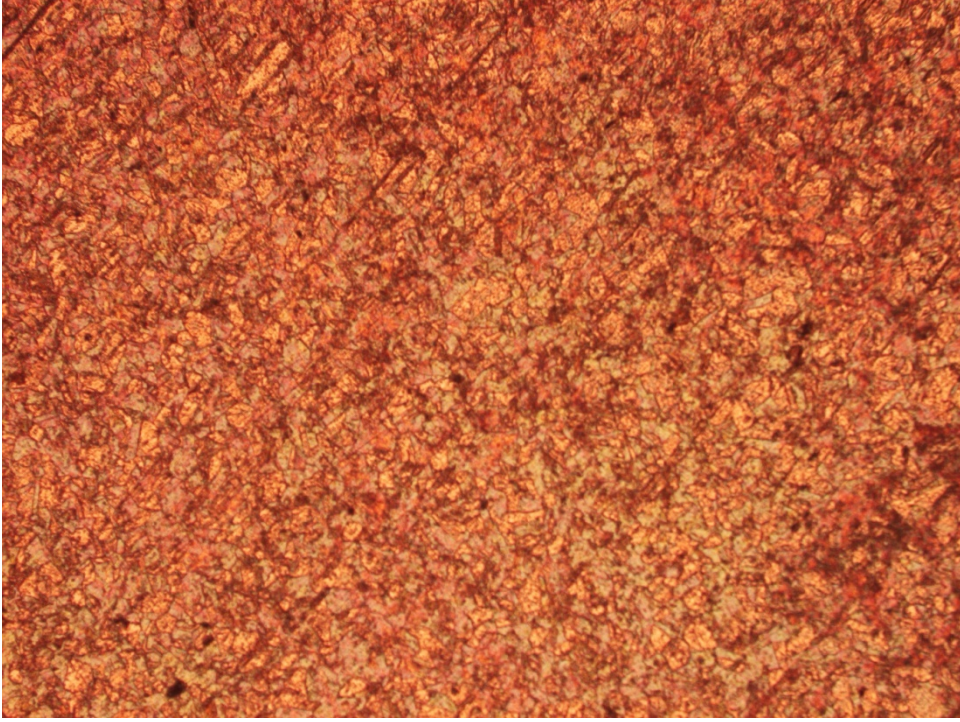
EK-2 (Devam) Deney Sonuçları

| 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

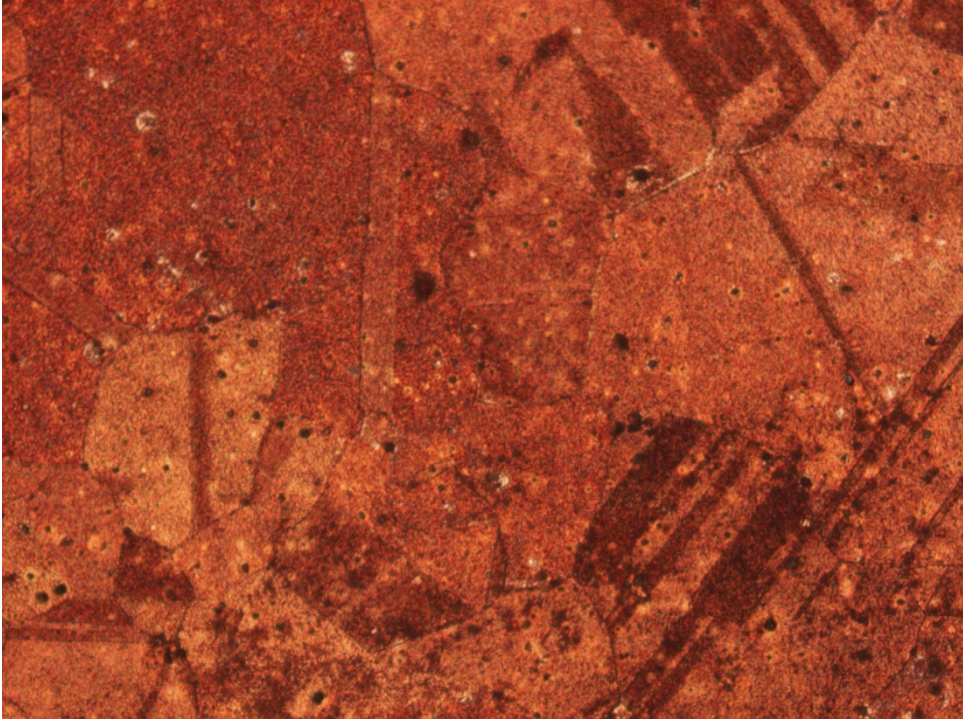


CuCr1Zr Alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler

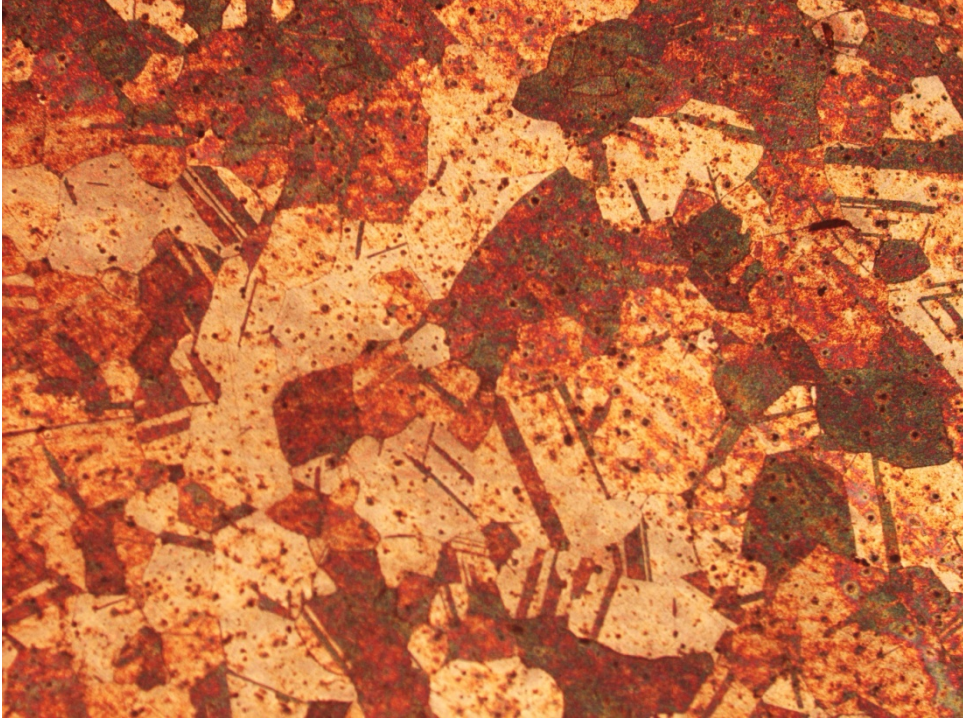


980⁰C de su verilmiş CuCr1Zr Alaşımı 10x büyütme



980⁰C de su verilmiş CuCr1Zr Alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler

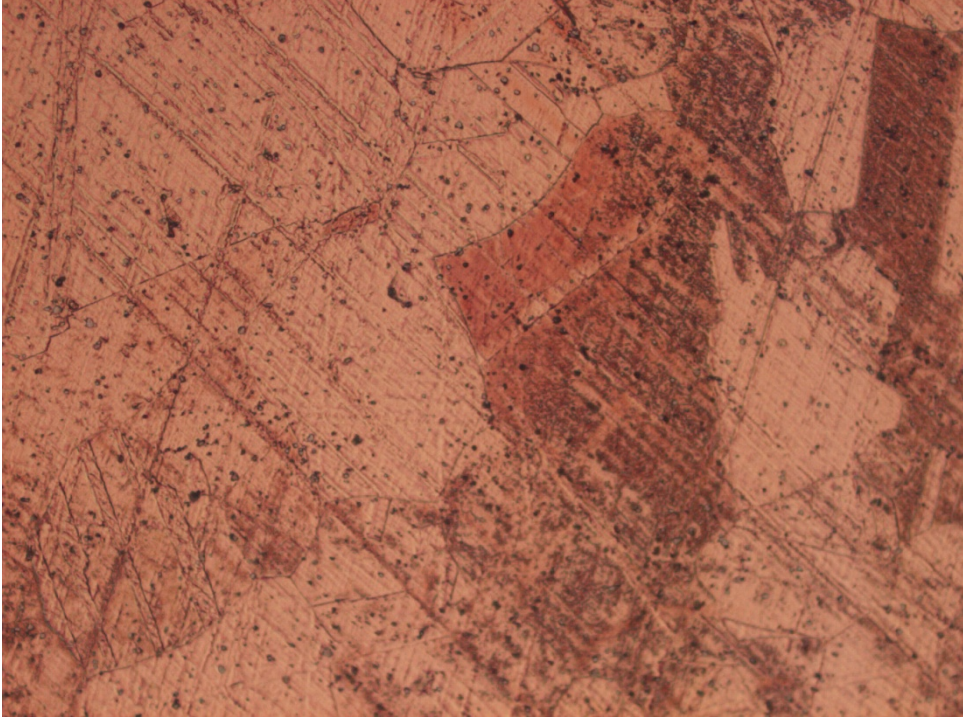


500⁰C de 2 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr Alaşımı 10x büyütme

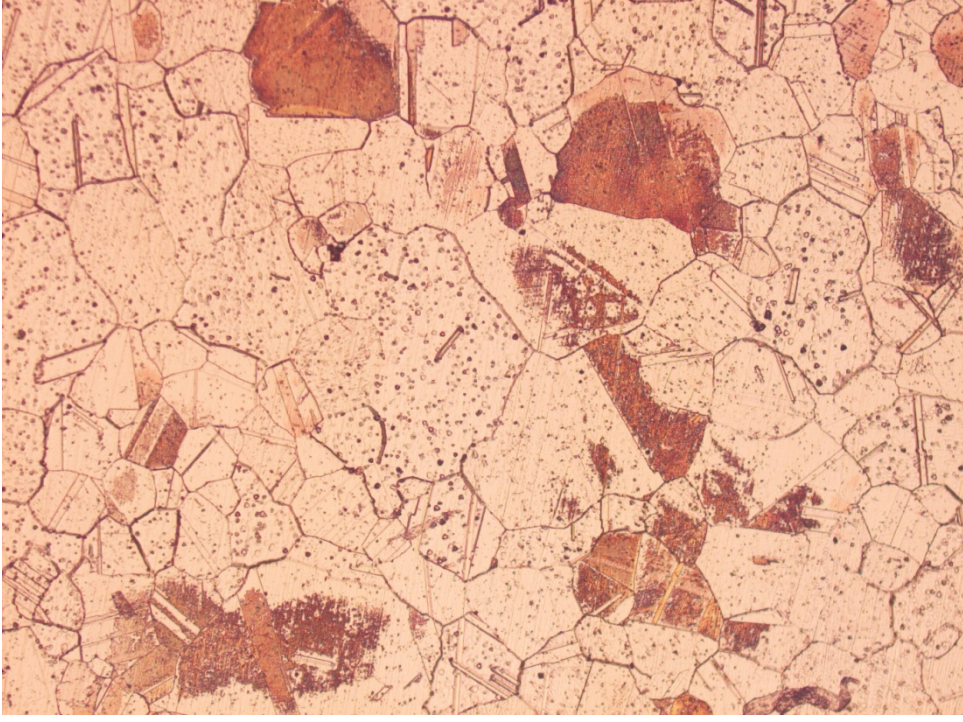


500⁰C de 2 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr Alaşımı 20x büyütme

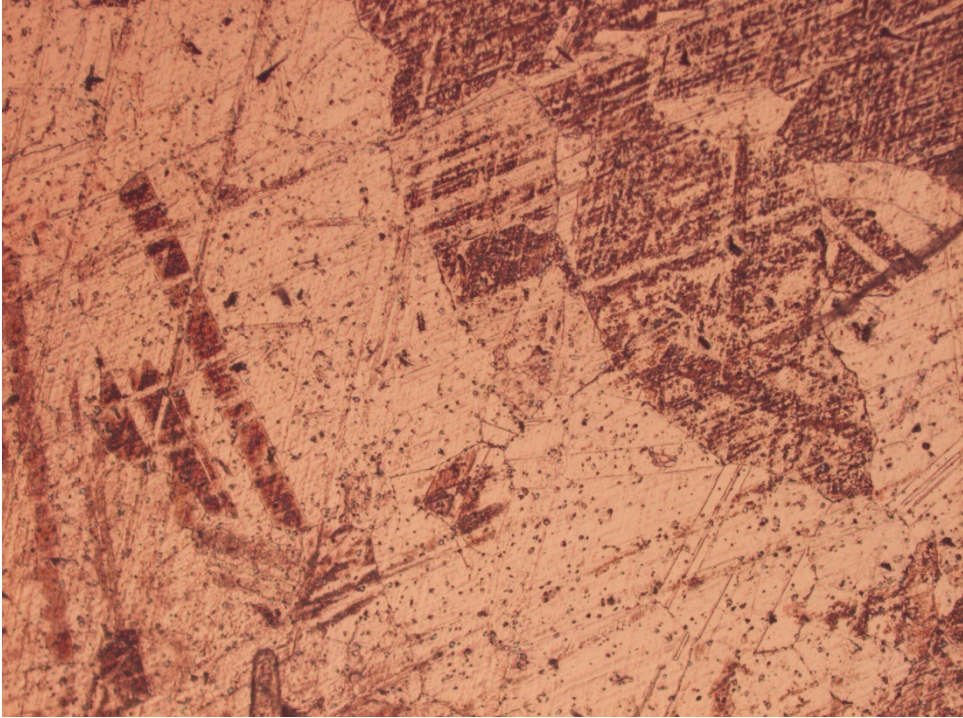
EK-3 (Devam) Metalografik Resimler

500⁰C de 4 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 10x büyütme500⁰C de 4 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler

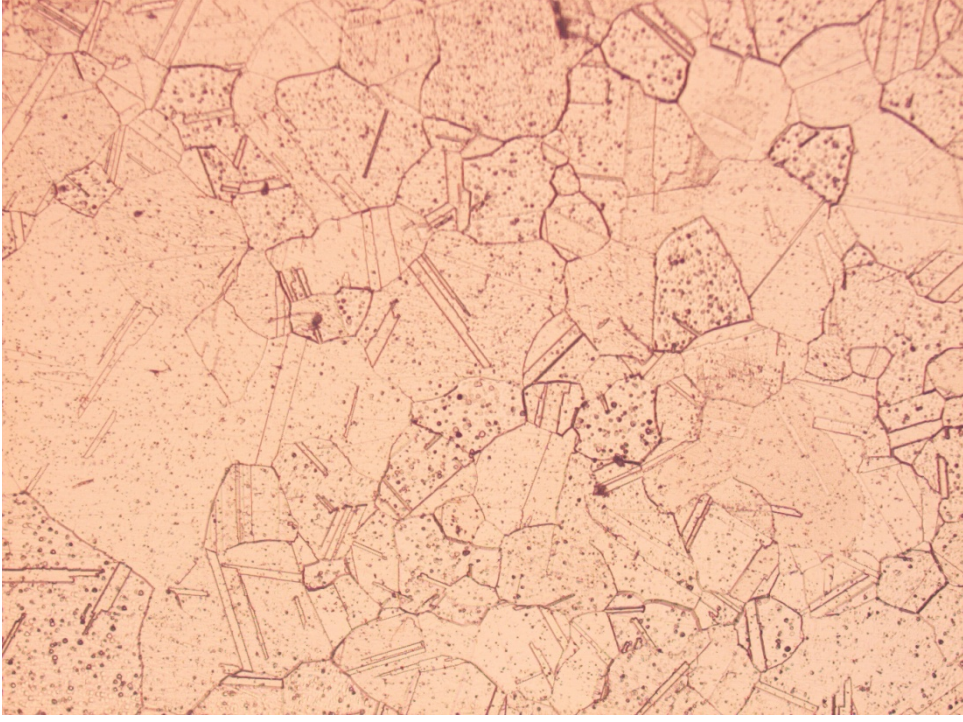


500⁰C de 12 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 10x büyütme

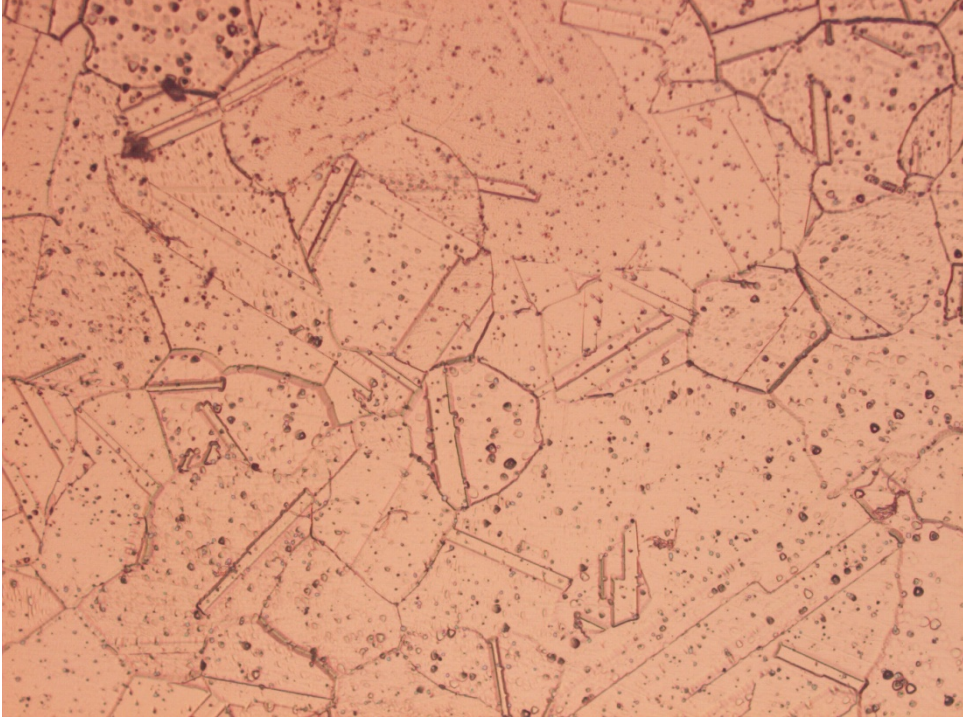


500⁰C de 12 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 20x büyütme

EK-3 (Devam) Metalografik Resimler



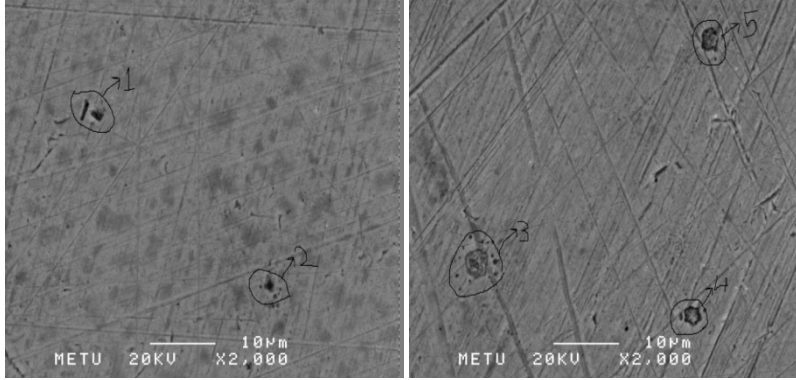
500⁰C de 24 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 10x büyütme



500⁰C de 24 saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr alaşımı 20x büyütme

EK-4 SEM Analizi Sonuçları

2 Saat Yaşlandırılmış CuCr1Zr SEM



2saatmatriks

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

2saatmatriks2

| <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

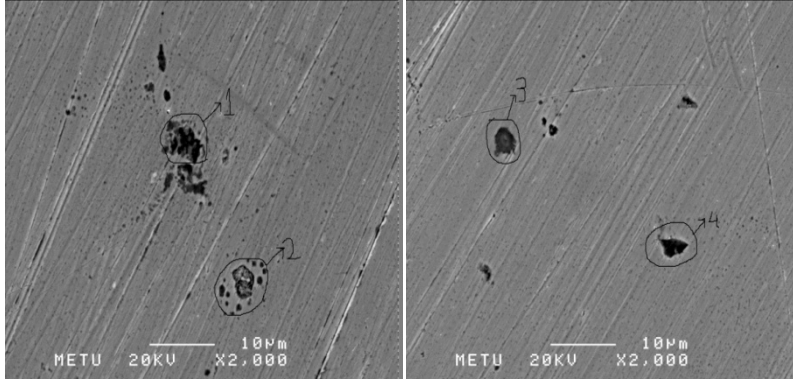
| <i>Element</i> | <i>Weight Conc %</i> | <i>Atom Conc %</i> |
|----------------|--------------------------|------------------------|
| Cr | 1.41 | 2.26 |
| Cu | 19.14 | 25.11 |
| Zr | 79.45 | 72.63 |

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

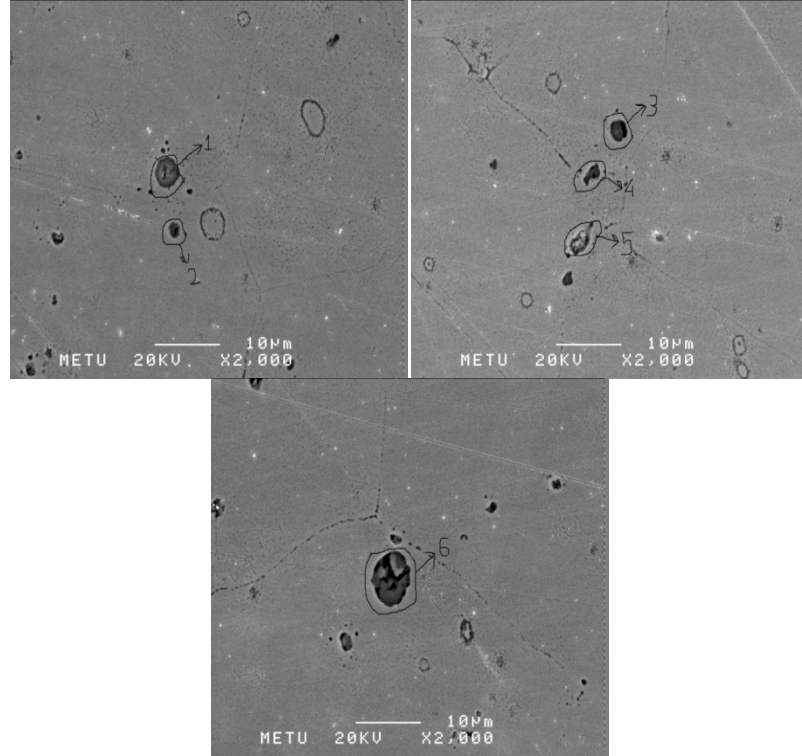
| <i>Element</i> | <i>Weight Conc %</i> | <i>Atom Conc %</i> |
|----------------|--------------------------|------------------------|
| Cr | 48.94 | 56.21 |
| Fe | 0.81 | 0.86 |
| Cu | 35.17 | 33.05 |
| Zr | 15.08 | 9.87 |

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

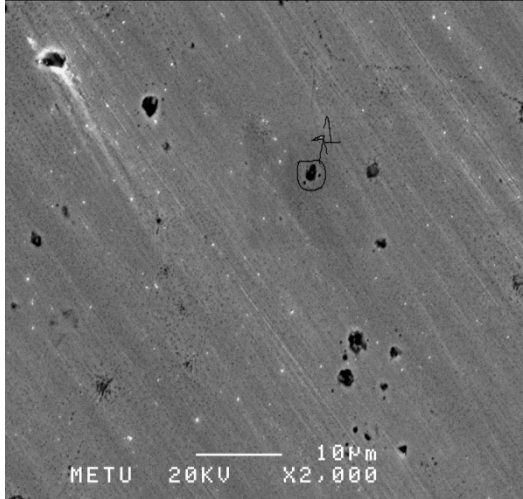
| <i>Element</i> | <i>Weight Conc %</i> | <i>Atom Conc %</i> |
|----------------|--------------------------|------------------------|
| <i>Cr</i> | 2.84 | 4.48 |
| <i>Cu</i> | 21.09 | 27.19 |
| <i>Zr</i> | 76.07 | 68.33 |

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