



T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ

**BAKIR ALAŞIMLARININ MİKROYAPI, MEKANİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ
ÜZERİNDE EŞ KANALLI AÇISAL PRESLEME-KONFORM PROSESİNİN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

Proje No:2016-07-02-YL12

Yüksek Lisans Tez Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Adem Bakkaloğlu
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Araştırmacının Adı Soyadı
Aslıhan Gökdoğan
Malzeme Anabilim Dalı

Eylül 2019

İSTANBUL

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAKIR ALAŞIMLARININ MİKROYAPI, MEKANİK VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE EŞ KANALLI AÇISAL PRESLEME-KONFORM
PROSESİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Aslıhan GÖKDUMAN tarafından hazırlanan tez çalışması 14.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Hakan YILMAZER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat DANIŞMAN
İstanbul Gedik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2016-07-02-YL12 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu çalışma sırasında bana her türlü desteği sağlayan ve çalışmalarımda bana hep yardımcı olup yönlendiren değerli hocalarım Prof. Dr. Adem Bakkaloğlu ve Dr. Öğretim Üyesi Hakan Yilmazer'e teşekkür ederim.

Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 1982 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Ayrıca numuneler Denizli'de bulunan ERBAKIR tesislerinde üretilmiş olup, oradan temin edilmiştir. Firmanın Genel Müdür'ü Halil Göker 'e ve danışman Doç. Dr. Ceren Göde'ye desteklerinden dolayı teşekkürlerimi iletirim.

Çalışmam sırasında Erasmus + aracılığıyla Çek Cumhuriyeti Brno'da bulunan Institüte of Physyis of Material, Academy of Sciences of the Czech Republic'te erasmus stajı yapma şansı buldum. Burada bulunan değerli hocalarım Jiri Dvorak, Petr Kral, Marie Svoboda ve Vaclav Sklenicka'ya tüm destek ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Savunma jüri üyelerim sevgili Prof. Dr. Sibel Dağlılar ve Doç. Dr. Murat Danışman'a teze katkılarından ve yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam ve tüm hayatım boyunca bana maddi ve manevi her desteği sağlayan canım aileme ve her zaman beni motive edip çalışmama yardımcı olan, projemin birçok aşamasında da bana katkı sağlayan başta Hasan Köklü olmak üzere tüm arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

Mayıs, 2019

Aslıhan GÖKDUMAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET xiv	
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ 1	
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Hipotez	6
BÖLÜM 2	
AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON YÖNTEMLERİ	7
2.1 Bakır ve Bakır Alaşımları.....	7
2.1.1 Elektrik ve Isıl İletkenliği.....	8
2.1.2 Ticari Ürün Olarak Şekillendirilmesi.....	9
2.2 Aşırı Plastik Deformasyon	9
2.2.1 Aşırı Plastik Deformasyon (APD) Mekanizması.....	11
2.2.2 İkizlenme Deformasyon Mekanizması	13
2.2.3 Deformasyon Dokusu	13
2.3 Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemleri	13
2.3.1 Yüksek Basınç Burulması (YBB)	14

2.3.2	Eş Kanallı Açısal Presleme (EKAP)	15
2.3.3	Eş Kanallı Açısal Presleme-Konform (EKAP-Konform)	18
2.4	Sürünme	22
2.4.1	Sürünme Mekanizmaları	26
2.4.1.1	Difüzyon Sürünmesi	26
2.4.1.2	Dislokasyon Sürünmesi	26
2.5	Elektriksel Özellikler	27
BÖLÜM 3		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		31
3.1	Malzemelerin Üretimi ve EKAP-Konform Prosesi	31
3.1.1	Malzemelerin Üretimi	31
3.1.2	EKAP-Konform Prosesi	33
3.2	Mikroyapı Analizi	34
3.3	Mekanik Özellikler	37
3.3.1	Sertlik Deneyi	37
3.3.2	Çekme Deneyi	39
3.3.3	Sürünme Deneyi	39
3.4	Elektriksel Özellikler	40
BÖLÜM 4		
DENEYSEL SONUÇLARI VE İRDELEME		41
4.1	Mikroyapı Sonuçları	41
4.2	Mekanik Deney Sonuçları	50
4.2.1	Sertlik Sonuçları	50
4.2.2	Çekme Deneyi Sonuçları	53
4.2.3	Sürünme Deneyi Sonuçları	53
4.3	Elektriksel Özellikler	61
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		64
KAYNAKLAR		67
ÖZGEÇMİŞ		71

SİMGE LİSTESİ

μm	Mikrometre
a	Sabit
C	Santigrat
cc	Kübik santimetre
Cu	Bakır
d	Tane boyutu
D	Difüzyon hızı
Do	Sabit
E	Elastiklik modülü
F	Fahrenheit
g	Gram
h	Numunenin kalınlığı
I	Akım
K	Kelvin
Kg	Kilogram
k_y	Malzemeye özgü dayanım sabiti
L	Numunenin boyu
Mg	Magnezyum
mm	Milimetre
P	Fosfor
ϕ	İç kanal açısı
Pb	Kurşun
Q	Atomik hareket için aktivasyon enerjisi
R	Direnç
r	Diskin yarıçapı
R	Evrensel gaz sabiti (8.314 J / mol K)
Se	Selenyum
Sn	Kalay
T	Mutlak sıcaklık
t	Zaman
V	Volt

Zn	Çinko
γ	Burulma gerinimi
σ_0	Kristalin dislokasyon hareketine gösterdiği direnç
σ_y	Malzemenin akma dayanımı
Ψ	İki kanalın kesiştiği dış eğrilik yayı
ϵ	Gerinim

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
APD	Aşırı Plastik Deformasyon
ÇKA	Çevre Koruma Ajansı
EBSD	Electron Backscatter Diffraction
ECAP	Equal Channel Angular Pressing
ECAP-Conform	Equal Channel Angular Pressing - Conform
EKAP	Eş Kanallı Açısal Presleme
EKAP - Konform	Kanallı Açısal Presleme – Konform
HMK	Hacim Merkezli Kübik
IACS	International Annealed Copper Standard
NG	Nano Grained
NT	Nano Taneli
Sn	Kalay
SPD	Severe Plastic Deformation
UFG	Ultra Fine Grained
UİT	Ultra İnce Taneli
XRD	X-Ray Diffraction
YBB	Yüksek Basınç Burulması
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 EKAP ve soğuk işlemin şematik gösterilmesi	2
Şekil 1. 2 a. Konform prosesi uygulanmış Cu -% 0,20 Mg alaşımı, b. Konform prosesi uygulanmış Cu -% 0,4 Mg alaşımı c. Konform ve soğuk işlem prosesi uygulanmış Cu -% 0,4 Mg alaşımına ait mikroyapı görüntüleri.....	3
Şekil 1. 3 Uygulanan farklı şekillendirme yöntemlerinin Cu-Mg alaşımlarının mikro sertliğine etkisi	3
Şekil 1. 4 EKAP ve soğuk işlemin Cu-Mg alaşımlarının gerilme-gerilme eğrileri üzerinde etkisi.....	4
Şekil 1. 5 EKAP ve soğuk işlem geçişleri ardından Cu-Mg alaşımının ısıl işlemiyle iletkenlik değişimi	5
Şekil 2. 1 Gerilimli mikroyapı oluşumunun şematik gösterimi	12
Şekil 2. 2 YBB yöntemleri	15
Şekil 2. 3 EKAP yönteminin şematik gösterimi: X, Y ve Z düzlemleri, sırasıyla enine düzlemi, akış düzlemini ve uzunlamasına düzlemi gösterir	16
Şekil 2. 4 EKAP'ın kalıp içerisindeki kayma düzlemini gösterme prensibi: 1 ve 2 numaralı elemanlar, çizimin alt kısmında belirtildiği gibi kesilerek aktarılır	17
Şekil 2. 5 EKAP prosesinin rotaları	18
Şekil 2. 6 EKAP-Konform sürecinin şematik çizimi	20
Şekil 2. 7 EKAP-Konform prosesinin şematik gösterimi	20
Şekil 2. 8 Sürekli EKAP prosesinin şematik gösterilmesi	21
Şekil 2. 9 Kararlı durumda sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilen etkili gerilme alanları, $m = 0$: (a) $\phi = 90^\circ$, (b) $\phi = 100^\circ$, (c) $\phi = 110^\circ$ ve (d) $\phi = 120^\circ$	22
Şekil 2. 10 Sürünme ve gerilim kırılma deneylerinin karşılaştırılması	23
Şekil 2. 11 Sürünme deneyi	24
Şekil 2. 12 Sürünme deneyi için gerilim-zamanı eğrisi	24
Şekil 2. 13 Difüzyon sürünme ve güç yasası sürünme gösteren uygulanan gerilime karşı minimum gerilim oranı	25
Şekil 2. 14 Aktivasyon enerjisinin belirlenmesini gösteren sıcaklık-minimum sürünme hızının grafiği.....	26
Şekil 2. 15 Sketch'in dört nokta prop yöntemi	28
Şekil 2. 16 (a)Hacimsel numunenin, (b) ince numunenin dört nokta prop yöntemi ile ölçülmesi.....	28

Şekil 3.1	Grafit potalı yukarı doğru sürekli döküm ünitesi: 1- Ergimiş Bakır 2- Kalıp 3- Soğutucu 4- Filmaşın 5- Yönlendirici Rol 6- Grafit Tozu 7-Grafit Pota 8- Sarıcı	32
Şekil 3. 2	Grafit potalı döküm haznesinden tel çekme prosesi	32
Şekil 3. 3	EKAP-Konform Cihazı	33
Şekil 3. 4	Numunelerin zımparalanması	35
Şekil 3. 5	Elektrolitik parlatma cihazı	35
Şekil 3. 6	Numunelerin parlatılması	35
Şekil 3. 7	Titreşimli parlatma cihazı	36
Şekil 3. 8	Numunelerin EBSD analizi için mikroskopa yerleştirilmesi	36
Şekil 3. 9	EBSD analizi sırasında görüntü elde etme	37
Şekil 3. 10	Numune yüzeyinden sertlik değerleri alınan noktalar	38
Şekil 3. 11	Sertlik cihazı ve numunenin üzerinde sertlik almak için oluşturulan iz	38
Şekil 3. 12	Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi	38
Şekil 3. 13	Çekme deneyi ölçüm cihazı	39
Şekil 3. 14	Sürünme deneyinde kullanılan numune	40
Şekil 3. 15	Sürünme deney cihazları	40
Şekil 3. 16	Dört Prop Yöntemi Cihazı	40
Şekil 4. 1	Cu-0,18Sn _C için (a) genel, (b) numunenin merkezinden alınan görüntüler; Cu-0,20Sn _C için (c) genel, (d) numunenin merkezinden alınan görüntüler	42
Şekil 4. 2	Cu-0,18Sn _{EC} 1P, Cu-0,18Sn _{EC} 2P, Cu-0,20Sn _{EC} 1P ve Cu-0,20Sn _{EC} 2P numunelerini merkez ve kenar bölgelerinden alınan EBSD görüntüleri ve numunelerin üzerinden görüntü alma noktaları ve kristallerin kafes düzlemlerinin dağılım haritası	43
Şekil 4. 3	Tane boyutunun numunelerin merkez ve kenar bölgelerine göre ikiz oluşma durumlarına bağlı olarak dağılımları	44
Şekil 4. 4	Tane sınırlarının yönlenmelere bağlı dağılımları ve numune üzerindeki tane yönlenmelerinin dağılımı	45
Şekil 4. 5	Cu-0,18Sn _{EC} 1P, Cu-0,18Sn _{EC} 2P, Cu-0,20Sn _{EC} 1P ve Cu-0,20Sn _{EC} 2P numunelerinin a). yüksek açılı tane sınırı dağılımları, b). ikizlenme oranları	46
Şekil 4. 6	[100] ve [111] yönlenmelerine göre Cu-0,18Sn _{EC} 1P, Cu-0,18Sn _{EC} 2P, Cu-0,20Sn _{EC} 1P ve Cu-0,20Sn _{EC} 2P numunelerinin 20 ° sapma ile EBSD haritaları ve alan dağılımları	47
Şekil 4. 7	Cu-0,18Sn _{EC} 1P, Cu-0,18Sn _{EC} 2P, Cu-0,20Sn _{EC} 1P ve Cu-0,20Sn _{EC} 2P numunelerini merkez ve kenar bölgelerine göre [100] ve [111] yönlenmelerine bağlı olarak % kristal kafes düzlemlerinin dağılımları	48
Şekil 4. 8	Saf bakırın XRD grafiği	49
Şekil 4. 9	Cu-Sn0,18 _C , Cu-0,18Sn _{EC} 1P ve Cu-0,18Sn _{EC} 2P numunelerinin XRD grafikleri	49
Şekil 4. 10	Cu-Sn0,20 _C , Cu-0,20Sn _{EC} 1P ve Cu-0,20Sn _{EC} 2P numunelerinin XRD grafikleri	50
Şekil 4. 11	Cu-Sn0,18 _C , Cu-0,18Sn _{EC} 1P ve Cu-0,18Sn _{EC} 2P numunelerine ait sertlik dağılım grafiği	51
Şekil 4. 12	Cu-Sn0,20 _C , Cu-0,20Sn _{EC} 1P ve Cu-0,20Sn _{EC} 2P numuneleri ait sertlik dağılım değerleri	51
Şekil 4. 13	a. Cu-0,18Sn _C , b. Cu-0,18Sn _{EC} 1P, c. Cu-0,18Sn _{EC} 2P numuneleri ait sertlik değerlerinin renkli harita üzerinde dağılımları	52
Şekil 4. 14	a. Cu-0,20Sn _C , b. Cu-0,20Sn _{EC} 1P, c. Cu-0,20Sn _{EC} 2P numuneleri ait sertlik değerlerinin renkli harita üzerinde dağılımları	52

Şekil 4. 15 Sürünme deneyi sonrası kırılan numuneler	53
Şekil 4. 16 Cu-0,18Sn _C , Cu-0,18Sn _{EC} 1P, Cu-0,18Sn _{EC} 2P numunelerinin 100 MPa altında 573 °K sıcaklığındaki sürünme davranışları	54
Şekil 4. 17 Cu-0,20Sn _C , Cu-0,20Sn _{EC} 1P, Cu-0,20Sn _{EC} 2P numunelerinin 100 MPa altında 573 °K sıcaklığındaki sürünme davranışları	54
Şekil 4. 18 Numunelerin başlangıç ve 2 EKAP-Konform geçişi sonrası sürünme davranışları	55
Şekil 4. 19 Aktivasyon Enerjisi Grafiği	56
Şekil 4. 20 (a-b). Cu-0,20Sn _{EC} 2P, (c-d). Cu-0,18Sn _{EC} 2P, (e-f). Cu-0,20Sn _{EC} 1P, (g-h). Cu- 0,18Sn _{EC} 1P numunelerinin kırılma yüzeyleri.....	57
Şekil 4. 21 (a)Cu-0,18Sn _C numunesinin sürünme sonrası kırılma yüzeyi, (b) A bölgesinin büyütülmüş görüntüleri, (c) B bölgesinin büyütmüş görüntüsü	59
Şekil 4. 22 (a) Uygulanan gerilime dik sınırlar boyunca ağırlıklı olarak yayılan boşlukların oluşumu, (b) Kavitasyon 1'in görüntüleri, (c) Kavitasyon 2'in görüntüleri.....	60
Şekil 4. 23 Cu-0,18Sn _C , Cu-0,18Sn _{EC} 1P ve Cu-0,18Sn _{EC} 2P numunelerinin 4 prop yönteminden elde edilen V/I grafiği	61
Şekil 4. 24 Cu-0,20Sn _C , Cu-0,20Sn _{EC} 1P ve Cu-0,20Sn _{EC} 2P numunelerinin 4 prop yönteminden elde edilen V/I grafiği	62

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1 Cu-%0,18Sn ve Cu-%0,20Sn numunelerinin kimyasal kompozisyonları.....	32
Çizelge 3. 2 TLJ400 Konform makinası parametreleri.....	33
Çizelge 4. 1 Numunelerin çekme dayanımları ve % uzama değerleri.....	53
Çizelge 4. 2 Numunelerin iletkenlik sonuçları.....	63

**BAKIR ALAŞIMLARININ MİKROYAPI, MEKANİK VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDE EŞ KANALLI AÇISAL PRESLEME-KONFORM
PROSESİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Aslıhan GÖKDUMAN

Malzeme Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hakan YILMAZER

Günümüzde, saf bakır(Cu) ve bakır alaşımları üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanım alanı bulmuştur. Güç ve iletişim kabloları, mıknaş (sargı) teli, baskılı devre iletkeni ve diğer elektrik uygulamalarında Cu ve alaşımları modern hayata büyük değer sağlamaktadır. Özellikle Ar-Ge çalışmaları yüksek hızlı trenlerde, trenlerin 300 km/saat hızı aşabilmesi amacıyla katener tel malzemesi olarak yüksek mekanik performansa sahip Cu ve alaşımları kullanılması üzerine yoğunlaşmıştır. Hızlı trenlerin hızlarının artırılmasındaki en önemli engel katener hattı (catenary line) olarak bilinen bölgede kullanılan telin mekanik performans olarak yeterli olamamasından kaynaklanmaktadır. Bu telden beklenenler yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek mekanik dayanımdır.

Yapılan çalışmada yüksek performansta mekanik davranış ve uygulamada kullanılabilecek seviyede elektriksel iletkenliğe sahip UİT(ultra ince taneli) Cu-Sn tellerinin üretimi ve prosesinin optimizasyonu amaçlanmıştır.

Klasik Aşırı Plastik Deformasyon(APD) yöntemleri olan Eş Kanallı Açısallı Presleme (EKAP)'ye nazaran Eş Kanallı Açısallı Presleme-Konform(EKAP-Konform) ile Türkiye'de ilk

kez çalışılmaktadır. EKAP-Konform işleminin tercih edilmesinin nedeni bir süreklilik sağladığı için uzun tel malzemelerde kullanıma çok uygun olmasıdır.

Sürünme dayanımı büyük önem taşıyan ÜİT Cu-Sn(kalay) tellerinin önce sertlik ve çekme davranışları araştırılmıştır. Tel malzemeleri yüksek hız nedeniyle büyük oranda aşınmaya uğrayacak ve tellerde aşırı ısınma meydana gelecektir. Sürünme deneyi ile tellerde yüksek sıcaklıklardaki çalışma performansı incelenmiştir. Sürünme davranışları üzerine yapılacak çalışmalarla literatürdeki bu boşlukların kapatılması hedeflenmektedir.

Çalışmada EKAP-Konform uygulanmamış 20 mm Cu-Sn_{0,18} ve Cu-Sn_{0,20} numuneleri (Cu-0,18Sn_C, Cu-0,20Sn_C), 1 EKAP-Konform pasosu (Cu-0,18Sn_{EC}1P, Cu-0,20Sn_{EC}1P) ve 2 EKAP-Konform pasosu sonrası elde edilen 8 mm çaplı Cu-Sn_{0,18} ve Cu-Sn_{0,20} numuneleri (Cu-0,18Sn_{EC}2P, Cu-0,20Sn_{EC}2P) kullanılmıştır.

EKAP-Konform uygulanmamış numunelerin optik mikroskop ile mikroyapılarının incelenmesi sonucunda tanelerin çok büyük olduğu görülmüş, EKAP-Konform uygulamasından sonraki EBSD sonuçlarında ise tanelerin ultra ince taneli hale dönüştüğü belirlenmiştir.

Ultra ince taneli Cu-Sn tellerde, mekanik davranışlarının açıklanması için tane ve alt tane sınırları gibi ara yüzeyler ve dislokasyon karakteri (türü, oluşumu, yönlenmesi ve yok olması) “X-ışınları profil analizi” ileri karakterizasyon yöntemleriyle ortaya konmuştur. Yapılan deneyler sonucunda EKAP-Konform prosesi sonrası en sert malzemenin; Cu-0,18Sn_{EC} 1P olduğu belirlenmiştir.

Numunelerin çekme dayanımları EKAP-Konform ile artmış, fakat artan paso sayısı ile dayanımları düşmüştür. En dayanıklı malzemenin Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesi olduğu görülmüştür. En yüksek % uzama değeri Cu-0,18Sn_{CG} numunesinde görülmüştür. Numunelerde dislokasyonların taneler içinde ve / veya tane sınırları boyunca (tane sınırı kayması) difüzyon kontrollü hareketi ile sürünme meydana gelmiştir. Sürünme deneyinde malzemelere uygulanan gerilim arttıkça malzemelerin kırılma sürelerinin azaldığı görülmüştür.

Ayrıca çalışma ile EKAP-Konform işleminin elektriksel özellikler üzerindeki etkisi de incelenmiş, EKAP-Konform işlemi sonrası elektriksel iletkenlik artmıştır. Çalışmada kullanılan numuneler ERBAKIR A.Ş. tesislerinde üretilmiş olup çalışma sonuçları prosesin ticarileştirilmesi üzerinde de etkili olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Bakır, bakır-kalay alaşımları, EKAP, EKAP-Konform, aşırı plastik deformasyon

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF EQUAL CHANNEL ANGULAR
PRESSING-CONFORM PROCESS ON MICROSTRUCTURE, MECHANICAL
AND ELECTRICAL PROPERTIES OF COPPER ALLOYS**

Aslıhan GÖKDUMAN

Department of Materials

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Adem BAKKALOĞLU

Co-Adviser: Dr. Hakan YILMAZER

Today, pure copper (Cu) and copper alloys have been widely used in industry due to their superior physical and chemical properties. Today, power and communication cables, magnet (winding) wire, printed circuit conductor and other electrical applications Cu and its alloys give great value to modern life. In high-speed trains, R & D studies concentrate on Cu and alloys with high mechanical performance as catenary wire material in order to overcome the trains speed of 300 km / h. The most important handicap catenary line for increasing the speed of today's high-speed trains is due to the fact that the wire used in the region is not sufficient as mechanical performance. The requirements of this wire are, in summary, high electrical conductivity and high mechanical strength. The final goal in the thesis is to optimize the production and process of UFG (ultra fine-grained) Cu-Sn wires with electrical conductivity at high performance and high level of mechanical conductivity.

Severe plastic deformation (SPD) compared with conventional methods that ECAP-Conform being studied for the first time in Turkey. ECAP-Conform process provides a continuity of long wire materials is very suitable for use. This is the most important preference.

The hardness and tensile behavior of the ultra-fine-grained Cu-Sn wires were investigated in detail. Creep strength is of great importance here. Wire materials will cause high wear due to high speed and overheating of the wires will occur. With creep deney, the result of heating in the wires is the performance of the materials at high temperatures. With the studies on creep behavior, it is aimed to close these gaps in the literature.

ECAP-Conformed samples were found to be very large in the optical microscope images. The EBSD results after ECAP-Conform application showed that the grains were converted into ultra fine grained grains. In the case of ultra-fine-grained Cu-Sn wires, for the first time for the explanation of their mechanical behavior, interfaces such as grain and sub-grain boundaries and dislocation character (type, formation, orientation and extinction) de X-ray profile analysis / advanced characterization methods.

As a result of the experiments carried out ECAP-Conform process after the hardest material; Cu-0,18Sn_{EC} is a sample of 1P. The tensile strength of the samples increased with ECAP-Conform, but the strengths decreased slightly with increasing rust. The most resistant material was Cu-0,18Sn_{EC} 1P sample. The highest % elongation was observed in the Cu-0,18Sn_{CG} sample. In specimens, creeping with diffusion controlled movement of the dislocations in grains and / or along grain boundaries (grain boundary shift) has occurred. The creep deney showed that the materials applied to the materials decreased and the breakage times of the materials decreased.

In addition, the effect of EKAP-Conform process on electrical properties was also examined and the electrical conductivity increased after EKAP-conform process. Samples used in the project are manufactured in ERBAKIR A.Ş. The results of the project will be effective on the commercialization of the process.

Keywords: Copper, Copper-tin alloys, ECAP, ECAP-Conform, severe plastic deformation

1.1 Literatür Özeti

Elektronik endüstrisindeki meydana gelen son gelişmeler araştırmacıların dikkatini yüksek dayanımlı ve iyi elektriksel iletkenliğe sahip bakır bazlı alaşımların geliştirilmesine odaklamıştır. Yüksek dayanımı ve iyi elektriksel iletkenlik, bakır alaşımlarında birbirine zıt olan durumlardır. Yapılan araştırmaların çoğu saf Cu matrisine bazı alaşım elementleri (Cr, Ag, Zr, Nb ve Co gibi) eklemeye odaklanmıştır. Bu geleneksel güçlendirme yaklaşımları, Cu matrisinde çeşitli tiplerde kusurlara (örneğin, dislokasyonlar, takviye partikülleri, noktasal hatalar) neden olur ve bu kusurlar iletken elektronların saçılmasını artırıp elektrik direncini arttırırlar. Yüksek dayanımlı ve iyi elektriksel iletkenliğe sahip ultra ince taneli (UİT) malzemeler elde etmek için yeni bir aşırı plastik deformasyon işlemi, yani eş kanallı açısız presleme (EKAP) uygulanabilir [1,2].

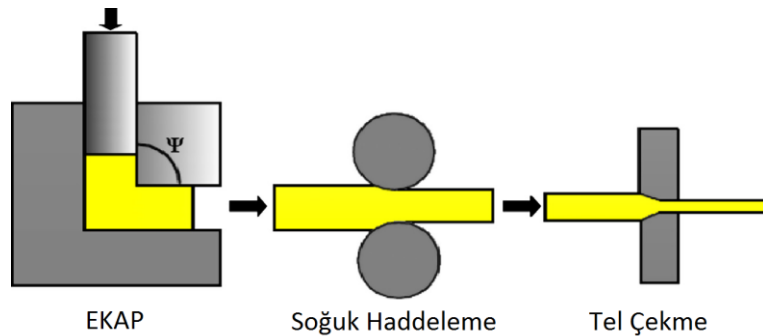
Haddeleme ve çekmenin dahil olduğu soğuk işlem yöntemleri genellikle bakır temas tellerinin imalatında kullanılır. Yüksek hızlı (≥ 300 km/s) trenlerin katener ağı sisteminde kullanılacak olan tellerde yüksek çekme dayanımı (> 500 MPa) ve iyi iletkenlik (> 60 IACS) istenen en önemli özelliklerdir [3]. Soğuk işlem, mikro yapıyı incelemekte ve alaşımların dayanımını arttırmaktadır. EKAP ve soğuk işlemle üretilen UİT bakır alaşımlarının mikroyapı değişikliği, mekanik özellikleri ve iletkenliği hakkında literatürde çok az bilgi bulunmaktadır. Young ve ark.[4] EKAP prosesini uygulayarak elde ettikleri nanoyapılı Cu-% 3 Ag alaşımının mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemiş ve daha sonra da bu numunelere soğuk haddeleme işlemi uygulayarak

numunelerin özelliklerinde meydana gelen değişimi araştırmıştır [4]. Soğuk haddelemenin belirgin etkisi ile gerilme kuvveti artmış, ancak elektrik iletkenliği azalmıştır [3].

Dönen bir iç mil ve sabit bir dış kalıptan oluşan EKAP-Konform prosesinde malzeme dairesel bir oluk içerisine girer, sürtünme kuvveti etkisi ve mil yardımıyla oluk boyunca ilerler. Destek yardımı ile de 90°'lik bir açıyla kalıptan çıkışı sağlanır. Malzeme proses boyunca aşırı kesme gerilmesine maruz bırakıldığı için bu işlem sonrası malzeme UİT yapıya ve geliştirilmiş mekanik özelliklere sahip olur [5].

Bu konuda K.X. Wei ve arkadaşları [1] ve C. Zhu ve arkadaşları [3] tarafından yapılan çalışmalar, Cu bazlı alaşımlara Mg ilavesinin olumlu sonuçlar verdiğini, Cu-Mg alaşımlı kontak kabloları ile daha düşük üretim maliyetleri elde edildiğini göstermiştir. Çin demiryolu inşaatı elektrifikasyon bürosu grubu, konform ve soğuk çekme prosedürüyle yeni bir Cu% 0,4 Mg alaşımlı kontak teli üretmişler, çekme dayanımı (UTS), 522 MPa ve Cu -% 0,4 Mg alaşımının iletkenliğini ise % 68,6 IACS olarak belirlemişlerdir [3].

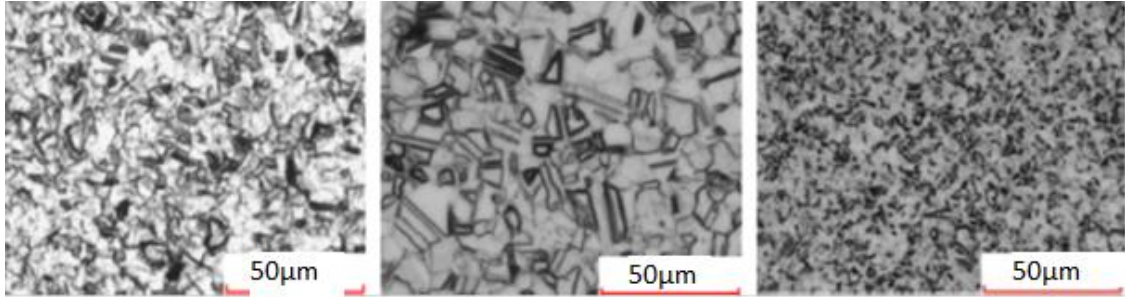
Şekil 1.1'de EKAP ve soğuk işlem şematik olarak gösterilmektedir. Konform işlemi Çin demiryolu inşaatı elektrifikasyon bürosu grubu bünyesinde gerçekleştirilmektedir. Soğuk işlem ardından 573K sıcaklığında 2 saatte ısıtılmalıdır.



Şekil 1. 1 EKAP ve soğuk işlemin şematik gösterilmesi [3]

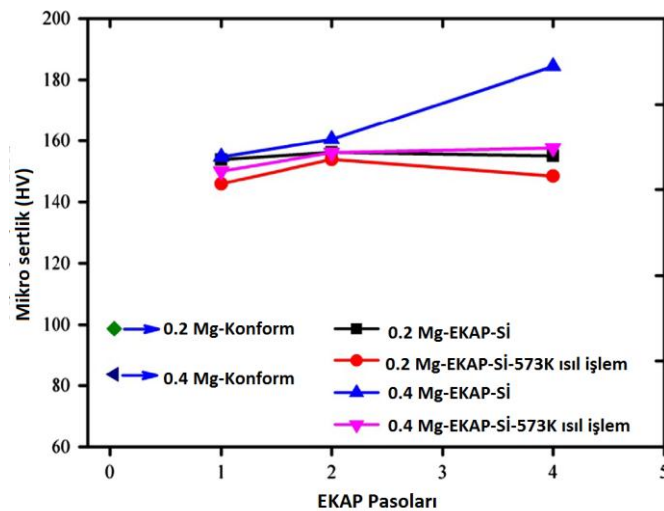
Şekil 1.2 konform ve konform artı soğuk çekme işleminden sonra Cu -% 0,20 Mg ve Cu -% 0,4 Mg alaşımlarının mikroyapılarını göstermektedir. Konform durumunda ağırlıkça Cu% 0,4 Mg alaşımının ortalama tane boyutu, ağırlıkça Cu -% 0,20 Mg alaşımından yaklaşık olarak 5-10 μm daha azdır. Konform ve soğuk çekme işlemlerinden sonra, ağırlıkça Cu -% 0,4 Mg alaşımı tanelerini daha ince taneli hale dönüştürmüştür.

Ortalama tane büyüklüğü yaklaşık 1 μm dir. Ağırlıkça Cu-% 0,4 Mg alaşımının mikro yapısında ağırlıkça Cu -% 0,20 Mg alaşımının mikroyapısına göre daha yoğun bir ikizlenme yapısı görülmektedir [3].



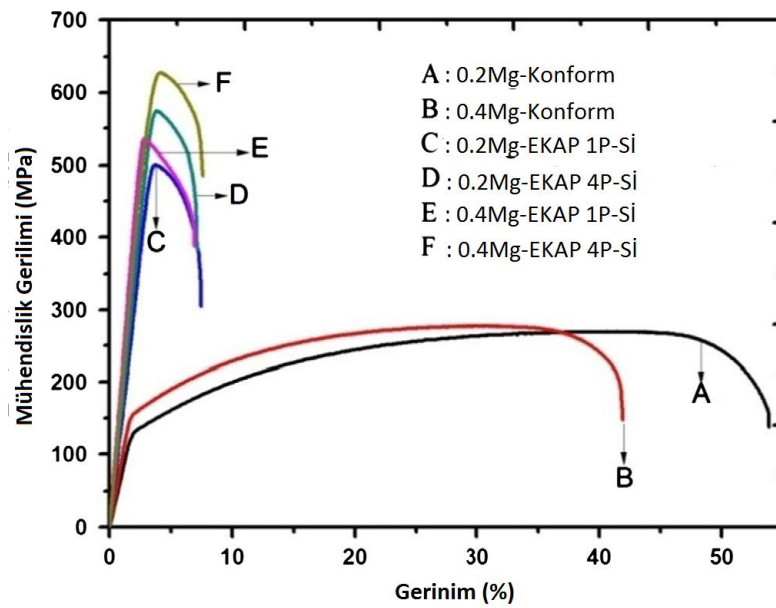
Şekil 1. 2 a. Konform prosesi uygulanmış Cu -% 0,20 Mg alaşımı, b. Konform prosesi uygulanmış Cu -% 0,4 Mg alaşımı c. Konform ve soğuk işlem prosesi uygulanmış Cu -% 0,4 Mg alaşımına ait mikroyapı görüntüleri [3]

EKAP ve oda sıcaklığında soğuk çekme işleminden sonra iki Cu-Mg alaşımının mikro sertlik değerleri, Şekil 1.3'te verilmektedir. Sonuçlar, Konform durumunda ağırlıkça Cu -% 0,20 Mg alaşımının Cu -% 0,4'den daha yüksek bir mikro sertliğe sahip olduğunu göstermektedir. Bunun neden, ağırlıkça Cu - 0,20 Mg içeren alaşımın konform durumunda Cu -% 0,4 Mg'den daha ince mikroyapıya sahip olmasıdır. 1 EKAP ve soğuk çekme geçişinden sonra, iki alaşımın da mikro sertlik değerleri önemli ölçüde artmaktadır. EKAP yükseldikçe, ısıtılma işlemi olmaksızın Cu% 0,4 Mg alaşımının sertlik değeri artmaktadır, diğerlerinde ise büyük bir değişiklik görülmemektedir [3].



Şekil 1. 3 Uygulanan farklı şekillendirme yöntemlerinin Cu-Mg alaşımlarının mikro sertliğine etkisi [3]

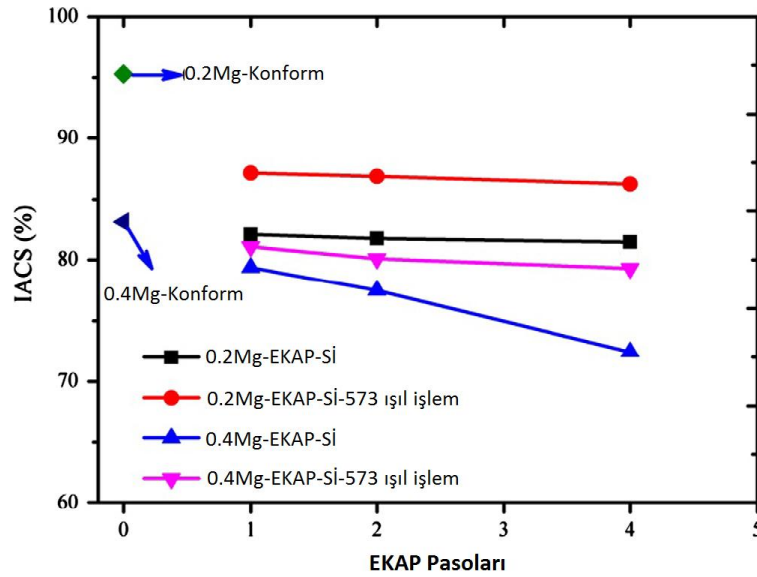
Cu-Mg alaşımlarına uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen mekanik değerler Şekil 1.4'te verilmiştir. Konform yöntemi uygulanmış numuneler (şekildeki A ve B eğrileri) yüksek süneklik ve düşük dayanımı göstermektedir. EKAP ve soğuk işlemden sonra, tüm numunelerin son çekme dayanımı (UTS) ve akma dayanımı (YS) artmıştır (C, D, E ve F eğrileri). EKAP geçişinin 1'den 4'e çıkarılmasıyla birlikte, Cu -% 0,20 Mg (C ve D eğrileri) ve Cu -% 0,4 Mg (E ve F eğrileri) alaşımlarında UTS ve YS değerleri artmıştır. 4 EKAP artı soğuk işlem geçişinden sonra Cu -% 0,20 Mg ve Cu -% 0,4 Mg alaşımlarının UTS değerleri sırasıyla 574,8 MPa ve 627,4 MPa ve YS değerleri sırasıyla 567,4 MPa ve 596,9 MPa olarak ölçülmüştür. Toplam uzama, EKAP ve soğuk işlemden sonra düşmüş, bu numuneler için neredeyse% 6,9 ile% 7,6 arasında bir süneklik artışına yol açmıştır [3].



Şekil 1. 4 EKAP ve soğuk işlemin Cu-Mg alaşımlarının gerilme-gerilme eğrileri üzerinde etkisi [3]

Cu-Mg alaşımlarının elektriksel iletkenliği, Şekil 1.5'de gösterilmektedir. Cu-Mg alaşımının elektriksel iletkenliğinin, alaşımın Mg oranından etkilendiği ve elektriksel iletkenliğin Mg oranının arttırılmasıyla azaldığı görülmektedir. EKAP geçişlerinin artmasıyla elektriksel iletkenlik azalmış, ancak ısı işleminden sonra elektriksel iletkenlik artmıştır. 4 EKAP+soğuk işlem geçişinden sonra Cu -% 0,20 Mg ve Cu -% 0,4 Mg alaşımlarının elektrik iletkenliği sırasıyla% 81,5 IACS ve% 72,4 IACS olarak elde

edilmiştir. Çok kristalli metalik malzemelerin elektrik iletkenliği, daha önce birçok araştırmada belirtilen tane büyüklüğünün azalmasıyla azalmıştır [6]. EKAP + soğuk işlem sırasında meydana gelen dislokasyon yoğunluğunun ve noktasal hataların artması elektrik iletkenliğini düşürmektedir [1]. Alaşım içerisinde Mg oranının artmasıyla noktasal hatalarda artma meydana gelmiştir. Ağırlıkça Cu-%0,20 Mg alaşımındaki noktasal hatalar 1 EKAP ve soğuk işlem geçişinden sonra artmıştır. Mg içeriğinin artırılmasıyla, ağırlıkça Cu-%0,4 Mg alaşımındaki kusurlar, uygulanan gerilme arttıkça artmıştır. Böylece, ağırlıkça Cu-% 0,20 Mg alaşımının elektrik iletkenliğinin, 1 EKAP ve soğuk işlem geçişinden sonra neredeyse sabit kaldığı, ancak Cu -% 0,4 Mg alaşımının EKAP geçişleri arttıkça yavaş yavaş azaldığı bulunmuştur. Isıl işlemle, hataların sayısındaki azalma nedeniyle elektriksel iletkenlik artmıştır [3].



Şekil 1. 5 EKAP ve soğuk işlem geçişleri ardından Cu-Mg alaşımının ısıl işlemiyle iletkenlik değişimi [3]

Ruslan Z. Valiev ve arkadaşları [2,7] ile Yuri Estrin ve arkadaşları [8] tarafından EKAP yöntemi ile yapılmış çalışmalar ilk olarak yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip alüminyum ve alaşımları ve sonrasında yine YMK yapıya sahip bakır ve bakır alaşımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. EKAP ile birlikte numunelerin EBSD analizleri ile tane yapıları, sertlik ve çekme deneyleri ile mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Václav Sklenička ve arkadaşları [9] EKAP uygulanmış malzemelerin mikroyapı ve sürünme deneyleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır.

EKAP-Konform üzerine T. G. Langdon ve arkadaşlarının [10] çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalarda yine malzemelerin mikroyapıları ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir.

(ekleme yapılacak)

1.2 Tezin Amacı

Çalışma ile EKAP-Konform uygulanmamış ve EKAP-Konform 1 ve 2 paso uygulanmış numunelerin mikroyapılarını incelemek, EKAP-Konform'un tane küçülmesindeki etkisini araştırmak, EKAP-Konform uygulanmamış ve EKAP-Konform 1 ve 2 paso uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerini (sertlik, çekme dayanımı ve sürünme) karşılaştırmak, elde edilmesi istenen tane küçültmesinin yine mekanik özelliklere etkisini incelemek, EKAP-Konform'un numuneler üzerindeki elektriksel özelliklerin (direnç ve elektriksel iletkenlik) üzerindeki etkisini araştırmak amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

EKAP-Konform'un mikroyapıda beklenen etkisi, EKAP-Konform uygulanmayan tanelerdeki yönlenmiş ve iri taneleri, ultra ince taneli (UİT) boyuta dönüştürmesidir. Küçük taneler ile birlikte numunelerin sertlik değerleri artacak ve çekme dayanımlarında da artması beklenmektedir.

Numuneler aşırı plastik deformasyona maruz kaldıkları için tane küçülmeleri dislokasyon hareketleri ile meydana geleceğinden sürünme sonuçlarında da güç kanunu prensibine göre bir sürünme meydana gelmesi beklenmektedir. EKAP-Konform prosesinde kullanılan sıcaklığında difüzyon üzerinde etkisi olduğu düşünülmektedir.

Literatürde EKAP-Konform'un elektriksel özellikler üzerindeki etkisi hakkında kesin bir sonuç bulunmasa da, yöntemde kullanılacak tel malzemeler dilute(seyreltilmiş) alaşımlı seçilmiş, böylelikle içerisinde bulunan kalay(Sn) miktarının elektriksel iletkenliği çok düşürmemesi hedeflenmiş ve bu tellerin yüksek hızlı trenlerin katener ağ sistemlerinde kullanılması hedeflenmiştir.

AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON YÖNTEMLERİ

2.1 Bakır ve Bakır Alaşımları

Atom ağırlığı 63,54 olan bakırın, atom numarası 29 olup yüzey merkezli kübik(YMK) kristal yapısına sahiptir. Bakır, gümüş ve altıninkine benzer doğal özelliklere sahiptir. Mükemmel iletkenliği, işlenebilirliği, korozyon direnci ve biyo-işlevselliği bakırın temel özellikleridir ve nikel, çinko, kalay ve alüminyum gibi diğer elementler içinde yüksek çözünürlüğe sahiptir. Bakırın yoğunluğu $8,96 \text{ g/cm}^3$ ve erime noktası 1083°C 'dir. Bakırın alaşım oluşturduğunda ise bu özelliklerin tümü önemli ölçüde değişmektedir [11].

Bakır ve bakır alaşımları, günlük yaşamımızı sağlayan ve geliştiren çeşitli ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek elektriksel ve termal iletkenliklere sahiptirler, iyi dayanımı ve şekillendirilebilirlik sergilerler, korozyon ve yorgunluğa karşı yüksek bir dirence sahiptirler ve manyetik değildirler. Bakır ve bakır alaşımları kolayca lehimlenebilir ve çeşitli gaz, ark ve direnç yöntemleri ile kaynaklanabilir. Saf bakır, elektrik teli ve kabloları, elektrik kontakları ve elektrik akımını geçmesi gereken çeşitli diğer parçalarda yaygın olarak kullanılır. Bakırlar ve bazı pirinçler, bronzlar ve bakır nikeller, otomotiv radyatörleri, ısı eşanjörleri, ev ısıtma sistemleri, güneş kolektörleri ve metal bir bölüm boyunca hızlı bir şekilde ısı iletimi gerektiren çeşitli diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Korozyon direncinin yüksek olması sebebiyle bakırlar, pirinçler, bronzlar ve bakır nikelleri içme suyu, proses suyu veya

diğer sıvıları ve endüstriyel gazları taşıyan sistemlerde borularda, valflerde ve rakorlarda kullanılır [11].

Bakır alaşımlar, dokunma yüzeylerindeki bakteri seviyelerinin en aza indirilmesinin önemli olduğu yerlerde de kullanılmaktadır. Bakterilerin % 99,9'unu iki saat içinde öldürme özelliklerinden dolayı, 280'den fazla bakır alaşımına Amerika birleşik Devletleri (ABD) Çevre Koruma Ajansı (ÇKA) tarafından halk sağlığı kaydı verilmiştir [11].

Bakır ve bakır alaşımları, eski ve modern mimaride estetik görünüşleri, dayanıklılıkları, korozyon direnci ve geri dönüşüme elverişli olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Çağdaş mimaride kalay bronz (Sn-bronz), pirinç ve bakır-alüminyum alaşımlarının çatı ve cephelerde kullanımı artmaktadır. İlk alaşım yaklaşık 4000 yıl önce geliştirildiği için bronz kullanımı uzun bir geçmişe sahiptir. Günümüzde, bu malzeme grubu alüminyum-bronz, fosfor bronz, kalay-bronz, silikon-bronz ve mangan-bronz gibi farklı özelliklere sahip çeşitli alaşımlar içermektedir.

Sn-bronzları, mekanik ve fiziksel özelliklerinden (örn. Yüksek akma dayanımı, sertlik, yorulma ve korozyon direnci) dolayı yaylar ve yataklar gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır, bununla birlikte düşük Sn alaşımlı bronzların yüzey görünüşleri ve korozyon direnci nedeniyle modern mimaride kullanımı artmaktadır [12].

2.1.1 Elektrik ve Isıl İletkenliği

İletkenlik, bakırın diğer metallerden ayrılmasını sağlayan en önemli özelliğidir. Malzemelerin elektriksel iletkenliği, 1913'te% 100 IACS (International Annealed Copper Standard) değeri verilen standart bir "saf" bakır çubuğuna göre ölçülmüştür [11].

Ticari alaşımları üretmek için kullanılan ısı ve mekanik işlemler, bu alaşımların iletkenliklerinde büyük değişikliklere neden olur ve genellikle en yüksek dayanımı sahip alaşımlar, en düşük iletkenliğe sahiptir alaşımlardır [11].

Elektrik iletimi ve ara bağlantı için kullanılan temizleyicilerin çoğu, % 85 IACS veya daha yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir. C10100 ve C10200 gibi oksijen içermeyen (saf) bakırların birçoğu gibi %101 IACS'ye sahiptir. Fosforlu Deoksidize Bakırın iletkenliği ise; %99,9 bakır içeriğine sahiptir, ancak iletkenliği %85 IACS'dir. Fosfor, iletkenliği önemli ölçüde azaltan alaşım elementlerinden biridir [11].

Bor, demir, kalay, çinko, kobalt, magnezyum ve fosfor gibi elementlerin kombinasyonları ile elde edilen bir başka alaşım grubu, %50 ila% 75 IACS aralığında iletkenlik ile iyi bir dayanımı sağlamaktadır. Bazı berilyum kaplamalar, pirinçler, teneke pirinçler, fosfor bronzları ve bakır-silikon alaşımları % 25 ila% 50 IACS iletkenlik değeri arasındadırlar [11].

(%100 IACS = 5.80×10^7 Siemens/Metre)

2.1.2 Ticari Ürün Olarak Şekillendirilmesi

Bakır ve bakır alaşımları, tel ve kablo, levha, şerit, çubuk, boru, dövme, ekstrüzyon, döküm ve toz metalurji şekillendirmeleri de dahil olmak üzere, hem dövme hem de dökme ürünler olarak üretilebilirler [11].

Bakır ve bakır alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan yöntemlerin başlıcaları aşağıdaki gibidir.

- Sıcak Şekillendirme Prosesleri
- Ekstrüzyon
- Dövme
- Soğuk Şekillendirme Prosesleri

Bakır, geri dönüştürülebilir metallerden biri olduğu için, bazı ticari işlemlerde %100 hurda kullanılmaktadır. Tamamen entegre edilen ticari değirmenler, gerekli kimyayı oluşturmak için harmanlanmış hurdayı uygun elemanlarla eritir. Dekoratif amaçlı bir ürün üretmek için geleneksel metal döküm, sıcak çalışma, ısıl işlem ve soğuk çalışma adımları uygulanmaktadır [11].

2.2 Aşırı Plastik Deformasyon

Tüm kristalin malzemelerde ortalama tane büyüklüğü mekanik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesinde en önemli faktördür. Bu nedenle, tüm polikristalin malzemelerin dayanımı, malzemenin ortalama tane büyüklüğü (d), Hall-Petch denklemi ile ilişkilendirilir [2].

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (2.1)$$

σ_y ; malzemenin akma dayanımını,

σ_0 : kristalin dislokasyon hareketine gösterdiği direnci,

k_y : malzemeye özgü dayanımı sabitini vermektedir.

Eşitlik (2.1)'de, tane büyüklüğünde bir azalma meydana geldiğinde dayanım artmaktadır ve bu durum küçük tane boyutlarına sahip malzemelerin üretilmesinde giderek artan bir yönelmeye yol açmaktadır[2].

Ticari alaşımların tane büyüklükleri, özel uygulamalar için alaşımların belirtilen sıcaklık ve mekanik deneyleri kriterlerine göre önceden belirlenmiş termomekanik iyileştirmeler kullanılarak yapılmaktadır. Bu yöntemler, mikron altı tane boyutlarına sahip malzemeler üretmek için kullanılmaktadır. Mikrometre ve nanometre aralığında tane büyüklüğü ile ultra ince taneli malzemelerin üretilmesinde kullanılabilecek yeni ve farklı tekniklerin geliştirilmesi önemlidir [2].

Polikristalin malzemelerin özelliklerine bağlı olarak UİT malzemeleri, ~1 μm 'den daha düşük ortalama tane büyüklüklerine sahip çok küçük tanelere sahip olan poli kristaller olarak tanımlanmaktadır. Bulk UİT malzemeler, oldukça homojen bir mikroyapıya ve yüksek açılı tane sınırlarına sahiptir. Gelişmiş ve benzersiz özelliklerin elde edilmesi için yüksek açılı tane sınırlarının varlığı önemlidir [2,7].

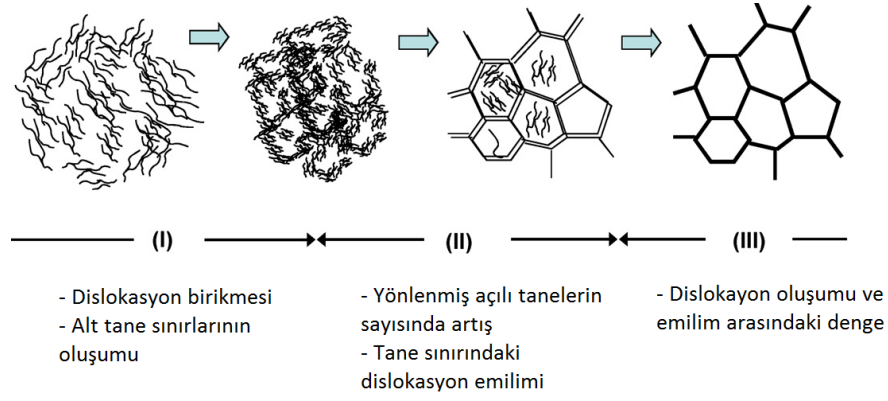
Bir iri taneli malzemeyi ultra ince taneli bir malzemeye dönüştürmek için, yüksek bir dislokasyon yoğunluğunun ortaya çıkması gerekmekte ve dislokasyon yoğunluğunun artması için ise yüksek gerilme uygulanması gerekmektedir. UİT oluşturulması için tane sınırları yeniden düzenlenmektedir. Ekstrüzyon veya haddeleme gibi geleneksel metal işleme yöntemleri, iki önemli nedenden ötürü UİT yapıları üretme kabiliyetlerinde sınırlı kalmaktadır. İlk olarak, bu yöntemler kullanılarak uygulanabilecek olan gerilmeler üzerinde bir sınırlama vardır. İkincisi, geleneksel işlemlerde uygulanan gerilmeler, metalik alaşımların ortamdaki düşük işlenebilirliği ve düşük sıcaklıklar nedeniyle UİT yapılarını oluşturmak için yetersizdir. Bu sınırlamaların bir sonucu olarak ise, enine kesit boyutlarda herhangi değişiklik meydana gelmeden, oldukça yüksek gerilmelerin düşük sıcaklıklarda uygulandığı aşırı deformasyonun uygulanmasına dayalı alternatif işleme

tekniklerinin geliştirilmesine sebep olmuştur. Bu malzemeler üzerinde yapılan çalışmalar, bu işleme tekniklerinin toplu nano yapıli malzemeler üretiminde kullanılmasına dair ayrıntılı bir genel bakış sağlamıştır [2,13].

APD işlemleri, katı maddenin genel boyutlarında herhangi bir değışiklik yapılmadan çok yüksek bir gerilmenin bulk bir katının üzerine uygulandığı metal şekillendirme yöntemleri olarak tanımlanır ve yüksek oranlarda tane boyutunu küçültmek için önemlidir. APD prosesindeki gelişmeler ilk olarak elli yıl önce, Birleşik Devletler'deki Bridgman'ın çalışmaları ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda; metaller, yüksek basınç altında yüksek deformasyonlara tabi tutulmuştur. Daha sonra yapılan bir çalışmada Bridgman, metal disklerle farklı yüksek basınçlar ve eşzamanlı burulma zorlaması uygulamış ve günümüzde klasik bir APD prosedürü olarak kabul edilen YBB prosesini ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, Bridgman, yüksek basınçların uygulanmasıyla geliştirilmiş deformasyon potansiyelini göstermesine rağmen, maksimum uygulanan 0,20 GPa basıncının, istisnai özellikler elde etmek için yetersiz olduğunu kanıtlamıştır. Birçok farklı APD işleme tekniğı önerilmiş, geliştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu teknikler, eşit kanal açisal presleme (EKAP), yüksek basınçlı burulma (YBB), çok yönlü dövme, büküm ekstrüzyonu, akümülatif hadde yapıştırma (AHY) teknikleridir. Tüm bu prosedürler, kristal yapıli katılardaki büyük plastik gerilmeleri ve önemli mikroyapısal küçülmeleri sağlamaktadır. EKAP, YBB, çok yönlü dövme ve AHY gibi bu tekniklerin bazıları, kristal yapıya bağılı olarak, işlenmiş mikroyapıların tipik olarak ~70-500 nm aralığında yer alan tane boyutlarına sahip olduğu UİT malzemeleri üretmek için en yaygın yöntemlerdir. Bu amaçla diğere teknikler řu anda geliştirilmektedir[2].

2.2.1 Aşırı Plastik Deformasyon (APD) Mekanizması

Mikroyapının oluşumu 3 basit bölgeye ayrılmaktadır ve Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmiştir. İlk bölge (I) sertliğın arttığı yere karşılık gelmektedir. Bu bölgede dislokasyonların birikmesi ve alt tane sınırları oluşumu gerçekleşmektedir. Alt tane sınırlarının dislokasyonların birleşmesi nedeniyle oluştuğı düşünölmektedir. Sertlikteki artış, dislokasyon yoğunluğundaki bir artışa bağlanmakta ve bu da tanelerin içindeki dislokasyonların karşılıklı etkileşimde bulunma olasılığına ve alttane sınırlarının varlığı ile dislokasyon hareketinin engellenmesine neden olmaktadır [16].



Şekil 2. 1 Gerilimli mikroyapı oluşumunun şematik gösterimi [14]

Sertliğin gerilme ile azaldığı ikinci bölge (II), tane içindeki yer değiştirme yoğunluğundaki bir düşüş nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Dislokasyonların yoğunluğundaki azalmanın, dislokasyonların alttane sınırlarında yok edilmesinden dolayı meydana geldiği ve aynı zamanda bu yok etmenin yanlış yönlendirme açılarındaki artışa yol açtığı düşünülmektedir. Yanlış yönlendirme açısı arttıkça, dislokasyonların tane sınırlarında absorbe edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, gerilme ile yanlış yönlendirme artar ve daha fazla tane daha yüksek açılı sınırlarıyla çevrelenmektedir [14].

Sertliğin sabit kaldığı üçüncü bölgede (III), dislokasyon sayısındaki artıştan kaynaklanan sertleşme, yüksek açılı tane sınırlarındaki dislokasyonların absorbe edilmemesi nedeniyle yumuşama ile dengelenmektedir. Düşük açılı tane sınırlarının bazı saçılımları vardır ve bunun nedeni bazı dislokasyonların absorbe edilmemesi ancak alttane sınırlarının oluşumuna katkıda bulunmasıdır. Isıl işlem ile elde edilen mikroyapı ile karşılaştırıldığında, tane içinde çok az yer değiştirme vardır ve tane sınırları pürüzsüz ve düzdür. Ayrıca, küçük tane boyutu da dahil olmak üzere düşük açılı sınırların bir kısmının varlığı, sadece ısıl işlem ile elde edilen mikro yapıdan daha farklıdır [14].

Önceden belirlenmiş bir çalışmaya dayanarak, yüksek açılı sınırlarla çevrili ince tanelerin oluşumu için Şekil 1.6'da gösterilen mekanizma gösterilmiştir: (1) dislokasyonların birikmesi meydana gelmekte, (2) alttane sınırları oluşmakta, (3) bazı dislokasyonlar, yanlış yönelim açılarını artırmak için alttane sınırlarında yok edilmekte ve (4) APD ile dislokasyon oluşumu ile tane sınırlarında dislokasyonların emilimi arasında denge kurulmaktadır [14].

2.2.2 İkizlenme Deformasyon Mekanizması

Bir kristal yapının, sahip olduğu bir düzlemin iki tarafında simetrik iki farklı yönelim göstermesine kristal ikizlenme denilmektedir. Bazı araştırmacılar, ikizlerin ve dislokasyonların bazı erken simülasyonlarda bulunduğunu ve nano-metaldeki yüksek yığılma hatası enerjisinin deformasyonunun ana ikizleme mekanizması olduğunu belirtmektedirler. Kayma ile bağıntılı ikizler, simülasyon modellerinde YMK yapıya sahip metallerin kayma deformasyon sürecinde oluşmaktadır. V. Yamakov ve arkadaşlarının [15] yapmış olduğu deneyler ikizlenmenin 300 nm'den daha küçük tane boyutuyla UİT bakırda önemli bir mekanizma olduğunu da doğrulamaktadır. V. Yamakov ve arkadaşları YMK kobalt nano kristallerinde ikiz tane sınırları ve dislokasyon kayması arasındaki etkileşimi incelemiş ve ikizlenme deformasyonun malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde ikili bir rolü olduğunu belirlemişlerdir. Erken deformasyon aşamasında, ek kayma sistemi oluşabilmekte veya ikizlerin ve dislokasyonların etkileşimi ile kayma sisteminin göçüne neden olmakta ve deformasyonu gerçekleştirmektedir. Daha sonraki deformasyon aşamasında, ikiz tane sınırları, kayma dislokasyonlarını biriktirmek için belirli tip kayma dislokasyonlarını engellemekte ve bu da malzeme sertleşmesine neden olmaktadır [15].

2.2.3 Deformasyon Dokusu

APD işleminde, polikristallerin taneleri yavaş yavaş daha kararlı bir tane yönüne dönmekte ve deformasyon dokusu oluşmaktadır. Doku tipi ve yoğunluğu, spesifik işleme teknolojisi ile doğrudan bir ilişkiye sahiptir. Örneğin, YBB malzemeleri lifli dokuya sahiptir [13]. EKAP malzemeleri çoklu bir dokuya sahipken, ARB malzemeleri güçlü bir tabaka yapısına sahiptir [16]. APD, bulk UİT malzemelerin deformasyon dokusunu, malzemelerin mikroyapısını ve özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir [15].

2.3 Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemleri

APD'nin çok fazla çeşidi bulunmaktadır. Bunların başlıcaları Yüksek Basınç Burulması, Eş Kanallı Açısal Presleme ve Eş Kanallı Açısal Presleme-Konform'dur.

2.3.1 Yüksek Basınç Burulması (YBB)

APD sırasında uygulanan yüksek basınç, tane yapısının gelişimini önemli ölçüde etkilemekte ve UİT veya nanoyapılı tanelerden oluşan malzemelerin üretimini mümkün kılmaktadır. APD teknikleri arasında, YBB işlemi özellikle çok tercih edilen bir yöntemdir, çünkü EKAP ile karşılaştırıldığında, hem daha küçük tanelere hem de daha yüksek bir oranda yüksek açılı tane sınırlarının oluşmasını sağlamaktadır [14,17].

YBB, ince bir disk şeklinde olan numunenin, yüksek bir hidrostatik basınç altında burulma zorlamasına maruz bırakılarak işlenmesidir. YBB yöntemi, Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmektedir [18,19].

Disk bir boşluk içinde bulunmakta, bir hidrostatik basınç uygulanmakta ve anvillerden birinin döndürülmesiyle plastik burulma elde edilmektedir. 2 GPa'dan daha yüksek basınçlara çıkabilmek için, Şekil 2.2 (b)'de gösterildiği gibi, iki çıkıntının her birine yerleştirilmiş boşluklarla modifiye bir geometrinin kullanılması tercih edilmektedir [21,23].

Dış malzeme akışı yoksa, disk kalınlığı sabit kalmakta ve gerçek burulma gerinimi, γ , ile verilmektedir.

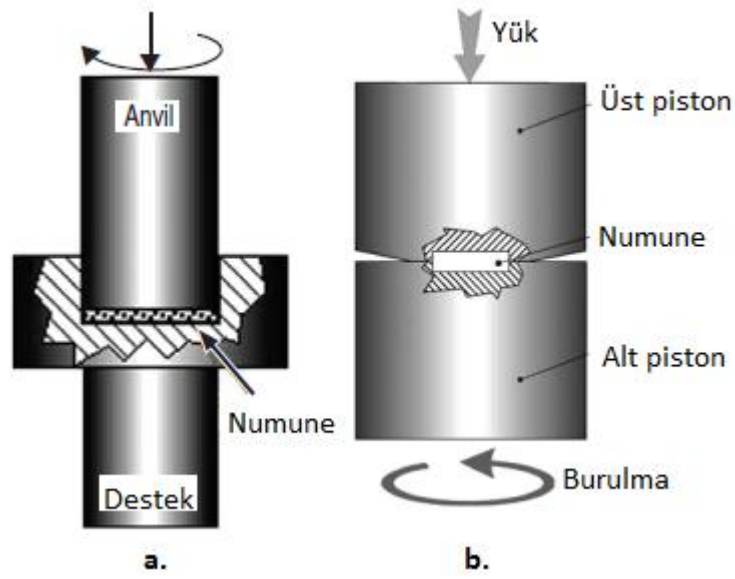
$$\gamma = (r / h)\phi \quad (2.2)$$

r: diskin merkezinden kenara olan mesafesi,

ϕ : radyan cinsinden burulma açısı,

h: numune kalınlığıdır.

İki anvil arasında bir miktar dış malzeme akışı ve h değerine karşılık gelen bir azalma oluşması gibi farklı bir ilişki mevcuttur. YBB yöntemi, geliştirilmiş düşük ve yüksek manyetik özelliklere sahip metallere, arteriyel stentlere ve mikroeletromekanik sistem uygulamaları için cihazlara sahip küçük hacimli nanomanyetikler gibi ürünler için önemli bir prosestir [10,19].



Şekil 2. 2 YBB yöntemleri [19]

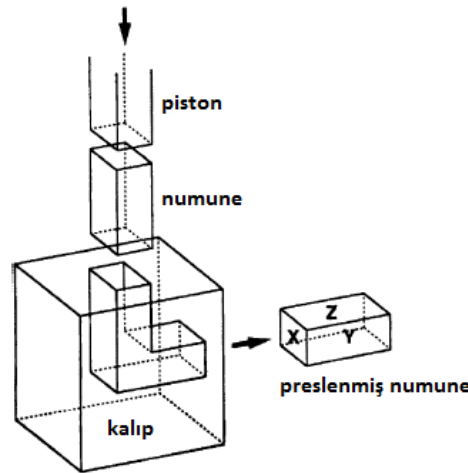
Yüksek açılı tane sınırlarıyla çevrili ultra ince tanelerin oluşumu: Dislokasyonların birikmesi, YBB işleminin başlamasıyla gerçekleşmekte ve daha sonra artan ϵ_{eq} ile dislokasyonların yeniden düzenlenmesiyle alt tane sınırları oluşturmaktadır. İşlemin daha sonraki aşamasında alttaneler tane sınırlarında yok olmaktadır. Dinamik yeniden kristalleşme aşamasında, metalik malzemelerin mikroyapı görüntülerinde tane sınırları, yüksek gerilme enerjileri ve dengede olmayan tane sınırları olarak adlandırılan yüksek dislokasyon yoğunlukları nedeniyle bulanık ve dalgalı görünmektedir. YBB yönteminde tane sınırlarında dislokasyonların emilmesi ile dislokasyon oluşumu arasında denge kurulmaktadır [22].

2.3.2 Eş Kanallı Açılal Presleme (EKAP)

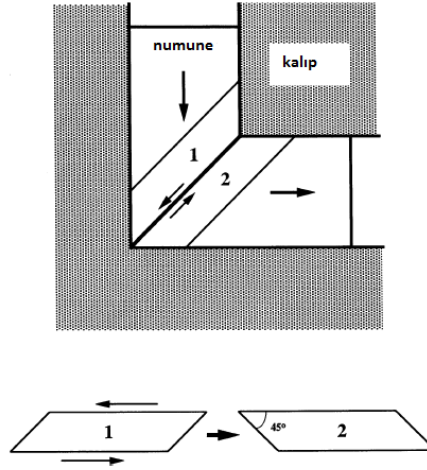
EKAP prosesi yıllardır üzerinde çalışmalar yapılan en önemli APD yöntemlerinden biridir. EKAP yöntemi oldukça geniş bulk malzemelere uygulanabilir, böylece çok çeşitli yapısal uygulamalarda kullanılabilecek malzemeler üretme potansiyeli ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca geniş bir alaşım yelpazesi üzerinde kolaylıkla gerçekleştirilebilen ve sadece kalıbın yapımı haricinde, çoğu laboratuvarında temin edilebilen ekipmanın kullanıldığı basit bir yöntemdir. Farklı kristal yapıları olan malzemelere ve çökeltili oluşturma ile sertleştirilmiş alaşımlardan intermetallik ve metal-matriks kompozitlere kadar birçok malzemeye EKAP prosesi geliştirilebilmekte ve uygulanabilmektedir. Preslerin yeterince yüksek bir gerilme uygulamasıyla preslenmiş metal homojen bir

yapıya ulaşmaktadır. İşlem büyük numunelerin preslenmesi için ölçeklendirilebilmektedir ve ticari metal işleme prosedürlerinde kullanılmak üzere EKAP geliştirme potansiyeli vardır [2].

EKAP prosesinin esasları Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilmektedir. Şekilde gösterilen kalıp için, iç kanal açısı ϕ , 90° ile bükülmektedir ve iki kanalın kesiştiği dış eğrilik yarı, ψ , 0° 'ye eşittir. Çubuk veya çubuk şeklindeki numune, kanal içine sığacak şekilde işlenmekte ve numune, bir piston kullanarak kalıbın içinden preslenmektedir. Verilen deformasyon, Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilmektedir. Numune kalıbın içinden geçerken kayma meydana gelmektedir ve Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Şekil 2.4'teki kalıp açısı 90° 'dir, teorik kesme düzlemi, 1 ve 2 numaralı numune içindeki iki bitişik eleman arasında gösterilmektedir ve bu elemanlar, şemanın alt kısmında gösterildiği gibi kesme düzlemleri ile aktarılmaktadır. Numune kesme düzleminde geçerken çok yoğun bir gerilme kullanılmasına rağmen, numune enine kesit boyutlarında herhangi bir değişiklik yaşamaksızın kalıptan çıkmaktadır. Bu, Şekil 2.4'teki preslenmiş numune ile gösterilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, çok büyük gerilmeler kullanılmasına rağmen, EKAP prosesi sonrası aynı kesit alanının sabit kalması, APD işlemenin önemli bir özelliğidir ve bu özellik APD yöntemlerini geleneksel metal işleme yöntemlerinden (haddeleme, ekstrüzyon ve çizim gibi çalışma işlemleri gibi) ayırmaktadır [2].



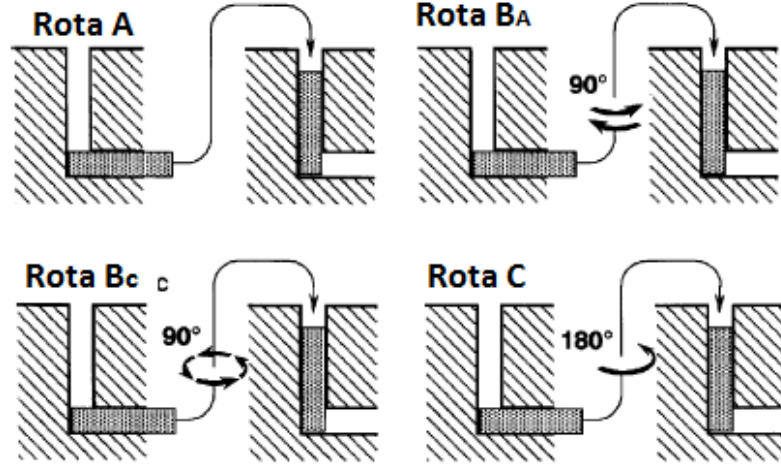
Şekil 2. 3 EKAP yönteminin şematik gösterimi: X, Y ve Z düzlemleri, sırasıyla enine düzlemi, akış düzlemini ve uzunlamasına düzlemi gösterir [2]



Şekil 2. 4 EKAP'ın kalıp içerisindeki kayma düzlemini gösterme prensibi: 1 ve 2 numaralı elemanlar, çizimin alt kısmında belirtildiği gibi kesilerek aktarılır [2]

Kesit alanı değişmeden kaldığından, son derece yüksek gerilmelere ulaşmak için aynı numune tekrar tekrar basılabilmektedir. Örneğin, tekrarlanan presleme sonrası numunelerin kullanılması, çeşitli geçişler ile farklı yönlerde döndürerek, her bir ardışık geçişte farklı kayma sistemlerinin oluşmasına olanak sağlamaktadır [23]. Uygulamada, EKAP araştırmalarının çoğu, kare kesitli kalıpların ve kare kanallı kalıpların kullanılmasını içermektedir. Bu numuneler için, bulk malzemelerin her bir ayrı geçiş arasında 90°'lik artışlarla döndüğü işlem yollarının geliştirilmesi uygundur. Aynı işleme yolları, numuneler, dairesel kesitli çubuk formunda olduğunda da kolayca uygulanmaktadır [2].

EKAP proses rotaları Şekil 2.5'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Numuneler ilk olarak herhangi bir yöne döndürülmeksizin, kalıptan çıktığı şekilde tekrar preslenmektedir ve A rotasını oluşturmaktadır. İkinci olarak, numune X eksenini etrafında 90° bir sağ ve bir sonrası geçişte sola döndürülerek B_A rotasını oluşturmaktadır. Üçüncü olarak, numune X eksenini böyle aynı yönde her presleme işlemi sonrası 90° döndürülerek B_C rotası oluşturmaktadır. Son olarak ise numune her presleme işlemi sonrası X yönünde 180° döndürülerek C rotasını oluşturmaktadır. Tüm bu farklı rotalar sonrasında farklı kayma düzlemleri oluşmaktadır. B_A ve B_C rotaları pratik durumlarda kolayca uygulanamaz çünkü plaka ilk ve sonraki tüm geçişlerde paralelkenar olarak kesilir, böylece her geçişten sonra kare bölümleri elde etmek için işlem yapılmalıdır[2].



Şekil 2. 5 EKAP prosesinin rotaları [5]

EKAP'ı etkileyen faktörler sırası ile aşağıdaki gibidir.

1. EKAP'ta Uygulanan Gerilme
2. EKAP Proses Rotaları
3. Farklı İşleme Yolları İçin Kayma Sistemleri
4. Kanal Açısının Etkisi, ϕ
5. Presleme Hızı
6. Presleme Sıcaklığı

2.3.3 Eş Kanallı Açısal Presleme-Konform (EKAP-Konform)

EKAP prosesinin metaller ve kompozitler için etkili bir tane küçültme yöntemi olduğu kanıtlanmıştır ve büyük bulk numunelerin üretimi için ölçeklendirilebilmesi avantajına sahiptir. Bununla birlikte, EKAP üç kritik dezavantaja sahiptir. Birincisi ve en önemlisi, geleneksel EKAP, numunenin kalıbın içine sokulduğu, kalıbın içinden bastırıldığı, çıkarıldığı ve daha yüksek bir gerilmenin uygulanması için yeniden yerleştirildiği tekrarlayan bir akışı içeren kesintili bir süreçtir. Bu, EKAP'ın laboratuvar araştırması için etkili bir işlem aracı olmasına rağmen, yoğun bir emek verilmesi ve endüstriyel operasyonlarda kullanım için kolay olmayan bir yöntem olduğu anlamına gelmektedir. İkincisi, EKAP'ta kullanılan numunelerin toplam uzunlukları üzerinde bir sınırlama vardır, çünkü uzunluk hem kritik en / boy oranını korumak için hem de sıkıştırma

yolunun toplam mevcut yer değiştirmesini sınırlamanın bir sonucu olarak sınırlandırılmıştır. Üçüncü problem ise her bir numunenin önünde ve arkasında yer alan tek biçimli olmayan deformasyon ve büyük çaplı çarpıklıklar nedeniyle EKAP ile malzeme kayıpları oluşmaktadır. Örneğin, bir alüminyum alaşımının preslenmiş numunesinin uzunlamasına kesitleri üzerinde detaylı sertlik ölçümleri kaydedilmiştir ve başlangıç uzunlukları 70 mm olan kütükler için ~38 mm'lik bir mesafe boyunca etkili bir düzgün akış uzunluğu oluştuğunu göstermiştir. Bu ölçümler, geleneksel EKAP'ın potansiyel olarak% 40'lık bir malzeme israfı gerektirdiğini ve bu da pratikte, EKAP teknolojisinin başarılı uygulamalarının yüksek maliyet gerektireceğini göstermektedir [5].

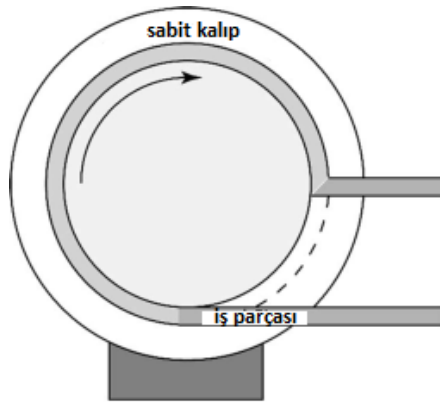
ÜİT malzemelerini ticarileştirmek, sürekli işleme teknikleri ile verimliliğini artırmak ve maliyeti düşürmektir. EKAP ile metallerin sürekli işlenmesi için birkaç prosedür önerilmiştir; bu yöntemlerde, bu işlemler ile bir kanalın çıkışına bir ani eğim verilmesi EKAP adımına dahil edilmektedir. Bu yaklaşımın örnekleri arasında sürekli sınırlı şerit kesme işlemi, eşit kanal açısai haddeleme, konstrüksiyon ve sürekli sürtünmeli açısai ekstrüzyon bulunmaktadır [5].

Sürekli kesme, sürekli sürtünmeli açısai ekstrüzyon ve EKAP-Konform işleminin ortak özelliği, numuneyi sürtünme kuvveti tarafından sürekli olarak EKAP kalıbına beslemek için konform tekniğinin benimsenmesidir. Bu nedenle, numunelerin (sac, çubuk, çubuk ve tel dahil) kesitini değiştirmeden sürekli bir deformasyon uygulayan “sürekli bir EKAP işlemi” olarak adlandırılmaktadır [24].

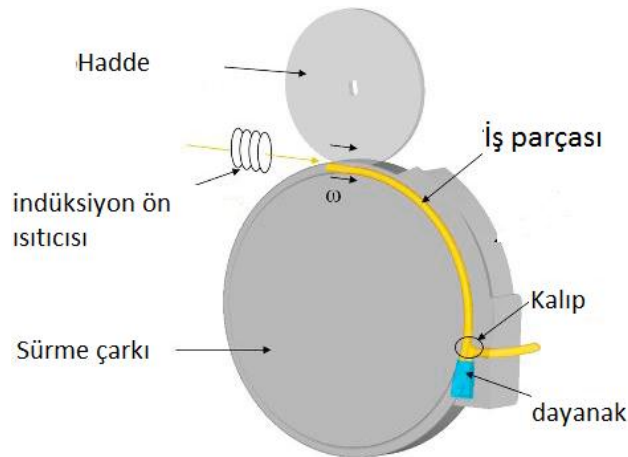
R.Z. Valiev [5], ticari saflıktaki alüminyum numunesinde uyguladığı EKAP-Konform yönteminden sonra yüksek oranda tane küçültmesi oluşmuş, 650 nm'lik tane boyutlarına sahip numuneler elde edilmiştir. Daha sonra yöntem ticari saflıkta bulunan titanyuma da uygulamış ve ~200-300 nm tane boyutu elde edilmiştir. Bu sonuçlar, EKAP–Konform'un, kesintisiz bir APD işleme prosedüründe yüksek oranda tane küçültme için önemli bir proses olduğunu göstermektedir[5].

Konform ekstrüzyon prosesi, tel ürünlerinin sürekli ekstrüzyonu için 30 yıl önce geliştirilmiştir ancak son zamanlarda EKAP-Konform prosesinde EKAP ile uygun şekilde kombine edilmiştir [25].

Bu işlemde, bir iş parçasını bir EKAP kalıbı içine itmede sürtünme kuvveti üretmek için kullanılan prensip, Konform işlemine benzerdir, modifiye edilmiş bir EKAP kalıp tasarımı kullanılır, böylece iş parçası UİT yapıları üretmek için tekrar tekrar işlenebilir. Tasarlanmış ve yapılandırılmış EKAP-Konform kurulumu şematik olarak Şekil 2.6'da ve Şekil 2.7'de gösterilmektedir[25]. Şekillerde gösterildiği gibi, sistem merkezde bir döner mil, bir oluk içermekte ve numune bu oluğa beslenmektedir. Numune, numunenin şaft ile dönmesi için oluk ile temas ara yüzünde sürtünme kuvvetleri tarafından ileri sürülmektedir. Bununla birlikte, numune, oluk içinde sabit bir kalıp ile sınırlanmakta ve bu kalıp ayrıca numuneyi durdurmaktadır. Numune kesme yoluyla bir açıyla dönmeye zorlanmaktadır. Mevcut kurulumda açı, EKAP'ta en çok kullanılan kanal kesişme açısı olan 90°'e yakındır. Bu kurulum, EKAP sürecini sürekli hale getirmektedir. Kalıp açısı ve gerilme oranı gibi diğer EKAP parametreleri de sürece dahil edilmektedir [2].

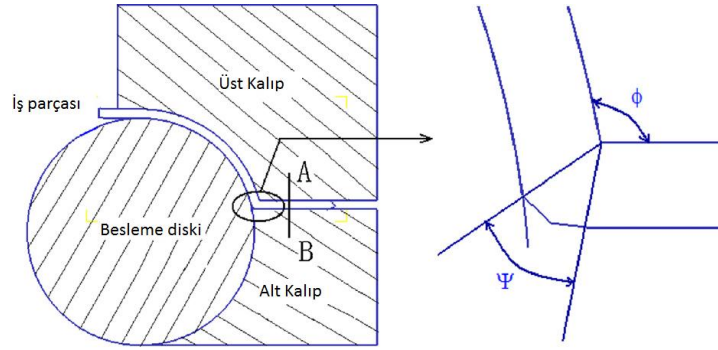


Şekil 2. 6 EKAP-Konform sürecinin şematik çizimi [25]



Şekil 2. 7 EKAP-Konform prosesinin şematik gösterimi [26]

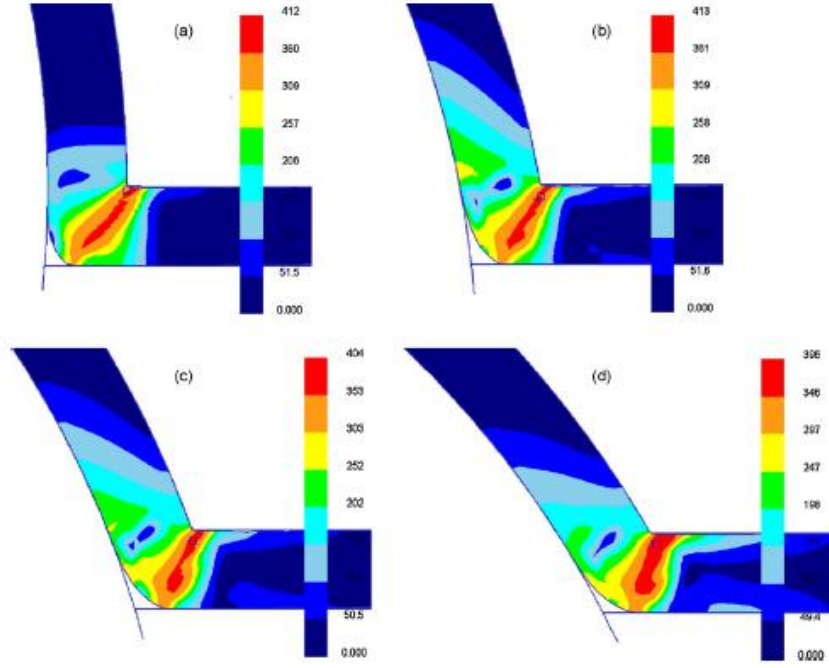
Lee ve arkadaşları[27], yanlış yönlenme açılarına sahip ultra ince taneler üretmek için ϕ açısının 100° ila 140° arasında seçilmesini önermişlerdir [27], onların aksine Nakashima ve arkadaşları ise, $EKAP = 135^\circ$ olan UİT yapısını üretme yeteneğine sahip olmadığını bulmuşlardır [28]. Ticari saflıkta alüminyum şerit deneylerinden ise optimum kalıp açısının 115° olması gerektiği elde edilmiştir [29].



Şekil 2. 8 Sürekli EKAP prosesinin şematik gösterilmesi [24]

Kayma, EKAP'taki iki kanalın ince tabakaların kesişme düzlemi ile sınırlıdır[23]. Kayma deformasyonu, deformasyon bölgesindeki etkili gerilme oranından veya etkili gerilme konturlarından çıkarılabilmektedir. Sabit kalıpta sürtünmesiz ($m = 0$, m :sürtünme katsayısı) farklı kalıp açısına sahip etkili gerilme (MPa) dağılımı Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

İş parçası deformasyon bölgesine girmeden önce gerilme dağılımı göstermektedir. $\phi = 90^\circ$ ve 100° 'de, etkili gerilme dağılımı esas olarak kesme düzlemi üzerinde yoğunlaşmaktadır ve Şekil 2.9 (a) ve (b) 'de simetrik olarak şekillendirilmiş kontür çizgileri gösterilmektedir. Kalıp açısının artması ile deformasyon bölgesi, çıkış kanalının çıkış yönünde ileriye doğru yayılarak teorik kayma düzleminden ayrılmasına yol açmaktadır. Simetrik ve karmaşık olmayan, Şekil 2.9 (c) ve (d) 'de verilmiş gerilim dağılımında, düzensiz deformasyonun kalıp açısı ile arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, kalıp açısının Lee ve arkadaşları tarafından önerildiği gibi sadece 100° ila 140° 'den farklı olarak daha geniş bir aralıkta değişken olabileceğini gösteren bir kesme düzlemi de mevcuttur [24],[27].



Şekil 2. 9 Kararlı durumda sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilen etkili gerilme alanları, $m = 0$: (a) $\phi = 90^\circ$, (b) $\phi = 100^\circ$, (c) $\phi = 110^\circ$ ve (d) $\phi = 120^\circ$ [24]

2.4 Sürünme

Genel olarak, malzemelerin mekanik özellikleri ve performansı artan sıcaklıklarla değişmektedir. Elastiklik modülü ve dayanımı artan sıcaklıkla düşerken, süneklik artmaktadır. Difüzyon ile ilişkili olan atomik hareketlilik Fick Yasası ile açıklanmıştır: [30]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2.3)$$

D: difüzyon katsayısı,

D_0 : sabit,

Q: atomik hareket için aktivasyon enerjisi,

R: evrensel gaz sabiti (8.314 J / mol K),

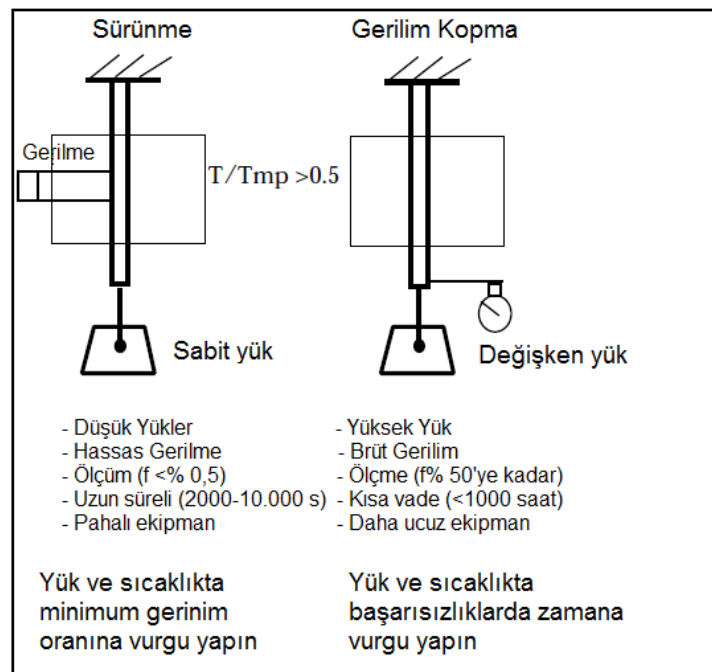
T: mutlak sıcaklık

Difüzyon kontrollü mekanizmalar, yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikler ve performanslar üzerinde önemli etkiye sahiptir. Dislokasyon tırmanışı, atomlar arası boşlukların konsantrasyonu, yeni kayma sistemleri ve tane sınırı kaymasını gibi

mekanizmalar difüzyon kontrollü olup ve malzemelerin davranışını yüksek sıcaklıklarda etkilemektedir. Difüzyon hızına bağlı olan korozyon veya oksidasyon mekanizmaları, malzemelerin ömrünü yüksek sıcaklıklarda etkilemektedir [30].

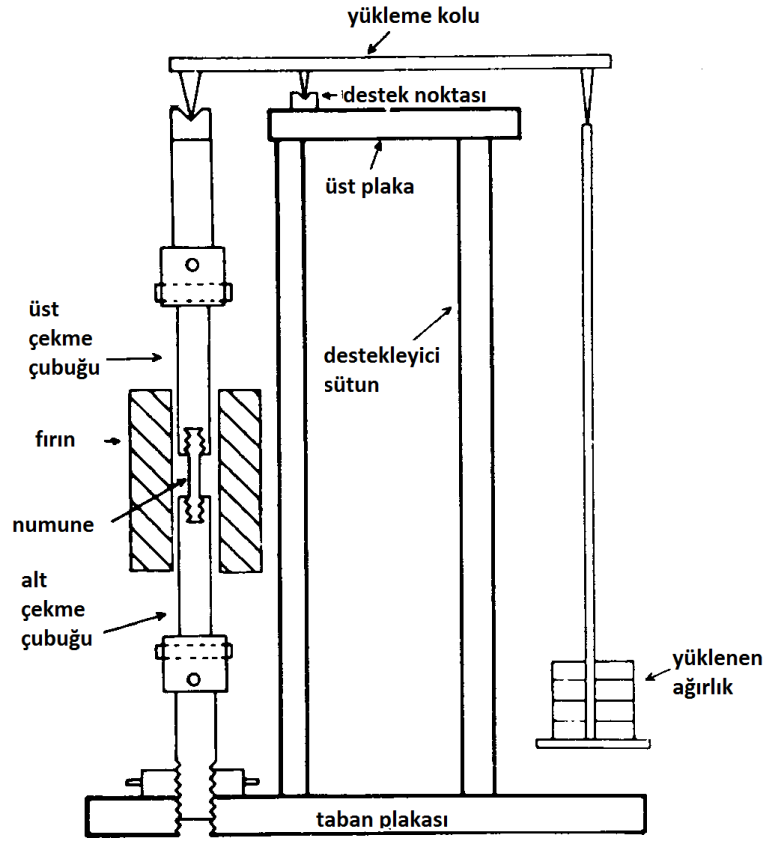
Özgün bir malzeme davranışı olmayan sürünme, performansa dayalı bir davranıştır. Sürünme mutlak ergimeden daha büyük mutlak sıcaklıklarda zamana bağlı deformasyon olarak tanımlanabilmektedir [30].

Sürünme esnasında numuneye bir kuvvet uygulanmakta ve yüksek bir sıcaklığa maruz bırakma ile zaman içinde boyutsal değişimi ölçülmektedir (Şekil 2.10).

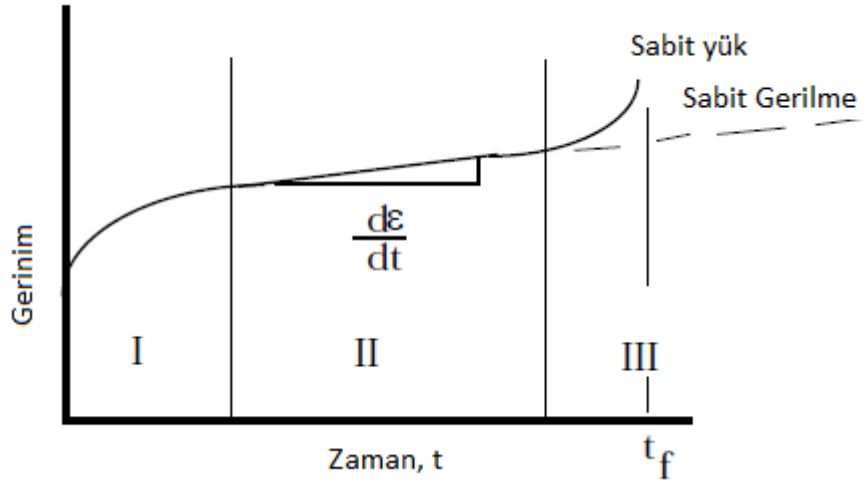


Şekil 2. 10 Sürünme ve gerilim kırılma deneylerinin karşılaştırılması [30]

Sürünme deneylerinde sıcaklık tolerans aralığı kritiktir (bu yüzden tolerans $<0,1$ ila $0,5^{\circ}$ C arasında tutulmalıdır). Çözünürlük ve ekstensometrenin stabilitesi önemlidir (düşük sürünme değerlerine sahip malzemeler için yer değiştirme çözünürlüğü $0,5 \mu m$ seviyesinde olmalıdır). Sürünme deneyi sırasında çevresel etkiler, malzemenin uzamasını etkilemeksizin malzemenin erken kırılmasına neden olabilmektedir ve bu durumda ya gerçek kullanım koşulları taklit edilmeli ya da kırılmaların sürünme mekanizmalarına karşı yalıtılması sağlanmalıdır. Sürünme esnasında ise uygulanan gerilme tek eksenli olmalıdır. Şekil 2.11, sürünme deneyi setini göstermektedir [30].



Şekil 2. 11 Sürünme deneyi [30]

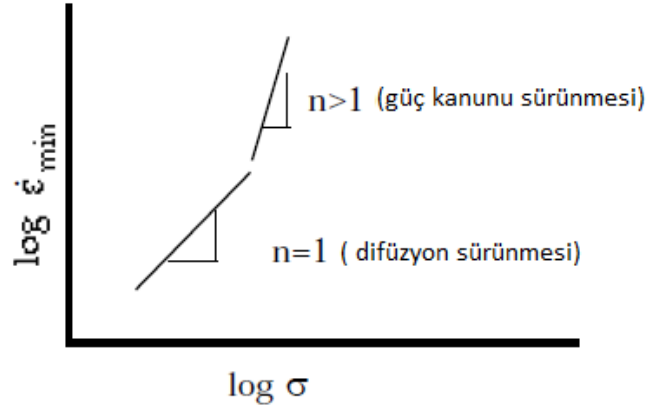


Şekil 2. 12 Sürünme deneyi için gerinim-zamanı eğrisi[30]

Sürünme deneyinin temel sonuçları, Şekil 2.12'de şematik olarak gösterilen zaman-gerilme diyagramları ile değerlendirilmektedir. Başlangıç gerilmesi, $\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{E}$, sadece uygulanan yüke karşı elastik tepkidir. Gerilmenin kendisi genellikle mühendislik gerilmesi, $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$, olarak hesaplanır. Birincil bölge (I), malzeme deformasyonu ve

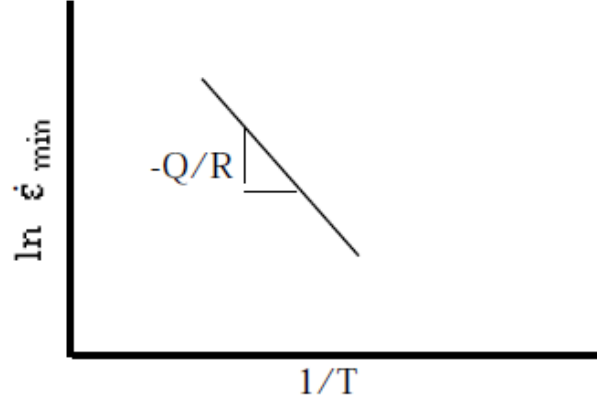
malzemenin sürünme direnci nedeniyle azalan sürünme gerilme oranına ($\frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{\varepsilon}$) sahip geçici sürünme ile belirtilmektedir. İkincil bölge (II), gerilme sertleşmesi oluşan kararlı durumdaki sürünme (sürünme oranı, $\varepsilon_{min.} = \varepsilon_{ss}$, sabittir) ile belirtilmektedir. Üçüncül bölge (III), sabit yük altında boyun verme veya kırılma mekanizmasının oluşmasının numunenin kırılmasından önce meydana geldiği kayma gerilmesi hızının artması ile açıklanmaktadır. Bazen, bu bölgeler çok spesifik ve çok kısa süreler olmasına rağmen, kuaterner bölgeler, gerilme-zaman eğrisinin de incelenmesine dahil edilmektedir [30].

Sürünme esnasında numune uzadıkça kesit alanı azalır ve sabit bir gerilimi korumak için yükün azaltılması gerekmektedir. Sürünme deneyi sonuçları verilirken, uygulanan ilk gerilim kullanılır. Sabit yük ve sabit gerilme etkisi Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Genel olarak, bu etkinin (sabit gerilme için kesikli çizgi), yalnızca ikincil bölgenin ilerisindeki, tersiyer bölgede kendini gösterdiği dikkate alınmalıdır.



Şekil 2. 13 Difüzyon sürünme ve güç yasası sürünme gösteren uygulanan gerilime karşı minimum gerilim oranı [30]

Şekil 2.14'te verilen minimum sürünme hızı grafiğinin eğimi aktivasyon enerjisini (Q) vermektedir[30]. Mühendislik tasarımında sürünme için amaç, uzun vadede malzeme davranışlarını öngörmektir. Bu amaçla üç temel yöntem vardır: gerilim-kırılma, minimum gerilme oranı ve kırılmaya kadar geçen süre ve sıcaklık telafi süresidir. Kullanılan yöntemlerde deney süresinin, tasarım süresinin en az % 10'u kadar olması ve sürünme ve / veya bozulma mekanizmasının, zaman, sıcaklık veya gerilim ile değişmemesine dikkat edilmelidir [30].



Şekil 2. 14 Aktivasyon enerjisinin belirlenmesini gösteren sıcaklık-minimum sürünme hızının grafiği[30]

2.4.1 Sürünme Mekanizmaları

2.4.1.1 Difüzyon Sürünmesi

Difüzyon sürünmesi, tane içinde atomların difüzyonu ile malzemenin taşınmasıyla gerçekleşmektedir. Bütün yayılma süreçleri gibi, bu durumda uygulanan gerilim tarafından yaratılan serbest enerji gradyanı (kimyasal potansiyel) ile yönlendirilmektedir. Örneğin, uygulanan bir gerilme, yükleme boyunca, her bir tanenin uçlarında yüksek hidrostatik gerilim bölgeleri oluşturmaktadır. Tanenin “ekvator” bölgeleri olarak adlandırılabilir bir durumda, hidrostatik gerilimi daha düşüktür. Yüksek hidrostatik gerilim olan bu “kutup” bölgelerinde atomlar daha düşük bir serbest enerjiye sahip olduklarından, bu bölgelere doğru yayılma eğiliminde olacaktırlar ve bu hareket, yükün yükleme yönü boyunca uzamasına yol açacaktır. Bu, bireysel tanelerin ölçeğinde meydana geldiğinden, ince taneli malzemelerde difüzyon mesafeleri daha kısadır ve bu nedenle sürünmeye daha duyarlı olma eğilimi göstermektedirler [31].

İki tip difüzyon sürünmesi vardır, eğer sürünme, difüzyon yollarının tane sınırlarından geçmesine bağlı ise Coble sürünmesi (daha düşük sıcaklıklarda meydana gelir) veya difüzyon kafesler yoluyla ilerliyorsa ise Nabarro-Herring sürünmesi (daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelir) olarak adlandırılır [31].

2.4.1.2 Dislokasyon Sürünmesi

Dislokasyon sürünmesi dislokasyonların hareketini içeren bir mekanizmadır. Bu

sürünme mekanizması, yüksek gerilmelerde ve nispeten düşük sıcaklıklarda baskın olma eğilimindedir. Dislokasyonlar kayma düzleminde kayma yaparak hareket edebilirler, bu da düşük ısı aktivasyon gerektiren bir işlemdir. Hareketleri için hız belirleme aşaması genellikle difüzyon gerektiren ve böylece zamana bağlı ve daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bir tırmanma işlemidir [31].

Uygulanan gerilim dislokasyon hareketi ve atomların difüzyonu için bir itici güç sağlamaktadır. Gerilim arttıkça deformasyon oranı da artmaktadır. Gerilim üssü olarak tanımlanan n değeri, hangi sürünme mekanizmasının faaliyet gösterdiğine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, difüzyon sürünmesi için değeri yaklaşık 1 iken, dislokasyon sürünmesi için ise genellikle 3-8 aralığındadır [31].

2.5 Elektriksel Özellikler

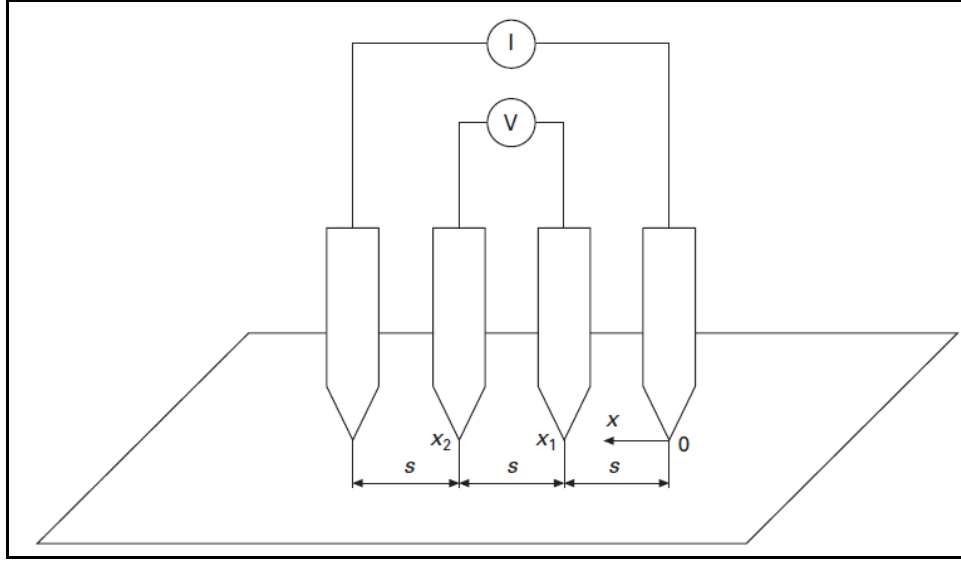
Şekil 2.15'te gösterilmiş olan dört noktalı prob yöntemi ince kalınlıktaki metallerin elektrik direncini ölçmek için kullanılan en yaygın yöntemdir. Dört eşit aralıklı propların; içerdeki iki prop arasından voltmetre, dıştaki iki prop arasında akım geçmektedir. Bir numunenin hacimsel direncini ölçmek için sabit bir akım (I) dış iki proptan geçerken, iç iki prop arasından da voltaj(V) düşüşü kaydedilmektedir. Şekil 2.15'te diferansiyel direnç şöyle yazılabilmektedir:

$$dR = \rho \left(\frac{dx}{A} \right) \quad (2.4)$$

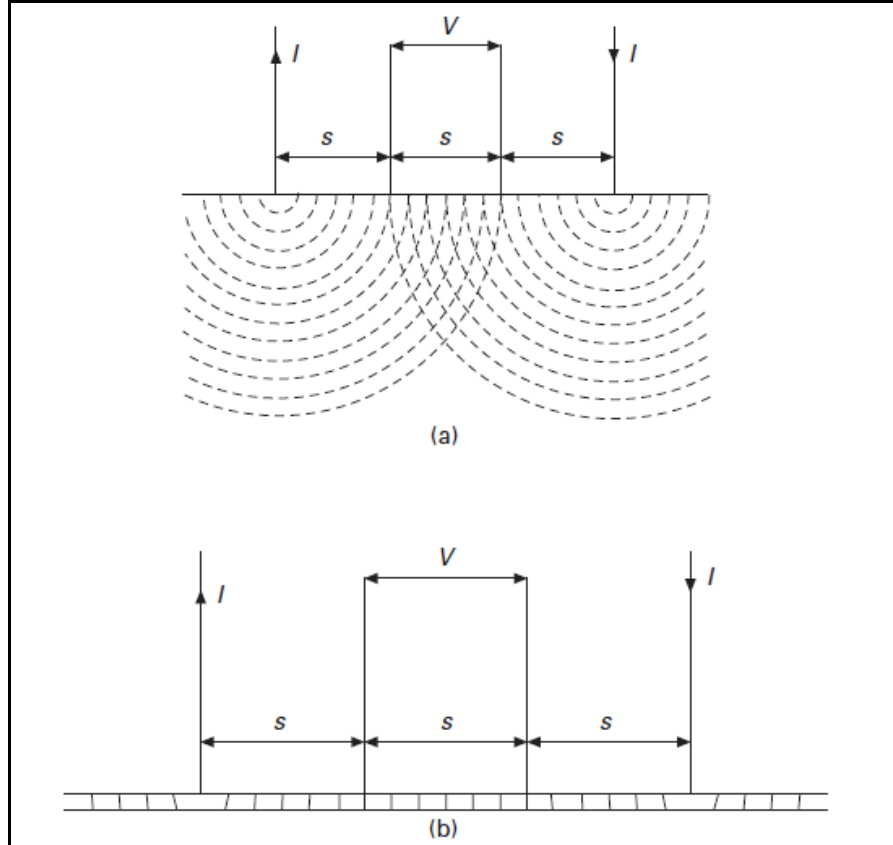
Denklemden; dR ; x mesafesindeki iki nokta arasındaki direnç,

A ; akımın geçtiği alan,

ρ ; numune malzemesinin direncidir[32].



Şekil 2. 15 Sketch'in dört nokta prop yöntemi [32]



Şekil 2. 16 (a) Hacimsel numunenin, (b) ince numunenin dört nokta prop yöntemi ile ölçülmesi [32]

Şekil 2.16.a'da Kalınlığın $t \gg s$ olduğu hacimsel bir malzemede dış proplardan yayılan akımın, küresel bir yayılması olduğunu kabul edilerek iki iç prob arasındaki entegrasyon (2.5) denklemindeki gibi yazılabilir.

$$R = \int_{x1}^{x2} \rho \left(\frac{dx}{A} \right) = \int_{x1}^{x2} \rho \frac{dx}{2\pi x^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left(-\frac{1}{x} \right) \Big|_{x1}^{x2} = \frac{\rho}{4\pi s} \quad (2.5)$$

Propların mesafesi s ile ölçülmektedir. Dış iki probdaki akımın üst üste binmesi nedeniyle, ölçülen direnç (2.6) eşitliğine göre hesaplanabilir.

$$R = \frac{V}{2I} \quad (2.6)$$

Hacimsel numunenin direnci (2.7) eşitliğine göre belirlenebilir.

$$\rho = 2\pi s \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.7)$$

Şekil 2.16.b'ye göre $t \ll s$ 'deki çok ince bir numune için akım alanı yerine bir akım halkası alınabilir ve (2.8) eşitliğine göre bu alan hesaplanabilir.

$$A = 2\pi x t \quad (2.8)$$

Entegrasyon olarak alınarak (2.9) eşitliği elde edilebilir.

$$R = \int_{x1}^{x2} \rho \left(\frac{dx}{A} \right) = \int_{x1}^{x2} \rho \frac{dx}{2\pi x t} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln x \Big|_{x1}^{x2} = \frac{\rho}{2\pi t} \ln 2 \quad (2.9)$$

ile verilebilir. Akımın süperpozisyonu ile ince numunenin direnci (2.10) eşitliği ile verilebilir.

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.10)$$

Levha direncinin prop aralığından bağımsız olduğu ince numunenin levha direnci ise (2.11) eşitliğine göre hesaplanabilir.

$$Rs = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right) = 4.53 \left(\frac{V}{I} \right) \quad (2.11)$$

Türev yarı sonsuz bir hacimsel numune ve ince numune için verilmiştir. İdeal olmayan bir numune için, bir düzeltme faktörü tanıtılmalıdır. Deneyde, numunenin kenarı ile en yakın prob arasındaki mesafe, prob aralığının beş katına eşit veya ondan büyükse,

düzeltilme gerekmemektedir[32].

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemelerin Üretimi ve EKAP-Konform Prosesi

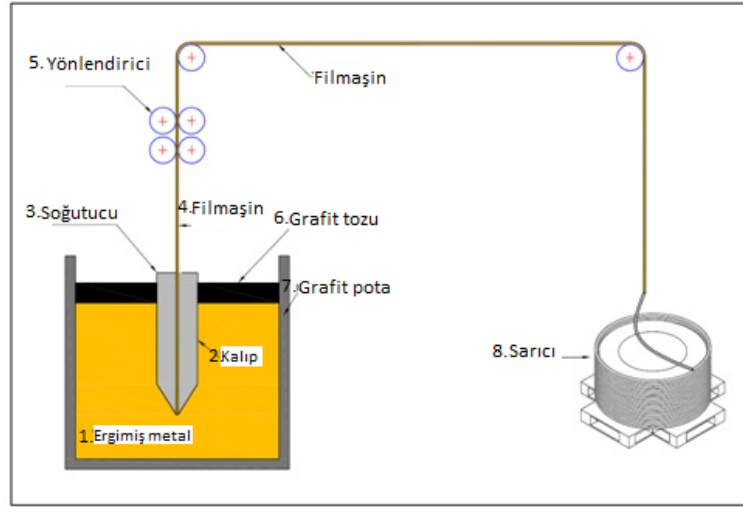
Numunelerin üretilmesi ve EKAP-Konform prosesi Denizli’de bulunan ERBAKIR A.Ş. fabrikasında gerçekleştirilmiştir.

3.1.1 Malzemelerin Üretimi

Cu-Sn alaşımları, sürekli döküm fırınında (Rautomead) 20 mm filmaşın çapında 1100-1200 °C’de, demir dışı metallerin üretiminde kullanılan 500 kg’lık bir grafit pota ile üretilmiştir. Cu-Sn alaşımları, ağırlıkça % 0,18 Sn ve ağırlıkça % 0,20 Sn içeren iki farklı oranda filmaşın olarak çekilmiş, kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Şekil 3.1, grafit potada üretilen Cu-Sn alaşımlarının gerçekleştirildiği sürekli döküm fırını ve işleminin şematik bir görünümünü göstermektedir. Yüksek otomasyon teknolojisi ile donatılmış, döküm hızı ve döküm sıcaklığı gibi birçok parametre sistemde hassas bir şekilde ayarlanmıştır. İşlem sırasında alaşımın oksidasyonunu önlemek için sıvı metal yüzey özel grafit döküm tozuyla kaplanmıştır. Şekil 3.2’de grafit potalı döküm haznesinden tel çekme prosesi gösterilmiştir.

Çizelge 3. 1 Cu-%0,18Sn ve Cu-%0,20Sn numunelerinin kimyasal kompozisyonları

Cu-%0,18Sn							
Element	Sn	Zn	Pb	P	Mg	Se	Cu
Ağırlık %	0,17	<0,001	<0,001	<0,02	<0,0021	<0,0001	Denge
Cu-%0,20Sn							
Element	Sn	Zn	Pb	P	Mg	Se	Cu
Ağırlık %	0,20	<0,001	<0,001	<0,0008	<0,013	<0,0002	Denge



Şekil 3. 1 Grafit potalı yukarı doğru sürekli döküm ünitesi: 1- Ergimiş Bakır 2- Kalıp 3-Soğutucu 4- Filmaşın 5- Yönlendirici Rol 6- Grafit Tozu 7-Grafit Pota 8- Sarıcı

500 kg'lık Cu-Sn alaşımlarında kullanılacak Sn miktarı; Cu-%0,18Sn için 9 kg , Cu-%0,20Sn için 10 kg saf Sn (%99,95 saflıkta ticari granül) olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. 2 Grafit potalı döküm haznesinden tel çekme prosesi

3.1.2 EKAP-Konform Prosesi

EKAP-Konform ve ekstrüzyon prosesi için firmada bulunan TJ400 marka cihaz kullanılmıştır. TJ400 sürekli ekstrüzyon hattında, 2000 mm^2 'nin altında bir kesit alanına sahip yüksek kaliteli $\Phi 20\text{mm}$ Cu-Sn0,18 ve Cu-Sn0,20 hammaddeleri kullanılarak yukarı doğru döküm tekniği uygulanmıştır. Başlangıçta kalıp 800°C 'ye kadar ısıtılmış sonra sisteme takılmıştır ve $\Phi 20\text{mm}$ Cu-Sn0,18 ve Cu-Sn0,20 çubuklarının sıcaklıkları ise ısınan kalıp nedeniyle 500°C 'ye yükselmiştir.

Maksimum ekstrüde bakır ürün genişliği 170 mm 'ye kadar ve sürekli döner ekstrüzyon hattının ortalama üretim hızı 1100 kg / saate ulaşmaktadır.

Bu sürekli döner ekstrüzyon hattı, başlangıçta bakır tellerin üretimi için tasarlanmıştır. Ayrıca, motorlarda, transformatörlerde ve güç dağıtım kabinlerinde yaygın olarak kullanılan bakır çubuk ve diğer ekstrüde bakır ürünleri üretmek için de kullanılabilir [16]. Şekil 3.3'te EKAP-Konform cihazı gösterilmektedir.



Şekil 3. 3 EKAP-Konform Cihazı

Cihaza ait diğer parametreler Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3. 2 TLJ400 Konform makinası parametreleri

Ekstrüzyon Çarkının Nominal Çapı (mm)	400
Ekstrüzyon Çarkının Anma Hızı (rpm)	12,5
Max. Ürün Genişliği (mm)	170
Ürünün Kesit Alanı (mm^2)	100-2000
Ortalama Üretim (kg/h)	1300
Hurda (%)	5-8

Çalışmada kullanılan numuneler:

- EKAP-Konform uygulanmamış 20 mm Cu-Sn0,18 ve Cu-Sn0,20 numuneleri (Cu-0,18Sn_C, Cu-0,20Sn_C)
- 1 EKAP-Konform pasosu (Cu-0,18Sn_{EC} 1P, Cu-0,20Sn_{EC} 1P)
- 2 EKAP-Konform pasosu sonrası elde edilen 8 mm çaplı Cu-Sn0,18 ve Cu-Sn0,20 numuneleri (Cu-0,18Sn_{EC} 2P, Cu-0,20Sn_{EC} 2P)

3.2 Mikroyapı Analizi

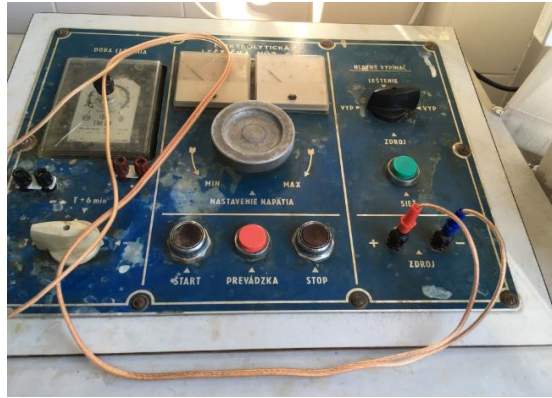
Numunelerin mikroyapı analizleri için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile EBSD(Electron Backscattered Diffraction) analizi alınmıştır. Bu analizler Çek Cumhuriyeti'nin Brno şehrinde bulunan Institute of Physics of Material'da gerçekleştirilmiştir.

Numuneler metalografik inceleme için önce sırasıyla 400, 1200, 2500 ve 4000 meshlik zımparalarla zımparalanmış ve daha sonra parlatma yapılmıştır. Zımparalamadan sonra alkolle yıkanıp kurutulan numuneler, elektrolitik parlatma cihazında parlatılmıştır. Elektrolitik parlatma çözeltisi olarak 250 ml fosforik asit, 250 ml etil alkol, 50 ml propil alkol ve 500 ml distile su kullanılmıştır. Cihazda kırmızı kablo (+)'ya, mavi kablo (-)'ye bağlanmıştır ve (+) kablo numuneye, (-) kablo kap içinde bulunan metale bağlanmıştır. Ardından cihaz açılmıştır ve voltaj 30'a ayarlanarak sisteme akım gönderilmiştir. Numune çözeltinin içine batırılarak bir süre gezdirilmiştir ve ardından su ile temizlenip kurutulmuştur. Kontrol amaçlı numuneler optik mikroskopta incelenmiştir, Ø 20 mm'lik numunelerin EBSD görüntüleri için yeterli olmadığı görülmüştür. Numunelerin yüzeyleri çok geniş olduğu için hemen oksidasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Düşük ve yüksek voltajlarda yine elektrolitik parlatma uygulansa da yeterli olmamıştır ve 2 saat titreşimli parlatma cihazında bekletilmiştir. Titreşimli parlatmada kullanılan çözeltinin içerisinde 0,05 µm büyüklüğünde koloidal silika bulunmaktadır. Titreşimli parlatma yöntemi aslında soğuk EBSD analizinde kullanılmaktadır. Optik mikroskopta numuneler üzerinden büyütme yapmadan görüntüler alınmıştır.

Numunelerin hazırlanma aşaması Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 Numunelerin zımparalanması



Şekil 3. 5 Elektrolitik parlatma cihazı

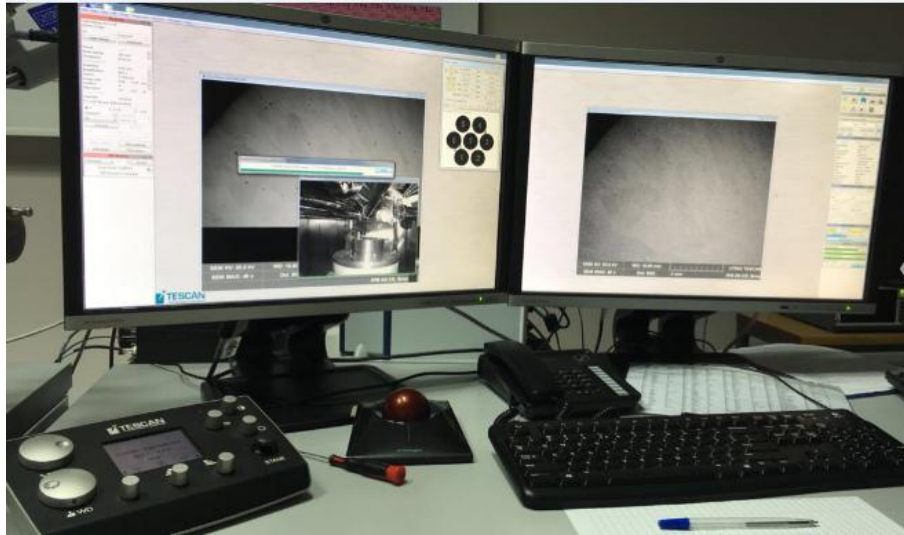


Şekil 3. 6 Numunelerin parlatılması

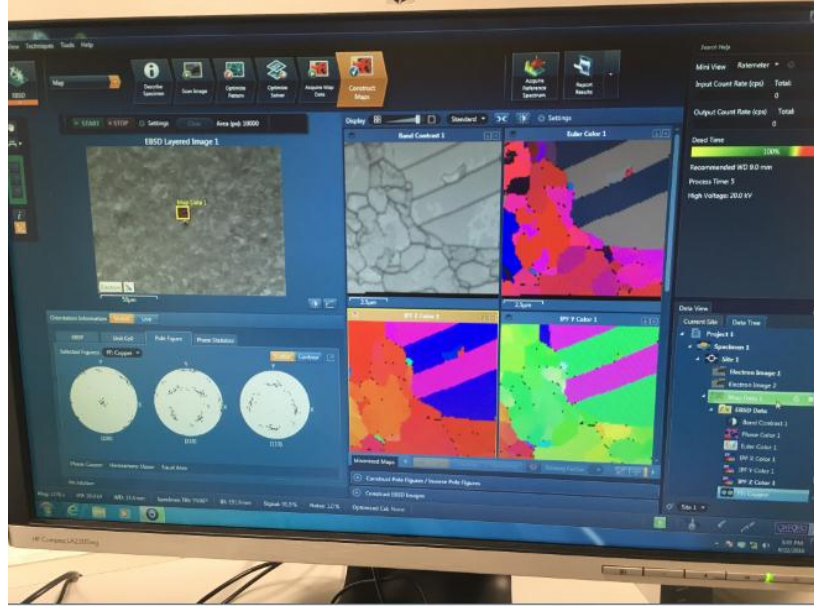


Şekil 3. 7 Titreşimli parlatma cihazı

EBSD gibi lokal bölgelerin kristal oryantasyon ölçümleri için difraksiyon temelli teknikler, bugün ince ölçekli mikroyapısal özelliklerin karakterizasyonu için önemli bir yere sahiptir. EBSD ölçümü Oxford Instruments HKL Kanal 5 yazılım paketi kullanılarak bir JOEL JSM-7001F Saha Emisyon SEM (20 kV hızda gerilimde) ile gerçekleştirilmiştir. EBSD ile elde edilen veriler, tane yönlenmeleri için (alttaneler $\Delta \geq 2^\circ$ ile ve taneler $\Delta \geq 15^\circ$ ile) iki değerde analiz edilmiştir. X ekseninin, son sıkıştırma yönüne ve kanalın dibine dik olan Z eksenine paralel olduğu yerdedir.



Şekil 3. 8 Numunelerin EBSD analizi için mikroskopa yerleştirilmesi



Şekil 3. 9 EBSD analizi sırasında görüntü elde etme

Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 numunelerin EBSD görüntüleri alınırken çekilmiştir.

XRD analizi; YTÜ Merkez laboratuvarında yapılmıştır. XRD analizi için numuneler, metalografik olarak hazırlanmıştır. Numuneler sırasıyla 400, 1200, 2500 ve 4000 meshlik zımparalarla zımparalanmış ve daha sonra parlatma yapılmıştır. Zımparalamadan sonra alkolle yıkanıp kurutulan numuneler, elektrolitik parlatma cihazında parlatılmıştır. Numunelerin faz yapısı, 40 kV'luk bir voltaj ve 40 mA'lık bir akım ile bir Cu-K α radyasyon tüpü kullanılarak XRD ile r_h pozisyonunda analiz edilmiştir.

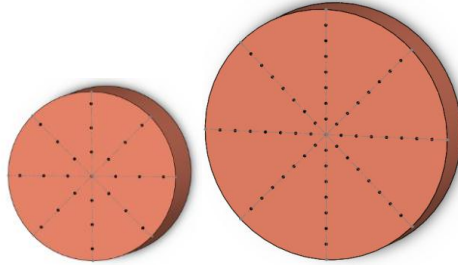
3.3 Mekanik Özellikler

Mekanik özelliklerin incelenmesi kapsamında numunelere sertlik deneyi, çekme deneyi ve sürünme deneyi uygulanmıştır.

3.3.1 Sertlik Deneyi

Sertlik deneyi Çek Cumhuriyeti'nin Brno şehrinde bulunan Institute of Physics of Material'da sertlik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney için Şekil 3.10'da görülen Zwick/Roell ZHV cihazı kullanılmıştır. Sertlik deneyi ISO 6507 / ASTM E 92 standardına göre yapılmış ve Vickers yöntemi ile numunelerin üst yüzeylerinden 1 mm aralıklarla ölçümler alınmıştır. Sertlik ölçümü için 1 kg yük uygulanmış ve yük 10 sn numune yüzeyinde bekletilmiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneyde tepe açısı 136° olan

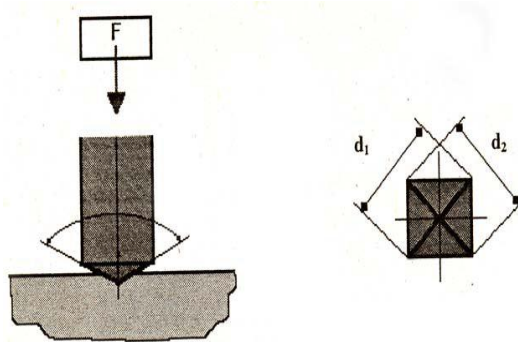
elmas kare piramit ucun bıraktığı izin köşegenleri cihaz tarafından ölçölerek sertlik değeri bulunmuştur. Şekil 3.10’da numune yüzeyinden sertlik değeri alınan noktalar, Şekil 3.11’de sertlik cihazı ve numunenin üzerinde sertlik almak için oluşturulan iz, Şekil 3.12’de vickers sertlik ölçümü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 10 Numune yüzeyinden sertlik değeri alınan noktalar



Şekil 3. 11 Sertlik cihazı ve numunenin üzerinde sertlik almak için oluşturulan iz



Şekil 3. 12 Vickers sertlik ölçümünün şematik olarak gösterilmesi

3.3.2 Çekme Deneyi

Çekme deneyi Denizli’de bulunan ERBAKIR A.Ş. tesislerinde, 5-20 kN yükleme yapabilen Marestek cihazı ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 5,00 mm çapında ve 26 mm uzunluklarındadır. Şekil 3.13’te çekme deneyinde kullanılan cihaz verilmiştir.



Şekil 3. 13 Çekme deneyi ölçüm cihazı

3.3.3 Sürünme Deneyi

Sürünme deneyi ile EKAP-Konform’un yüksek sıcaklıklarda kullanılacak Cu-Sn_{0,18} ve Cu-Sn_{0,20} alaşımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yüksek hızlı trenlerin katener ağ sistemlerinde kullanılacak alaşımlı teller, yüksek hızdan dolayı meydana gelecek aşınma ile aşırı ısınacaklardır. Bu nedenle bu malzemelerin yüksek sıcaklık performansları büyük önem taşımaktadır.

Bu amaçla gerçekleştirilen sürünme deneyi Çek Cumhuriyeti, Brno şehrinde bulunan Institute of Physics of Material’da sürünme laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 473 – 543 - 573 – 673 K sıcaklıklarında 60-75-100-115-120-125 ve 150 MPa değerlerinde yapılmıştır. Numuneler 5,00 mm çapında ve 25 mm uzunluklarındadır. Şekil 3.14’te sürünme deneyinde kullanılan numune ve Şekil 3.15’te sürünme deneyi cihazları gösterilmiştir.



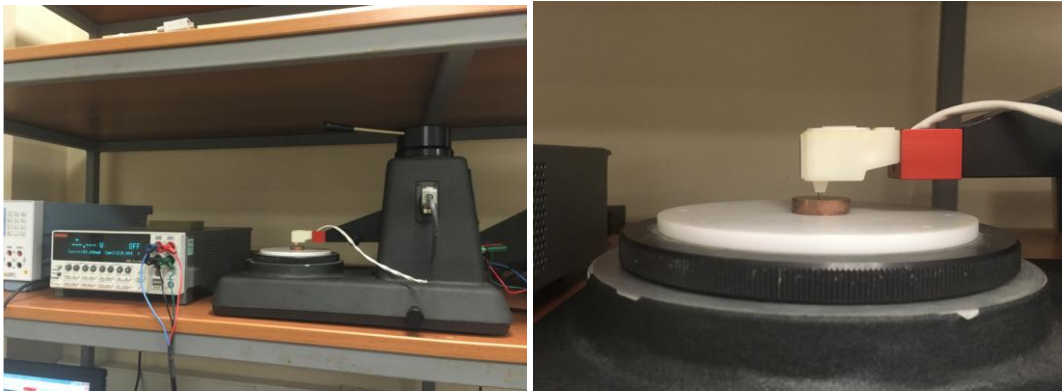
Şekil 3. 14 Sürünme deneyinde kullanılan numune



Şekil 3. 15 Sürünme deney cihazları

3.4 Elektriksel Özellikler

Numunelerin elektriksel özellikleri Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında Şekil 3.16'da verilen Dört Prop Yöntemi cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



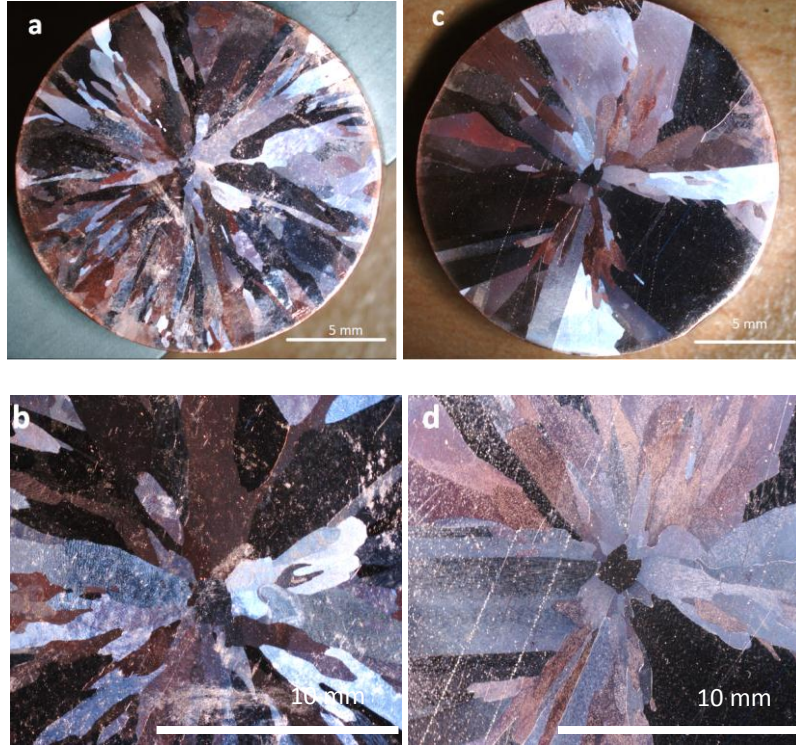
Şekil 3. 16 Dört Prop Yöntemi Cihazı

DENEYSEL SONUÇLARI VE İRDELEME

4.1 Mikroyapı Sonuçları

Cu-0,18Sn_C ve Cu-0,20Sn_C numuneleri döküm numuneleri olduğu ve EKAP-Konform uygulanmadığı için mikroyapıdaki taneler çok büyük görülmektedir. Bu yüzden EBSD analizinde istenilen görüntüler alınamamış, tek bir tane görüntünün alınacağı bölgeye sığmamıştır. Bu yüzden bu numunelerin mikroyapısı optik mikroskop ile incelenmiştir. Şekil 4.1’de bu tanelerin genel ve merkez görüntülerini göstermektedir.

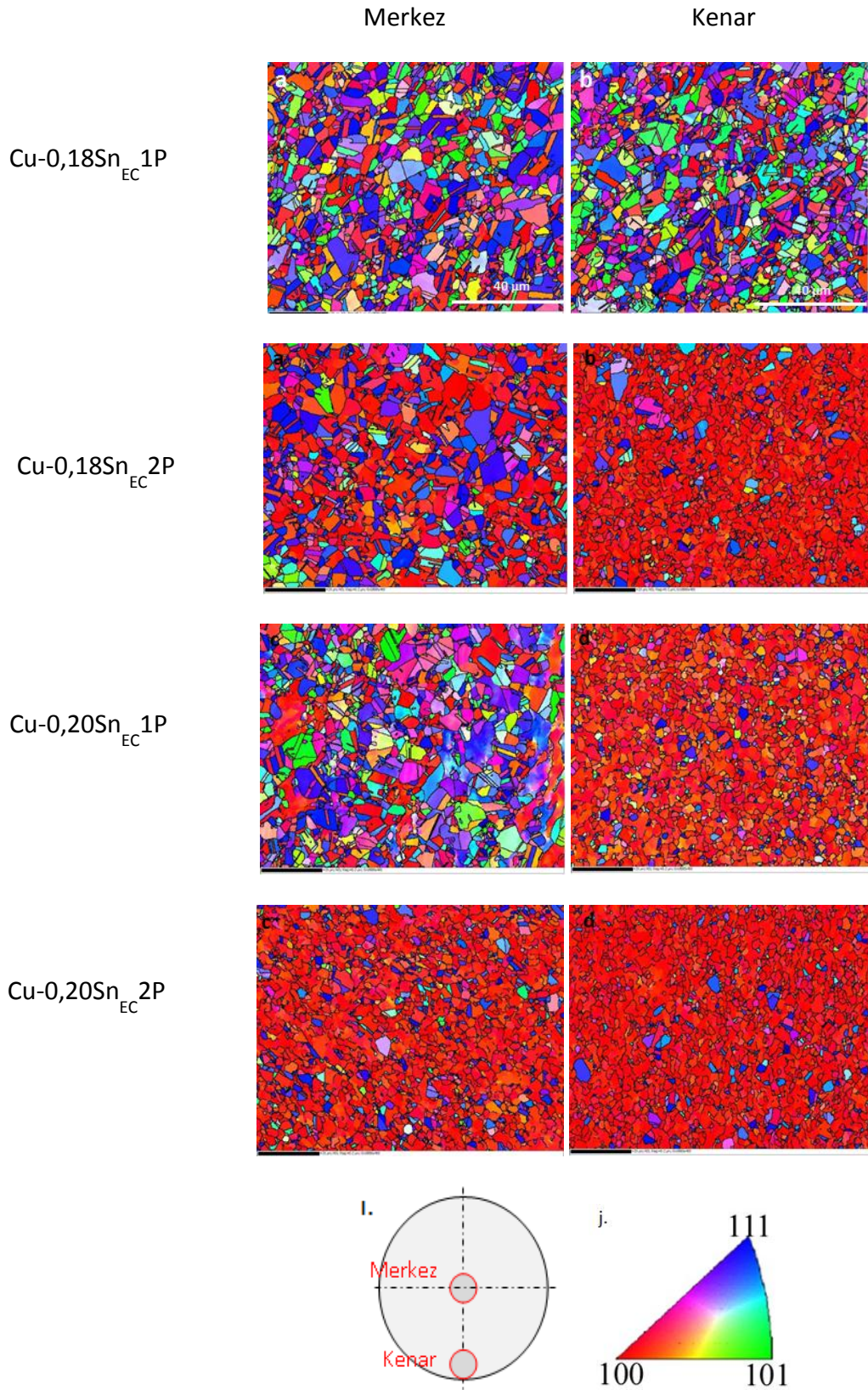
Optik mikroskop ile yapılan analizi sonrası elde edilen makro görüntüleri kullanılarak Image J Photo Analysis programı kullanılarak numunelerin tane boyutları hesaplanmıştır. Cu-0,18Sn_C numunesinin tane boyutu; 4,3 mm ve Cu-0,20Sn_C numunesinin tane boyutu; 7,07 mm olarak hesaplanmıştır. Cu-0,20Sn_C numunesinin tane boyutunun daha yüksek olduğu anlaşılmış ve alaşım içerisinde bulunan kalay (Sn) miktarının tane boyutunu yükseltici bir etkisi olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. 1 Cu-0,18Sn_{EC} için (a) genel, (b) numunenin merkezinden alınan görüntüler; Cu-0,20Sn_{EC} için (c) genel, (d) numunenin merkezinden alınan görüntüler

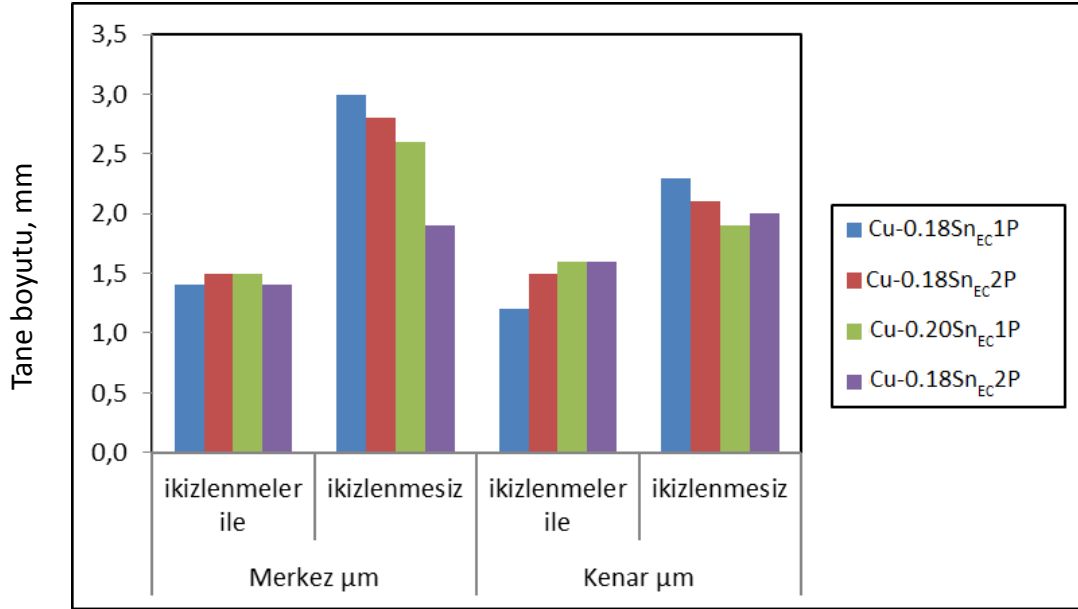
EBSD sonuçlarına bağlı olarak aşağıdaki veriler oluşturulmuştur. Şekil 4.2’de Cu-0,18Sn_{EC} 1P, Cu-0,18Sn_{EC} 2P, Cu-0,20Sn_{EC} 1P ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunelerinin merkez ve kenar bölgelerinden alınan EBSD görüntüleri verilmektedir.

Şekil 4.3’de numunelerin tane boyutlarının merkez ve kenar bölgelerindeki ikizlenme ve ikizlenme oluşumu olmadan olarak dağılımları verilmiştir. Bu grafiğe bağlı olarak Oxford Instruments HKL Kanal 5 yazılım paketi kullanılarak numunelerin tane boyutları hesaplanmış; ikizlenme oluşumu olarak en küçük tane boyutu Cu-0,18Sn_{EC}1P numunesinin kenar bölgesinden alınan görüntü sonucu elde edilmiş olup, tane boyutu 1,2 μm olarak elde edilmiştir. İkizlenme oluşumu olmadan ise en küçük tane boyutu Cu-0,20Sn_{EC}1P numunesinin kenar bölgesinden alınan görüntü sonucuna göre 1,9 μm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4. 2 Cu-0,18Sn_{EC} 1P, Cu-0,18Sn_{EC} 2P, Cu-0,20Sn_{EC} 1P ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunelerinin merkez ve kenar bölgelerinden alınan EBSD görüntüleri, numune üzerinden görüntü alma noktaları ve kristallerin kafes düzlemlerinin dağılım haritası

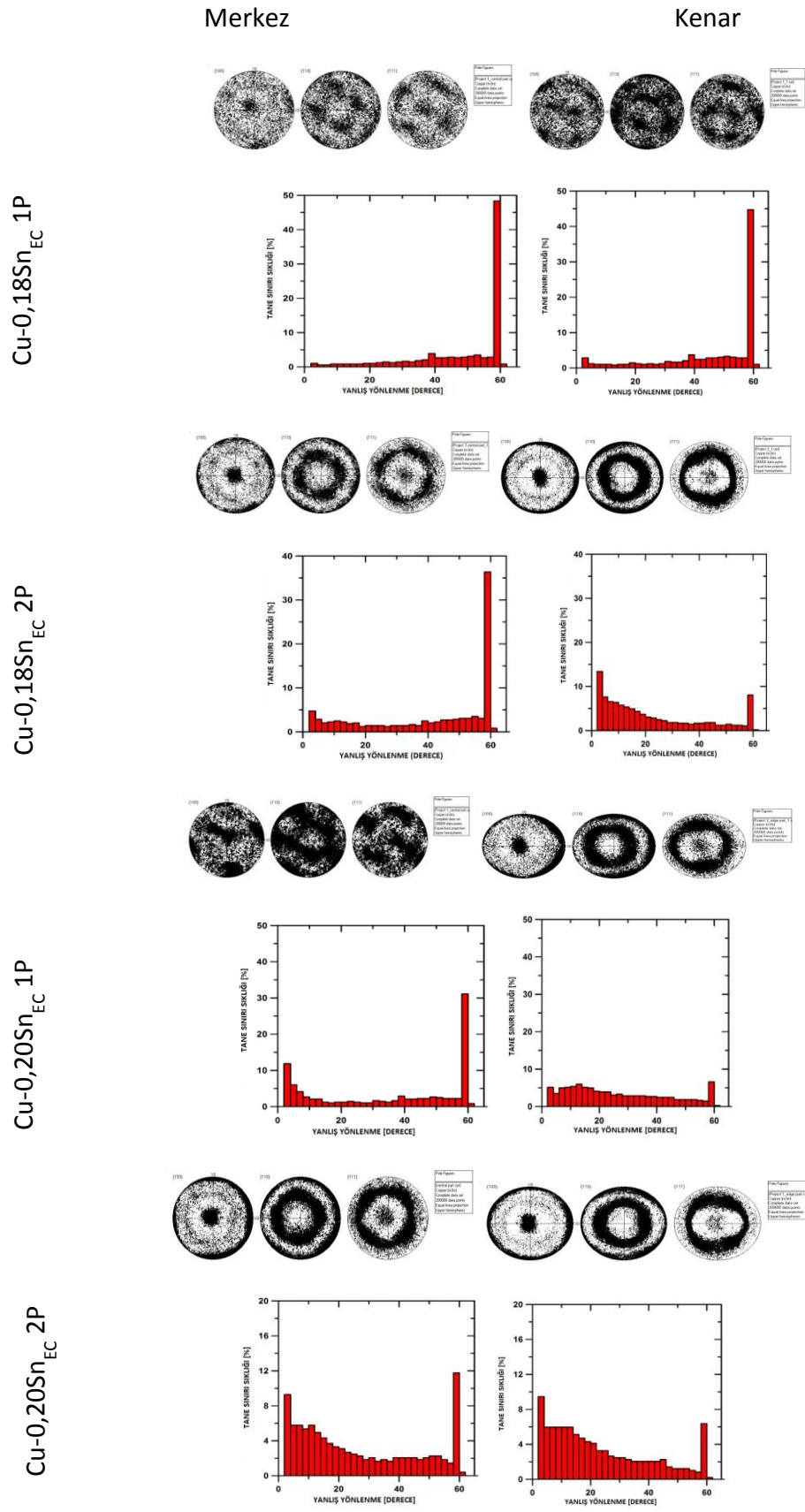
Şekil 4.3'e göre; 1 EKAP-Konform pasosu sonrası tanelerin boyutlarının daha küçük olduğu, 2 EKAP-Konform pasosu sonrası ise daha büyük boyutta olduğu görülmüştür. Buna; EKAP-Konform prosesi sırasında sıcaklık etken olmuştur. Ayrıca artan EKAP-Konform paso sayısı ile birlikte tanelerin kristallerin kafes düzlemlerinin [100] yönüne yönelmekte olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 3 Tane boyutunun numunelerin merkez ve kenar bölgelerine göre ikiz oluşma durumlarına bağlı olarak dağılımları

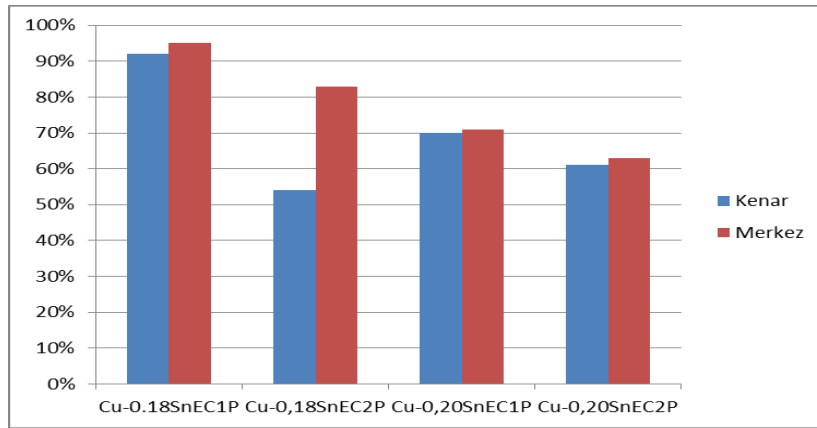
[100] kafes düzleminin birleşik dinamik geri kazanım ve tekrar kristallendirme işlemi sonucunda elde edildiği gösterilmiştir. Gerber ve ark.[33], deforme olmuş durumda geri kazanılmış ve / veya yeniden kristalize edilmiş [100] kafes düzleminin hacim oranının en yüksek gerilim seviyesi için arttığını varsaymışlardır[33].

Tel çekme dokusu yeniden kristalleşme sırasında majör olarak kristallerin kafes düzlemlerinin [100] yönüne yönelmekte olan tane yapısına dönüşmektedir. Deformasyon sırasında, kristal kafes düzlemlerinin [100] yönüne yönelmekte olan taneler dinamik olarak toparlanmaktadır. Bu koşullarda, kristal kafes düzlemlerinin [100] yönüne yönelmesine sahip taneler ve matris arasındaki EBSD ölçümlerinde depolanmış enerji farkı genişlemektedir. Sonuç olarak, gerilme uygulanmış malzemede bulunan küçük kristal kafes düzlemlerinin [100] yönüne yönelmesine sahip tanelerin yeniden kristalleştirme işlemi sırasında oranları artmaktadır. Yeniden kristalleşme sırasında, ikizlenme yapısı, doku gelişimini etkileyen önemli bir mekanizmadır [33].

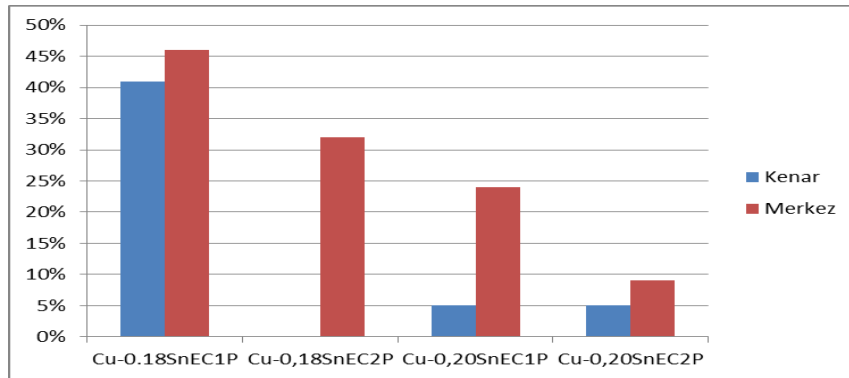


Şekil 4. 4 Tane sınırlarının yönlenmelere bağlı dağılımları ve numune üzerindeki tane yönlenmelerinin dağılımı

Kaba taneli metaller için, dislokasyon hareketi ve ikizlenme ilk gerçekleşecek deformasyon mekanizmalarıdır. Yüksek açılı tane sınırlarına sahip ultra ince taneler dislokasyonların hareketini engeller ve sonuç olarak dayanımı arttırırlar[34,35]. Şekil 4.3'te verilen grafikte numunelerin yüksek açılı tane sınırları oranı yüksektir ve bu durum numunelerde dislokasyonları sıkıştırarak numunelerin dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca yüksek açılı tane sınırlarının oluşması mikroyapının daha homojen olarak dağılmasını sağlamaktadır. Şekil 4.4'teki tüm grafiklerde görüldüğü gibi 60 derecede yanlış yönlenme oranı çok artmaktadır.



a.

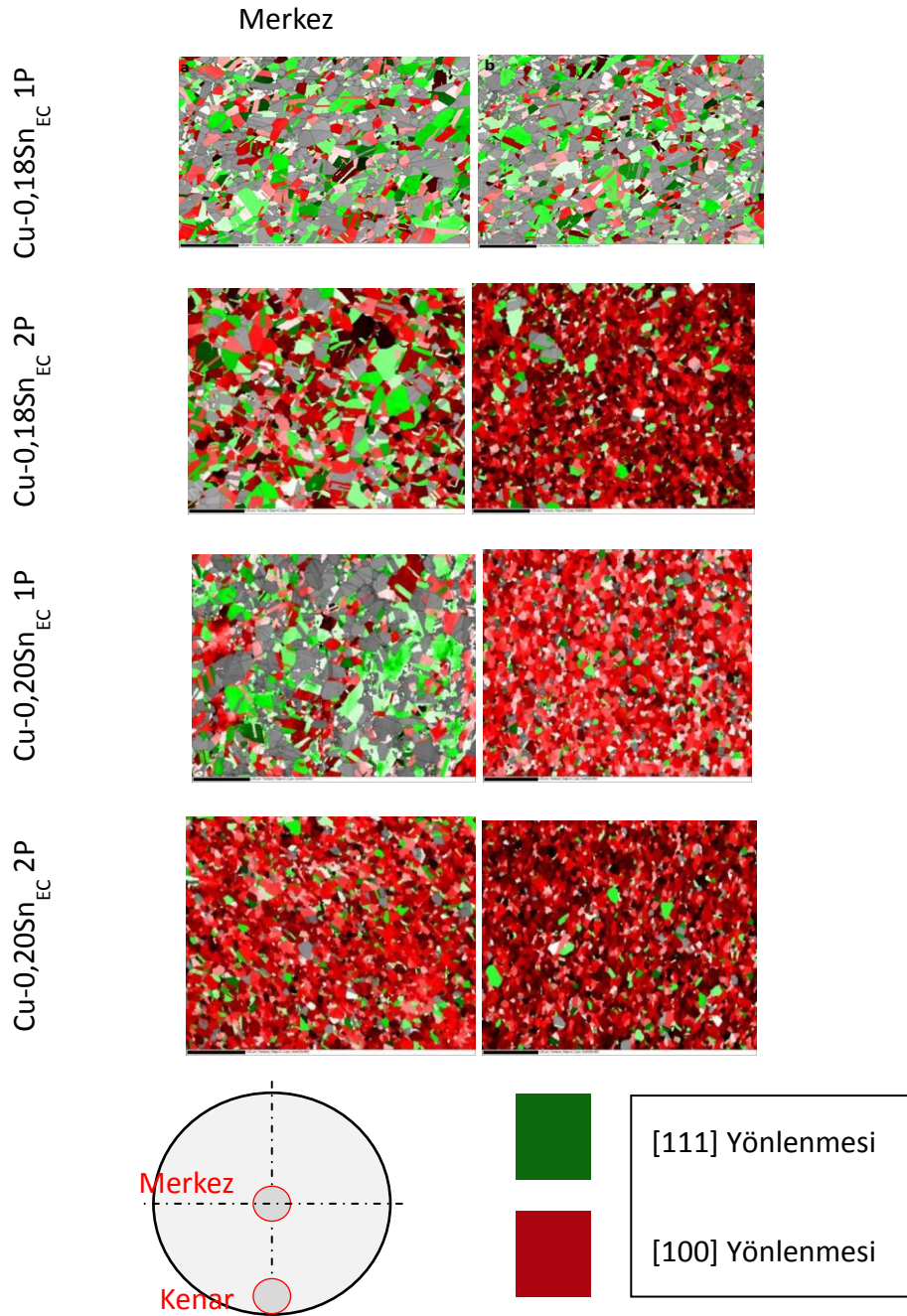


b.

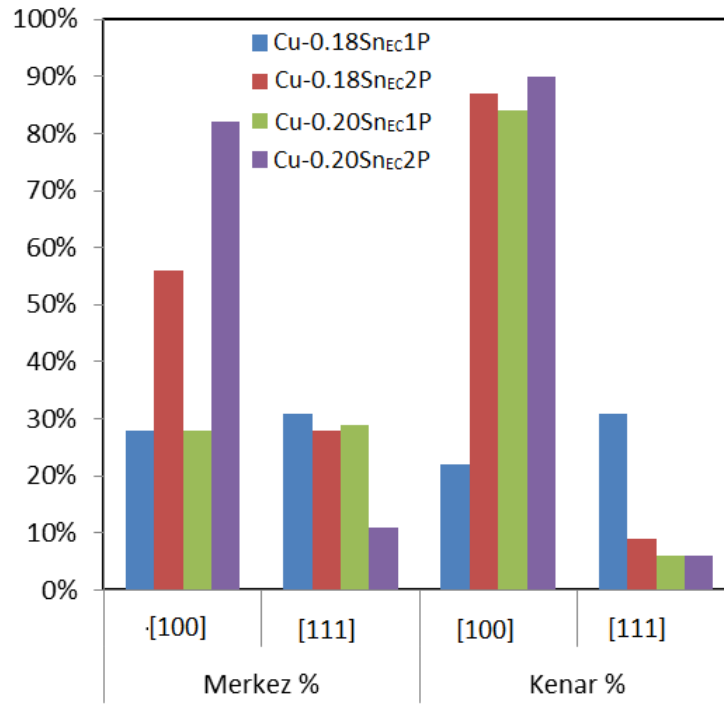
Şekil 4. 5 Cu-0,18Sn_{EC}1P, Cu-0,18Sn_{EC}2P, Cu-0,20Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunelerinin a). yüksek açılı tane sınırı dağılımları, b). ikizlenme oranları

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de 20 ° sapma ile EBSD haritalarına göre oluşturulan grafikte paso sayısı artıkcı kafes düzlemlerinin [100] yönünde yönlenmesi artmaktadır, fakat numunelerin kenar bölgelerinden alınan görüntülerde bu oran daha yüksektir. Cu-0,20Sn_{EC}2P numunesi merkezde ve kenar bölgesinde en çok kristal kafes düzlemlerinin

[100] yönünde yönlenme oranına sahip numunedir. Bu yönlenme oranına çok yakın değerde olan diğer numune ise Cu-0,18Sn_{EC}2P numunesidir. Buna göre Cu-0,20Sn_{EC}2P numunesi merkezde; %82, kenarda %90 kristallerin kafes düzlemlerinin [100] yönünde dağılımına sahipken Cu-0,18Sn_{EC}2P numunesi merkezden alınan görüntüde; %56 ve kenardan alınan görüntüde; % 87 kristal kafes düzlemlerinin [100] yönünde dağılımına sahiptir.



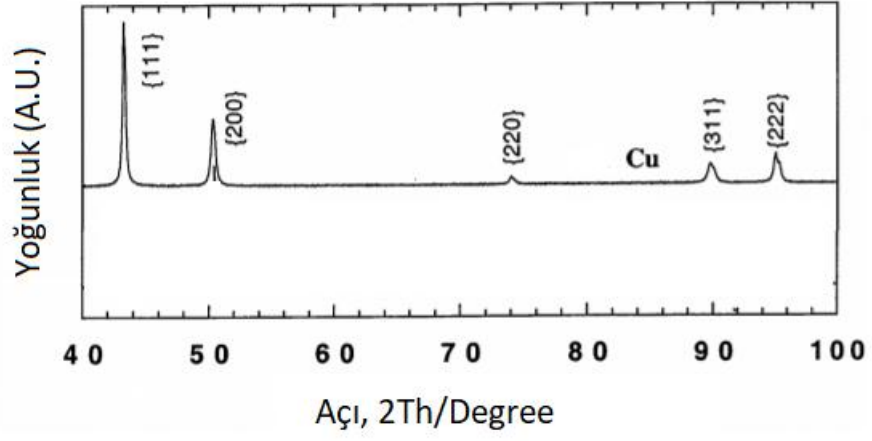
Şekil 4. 6 [100] ve [111] yönlenmelerine göre Cu-0,18Sn_{EC}1P, Cu-0,18Sn_{EC}2P, Cu-0,20Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunelerinin 20 ° sapma ile EBSD haritaları ve alan dağılımları



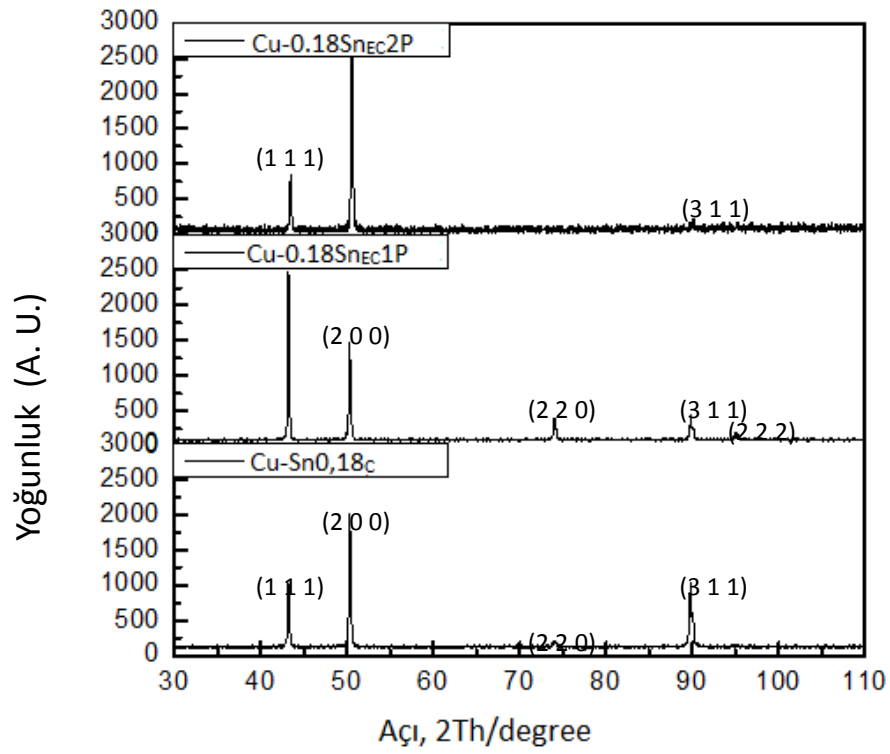
Şekil 4. 7 Cu-0,18Sn_{EC}1P, Cu-0,18Sn_{EC}2P, Cu-0,20Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunelerinin merkez ve kenar bölgelerine göre [100] ve [111] yönlenmelerine bağlı olarak % kristal kafes düzlemlerinin dağılımları

Şekil 4.8’de saf bakırın XRD grafiği verilmiştir [36]. Bu grafik referans olarak alınarak Şekil 4.9’de bulunan Cu-Sn_{0,18C}, Cu-0,18Sn_{EC}1P ve Cu-0,18Sn_{EC}2P numunelerine ait XRD grafikleri ve Şekil 4.10’da bulunan Cu-Sn_{0,20C}, Cu-0,20Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunelerine ait XRD grafikleri yorumlanmıştır.

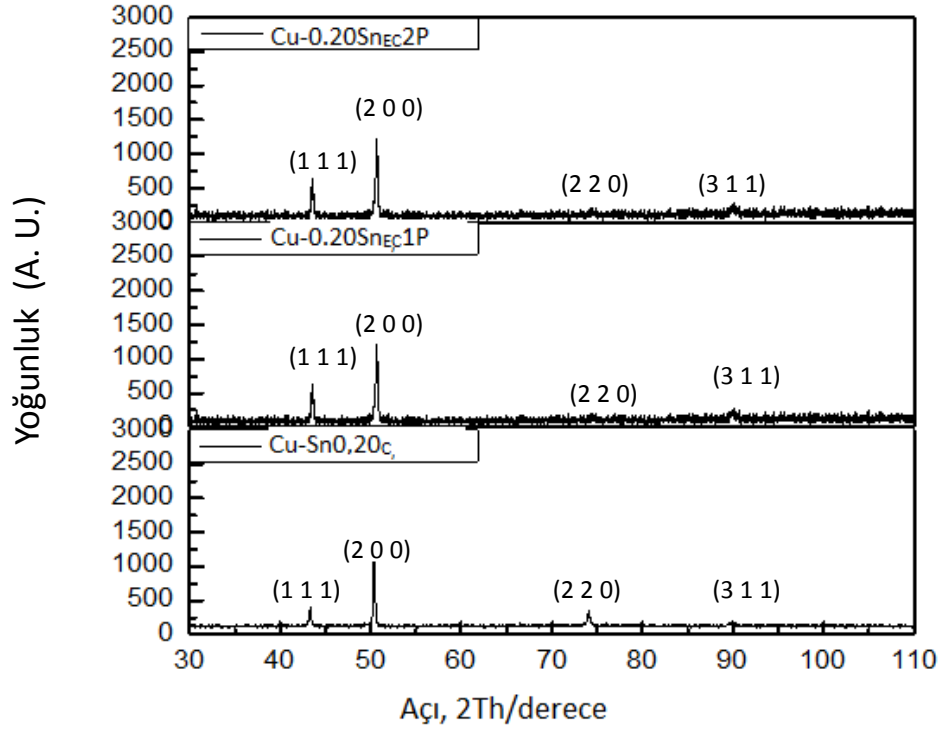
XRD sonuçlarına göre numuneler {111}, {200}, {220}, {311}, {222} ‘de pik vermiştir. Referans olarak alınan saf bakırın XRD grafiği ile numunelerin XRD sonuçları karşılaştırıldığında herhangi bir faz değişiminin olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4. 8 Saf bakırın XRD grafiği [36]



Şekil 4. 9 Cu-Sn_{0,18C}, Cu-0,18Sn_{EC}1P ve Cu-0,18Sn_{EC}2P numunelerinin XRD grafikleri

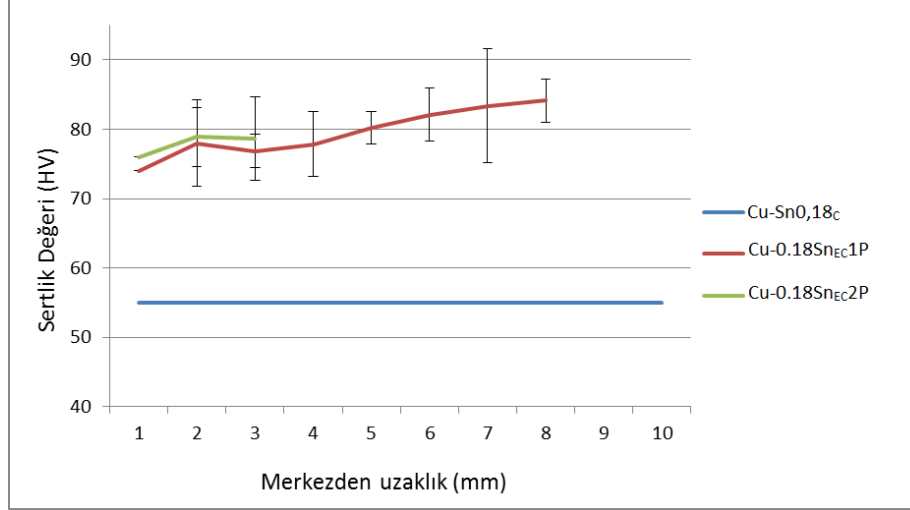


Şekil 4. 10 Cu-Sn0,20_c, Cu-0,20Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunelerinin XRD grafikleri

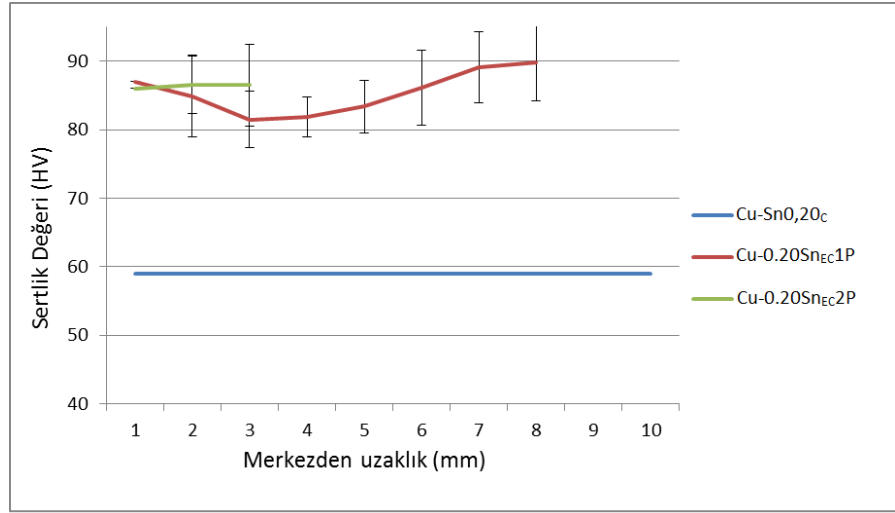
4.2 Mekanik Deney Sonuçları

4.2.1 Sertlik Deneyi Sonuçları

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'deki grafiklerde numunelerin sertlik dağılımları verilmiştir. EKAP-Konform prosesi uygulanmayan numuneler en düşük sertlik değerlerine sahip numunelerdir. EKAP-Konform prosesi ile küçülen tane boyutlarının etkisi olarak sertlik değerleri de artmaktadır. Sertlik değerleri en yüksek olan numuneler ise 1 EKAP-Konform pasosu sonrası numunelere aittir. 2 paso sonrası numunelerin tane boyutları bir miktar arttığı için sertlik değerleri de 1 pasoya göre düşüş göstermektedir.



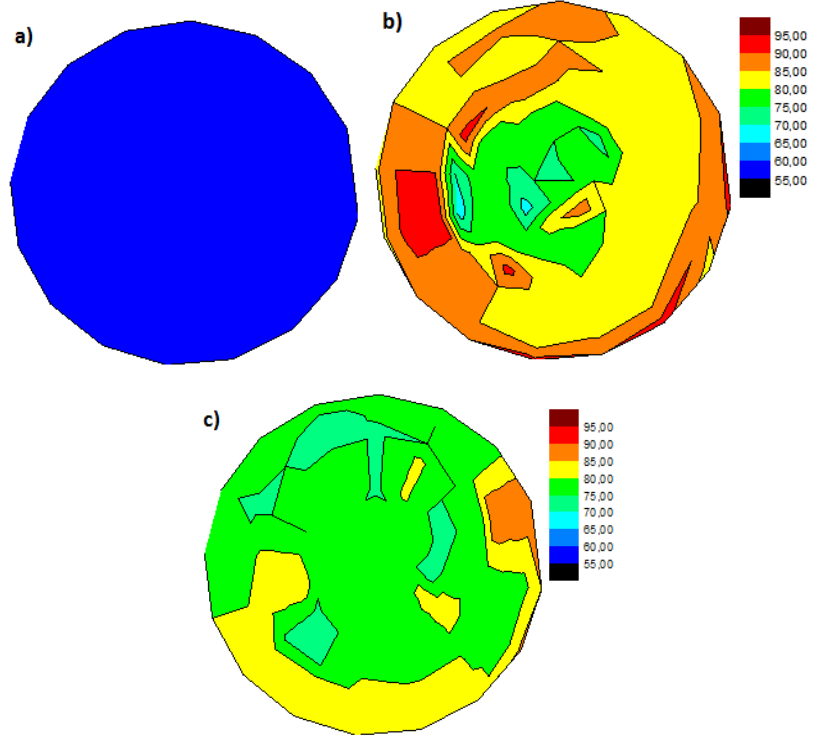
Şekil 4. 11 Cu-Sn0,18_c, Cu-0,18Sn_{EC}1P ve Cu-0,18Sn_{EC}2P numunelerine ait sertlik dağılım grafiği



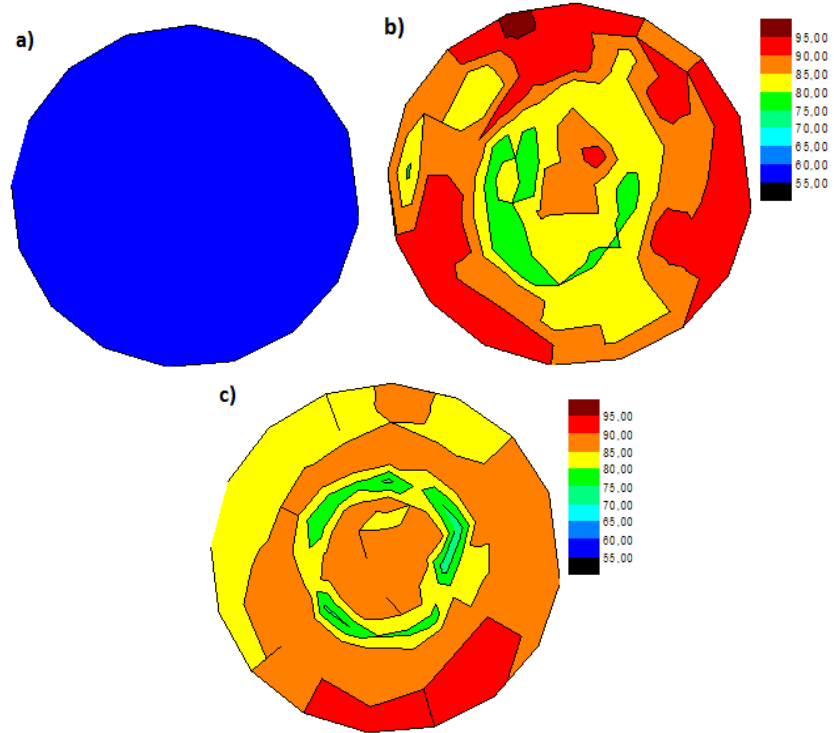
Şekil 4. 12 Cu-Sn0,20_c, Cu-0,20Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunelerine ait sertlik dağılım değerleri

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te numunelerin sertlik dağılım haritaları verilmiştir, numunelerin kenar bölgelerinin sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Merkez bölgeler daha düşük sertlik değerlerine sahiptir. EKAP-Konform işlemi sırasında sıyrılma işlemi gerçekleştiği için kenar bölgelerin sertleşmiş olduğu düşünülmektedir.

Cu-0,18Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}1P numuneleri en yüksek sertlik değerlerine sahip numunelerdir. En yüksek sertlik değeri Cu-0,18Sn_{EC}1P numunesidir. Bu duruma alaşımdaki Sn oranının artmasının tane boyutunu artırması ve sertlik değerini düşürmesinin neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. 13 a. Cu-0,18Sn_C, b. Cu-0,18Sn_{EC} 1P, c. Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunelerine ait sertlik değerlerinin renkli harita üzerinde dağılımları



Şekil 4. 14 a. Cu-0,20Sn_C, b. Cu-0,20Sn_{EC} 1P, c. Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunelerine ait sertlik değerlerinin renkli harita üzerinde dağılımları

4.2.2 Çekme Deneyi Sonuçları

Numunelere ait çekme dayanım ve % uzama değerleri ERBAKIR A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilen deney sonuçlarından alınmıştır.

Çizelge 4. 1 Numunelerin çekme dayanımları ve % uzama değerleri

Numuneler	Çekme Dayanımı(N/mm ²)	Uzama (%)
Cu-0,18Sn _C	187,96	52,3
Cu-0,18Sn _{EC} 1P	241	28
Cu-0,18Sn _{EC} 2P	213,3	35
Cu-0,20Sn _C	187,2	50,20
Cu-0,20Sn _{EC} 1P	235,4	30,3
Cu-0,20Sn _{EC} 2P	211,5	40

Çizelge 4.1’de numunelerin çekme dayanımları ve % uzama değerleri verilmiştir. Çizelgedeki verilere göre en iyi çekme dayanımı Cu-0,18Sn_{EC}1P numunesinde görülmektedir. Sertlik ve tane boyutlarına paralel olarak en yüksek çekme dayanımları 1 paso sonrasına ait numunelerde görülmektedir. En düşük çekme dayanımları ise döküm numunelerine ait olup, en yüksek %uzama değerleri ise çekme dayanımlarının tam tersine yine döküm numunelerinde görülmüştür. En düşük % uzama oranı ise 1 paso sonrası numuneler aittir.

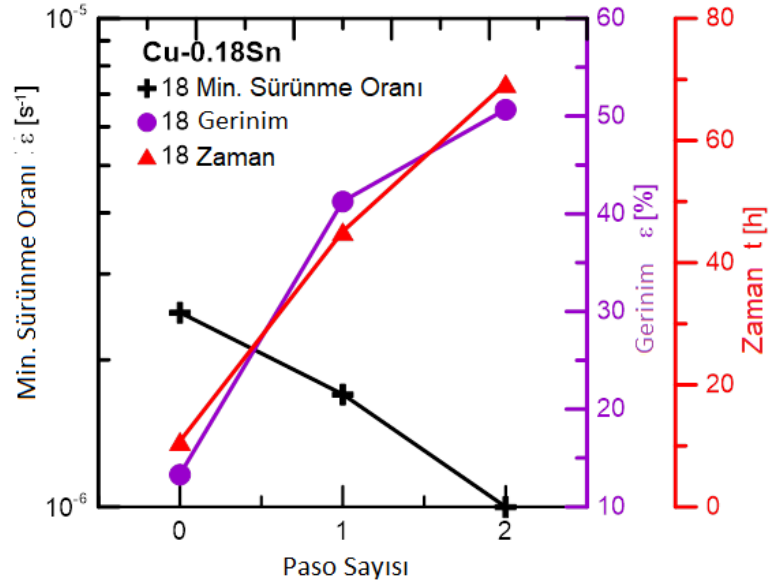
4.2.3 Sürünme Deneyi Sonuçları

Numunelerin sürünme deneyi sonucu numunelerin kırılma görüntüleri Şekil 4.15’te gösterilmiştir.

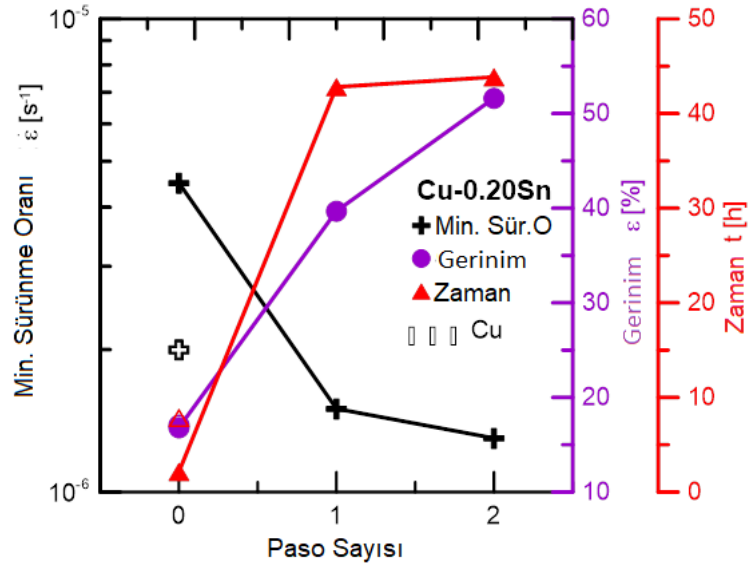


Şekil 4. 15 Sürünme deneyi sonrası kırılan numuneler

Şekil 4.16; Cu-0,18Sn_C, Cu-0,18Sn_{EC} 1P, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunelerinin 573 K sıcaklığındaki sürünme davranışlarını, Şekil 4.17 ise Cu-0,20Sn_C, Cu-0,20Sn_{EC} 1P, Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunelerinin 100 MPa altında 573 K sıcaklığındaki sürünme davranışlarını grafik olarak göstermektedir. Numuneler 100 MPa gerilme değerinde sürünme deneyine tabii tutulmuştur. Paso sayısı arttıkça minimum sürünme oranı azalmakta, gerilme oranı artmakta ve malzemenin kırılma süreleri artmaktadır.



Şekil 4. 16 Cu-0,18Sn_C, Cu-0,18Sn_{EC} 1P, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunelerinin 100 MPa altında 573 °K sıcaklığındaki sürünme davranışları

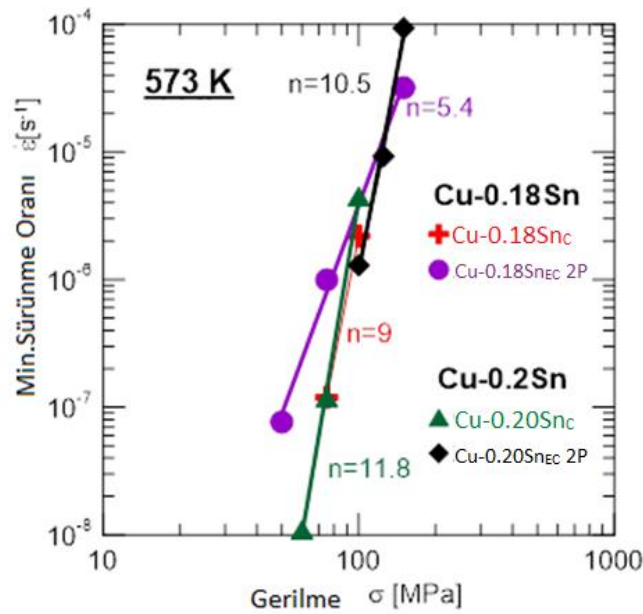


Şekil 4. 17 Cu-0,20Sn_C, Cu-0,20Sn_{EC} 1P, Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunelerinin 100 MPa altında 573 °K sıcaklığındaki sürünme davranışları

Şekil 4.18’de EKAP-Konform uygulanmış ve uygulanmamış numuneler için eğim ve dolayısıyla görünür gerilme üssü değeri(n)’in arttırdığı sürünme değerleri yakın olup sürünme içindeki deformasyon ve kırılma işlemlerinin benzer mekanizma tarafından kontrol edildiğini gösterir.

Malzemeler için gerilme üssü n’in değerleri, kaymayı ve dislokasyon tırmanışını içeren taneler arası bir dislokasyon işlemi ile ilişkilendirmek mümkündür. Bununla birlikte, gerilme üssünün n’nin başlangıç numunesi ile karşılaştırıldığında değerinin düşmesi, tane sınırında kayma, kavitasyon ve daha yoğun difüzyon işlemleri olarak ek sürünme mekanizmalarının sinerjik etkisinden kaynaklanabilmektedir. 1 veya 2 EKAP-Konform geçişinden sonra gerilme üssü n’in azalması muhtemelen tane sınırlarının yüksek oranda etkisinin bir sonucudur.

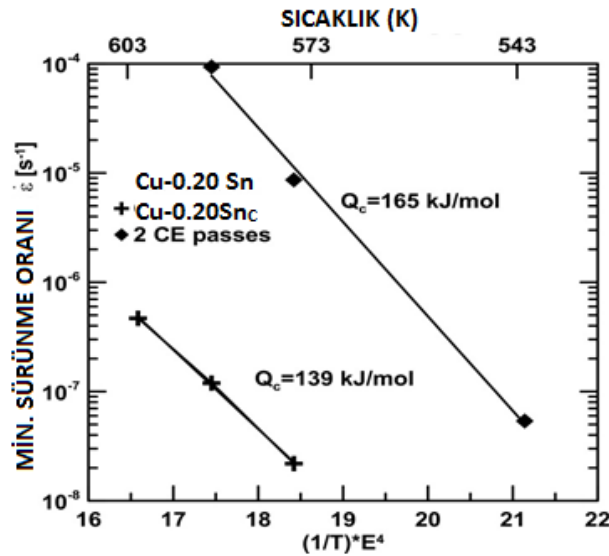
Sürünme için aktivasyon enerjisi Q, kafes difüzyon (ΔH_{SD})’nin aktivasyon entalpisinin değeri ile aynı olmalıdır ($\Delta H_{SD} \cong 140 - 196 \text{ kJ / mol}$ bakır için) [9].



Şekil 4. 18 Numunelerin başlangıç ve 2 EKAP-Konform geçişi sonrası sürünme davranışları

Şekil 4.19’da grafiği verilen sürünme deneyinde 75 MPa gerilme değerinde yapılan deneyte Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesi için 270-300-330 °C’de yapılan deney sonucu aktivasyon enerjisi, Q, 139 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Yine 75 MPa sabit yük altında

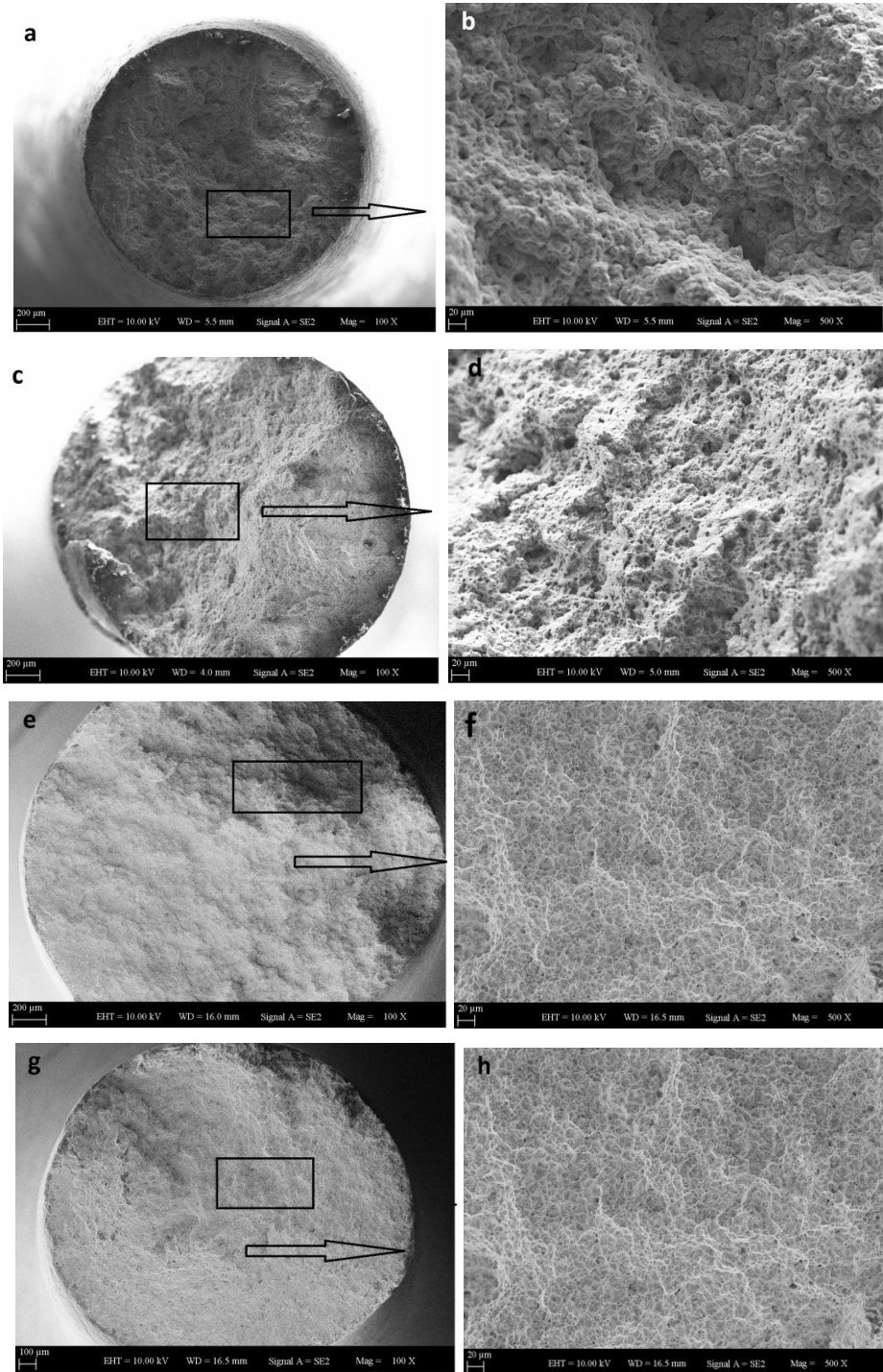
gerçekleşen deneyte Cu-0,20Sn_C numunesi için yapılan 200, 270 ve 300 °C'deki deneyler sonucu elde edilen aktivasyon enerjisi ise, Q_c , 165 kJ/mol'dür.



Şekil 4. 19 Aktivasyon Enerjisi Grafiği

Şekil 4.20'de numunelerin kırılma yüzeyleri verilmiştir, 573 K'de 100 MPa değerinde elde edilen sürünme deneyi sonucu (a-b)Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesi gevrek bir kırılma yüzeyine sahiptir. (c-d). Cu-0,18Sn_{EC}2P, (e-f). Cu-0,20Sn_{EC}1P ve (g-h). Cu-0,18Sn_{EC}1P numunelerinde de aynı şekilde gevrek kırılma görülmüştür. Kırılma yüzeyleri görüntüleri 500x büyütme de alınmıştır.

Sürünme sonrası kırılan yüzeyler küçük küresel ve daha büyük boşlukların bulunabileceğini göstermiştir. Divinsky ve ark. [37,38] UİT malzemelerin belirli doğrultular boyunca çok hızlı yayılmış olduğunu ortaya çıkarmışlardır. EKAP'ın UİT malzemelerde denge dışı arayüzler, boşluk kümeleri, nanovoidler ve mikro gözenekler şeklinde ilave serbest hacim sağlayabildiğini göstermişlerdir. Bu kusurlar ultra hızlı atomik taşınma için yeni yollar sağlamıştır. Çekirdeklenmenin ve küçük küresel oyukların büyümesinin difüzyon mekanizması tarafından etkilenebileceği de öngörmüşlerdir [37,38].



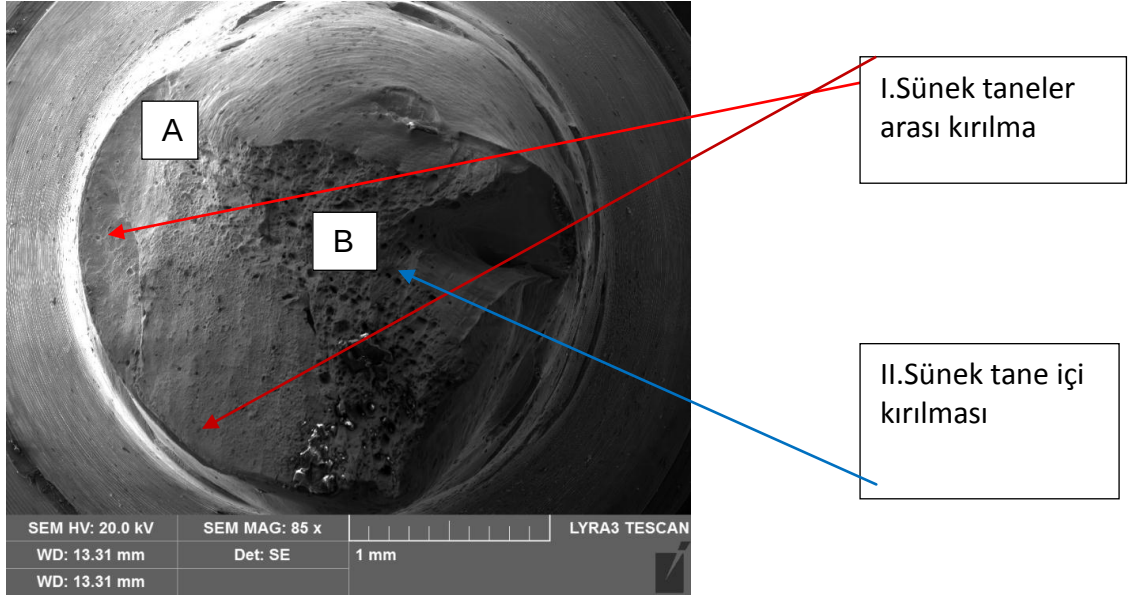
Şekil 4. 20 (a-b). Cu-0,20Sn_{EC} 2P, (c-d). Cu-0,18Sn_{EC} 2P, (e-f). Cu-0,20Sn_{EC} 1P, (g-h). Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunelerinin kırılma yüzeyleri

Azalan EKAP-Konform pasosu ile numune yüzeylerinde görülen gözeneklerin boyutları küçülmüş ve gözenek sayısı artmıştır. Süneklik ise azalmıştır. Genel görüntü daha homojen bir hal almıştır. Daha yüksek EKAP-Konform pasolarının görüntülerinde gözeneklerin çukurları daha geniş görülmektedir. Bunu tane boyutu ile ilişkilendirmek mümkündür.

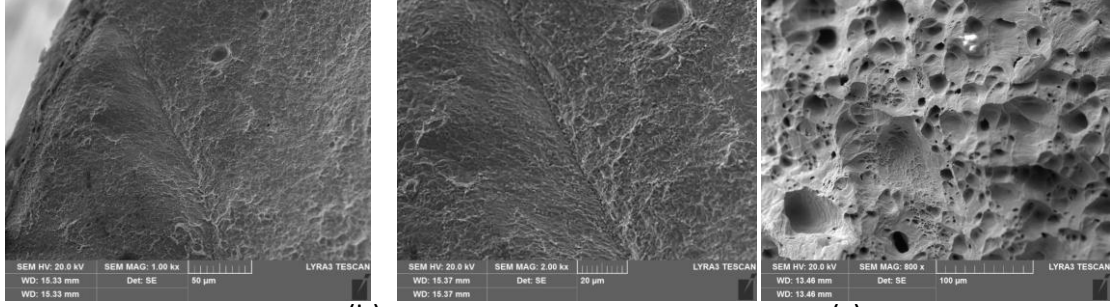
Şekil 4.21’de Cu-0,18Sn_C numunesinin sürünme sonrası kırılma yüzeylerini göstermektedir. Kırılma; sürünme davranışı sırasındaki kavite oluşumundan etkilenmiştir. A bölgesinde kırılma yüzeyinde (kavitasyon) tane sınırlarını takip ettiği görülebilmektedir. B bölgesindeki sürünme kırılma yüzeyi; gözenekler üzerinde çok sayıda küresel çukur bulunan karakteristik sünek tane içlerinde meydana gelen kırılmalardır.

Sürünme deneylerinin sabit bir gerilme uygulanarak değil sabit uygulanan bir yük ile yapıldığı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durum, numunenin kesiti azaldıkça sürünme sırasında gerilimin arttığı anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, sabit yükten gelen minimum sürünme oranlarının değerlerinin kırılmadan etkilendiği ve sabit değerler olamayabileceği demektir. EKAP-Konform uygulanmayan numunelerin sürünme direnci üzerindeki kırılmanın (kavitasyonun) etkisini ortadan kaldırmak için, sürünme deneylerinin sabit gerilme altında yapılması daha uygun olabilir.

EKAP-Konform uygulanmayan numunelerin durumu için sürünme eğrilerinden (gerilme hızı - zaman ve gerilme hızı - gerilme - gerilme oranı) çok kısa bir birincil aşamaya sahiptir ve sabit aşama pratikte bir eğilme noktasına getirilir ve sabit (ikincil) aşamayı çok kısa bir sürede üçüncü bir aşama izlemektedir. Üçüncü aşama genellikle kırılma nedeniyle sürünmenin hızlanması ile bağlantılıdır. Ancak sabit yükte gerilme sadece kırılma nedeniyle değil aynı zamanda enine kesitin azalması nedeniyle de artmaktadır. Üçüncü sürünme aşamasında kırılma veya gerilme artışının baskın olup olmadığını belirlemek için, üçüncü sürünme hızının gerilmeye olan bağımlılığını sabit gerilme altında sürünme deneyleri ile karşılaştırılabilirler.



(a)



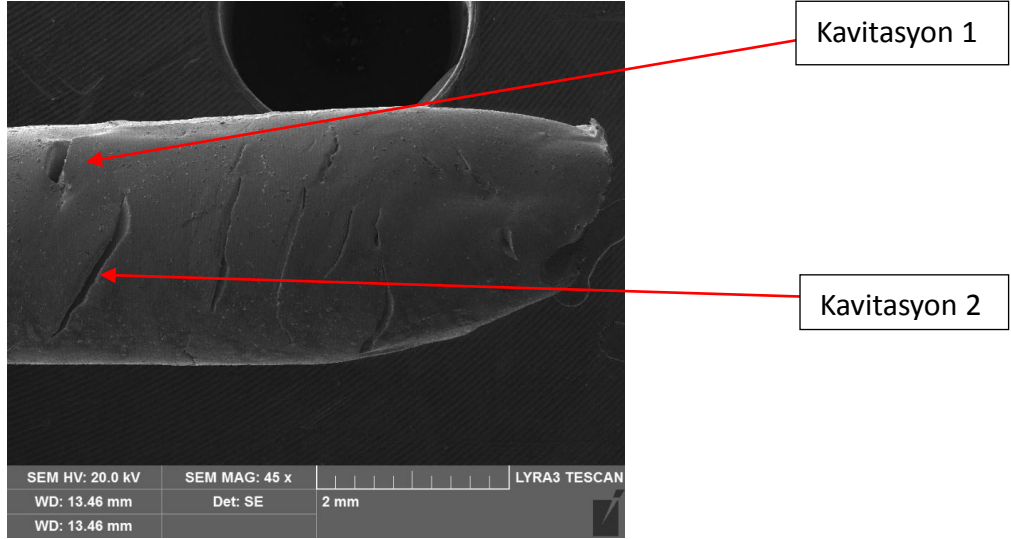
(b)

(c)

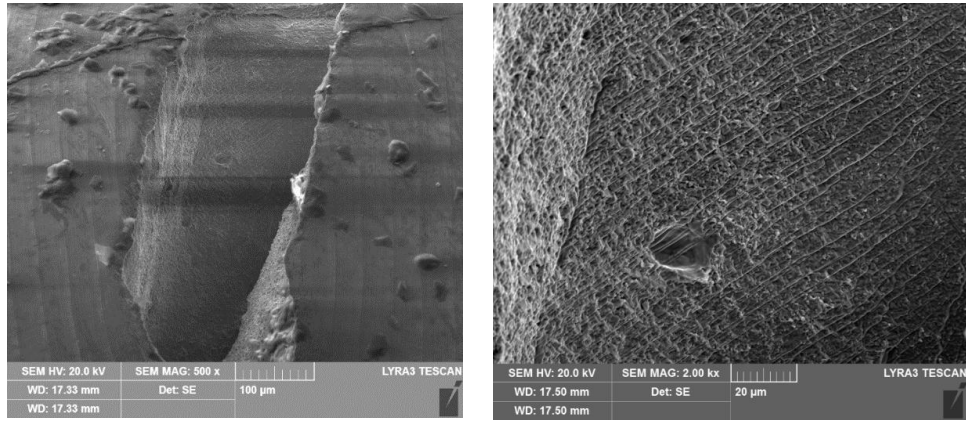
Şekil 4. 21 (a)Cu-0,18Sn_C numunesinin sürünme sonrası kırılma yüzeyi, (b) A bölgesinin büyütülmüş görüntüleri, (c) B bölgesinin büyütülmüş görüntüsü

Cu-0,18Sn ve Cu-0,20Sn arasındaki sürünme deneyi sonuç farklılıklarına kavitasyonlar neden olabilir. Daha fazla alaşım elementi oranına sahip olan Cu-0,20Sn'nin tane sınırlarında segregasyonlar oluşabilir ve böylece kavitasyona Cu-0,18Sn'den daha duyarlı olduğunu söylenebilir. Ayrıca, Cu-0,20Sn orta kısımda Cu-0,18Sn'den biraz daha küçük bir tane boyutu göstermesi tane boyutunun bir etkisi olabilir; yani ikizleri saymadan tane boyutu kolay deforme olmasına neden olabilir.

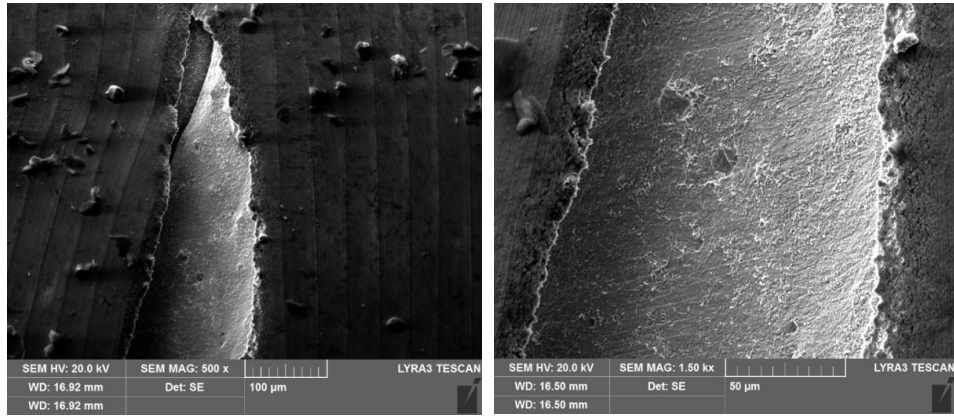
Şekil 4.22'de verilen görüntülerde sürünme sırasında uygulanan gerilim yönüne dik yönde çatlakların oluştuğu görülmektedir.



(a)



(b)

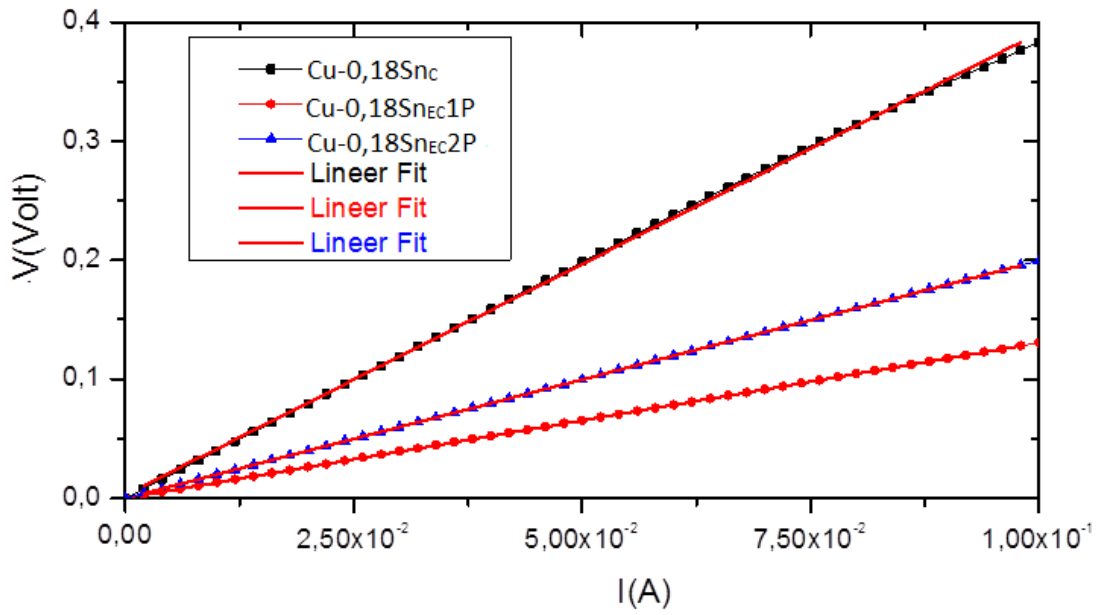


(c)

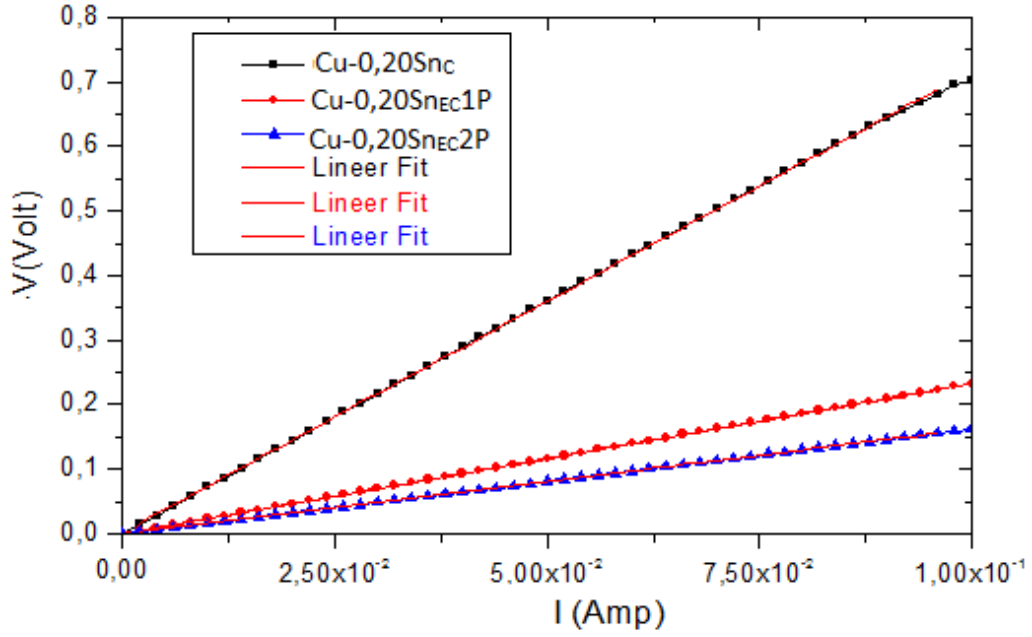
Şekil 4. 22 (a) Uygulanan gerilime dik sınırlar boyunca ağırlıklı olarak yayılan boşlukların oluşumu, (b) Kavitasyon 1'in görüntüleri, (c) Kavitasyon 2'in görüntüleri

4.3 Elektriksel Özellikler

Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 'de numunelerin 4 prop yöntemi sonucu ölçülen uygulanan Amper değerleri sonucu elde edilen Volt (DC) değerleri verilmektedir. Grafiğin eğimi ile propların alanlarının çarpımı ise direnç (R_s) değerlerini vermektedir. $1/R_s$ ise iletkenlik değerini Siemens.square cinsinden vermektedir. Kullanılan yöntem yüzeyin elektriksel özellikler değerlerini vermesi nedeniyle hacmin elektriksel iletkenliğini belirlemek için bulunan değerler düzeltme faktörü olan 4,532 değeri ile çarpılmıştır.



Şekil 4. 23 Cu-0,18Sn_C, Cu-0,18Sn_{EC1P} ve Cu-0,18Sn_{EC2P} numunelerinin 4 prop yönteminden elde edilen V/I grafiği



Şekil 4. 24 Cu-0,20Sn_C, Cu-0,20Sn_{EC1P} ve Cu-0,20Sn_{EC2P} numunelerinin 4 prop yönteminden elde edilen V/I grafiği

Bu veriler doğrultusunda Cu-0,18Sn_C numunesinin en düşük elektriksel iletkenliğe sahip olduğu görülmektedir. Cu-0,18Sn_{EC1P} numunesi ise en yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir, artan EKAP-Konform pasosu ile Cu-0,18Sn_{EC2P} numunesinde bir miktar elektriksel iletkenlikte düşme meydana gelmiştir.

Cu-0,20Sn numuneleri açısından veriler incelendiğinde ise EKAP-Konform uygulanan numunelerin elektriksel iletkenlik değerinde yükselme olduğu ve artan EKAP-Konform prosesi ile numunelerin elektriksel iletkenlik değerinin arttığı görülmüştür. Artan Sn miktarı noktasal hataların artması neden olması ile elektriksel iletkenlik bir miktar azalmıştır. Ayrıca, çözünen atomların neden olduğu noktasal hataların, yer değiştirme hareketi ve dolaşma olasılığını arttırmaktadır [39]. Bu veriler genel olarak değerlendirilmek istendiğinde en yüksek elektriksel iletkenliğin mikroyapı ile paralel olarak ilerlemiş ve en küçük tane boyutuna sahip olan Cu-0,18Sn_{EC1P} numunesinde olduğu görülmüştür. İkizlenme arttıkça, toplam tane sınırı enerjisi ve tane sınırı kusurları azalmaktadır [40], ve böylelikle elektriksel direnç azalmaktadır. Cu-0,20Sn alaşımı için 1 paso ve 2 paso sonrası artan ikizlenme oranları ile elektriksel iletkenlik artmıştır. Cu-0,18Sn_{EC2P} numunesi için ise elektriksel iletkenlik değerinde düşme meydana gelmiştir, bunun nedeni ise yapıda bulunan ikizlenme oranında düşme

olmasından kaynaklanmaktadır. Numunelerin direnç ve iletkenlik değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Numunelerin iletkenlik sonuçları

Numuneler	Grafiğin Eğimi(V/I)	Rs(Ohm/square)	İletkenlik(Siemens.square)
Cu-0,18Sn _C	3,8802	17,5856	0,05687
Cu-0,18Sn _{EC} 1P	1,30458	5,91237	0,16914
Cu-0,18Sn _{EC} 2P	1,9942	9,03771	0,11065
Cu-0,20Sn _C	7,14961	32,40201	0,03086
Cu-0,20Sn _{EC} 1P	2,3253	10,53825	0,09489
Cu-0,20Sn _{EC} 2P	1,62379	7,35677	0,13593

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Aşırı Plastik Deformasyon(ADP) yöntemlerinden EKAP-Konform'un Cu-0,18Sn_C ve Cu-0,20Sn_C numunelerine uygulanması sonucu elde edilen Cu-0,18Sn_{EC}1P, Cu-0,18Sn_{EC}2P, Cu-0,20Sn_{EC}1P ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunelerinin karşılaştırılması amacıyla yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. EKAP-Konform uygulanmadan önce makro görüntüler ile hesaplanmış olan tane boyutları Cu-0,18Sn_C numunesi için 4,3 mm ve Cu-0,20Sn_C numunesi için 7,07 mm dir.
2. İkizlenme yapıları ele alınarak tane boyutları hesaplandığında kenar ve merkez bölgelerden alınan görüntüler sonucu elde edilen ortalama tane boyutları sırasıyla Cu-0,18Sn_{EC}1P numunesi için 1,4 µm, Cu-0,18Sn_{EC}2P numunesi için 1,5 µm, Cu-0,20Sn_{EC}1P numunesi için 1,5 µm ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunesi için 1,4 µm dir. İkizlenme yapıları gözardı edilerek hesaplanan kenar ve merkez bölgelerden alınan görüntülerin tane boyutları ortalaması sonucu ise sırasıyla Cu-0,18Sn_{EC}1P numunesi için 2,7 µm, Cu-0,18Sn_{EC}2P numunesi için 2,5 µm, Cu-0,20Sn_{EC}1P numunesi için 2,2 µm ve Cu-0,20Sn_{EC}2P numunesi için 12,0 µm dir.
3. EKAP-Konform 1. pasodan 2. pasoya geçtiğinde tanelerde büyüme meydana gelmektedir. Bunun nedeni proses sırasında uygulanan sıcaklıktır.
4. EBSD sonuçlarına göre EKAP-Konform pasosu arttıkça numunelerde [100] yönelmesi görülmektedir.

5. 20 ° sapma ile EBSD haritalarına göre oluşturulan grafikte paso sayısı artıkça [100] yönlenmesi artmaktadır, fakat kenarda bu oran daha yüksektir.
6. XRD sonuçlarına göre 111, 200 noktalarında malzemenin pik verdiği görülmüştür.
7. EKAP-Konform öncesi numunelerin sertlikleri Cu-0,18Sn_C numunesi için 55 HV, Cu-0,20Sn_C numunesi için 59 HV değerindedir.
8. EKAP-Konform prosesi sonrası Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesi 80 HV, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunesi 77 HV, Cu-0,20Sn_{EC} 1P numunesi 85 HV ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesi ise 86 HV sertlik değerine sahiptir.
9. Numunelerin çekme dayanımları EKAP-Konform ile artmış, fakat artan paso ile dayanımları düşmüştür. Cu-0,18Sn_C numunesi 187,96 Mpa, Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesi 241 MPa, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunesi 213,3 MPa, Cu-0,20Sn_C numunesi 187,2 Mpa, Cu-0,20Sn_{EC} 1P numunesi 235,4 MPa ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesi 211,4 MPa çekme dayanımlarına sahiptirler.
10. % uzama değeri ise Cu-0,18Sn_C numunesi için % 52,3, Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesi için %28, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunesi için %35, Cu-0,20Sn_C numunesi için % 50,20, Cu-0,20Sn_{EC} 1P numunesi için %30,0 ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesi için ise %40 hesaplanmıştır.
11. Numunelerde dislokasyonların taneler içinde ve / veya tane sınırları boyunca (tane sınırı kayması) difüzyon kontrollü hareketi ile sürünme meydana gelmiştir.
12. Sürünme deneyi sonucu malzemelerin aktivasyon enerjilerine göre malzemelerde sürünme deneyi sırasında difüzyon görülmüştür.
13. 573 K, 100 MPa sabit şartlar altında yapılan sürünme deneyi sonucu paso sayısı arttıkça numunelerin kırılma süreleri artmıştır. Sırasıyla Cu-0,18Sn_C numunesi 11 saatte, Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesi 49 saatte, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunesi 68 saatte, Cu-0,20Sn_C numunesi 3 saatte, Cu-0,20Sn_{EC} 1P numunesi 43 saatte ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesi ise 44 saatte kopmuştur.

14. 573 K, 100 MPa sabit şartlar altında yapılan sürünme deneyi sonucu paso sayısı arttıkça numunelerin % gerinim değerleri artmıştır. Sırasıyla Cu-0,18Sn_C numunesin % 8, Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesi % 43, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunesi % 51, Cu-0,20Sn_C numunesi % 18, Cu-0,20Sn_{EC} 1P numunesi % 40 ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesi ise % 52 gerinim değerine sahiptir.

15. Artan alaşım elementi miktarı elektriksel özelliği düşürmüştür. Artan EKAP-Konform pasosu ile Cu-0,18Sn numunelerinde iletkenlik düşmüş, Cu-0,20Sn numunelerinde ise artmıştır. Sırasıyla numunelerin elektriksel iletkenlik değerleri Cu-0,18Sn_C numunesinde 0,05687 Siemens.square, Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesinde 0,16914 Siemens.square, Cu-0,18Sn_{EC} 2P numunesinde 0,11065 Siemens.square, Cu-0,20Sn_C numunesinde 0,03086 Siemens.square, Cu-0,20Sn_{EC} 1P numunesinde 0,09489 Siemens.square ve Cu-0,20Sn_{EC} 2P numunesinde 0,13593 Siemens.square olarak ölçülmüştür.

Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde EKAP Konform prosesinin bakır numuneler ve kullanılmak istenen yer göz önünde tutulduğunda tane boyutuna etkisi yeterli değildir. Nano boyuta inilmek istenmiş fakat mikroyapı mikro boyutta kalmıştır. İstenen mekanik özellikler de mikroyapı ile paralel olarak ilerlemiş fakat tane boyutu mikro boyutta kaldığı için mekanik özellikler açısından da elde edilen veriler yeterli olmamıştır.

Sonuç olarak gerçekleştirilen deneyler sonrası, Cu-0,18Sn_{EC} 1P numunesi en küçük tane boyutu olan 1,4 µm'ye, en yüksek çekme dayanımı olan 241 MPa'a, iyi bir sertlik değeri olan 80HV'ye ve en iyi elektriksel iletkenlik değeri olan 0,16914 Siemens.square'ye sahip olduğundan, bundan sonraki geliştirme çalışmalarına bu numune ile devam edilmesinin uygun olduğu düşünülmekte ve önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Wei, K.X., W. Wei, W., Wang, F., Du, Q.B., Alexandrov, I. V. ve Hu, J.,(2011). "Microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of industrial Cu-0.5%Cr alloy processed by severe plastic deformation", *Materials Science and Engineering A*, 528:1478–1484.
- [2] Valiev, R.Z. ve Langdon, T.G., (2006). "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", *Prog. Mater. Sci.* 51: 881-891.
- [3] Zhu, C., Maa, A., Jiang, J., Li, X., Song, D., Yang, D., Yuan, Y. ve Chen, J., (2014). "Effect of ECAP combined cold working on mechanical properties and electrical conductivity of Conform-produced Cu-Mg alloys", *J. Alloys Compd.* 582:135-140.
- [4] Ko, Y.G., Namgung, S., Lee, B.U. ve Shin, D.H., (2010). "Mechanical and electrical responses of nanostructured Cu-3 wt%Ag alloy fabricated by ECAP and cold rolling", *J. Alloys Compd.* 504:448-451.
- [5] Xu, C., Schroeder, S., Berbon, P.B. ve Langdon, T.G., (2010). "Principles of ECAP-Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy", *Acta Mater.* 58:1379-1386.
- [6] Reiss, G., Vancea, J. ve Hoffmann, H., (1986). "Grain-boundary resistance in polycrystalline metals", *Phys. Rev. Lett.* 56:2100-2103.
- [7] Valiev, R.Z., (2004). "Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties", *Nat. Mater.* 3:511-516.
- [8] Kim, H.S. ve Estrin, Y., (2005). " Microstructural modelling of equal channel angular pressing for producing ultrafine grained materials", *Mater. Sci. Eng. A.* 410-411:285-289.
- [9] Kvapilova, M., Sklenicka, V., Dvorak, J. ve Kral, P., (2011). "An Evaluation of Creep Mechanisms in Ultrafine-Grained Metals", *Mater. Struct. Micromechanics Fract.* 465: 382-385.
- [10] Sakai, G., Nakamura, K., Horita, Langdon, Z. ve T.G., (2005). "Developing high-pressure torsion for use with bulk samples", *Mater. Sci. Eng. A.* 406:268-273.
- [11] Caron, R.N., (2001). "Copper Alloys : Properties and Applications", *Sci. Technol.* 1–4.
- [12] Chang, T., Herting, G., Goidanich, S., Sánchez Amaya, J.M., Arenas, M.A., Le Bozec, N., Jin, Y., Leygraf, C. ve Odnevall Wallinder, I.,(2019). "The role of Sn on the long-term atmospheric corrosion of binary Cu-Sn bronze alloys in architecture", *Corros. Sci.* S0010-938X: 31991-7.
- [13] Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K. ve Alexandrov, I. V., (2000). "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", *Prog. Mater. Sci.* 45:103-189.
- [14] Ito, Y. ve Horita, Z., (2009). "Microstructural evolution in pure aluminum

- processed by high-pressure torsion", *Mater. Sci. Eng. A.* 503:32-36.
- [15] Wang, C., Li, F., Chen, B., Yuan, Z. ve Lu, H. (2012). "Severe Plastic Deformation Techniques for Bulk Ultrafine-grained Materials, *Rare Met. Mater. Eng.* 41:941-946.
 - [16] Tsuji, N., Saito, Y., Utsunomiya, H. ve Tanigawa, S., (1999). "Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process", *Scr. Mater.* 40:795-800.
 - [17] Weiss, I., ve Semiatin, S.L., (1998). "Thermomechanical processing of beta titanium alloys - An overview", *Mater. Sci. Eng. A.* 243:46-65.
 - [18] Zhilyaev, A.P., Nurislamova, G. V., Kim, B.K., Baró, M.D., Szpunar, J.A. ve Langdon, T.G., (2003). "Experimental parameters influencing grain refinement and microstructural evolution during high-pressure torsion", *Acta Mater.* 51:753-765.
 - [19] Valiev, R.Z., Estrin, Y., Horita, Z., Langdon, T.G., Zehetbauer, M.J ve Zhu, Y., (2016). "Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation: Ten Years Later", *JOM.* 68:1216-1226.
 - [20] Vorhauer, A. ve Pippan, R., (2004). "On the homogeneity of deformation by high pressure torsion", *Scr. Mater.* 51:921-925.
 - [21] Hebesberger, T., Stüwe, H.P., Vorhauer, A., Wetscher, F. ve Pippan, R., (2005). "Structure of Cu deformed by high pressure torsion", *Acta Mater.* 53:393-402.
 - [22] Yilmazer, H., Niinomi, M., Cho, K., Nakai, M., Hieda, J., Sato, S., Todaka, Y., (2014). "Microstructural evolution of precipitation-hardened beta-type titanium alloy through high-pressure torsion", *Acta Materialia.* 80:172-182.
 - [23] Segal, V.M., (1995). "Materials processing by simple shear", *Mater. Sci. Eng. A.* 197:157-164.
 - [24] Wei, W., Zhang, W., Wei, K.X., Zhong, Y., Cheng, G. ve Hu, J., (2009). "Finite element analysis of deformation behavior in continuous ECAP process", *Mater. Sci. Eng. A.* 516:111-118.
 - [25] G.J. Raab, R.Z. Valiev, T.C. Lowe, Y.T. Zhu, Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP-Conform, *Mater. Sci. Eng. A.* (2004).
 - [26] Palán, J., Procházka, R. ve Zemko, M., (2017). "The microstructure and mechanical properties evaluation of UFG Titanium Grade 4 in relation to the technological aspects of the Conform SPD process", *Procedia Eng.*, 207:1439-1444.
 - [27] Lee, J.C., Seok, H.K., Suh, J.Y., (2002). "Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing", *Acta Mater.* 50:4005-4019.
 - [28] Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M. ve Langdon, T.G., (1998). "Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in equal-channel angular pressing", *Acta Mater.* 46:1589-1599.

- [29] Utsunomiya, H., Hatsuda, K., Sakai, T., ve Saito, Y., (2004) "Continuous grain refinement of aluminum strip by conshearing", Mater. Sci. Eng. A. 372:199-206.
- [30] "Time Dependent Behaviour: Creep" (2018), courses.washington.edu/me354a/chap8.pdf. University of Washington Course. Chapter 8:1-9
- [31] Rotherham, L. ve Larke, L.W., (1950) "Creep deformation of metals", Research. 3:434-436.
- [32] Sha, W., Wu, X. ve Keong, K.G., (2011) Electrical resistivity of electroless copper deposit, Electroless Copp. Nickel-Phosphorus Plat. (2011) 117-134.
- [33] Baudin, T., Etter, A.L. ve Penelle, R., (2007). "Annealing twin formation and recrystallization study of cold-drawn copper wires from EBSD measurements", Mater. Charact. 58:947-952.
- [34] Valiev, R.Z., Kozlov, E. V., Ivanov, Y.F., Lian, J., Nazarov, A.A. ve Baudalet, B., (1994). "Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper", Acta Metall. Mater. 42:2467-2475.
- [35] Salimyanfard, F., Reza Toroghinejad, M., Ashrafizadeh, F. ve Jafari, M., (2011). "EBSD analysis of nano-structured copper processed by ECAP", Mater. Sci. Eng. A. 528:5348-5355.
- [36] Jiang, H., Zhu, Y.T., Butt, D.P., Alexandrov, I. V. ve Lowe, T.C., (2000) "Microstructural evolution, microhardness and thermal stability of HPT-processed Cu", Mater. Sci. Eng. A. 290:128-138.
- [37] Divinski, S. V., J. Ribbe, S. V., Baither, D., Schmitz, G., Reglitz, G., Rösner, H., Sato, K., Estrin, Y. ve Wilde, G., (2009). "Nano- and micro-scale free volume in ultrafine grained Cu-1 wt.%Pb alloy deformed by equal channel angular pressing", Acta Mater. 57:5706-5717.
- [38] Kral, P., Dvorak, J., Kvapilova, M., Blum, W. ve Sklenicka, V., (2012). " The influence of long-term annealing at room temperature on creep behaviour of ECAP-processed copper " , Materials Letters. 188:235-238.
- [39] Yang, G., Li, Z., Yuan, Y. ve Lei, Q., (2015). "Microstructure, mechanical properties and electrical conductivity of Cu-0.3Mg-0.05Ce alloy processed by equal channel angular pressing and subsequent annealing", J. Alloys Compd. 640:347-354.
- [40] Chen, X.H., Lu, L. ve Lu, K., (2007). "Electrical resistivity of ultrafine-grained copper with nanoscale growth twins", J. Appl. Phys. 102(083708-1).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Aslıhan GÖKDUMAN
Doğum Tarihi ve Yeri :03.07.1992 / Manisa
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :aslihangokduman@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malz. Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Ahkisar Çağlak Anadolu Lisesi	2010

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017-2018	Böllhoff Civata Tic. Ltd. Şti.	Uygulama Mühendisi
2018	EagleBurgmann	Kalite-İSG ve Çevre Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Gökdoğan A., Yilmazer H., Gode C., Dikici B., Dvorak J., Sklenicka V., Bakkaloğlu A., et al., "High Performance Copper and Copper Alloys Fabricated by Severe Plastic Deformation", The Third International Iron and Steel Symposium (IIS'17), KARABÜK, TÜRKİYE, 3-5 Nisan 2017, pp.79-82

Proje

1. Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2016-07-02-YL12 numaralı projesi