

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NORDİC GOLD BAKIR ALAŞIMINDA ISIL İŞLEMİN
ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞE VE SERTLİĞE ETKİSİ

Hüseyincan EKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Danışman
Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM

Eş Danışman
Doç.Dr. Çağlar YÜKSEL

Temmuz, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NORDİC GOLD BAKIR ALAŞIMINDA ISIL İŞLEMİN ELEKTRİKSEL
İLETKENLİĞE VE SERTLİĞE ETKİSİ**

Hüseyincan EKER tarafından hazırlanan tez çalışması 06.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr.Mustafa ÇİĞDEM
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Doç.Dr.Çağlar YÜKSEL
Atatürk Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Mustafa ÇİĞDEM, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cemaletin YAMAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Derya DIŞPINAR, Üye
İstanbul TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

Danışmanım Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM ve eş danışmanım Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Nordic Gold Bakır Alaşımında Isıl İşlemin Elektriksel İletkenliğe Ve Sertliğe Etkisi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Hüseyincan EKER

İmza

X X X X X

TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimden bu yana mesleki bilgisini ve birikimini benden esirgemeyen; değerli hocam Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans eğitimim süresince "Nordic Gold Bakır Alaşımında Isıl İşlemin Elektriksel İletkenliğe Ve Sertliğe Etkisi" tezi kapsamında çalışmalarımı destekleyen Ar-Ge Müdürü Sn. Bekir Perçine ve KAYALAR Bakır Alaşımları A.Ş'ne teşekkür ederim.

Tezimin deneysel çalışmalarında ve yazım aşamasında desteklerini esirgemeyen, bu tezin ortaya çıkmasında büyük emekleri olan Yük. Müh. Zeynep Sueda BAŞAR'a, Fatih BAŞTAŞ'a, Onur BATMAZ'a, teşekkür ederim. Ayrıca Lisans'a başladığım günden beri emeğini ve desteğini bir gün olsun esirgemeyen, bana sadece akademik alanda değil özel hayatımda da yol göstericilik yapan, kendisinden çok şey öğrendiğim değerli hocam Doç. Dr. Çağlar YÜKSEL'e gönülden bir teşekkür borç bilirim.

Son olarak, hayattaki en büyük destekçilerim ve bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, maddi ve manevi desteklerini şahsımdan hiçbir zaman esirgemeyen, annem Sibel EKER'e, babam Nihat EKER'e, kardeşlerim Yiğit EKER ile Sudenaz EKER'e ve değerli dostum Hasan ÖĞ'e çok teşekkür ederim.

Hüseyincan EKER

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
2 GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE BAKIR VE GENEL ÖZELLİKLERİ	4
2.1 Bakır Tarihi.....	4
2.2 Bakır ve Nordic Gold Alışımı Özellikleri.....	4
2.3 Bakır Rezervleri	6
2.4 Dünya Bakır Tüketimi ve Türkiye Bakır İhracatı.....	7
3 BAKIR ÜRETİMİ VE PROSESLERİ	9
3.1 Bakır Üretimi	9
3.2 Bakır-Demir-Sülfür Cevherlerinden Bakır Üretimi.....	9
3.2.1 Köpük Flatasyonu ile Konsantrasyon	12
3.2.2 Mat Ergitme.....	13
3.2.3 Dönüştürme	13
3.2.4 Doğrudan Bakır Ergitme	15
3.2.5 'Blister' bakırın rafine ve elektro-rafine işlemi.....	16
3.3 Bakırın Hidrometalurjik Ekstrasyonu	17
3.3.1 Solvent Özütlemesi	18
3.3.2 Elektro Kazanım	19
3.5 Bakır ve Bakır Alaşımli Hurda Geri Dönüşümü	21

3.6. Sürekli Döküm	22
3.6.1 Yatay Sürekli Döküm	23
3.6.2 Dikey Sürekli Döküm	23
3.6 Haddeleme Prosesi	26
3.6.1 Haddeleme Prosesi ve Tanımlar	26
3.6.2 Sıcak ve Soğuk Haddeleme Prosesi	27
3.7 Bakır Isıl İşlemi	31
3.7.1 Homojenizasyon	32
3.7.2 Tavlama (Yeniden Kristalizasyon)	32
3.7.4 Gerilim Giderme	35
3.7.5 Çökelti Sertleşmesi	36
4 PLASTİK ŞEKİL VERMENİN VE TAVLAMANIN ELEKTRİKSEL İLETKENLİK VE SERTLİK ÜZERİNDE ETKİSİ	38
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44
5.1 Kullanılan Malzeme ve Makineler	44
5.1.1 Nordic Gold Bakır Hurdası	44
5.1.2 Katot Bakır	44
5.1.3 Alaşım Elementleri (Alüminyum, Çinko, Kalay)	44
5.1.4 Çekirdeksiz Üst ve Alt İndüksiyon Ocakları	44
5.1.5 Slab Isıl İşlem Fırını	45
5.1.6 Sıcak Haddeleme Makinesi	45
5.1.7 Şerit Isıl İşlem Fırını	46
5.1.8 Soğuk Haddeleme Makinesi	47
5.1.9 Atomik Absorbsiyon Kimyasal Analiz Cihazı	47
5.1.10 Zımpara ve Parlatma Cihazı	48
5.1.11 Optik Mikroskop	48
5.1.12 Elektriksel İletkenlik Cihazı	49

5.1.13 Sertlik Cihazı	49
5.2 Deney Düzenegi.....	50
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	52
6.1 Kimyasal Bileşim Analizi ve Elektriksel İletkenliğe Olan Etkisi.....	52
6.2 Yeniden Kristalizasyon Prosesinde Isıl İşlem Sıcaklığının ve Süresinin Elektriksel İletkenliğe ve Sertliğe Etkisi.....	54
6.3 Yeniden Kristalizasyon Prosesinde Isıl işlem Sıcaklığının ve Süresinin Mikroyapıya Etkisi.....	65
KAYNAKÇA	69
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	73



SİMGE LİSTESİ

Ağ.	Ağırlıkça
$\Delta\rho_V$	Boşluktan Kaynaklanan Elektriksel Direnç
$\Delta\rho_D$	Dislokasyon ve Tane Sınırlarından Kaynaklanan Elektriksel Direnç
N	Dislokasyon Yoğunluğu
A	Elektronların Ortalama Serbest Yolu
P	Elektron Saçılma Olasılığı
ρ	Elektriksel Direnç
σ	Elektriksel İletkenlik
ΔH	Entalpi
$^{\circ}F$	Fahrenheit
IACS	International Annealed Copper Standard
λ	Lamda
MJ	Megajoule
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
ppm	Milyonda Bir
μm	Mikro Metre
$^{\circ}C$	Santigrat
d	Tane Çapı
HV	Vickers Sertliği
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

AAS	Atomik Absorbsiyon Spektrometresi
A.B.D.	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	American Society for Testing and Materials
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
As	Arsenik
A.Ş.	Anonim Şirketi
Au	Altın
B	Bor
Be	Berilyum
Bi	Bizmut
Ca	Kalsiyum
Cd	Kadmiyum
Co	Kobalt
Cr	Krom
Cu	Bakır
Cu ₈₉ Zn ₅ Al ₅ Sn ₁	Nordic Gold Alaşımı
CuFeS ₂	Kalkopirit
CuFeS ₄	Bornit
Cu ₂ S	Kalkosin
CuO	Bakır (II) Oksit
CuSO ₄	Bakır (II) Sülfat
dk	Dakika
Fe	Demir
FeS	Demir (II) Sülfür
Ga	Galyum
Ge	Germanyum
Hg	Civa
H ₂ O	Dihidrojen Monooksit
H ₂ SO ₄	Sülfirik Asit
In	İndiyum
Ir	İridyum
Kg	Kilogram
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
MÖ	Milattan Önce
Ni	Nikel
O	Oksijen
O.M.	Optik Mikroskop
P	Fosfor
Pb	Kurşun
Pd	Paladyum
Pt	Platin
Rh	Rodyum
S	Kükürt
Sb	Antimon
Se	Selenyum

Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Dioksit
SO ₂	Kükürt Dioksit
Sn	Kalay
Te	Tellür
Ti	Titanyum
v.b.	Ve Benzeri
YKR	Yeniden Kristalizasyon
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Sulfür cevherlerinden bakır çıkarmak için temel işlemler	10
Şekil 3.2 'Oksit' ve kalkokit cevherleri için hidrometalurjik yığın liçi bakır özütleme akış şeması.....	11
Şekil 3.3 Flotasyon görsel görünümü	12
Şekil 3.4 Ergiyik Cu-Fe-S matından ergiyik 'blister' bakır üretmek için Peirce – Smith dönüştürücüsü	15
Şekil 3.5 Peirce – Smith dönüştürücüsünün besleme, üfleme ve sıyırma aşamalarındaki pozisyonu	15
Şekil 3.6 Elektrolitik bir hücreden bakır yüklü katotların çıkarıldığı elektrolitik rafineri	17
Şekil 3.7 Cu özütleme için solvent özütleme mikserinin şematik görünümü	19
Şekil 3.8 Hurdadan bakır ve bakır alaşımlarının geri kazanılması için işlemlerinin akışı	21
Şekil 3.9 Yatay sürekli döküm	23
Şekil 3.10 Dikey sürekli döküm	24
Şekil 3.11 Direct Chill Sürekli Döküm	25
Şekil 3.12 Sıcak haddeleme ile üretilen ürünler	29
Şekil 3.13 Haddeleme işleminden geçen çeşitli bitmiş ve yarı bitmiş çelik ürünlerinin üretimi için şematik akış şeması	31
Şekil 3.14 Plastik şekil vermenin ve yeniden kristalizasyonun mekanik özelliklere etkisi	34
Şekil 3.15 Çökelme sertleşmesi mekanizması	37
Şekil 4.1 %99,999 saflıktaki bakır teller için R273/R4,2 direnç oranı ile tavlama sıcaklığı açısından bir saatlik tavlama eğrisi	43
Şekil 5.1 Üst ve alt indüksiyon ocakları.....	44
Şekil 5.2 Maerz ısıtma işlem fırını.....	45
Şekil 5.3 Sıcak Haddeleme Makinesi.....	46
Şekil 5.4 Şerit Isıl İşlem Fırını a) fırın içi b) fırın dış yüzeyi	46
Şekil 5.5 Soğuk haddeleme makinesi	47
Şekil 5.6 Atomik absorpsiyon spektrometresi.....	47
Şekil 5.7 Optik mikroskop.....	48
Şekil 5.8 Sigmascope SMP 350 Elektriksel iletkenlik cihazı.....	49
Şekil 5.9 EMCO TEST Dura Scan 2065 sertlik cihazı	50

Şekil 6.1	1 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	55
Şekil 6.2	1 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	55
Şekil 6.3	1 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	56
Şekil 6.4	2 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	57
Şekil 6.5	2 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	57
Şekil 6.6	2 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	58
Şekil 6.7	3 Numaralı grup 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	59
Şekil 6.8	3 Numaralı grup 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	59
Şekil 5.18	3 Numaralı gruba 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	60
Şekil 6.9	4 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	61
Şekil 6.10	4 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	61
Şekil 6.11	4 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	62
Şekil 6.12	5 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	63
Şekil 6.13	5 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	63
Şekil 6.14	5 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri	64
Şekil 6.15	650 °C Sıcaklıkta Yapılan a) Referans b) 60 dk. c) 90 dk d) 120 dk yeniden kristalizasyon uygulanmış numune mikroyapıları	65
Şekil 6.16	700 °C'de yapılan a) Referans b) 60dk. c) 90 dk d) 120 dk yeniden kristalizasyon uygulanmış numune mikroyapıları	66
Şekil 6.17	750 °C'de yapılan a) Referans b) 60dk. c) 90dk d) 120 dk yeniden kristalizasyon uygulanmış numune mikroyapıları	67
Şekil 6.18	Yeniden kristalizasyon sıcaklığının ve süresinin tane boyutuna etkisi	67

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Saf Bakır Metalin Özellikleri	5
Tablo 2.2 Türkiye'deki Bakır Rezervleri	6
Tablo 2.3 Türkiye İhracat Rakamları	7
Tablo 2.4 Ülkelere Göre Dünyadaki Rezerv Miktarları	8
Tablo 6.1 Eklenen Metallerin Elektriksel Dirençte Artış Miktarları	53
Tablo 6.2 Numunelerin Kimyasal Bileşimi ve Elektriksel İletkenlikleri.....	53



Nordic Gold Bakır Alaşımında Isıl İşlemin Elektriksel İletkenliğe ve Sertliğe Etkisi

Hüseyincan EKER

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof.Dr.Mustafa ÇİĞDEM

Eş-Danışman: Doç.Dr.Çağlar YÜKSEL

Bu tez çalışmasında slab olarak dökümü gerçekleştirilmiş ve sıcak haddelenmiş numuneler kullanılarak, soğuk hadde ve ısıtıl işlem proseslerinin birleştirilmesi doğrultusunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Darphane ve mermi imalatı sektörüne pirinç, alpaka, nordic gold, albronz, ticari saf bakır şerit, levha ve nihai ürün ihraç eden Kayalar Bakır Alaşımları A.Ş. ile gerçekleştirilen çalışmada soğuk deformasyon uygulanmış numunelere farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde ısıtıl işlem prosesleri uygulayarak elektriksel iletkenliğe, sertliğe, tane boyutuna olan etkisi incelenmiştir. Gerçekleştirilen proses kapsamında talep edilecek sertlik, elektriksel iletkenlik ve tane boyutuna göre proses tayin edilmiştir.

Nordic gold (NG) diye adlandırılan bu alaşım birçok ülkenin para pullarında kullanılmaktadır. Yapılan çalışma endüstriyel çalışmaya uygun olabilmesi için sanayi ölçeğinde gerçekleştirilmiş ve farklı proses adımları denenmiştir. %89 Cu, %5 Zn, %5 Al, %1 Sn'dan oluşmaktadır.

200 tonluk pres ile pul halinde numuneler elde edilmiştir. Toplamda 100 numune alınmıştır. Bu numunelerin 10 tanesi referans numuneleri olarak belirlenmiştir. Arta kalan 90 numune 600-650-750 °C ve 60-90-120 dk kombinasyonları ile dokuz farklı şekilde proses edilmiştir. Tüm numunelerin kimyevi içeriği atomik adsorbsiyon cihazı ile tayin edilmiş olup, sertlik değerleri Vickers sertlik yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Tüm numunelerin elektriksel iletkenliklerine %IACS olarak bakıldı. Yapılan deneysel çalışmalar sonrasında ısıtım işlem sıcaklığının artması ve sürenin artması tane büyümesine sebep olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak sertlik sonuçlarında düşüş, elektriksel iletkenlikte ise artış olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bakır, nordic gold, ısıtım işlem, soğuk, hadde, sertlik, elektriksel iletkenlik, tane boyutu.

Effect Of Heat Treatment on Electrical Conductivity and Hardness in Nordic Gold Copper Alloy

Hüseyin Eker

Department of Metallurgy and Material Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof.Dr.Mustafa Çiğdem

Co-supervisor: Assoc.Prof.Dr.Çağlar Yüksel

In this thesis, experiments were carried out to combine cold rolling and heat treatment processes by using hot-rolled samples after casting as slab.

In the work carried out with Kayalar Copper Alloys, which exports brass, alpaca, nordic gold, Al-bronze, commercial pure copper strip, plate and final product to the Mint and Bullet manufacturing sector, it is possible to apply heat treatment processes at different temperatures and different durations to the samples that have been cold deformed, and the electrical conductivity, hardness, grain size, its effect has been studied. The process determination was determined according to the hardness, electrical conductivity, hardness, and grain size to be requested within the scope of the process.

This alloy, called Nordic gold, is used in the money stamps of many countries. In order to be suitable for industrial work, the study was carried out on an industrial scale and different process steps were tried. This alloy consists of 89% Copper, 5% Zn, 5% Al, 1% Sn.

Stamped samples were obtained with a 200-ton press. A total of 100 samples were taken for each cast. 10 of these samples were determined as reference samples. The

remaining 90 samples were processed in 9 different ways with combinations of 600-650-750 °C and 60-90-120 minutes. The chemical content of all samples was determined by an atomic adsorption device, and the hardness values were determined using the Vickers hardness method. In addition, the electrical conductivity values of all samples were measured in IACS%.

After the experimental studies, the increase in the heat treatment temperature and the increase in the duration cause grain growth. As a result of this situation, it was observed that there was a decrease in hardness results and an increase in electrical conductivity.

Keywords: Copper, heat treatment, cold rolling, hardness, electrical conductivity, grain size

1.1 Literatür Özeti

Nordic gold alaşıımı, para pulları arasında kullanımı en yaygın olan alaşımlarından bir tanesidir. Kimyasal kompozisyonu %89 Cu, %5 Zn, %5 Al %1 Sn'dir. Genellikle korozyon direncinin yüksek olması ve altın rengine benzemesinden dolayı tercih edilmektedir. Elektriksel iletkenlik para pullarının güvenilirlik kontrolü yapılabilmesi açısından önem arz etmektedir.

Elektriksel iletkenlik, bir malzemenin elektrik akımının içinden geçmesine ne kadar kolay izin verdiğinin bir ölçüsüdür. Tersine, elektriksel direnç, bir malzemenin elektrik akımının akışına ne kadar güçlü direnç gösterdiğini ölçer. İki özellik birbirinin tam tersidir. Elektriksel iletkenlik, Yunan harfi σ ile gösterilir ve elektriksel direnç, Yunanca ρ sembolü ile gösterilir [1].

Metal malzemeleri mukavemetlendirmek amacı ile uygulanan yöntemler genel olarak elektriksel iletkenlikte düşüş meydana getirmektedir. Bu nedenle elektriksel iletkenlik ve mekanik mukavemet arasında ters ilişki durumu bulunmaktadır. Metallerde katı çözelti oluşturma, soğuk işlem ve tane inceltme gibi çeşitli mekanizmalar ile mukavemetlendirilmesi, iletkenlikte kayda değer bir azalmaya sebep olmaktadır [2].

Malzemede meydana gelen kusurların (tane sınırları, dislokasyonlar, nokta kusurları, vb.) ortaya çıkmasına dayanan bu güçlendirme işlemlerinin tamamı ve bu kusurlarda iletken elektronların saçılmasını da arttırarak, metalin elektriksel iletkenliğini azaltmaktadır. Aynı durum iletken malzemeler için de geçerlidir. Bu iki ana özelliğin yani yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek mukavemetin ters orantılığı olduğunu göstermektedir [3], [4], [5].

Malzemelerin sertliği mikroyapıdaki tanelerin dağılımına, tipine ve büyüklüğüne bağlıdır. Isıl işlem prosesi malzemelerin akma ve çekme dayançları, kopma uzaması, sertlik, tane boyutu ve elektriksel iletkenlik gibi değerlerini etkilemektedir.

Günümüzde hala bakır alaşımlarında deformasyon ve ısıt işlemin mikroyapılar üzerine örneğin istifleme hataları, deformasyon ve tavlama ikizlenmelerinin nasıl etki ettiğı tam anlamıyla bilinmemektedir.

Yapılan ısıt işlem ile sertlik, tane boyutu ve elektriksel iletkenlik arasında ilişki kurulmuştur. Elde edilen bu ilişki ile istenilen sertlik, tane boyutu ve elektriksel iletkenliğe göre hangi prosesin uygulanabileceğı hakkında fikir vererek para pulu üreticilerinin hangi ısıt işlem parametrelerini uygulayacaklarını belirlemiştir.

1.2 Tezin Amacı

Her geçen gün Dünya’da bakıra olan talep rakamlarında bir büyüme gözükmemektedir. Önümüzdeki 20 yıl içerisinde bu büyüme oranının %50’ye kadar çıkacağı öngörülmektedir. Elektronik araçların kullanımının artması ve elektrikli araçların hayatımızda daha fazla girmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının ve enerji verimliliğı çalışmalarının artışı ile bakır kullanımının artacağı öngörülmektedir.

Sanayi ölçeğinde yüksek kütlelerde döküm işlemi sonrası plastik şekil verme işlemi gören malzemelerde fırından alınan numune ile nihai ürün arasında tahmin yapabilmek pek mümkün değildir. Soğuk haddeleme yönteminde kafes yapısının bozulması ile elektron geçişi engellenmekte ve elektriksel iletkenlik düşmektedir. Bu etki saf metallerde kabullenilebilecek seviyelerde olmasına karşılık alaşımlarda ister dışında kalabilmektedir.

Bakır alaşımları için elektriksel iletkenlik önemli kıstaslardan bir tanesidir. Nordic Gold alaşımı bir para pulu alaşımıdır. Para pullarının güvenilirliğinin kontrolünde elektriksel iletkenlik önem arz etmektedir. Bu nedenle dar elektriksel iletkenlik aralıklarında çalışılmaktadır. Bir diğer önemli kıstas da sertliktir. Yeniden kristalizasyon ısıt işleminde sıcaklık ve sürenin arttırılması ile sertlik ve elektriksel iletkenlik arasında optimizasyon yapılması amaçlanmıştır.

Tez kapsamında yeniden kristalizasyon işlemi sonrası %25 soğuk haddeleme işlemine tabi tutulmuş Nordic Gold alaşımlarında farklı empürite miktarlarının, farklı ısıt işlem sürelerinin ve farklı ısıt işlem sıcaklıklarının malzemenin göstermiş olduğu sertlik, elektriksel iletkenlik ve tane boyutuna olan etkisinin tayin edilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Mukavemeti yüksek fakat elektriksel olarak iletken metaller üretmenin ana mekanizması, iletken elektronların saçılmasının minimuma indirilirken dislokasyon hareketlerinin etkin bir şekilde engellendiği uygun bir mikroyapı bulmaktır.

Hem tane boyutu hem de sıcaklık, kimyasal bileşime göre elektriksel özdirenç üzerinde zayıf bir etkiye sahiptir. Tane boyutu ve doku, esas olarak yeniden kristalleştirme işlemiyle belirlenir. Yeniden kristalizasyon işleminde itici güç deformasyon sırasında ortaya çıkan dislokasyon yoğunluğunun eliminasyonundan kaynaklanmaktadır.

Literatürde yapılan araştırmalarda bakır alaşımlarında ısıtma süresinin ve sıcaklığının artırılması ile elektriksel iletkenlikte küçük artışlar meydana gelirken sertlikte düşüş meydana gelmektedir.

Bu tezin hipotezi de elektriksel iletkenlik miktarında bir artış sağlanır iken mukavemetten de çok fazla ödün vermeyecek ısıtma işlem parametrelerinin belirlenerek Nordic Gold alaşımlarından en uygun para pulu üretimini gerçekleştirmektir.

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE BAKIR VE GENEL ÖZELLİKLERİ

2.1 Bakır Tarihi

Bakır, tarih öncesi çağlardan beri insanlığın vazgeçilmez bir malzemesi olmuştur. Tarihinin en önemli devirlerinden biri bronz olarak isimlendirilmiştir. Bronz bakır ve kalay alaşımıdır. Roma döneminde bakır, esas olarak metalin adının kökeni olan Kıbrıs'ta, daha sonra cuprum (Latince) olarak bozulmuş olan aes cyprium'dan (Kıbrıs'ın metalı) çıkarılmıştır.

Bakır yaklaşık MÖ 9.000 yılında ilk defa kullanılmıştır. Bakır takribi 5.000 yıl, bilinen tek metaldi. İlk bakır eserler, önce dekoratif, sonra fayda amacıyla kullanılmıştır. MÖ 5000 yılına gelindiğinde, malakit ve azurit gibi basit bakır oksit cevherlerinin ergimesine dair kanıtlar olduğu için metalurjinin temeli bu bulgular ile başlamıştır [6].

2.2 Bakır ve Nordic Gold Alaşımı Özellikleri

Bakır metalinin rengi kırmızıya benzemektedir. Elektrik ve ısı iletkenliği yüksektir. Bu nedenle elektrik santralleri, trafolar ve iletken malzeme talebinin yüksek olduğu birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakır metalı atmosferik koşullarda kullanım için dayanıklı bir elementtir. Mukavemeti görece düşük, kaynaklanabilirliği kötüdür iken dökülebilirliği yüksektir. Ancak kübik yüzey merkezli kafes yapısından dolayı plastik şekil verilebilirliği yüksektir. Dövme ve haddeleme işlemleri için uygun bir metaldir. Bakır metalı gümüşten sonra elektriği en iyi ileten metal olması nedeniyle sanayide önemli bir yeri bulunmaktadır. Ayrıca bakır-çinko, bakır-kalay gibi alaşımlarda günümüzde birçok sektörde kullanılmaktadır.

Bakır metalı periyodik cetvelde Cu ile sembolize edilmektedir. Atom numarası 19'dur. Atom ağırlığı da 63.54'tür. Öz kütlesi 8.93 gr/cm³'tür. Bakır doğada az oranda sabit ağırlıklı olarak sülfürlü, oksitli ve kompleks halde yer almaktadır. Cu

elementi 1B geçiş grubunda yer almaktadır. Bu elementin eksi değeri bulunmamaktadır[7].

Tablo 2.1 Saf bakır metalin özellikleri [8]

Kristal Yapı	Kübik Yüzey Merkezli
Yoğunluk	8,96 g/cm ³
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	250 °C
Isı iletkenliği	240-386 W/(Km)
Elektrik iletkenliği	35-58 m/ (Ωmm ²)
Ergime sıcaklığı	1084,62 °C
Çekme dayanımı	200-360 N/mm ²
Genleşme katsayısı	17x10-6 /K
Kopma uzaması	%45-2
Elastik Modül	125000 N/mm ²

Bakır, teller dahil olmak üzere çeşitli şekillere dönüştürmeyi kolaylaştıran sünek ve dövülebilir özelliklerinden dolayı kullanışlıdır. Isıl ve elektriksel iletkenliği yüksektir. Bu nedenle genellikle elektrik için kullanılır. Bakırın anti-mikrop etkisi bulunmaktadır. Birçok mikrop bakır yüzeyinde etkisiz hale gelir. Bu nedenle, özellikle pirinç antimikrobiyal özelliği nedeniyle kapı kolları gibi yerlerde sıklıkla kullanılır. Bakırın geçmişte yaraların iyileşmesi için kullanılmıştır. Bakır, bu niteliklere ek olarak, mükemmel ısı iletkenliği nedeniyle borular, paratonerler ve soğutma üniteleri (buzdolapları, klimalar, vb.) gibi birçok ev eşyasında bulunur. Bunlar, günümüzde bakırın kullanım alanlarından bazılarıdır [9].

NG Alaşımı %89 Cu, %5 Zn, %5 Al, %1 Sn'dan oluşmaktadır. [10]. Bu alaşımda gerçek altın bulunmamaktadır. Luvata tarafından Cu, Al, Zn ve Cu'dan üretilmiş bakır alaşımıdır. Rengi ve ağırlığı altından çok farklıdır. Bununla birlikte antimikrobiyaldir, alerjen değildir ve kararmaya karşı dirençlidir. Alaşım ve adı, küresel metal üretim grubu Luvata'nın fikri mülkiyetidir. Madeni paralarda kullanılmaktadır. Ancak Euro bölgesi dışındaki ülkelerde uzun yıllar kullanılmış ve kompozisyon İsveç'te 10 kron madeni para için oluşturulmuştur [11].

2.3 Bakır Rezervleri

Bakır; nikel, çinko, alüminyum, kurşun vb. gibi bir ana metaldir ve birçok endüstri için vazgeçilmezdir. Birincil olarak toplam dünyadaki bakır üretimi 2018'de yaklaşık 21 milyon tondur.

Yeryüzünde çıkartılabileceği düşünülen bakır miktarı 1.6 milyar tondur Ayrıca derin deniz nodüllerinde 0,7 milyar ton bakır bulunduğu tahmin edilmektedir. Bakır deniz derinliklerinde volkanik olay sonucu oluştuğu bilinmektedir. Fakat deniz tabanından çıkarılması pahalı bir işlemdir. Bakır; Utah, New Mexico ve Şili'de olduğu gibi genellikle açık ocak madenlerinde üretilmektedir. Şili, Dünya ihracatının yaklaşık %33'ü ile dünyadaki bakırın en büyük yüzdesini üretmektedir. Bakır ayrıca ABD, Endonezya ve Peru'da da çıkarılmaktadır. Bakır binlerce yıldır kullanılmaktadır. Fakat çıkartılan tüm bakırın yaklaşık %95'i son yüz yılda birincil olarak üretilmiştir. Ayrıca günümüzde kullanılan bakırın çoğu hurdadan ikincil olarak üretilmiştir.

Tablo 2.2 Türkiye'deki bakır rezervleri [9]

İL	MEVKİİ	Cu Tenör (%)	Bakır Metal içeriği(ton) (Görünür+Muhtemel)
Adıyaman	Sincik	0,95	6806
Adıyaman	Tut	0,19	47804
Artvin	Murgul/Damar	1,24	31137
Artvin	Murgul/Çakmakçaya	0,84	47997
Artvin	Murgul/Akarşen	2,24	13000
Artvin	Cerattepe	5,2	202800
Artvin	Seyitler	1,41	34752
Balıkesir	Havran	0,33	79092
Çanakkale	Arapuçuran	1,25	15375
Çanakkale	Gökçeada	0,19	221697
Çanakkale	Gökçeada	0,13	29166
Çanakkale	Gökçeada	0,15	31155
Diyarbakır	Çermik	0,84	1877
Elazığ	Ergani/anayatak	1,71	12000
Elazığ	Sivrice	0,26	10475
Erzurum	Oltu	0,2	512
Giresun	Espiye/lahanos+kızılkaya	2,4	57528
Giresun	Tirebolu/harköy	1,9	8740
Kahramanmaraş	Elbistan	0,18	1520547
Kastamonu	Küre/Bakıbbaba+aşıköy	2,05	252950

Tablo 2.3 Türkiye'deki bakır rezervleri [9] (devamı)

Kastamonu	Merkez	0,85	33733
Ordu	Gölköy	0,14	1009
Rize	Çayalı/Madenköy	4,61	502490
Siirt	Şirvan/Madenköy	4,61	502490
Sivas	Koyulhisar/kan	1,73	16683
Trabzon	Of/kotarakdere	1,31	12600
Trabzon	Of	0,35	58006
Trabzon	Of	0,4	21541
Trabzon	Yomra/kanköy	1,11	36741
TOPLAM			3790235

2.4 Dünya Bakır Tüketimi ve Türkiye Bakır İhracatı

Dünya bakır tüketimi her geçen gün artmakta ve 2018 yılında 23,8 milyon tona ulaşmış bulunmaktadır. Yapılan araştırmalarda Dünya bakır talebi de benzer eğilimi göstermektedir. Bu nedenle bakırın birim fiyatı da son yıllarda büyük bir ivmeyle artmış ve 2011 yılında maksimum bir seviyeye ulaşmıştır. Bu artan talep ile bakır metalinin geri dönüştürülerek kullanılması alanında çalışmalar arttırılmıştır. İkincil bakırın Dünya'da üretimi, 2017 itibariyle 4 milyon tona ulaşmıştır[6].

Tablo 2.4 Türkiye ihracat rakamları [12]

	2013		2014		2015	
	Miktar(kg)	Değer (FOB)	Miktar(kg)	Değer (FOB)	Miktar(kg)	Değer (FOB)
Blister Bakır	-	-	3	13	-	-
Bakır Çubuk ve Profiller	12.275.854	76.239.317	14.338.931	80.920.486	13.978.795	69.972.151
Bakır Teller	47.028.875	376.395.057	49.751.438	375.545.715	49.082.761	305.408.167
Bakır Örme Halatlar	50.519.646	426.003.795	50.384.803	401.668.265	48.551.338	317.638.200
Bakırdan Saç, Levha, Şerit	17.024.793	132.858.441	18.460.665	135.751.241	18.026.205	115.110.977
Bakır Hurda	23.155.219	131.565.103	17.203.542	102.876.453	12.044.682	55.559.087
Bakır Diğer	19.476.002	155.807.967	19.999.599	154.456.900	20.156.710	139.164.574
Bakır Toplam	169.480.388	1.298.869.680	170.138.981	1.251.219.072	161.840.491	1.002.853.156

Dünyada (Uluslararası Bakır Çalışma Grubu, 2018) verilerine göre 24 milyon ton bakır üretilmektedir. Cevherden bakır üretimi olarak iki çeşit üretim metodu bulunmaktadır. Bunlar pirometalürji ve hidrometalürjidir. Bu yöntemler sırasıyla

dünya bakır üretiminin %67 ve %16'sını oluşturmaktadır. %17'ise daha az enerji ile üretilen ikincil üretimdir.

Tablo 2.5 Ülkelere göre dünyadaki rezerv miktarları [12]

ÜLKE	ÜRETİM		Rezerv(ton)
	2014	2015	
ABD	1360	1250	33.000
Avustralya	970	960	88.000
Kanada	696	695	11.000
Şili	5750	5700	210.000
Çin	1760	1750	30.000
Meksika	515	550	46.000
Peru	1380	1600	82.000
Rusya	742	740	30.000
Diğer Ülkeler	3600	3900	150.000
Dünya Toplam	18500	18.700	720.000

3.1 Bakır Üretimi

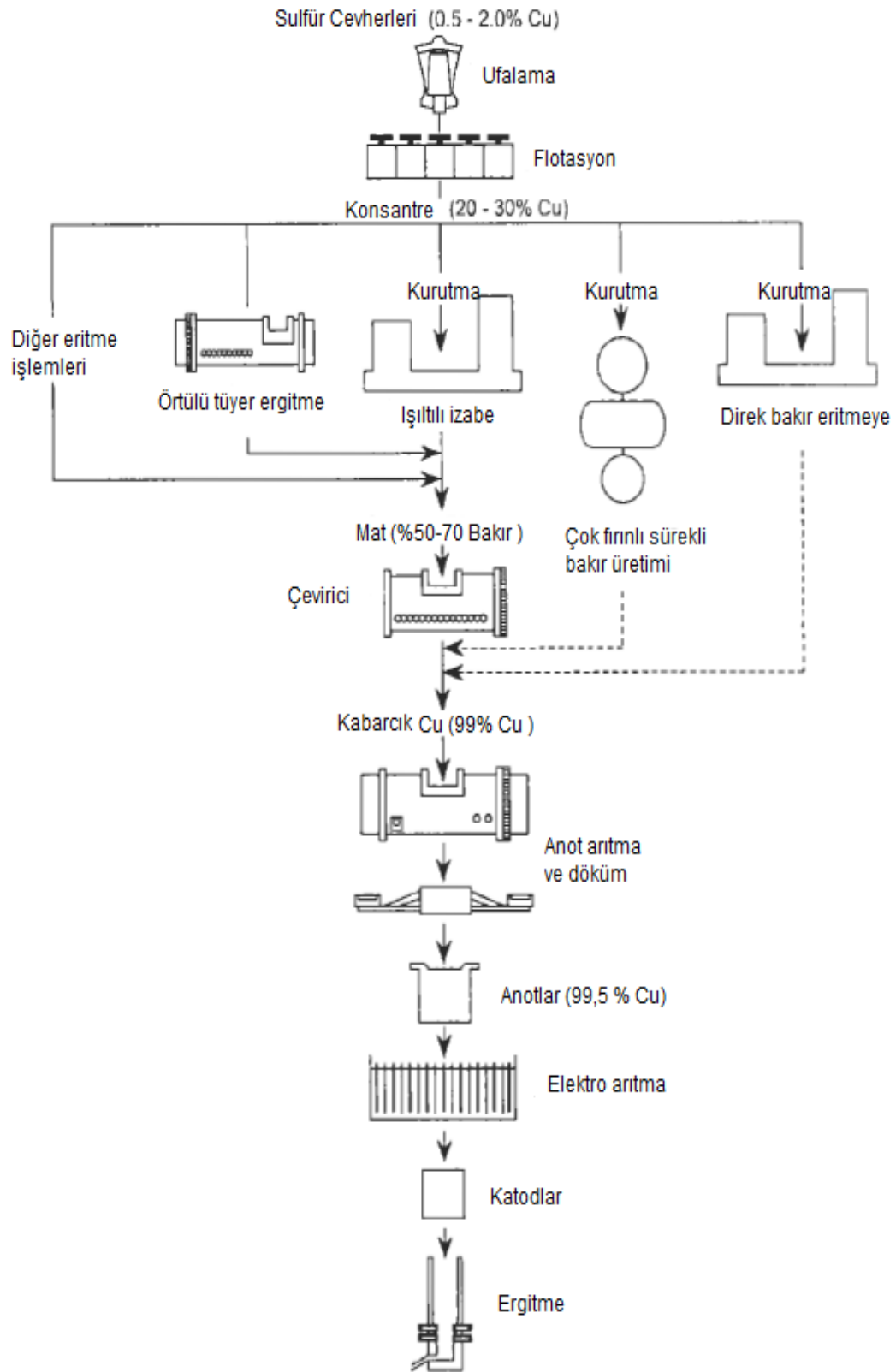
Bakır daha çok yer kabuğunda bakır-demir-sülfür ve bakır sülfür mineralleri olarak bulunmaktadır. Örneğin: Kalkopirit (CuFeS_2), bornitin (CuFeS_4) ve kalkozin (Cu_2S). Bir cevher kütlesindeki bu minerallerin konsantrasyonu azdır. Tipik bakır cevherleri %0,5 %1 arası Cu (açık ocaklar) veya %2 Cu (yeraltı madenleri) içermektedir. Saf bakır bu cevherlerden konsantrasyon, ergitme ve rafine aşamalarından geçilerek üretimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.1)[13].

Bakır ayrıca oksitlenmiş minerallerde oluşmaktadır (karbonatlar, oksitler, hidroksi-silikatlar, sülfatlar), ancak daha az ölçüdedir. Bakır genellikle bu minerallerden hidrometalurjik yöntemlerle üretilmektedir (Şekil 3.2). Hidrometalurji ile kalkosit (Cu_2S)'den bakır üretimi yapılmaktadır.

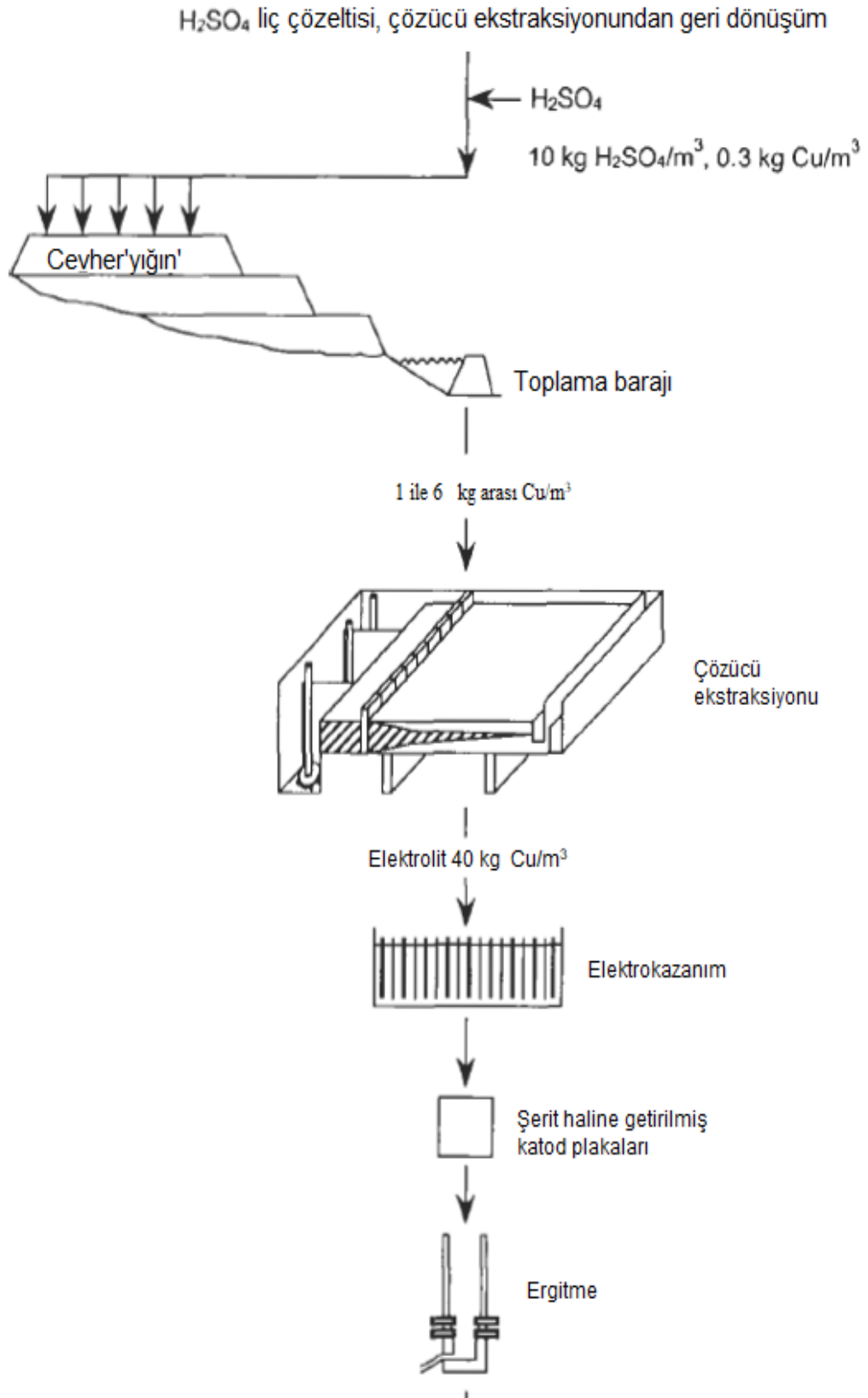
Üçüncü temel bakır kaynağı hurda bakır ve alaşımlarıdır. İkincil üretim dediğimiz; kullanılmış nesnelerden bakır üretimi, toplam bakır üretiminin %10-15'i civarındadır. Ayrıca endüstride imalat ve döküm aşamalarında oluşan hurdaların tekrar kullanımı bulunmaktadır. Genellikle endüstride firma bünyesinde döndüsü yapılan metallerin istatistikleri paylaşılmamaktadır. Bu nedenle ikincil olarak verilen istatistiklerin daha fazla olduğu düşünülmektedir.

3.2 Bakır-Demir-Sülfür Cevherlerinden Bakır Üretimi

Dünya'daki cevherden bakırın üretimin takribi %80'i Cu-Fe-S cevherlerindedir. Cu-Fe-S mineralleri sulu çözeltilerle basitçe çözülmez. Bu sebepten ötürü bu minerallerden bakır üretimini yoğunlukla pirometalurjiktir [13].



Şekil 3.1 Sülfür cevherlerinden bakır çıkarmak için temel işlemler [13]

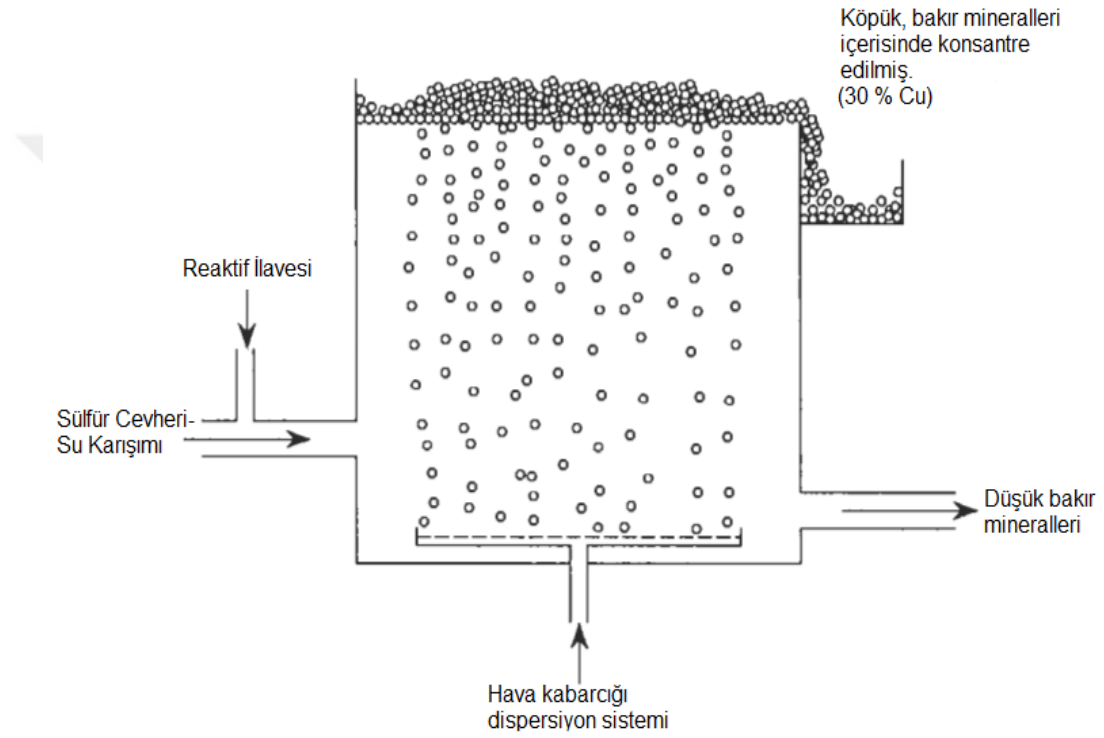


Şekil 3.2 'Oksit' ve kalkokit cevherleri için hidrometalurjik yığın liçi bakır özütleme akış şeması [13]

3.2.1 Köpük Flatasyonu ile Konsantrasyon

Cu minerallerini izole etmenin en etkili yöntemi köpük flotasyonudur. Bu işlem, Cu minerallerinin, su ile ince öğütölmüş bir cevher karışımından yükselen hava kabarcıklarına bağlanmasına neden olur (Şekil 3.3).

Flotasyon seçiciliği, Cu minerallerini su itici hale getiren ve atık mineralleri 'ıslak' bırakan reaktifler kullanılarak oluşturulur.



Şekil 3.3 Flotasyon görsel görünümü [13]

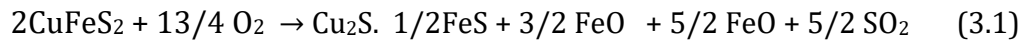
Reaktifler cevherdeki Cu-Fe-S ve Cu-S minerallerinin yükselen hava kabarcıklarına yapışmasına neden olur. Bunlar daha sonra kısa ömürlü bir köpükte birikir. Yüzen atık, son olarak atılmadan önce birkaç hücreden geçer. Çeşitli tip ve ölçülerde hücreler kullanılır. Bu köpük konsantre olmak için sudan arındırılır.

Bu reaktifler Cu minerallerinin yükselen kabarcıklar üzerinde kalmasını sağlar. Diğer mineraller yüzdürülmeden kalır. 'Yüzen' Cu mineral partikülleri, %30 Cu konsantresi haline gelmek için bir köpük içinde yüzdürme hücresinden taşmaktadır[13].

Yüzdürmeden önce, bakır cevherinin ince tanelere ezilmesi ve öğütülmesi sağlanmaktadır. Ergitme işleminde ince öğütülmüş malzemelerin etkili olması kullanımına yol açmıştır.

3.2.2 Mat Ergitme

Mat ergitme, büyük ve yüksek sıcaklıktaki (1250 °C) bir fırında oksitleme ve yüzdürme konsantresini ergitme işlemidir (Şekil 3.1). Ergitme işleminin amacı Cu-Fe-S konsantresinden S ve Fe'yi oksitleyerek Cu ile zenginleştirilmiş bir ergimiş sülfür fazı (mat) üretmektir. Oksidan genellikle oksijence zenginleştirilmiş havadır[13].



$$\Delta H_{25^\circ\text{C}} = -450 \text{ MJ/kg mol CuFeS}_2 \quad (3.2)$$



$$\Delta H_{25^\circ\text{C}} = -20 \text{ MJ/kg mol FeO} \quad (3.4)$$

Ergitme ürünleri konsantrasyon içerisindeki Cu'nun çoğunu içeren ergimiş sülfür mat (%45-75 Cu) ve mümkün olduğunca Cu içermeyen ergimiş oksit cürufudur. Ergimiş mat daha sonra saf olmayan ergimiş bakır oluşturmak için bir dönüştürme fırınında dönüştürülmektedir.

Mar ergitmede asgari Cu içeren cüruf hedeflenmektedir.

3.2.3 Dönüştürme

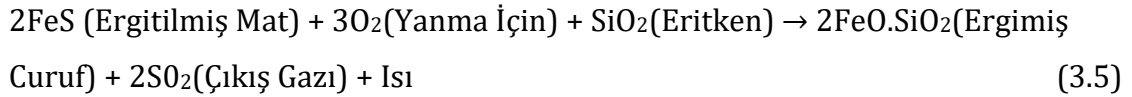
Bakır dönüştürme ergimeden elde edilen ergiyik matın oksijence zenginleştirilmiş havada veya normal havada oksitlenmesidir. Ham (%99 Cu) ergimiş bakır üretmek için Fe ve S'yi mattan uzaklaştırılır. Ardından bu bakır ateş ve elektro-rafine prosesine girer. Dönüştürme genellikle silindirik Peirce-Smith dönüştürücüsünde yapılır.

Sıvı mat (1200 °C) ergitme ocağından büyük kepçelerde aktarılır ve büyük bir merkezi ağızdan konvertöre dökülür daha sonra oksitleyici işlem başlatılır.

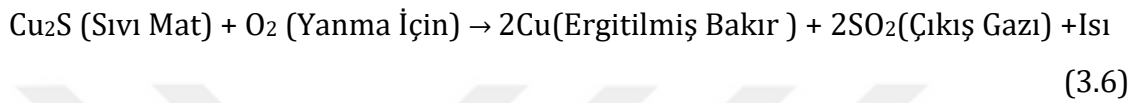
Konvertör, kanal uzunluğu boyunca oksijenle zenginleştirilmiş havayı içeriye besler veya havayı mat içine bir tüyer çizgisi boyunca döndürür. Dönüştürücüde Fe ve S oksidasyonu ile üretilen ısı, işlemin ototermal olarak gerçekleşmesi için yeterlidir.

Dönüşüm iki ardışık aşamada gerçekleşir:

1) FeS eliminasyonu veya cüruf oluşturma aşaması



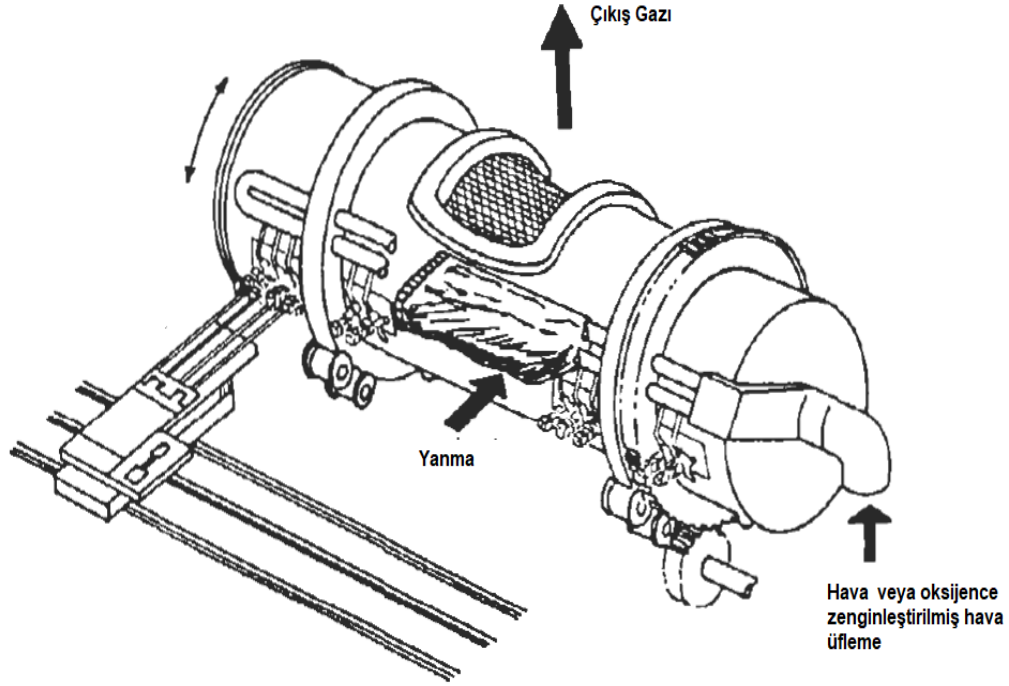
2) Kabarcıklı bakır şekillendirme aşaması



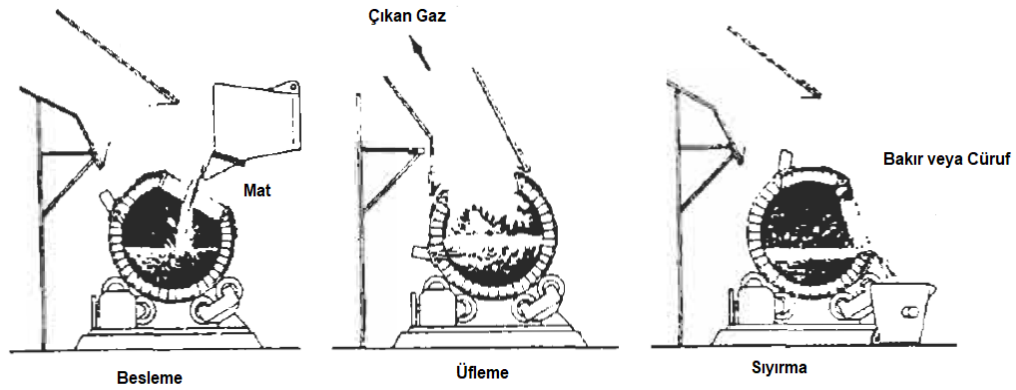
Bakır üretimi, mat yaklaşık %1'den daha az Fe ihtiva edene kadar gerçekleşmez, böylece Fe'nin çoğu bakır üretimi başlamadan önce konvertörden (cüruf şeklinde) elimine edilebilir. Ayrıca, bakır içerisindeki sülfür %0.02'nin altına düşene dek bakırın önemli bir oksidasyonu gerçekleşmez. Üfleme bu kükürt uç noktasının yakınında sona erdirilir. Ortaya çıkan 'blister' bakır rafinasyon prosesine aktarılır [13].

Dönüştürücüdeki koşullar güçlü olması nedeni ile oksitleme ve çalkalanma gerçekleşir. Bu nedenle bu kısımda cürufta yaklaşık %4 ile %8 bulunur. Bu Cu, çökeltme veya katılaştırma ile geri kazanılır. Ardından kalanı satılır veya atılır[13].

SO₂, dönüştürücü çıkış gazının içinde hacimce %8 ile %12 arasında, her iki dönüştürme reaksiyonunun bir yan ürünü olarak bulunmaktadır ve ergitme fırını gazı ile birleşmektedir. Böylelikle sülfürik asit olarak elde edilmektedir. Bununla birlikte, doldurma ve boşaltma sırasında SO₂'nin atmosfere bir miktar sızıntısı vardır (Şekil 3.5). Bu sorun, sürekli dönüştürme işlemlerinin geliştirilmesini teşvik etmektedir.



Şekil 3.4 Ergiyik Cu-Fe-S matından ergiyik 'blister' bakır üretmek için Peirce – Smith dönüştürücüsü [13]



Şekil 3.5 Peirce – Smith dönüştürücüsünün besleme, üfleme ve sıyırma aşamalarındaki pozisyonu [13]

3.2.4 Doğrudan Bakır Ergitme

Ergitme ve dönüştürme, Cu-Fe-S konsantrelerinin metalik bakırın oksitlenmesi için ayrı adımlardır. Doğrudan bir fırında bakır üretmek için bu iki adımın birleştirilmesi doğal görünmektedir. Bunun, toplu olarak Peirce-Smith dönüşümünden ziyade sürekli yapılması gerektiği de doğal gözükmemektedir.

2002 yılında Glasgow (İskoçya) ve Olympic Dam (Avustralya) olmak üzere iki yerde tek fırında direk bakır olarak üretime başlanmıştır.

Doğrudan bakır üretimi fırını içerisindeki güçlü oksitleme koşulları cüruf içerisinde %14 ile %24 arasında oksitlenmiş bakır vermektedir. Bu bakırın metalik bakıra indirgenme masrafı az cüruf üreten konsantrelerden çok daha azdır. Birden fazla fırın bile kullandığında doğrudan bakır ergitme, enerji, SO₂ toplama ve maliyet gibi avantajları bulunmaktadır[13].

3.2.5 'Blister' bakırın rafine ve elektro-rafine işlemi

Dönüştürmeden elde edilen bakır, elektrokimyasal işlemle yüksek saflıkta katot bakırına rafine edilir. Bu nihai bakır, 20 ppm'den daha az empürite içermektedir. Elektrik vb. yerlerde kullanımı mümkündür.

Rafinasyon hücrelerinin içindeki katot ile ince anot tabakasının geçişinin olması için elektro rafinasyon işleminin güçlü olması gerekmektedir [13].

Bakır elektro rafine etme şunları gerektirir:

- 1) Anot içerisindeki katışıkların elektrokimyasal olarak CuSO₄-H₂SO₄-H₂O elektrolitine çözünmesi gerekmektedir.
- 2) Elektrolitten paslanmaz çelik veya bakır katotlar üzerine elektrokimyasal olarak saf bakırın (anot safsızlıkları olmadan) kaplanması.

Bakır katotlarda 7 ile 14 gün boyunca biriktirilir. Ardından katotlar hücreden çıkarılır. Bakırlar yıkanır. Elektrolit, H₂SO₄ (150 ile 200 kg/m³) ve CuSO₄ (40-50 kg Cu/m³) 'nin sulu bir çözeltisidir. Ayrıca empürite, çok az klor ve organik "ekleme ajanları" içerir.

Birçok anot safsızlığı bu elektrolitte (Au, Pb, Pt, Sn) çözünmez. Elektro rafine ile etkileşime girmezler. Bunlar çamur olarak toplanır. Ürün kazanımı ve bakır için muamele edilir [13].



Şekil 3.6 Elektrolitik bir hücreden bakır yüklü katotların çıkarıldığı elektrolitik rafineri [13]

As, Bi, Fe, Ni ve Sb gibi diğer safsızlıklar kısmen veya tamamen çözünür ama iyi olan tarafı düşük voltajda (0.3 volt) elektro rafine hücresi bakır ile tepkimeye girmez. Katot bakırının fiziksel kirlenmesini engellemek için elektrolitte birikmemeleri gerekmektedir. [13].

3.3 Bakırın Hidrometalurjik Ekstraksiyonu

Cevherden bakırın yaklaşık %80'i yüzdürme, ergitme ve rafine etme ile elde edilir. Diğer %20'si hidrometalurjiktir. Hidrometalurjik özütleme şunları gerektirir[13]:

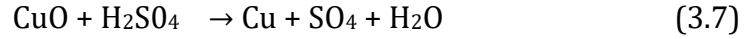
- 1) Kırık veya ezilmiş cevherden Cu'nun sülfürik asit liçi üretimi saf olmayan Cu içeren sulu çözelti.
- 2) Cu'nun saf olmayan çözeltiden solvent çıkarma ile, yüksek Cu elektrolite transferi.
- 3) Bu saf elektrolitten saf katot bakır elektrokaplama.

Bu şekilde en sık kullanılan cevherler şunlardır:

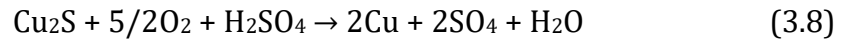
- 1) 'Oksit 'bakır minaralleri, örneğin: karbonat, hidro silikat, sülfat, hidroksi klörürler
- 2) Kalkosit (Cu_2S)

Liç işlemi çoğunlukla, seyreltik sülfürik asidin kırılmış veya ezilmiş cevher yığınlarına (0.5% Cu) serpilmesi ve asidin toplama havuzlarına damlamasına izin verilmesi ile yapılır (Şekil 2). Verimli Cu özütlemesi için birkaç ay liç gereklidir [13].

Oksitlenmiş mineraller sülfürik asit tarafından aşağıdaki gibi reaksiyonlarla hızla çözülür:



Sülfür mineralleri ise şematik olarak oksidasyon gerektirir:



Denklemlerde gösterildiği gibi, sülfid liç bakteriyel etki ile büyük ölçüde hızlanır.

Liç bazen Cu içeren flotasyon atıklarına, maden atıklarına, eski madenlere ve kırık küreciklere uygulanır. Ayrıca, cevher birikmelerinin sızması en mühim kısımdır.

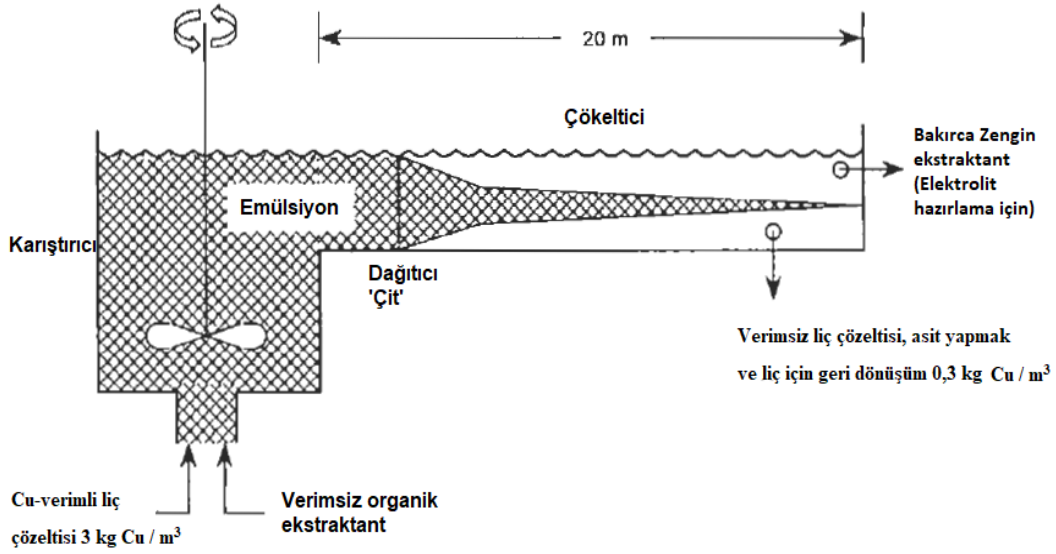
3.3.1 Solvent Özütlemesi

Birikmiş liçlerinden edinilen çözeltiler 1 ile 6 kg Cu/m³ ve 0,5 ile 5 kg H₂SO₄/m³ ve safsızlık ihtiva eder. (Örn. Fe ve Mn). Bu çözeltiler Cu içinde çok seyreltiktir. Saf bakır etal'in doğrudan elektro kaplanması için yeterli saf değildir. Cu'ları saf veya yüksek bakır ihtiva eden Cu elektrolite transfer edilmelidir. [13].

Transfer aşağıda belirtildiği gibi gerçekleştirilir:

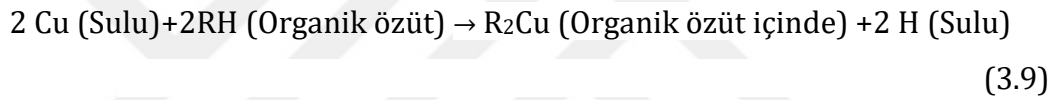
- 1) Saf olmayan bir liç çözeltisinden Cu'nun Cu'ya özgü bir organik özüt içine özütlemesi yapılması.
- 2) Cu yüklü özütün Cu tükenmiş liç çözeltisinden ayrılması.
- 3) Cu'nun yüklü özütten 185 kg H₂SO₄ / m³e elektrolite soyulması.

Özütleme ve sıyırma, büyük karıştırıcı çöktürücülerde yapılır (Şekil 3.7) [13].



Şekil 3.7 Cu özütleme için solvent özütleme mikserinin şematik görünümü [14]

Çözücü özütleme işlemi reaksiyon ile temsil edilir.



Düşük asitli bir sulu fazın organik özüt Cu ile (R_2Cu olarak) 'yüklenmesine' neden olduğunu gösterir. Ayrıca yüksek asitli bir çözeltinin organik maddenin boşalmasına yol açtığını gösterir [13].

Böylece, organik özüt zayıf asitli verimli süzdürme çözeltisi [aşama (1)] ile temas ettiğinde, Cu organik faza yüklenir. Daha sonra organik faz daha sonra yüksek asit elektrolitiyle [aşama (3)] temas ettirildiğinde, Cu elektroliz için uygun olan yüksek Cu "konsantrasyonunda organik maddeden elektrolit haline gelir[13].

Ekstraktanlar kayda değer miktarda Cu emer fakat neredeyse hiç kirlilik içermez. Cu'da güçlü olan ancak safsızlıklarda seyreltik elektrolitler verir.

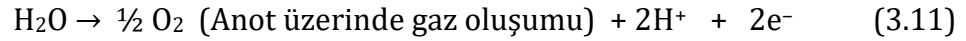
3.3.2 Elektro Kazanım

Yukarıdaki elektrolitlerdeki Cu, saf metalik katot bakırın elektro kaplanmasıyla geri kazanılır. [13].

Katot reaksiyonu:



Anot reaksiyonu:



Yaklaşık 2 volt gereklidir.

Katotta saf metalik bakır (20 ppm'den az istenmeyen safsızlıklar) ve anotta gazlı O₂ üretilir.[13]

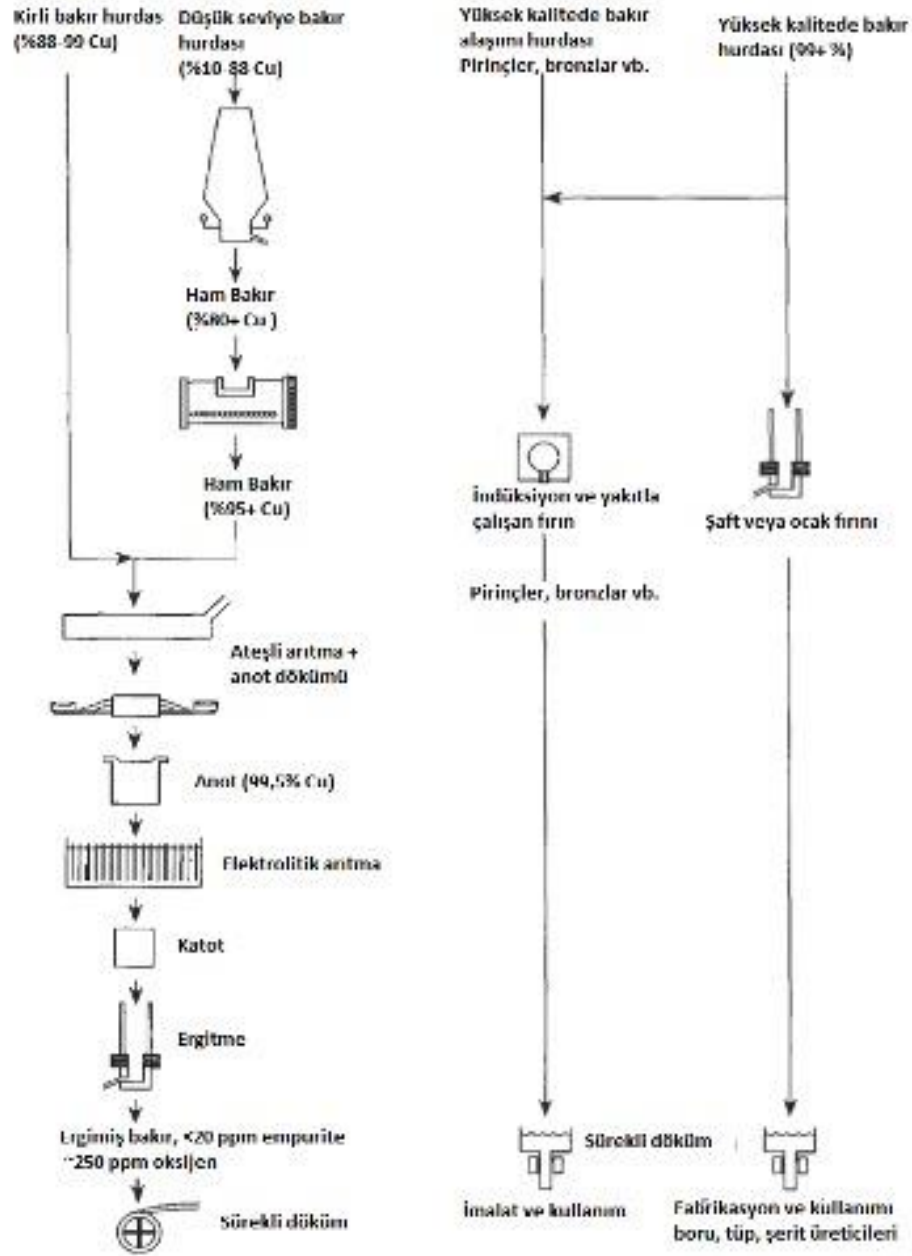
3.4 Ergitme ve Katot Bakır Dökümü

Ürünü yaparken ilk aşama elektro rafine edilmiş ve elektro kazanılmış bakırı ergitmek ve dökümünü yapmaktır. Ergime genellikle, katot tabakalarının artan sıcak yanma gazları ile ergitildiğı dikey şaft fırınlarında gerçekleştirilir. Düşük kükürtlü yakıtlar kullanılır. Böylelikle kükürt girişı engellenir. Alevleri azaltmak, aşırı oksijen alımını önler.

Ergimiş bakır, haddeleme, ekstrüzyon ve sürekli döküm ile dökölür. Özellikle önemli bir kombinasyon, sürekli çubuk döküm yöntemi haddelenmesidir. Böylelikle 1 cm çapında çubuk tel çekilerek üretilmektedir.

Yukarıda belirtilen bakır "elektrolitik tok" olarak isimlendirilmektedir. %~0.025 'O' ve 20 ppm'den daha az empürite ihtiva eder. En çok kullanılan bakır çeşididir. Bir diğeri ise oksijensiz bakırdır (<5 ppm O). Çok yüksek özenli uygulamalarda kullanılır. (Örn. fiber optik demetlerini sarmak için) Bakır üretiminin yaklaşık %1'ini oluşturur. Bakır üretiminin önemli bir kısmını alaşımlı malzemeler oluşturmaktadır. En çok bakır alaşımı pirinç ve bronz olarak üretilmektedir. Bu malzemeler için bakır esas olarak geri dönüşüm hurdalarından gelir.[13]

Alaşım hurdası (pirinç, bronz) ergitilir ve alaşım olarak dökölür. Ergitme işleminin saf bakır ile rafine edilmesinin bir avantajı yoktur. Empüriteleri gidermek için ergime sırasında cüruf lama gerçekleştirilir [13].



Şekil 3.8 Hurdadan bakır ve bakır alaşımlarının geri kazanılması için işlemlerinin akışı [13]

3.5 Bakır ve Bakır Alaşımlı Hurda Geri Dönüşümü

Daha önceden hurdadan ikincil olarak üretilmiş bakırın geri dönüşümü, birincil üretilmiş bakır üretiminin %10-15'ini oluşturmaktadır. Prosesten çıkan hurdanların geri dönüşümü %25 veya %35 civarındadır[13].

Hurdadan bakır üretimi avantajları bulunmaktadır:

- 1) Bakır cevheri madenciliği ve işlenmesinden çok daha az enerji gerektirir.
- 2) Maden, yoğunlaştırıcı, sızıntı ve ergitme atıklarını önler.
- 3) Gelecek nesiller için bakır bulunmasını sağlamaya yardımcı oluyor.

Bakır hurdaya uygulanan işlem saflığına bağlıdır (Şekil 3.8). En düşük kaliteli hurda, birincil veya ikincil (hurda) ergitme rafinerisinde konsantre gibi ergitilir. Ardından saflaştırılır. Yüksek kaliteli hurdaya genellikle elektro rafine yapılır. En yüksek kalitedeki hurda (çoğunlukla üretim hurdası) genellikle eritilir. Rafine edilmeden dökülür. Bu tür ürünler genellikle elektrik dışı ürünler için kullanılır (Tüp, şerit vb.)[13].

3.6. Sürekli Döküm

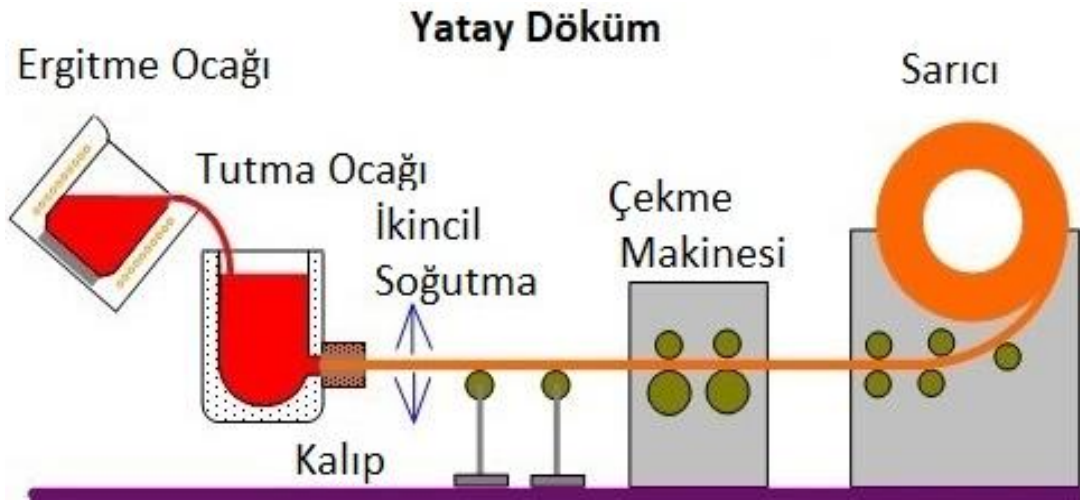
Sürekli döküm, sıvı metalin bir tarafı açık bir potadan dökülmesi ile başlar. Katılaşma ile ileri ve geri olarak hareket eder. Sürekli dökümde genişlik sabittir. Kalınlık kullanılan kalıba göre değişkenlik gösterebilir. Uzunluk ise talepler ve kalıp ömrü doğrultusunda belirlenir. Demir ve demir dışı alaşımlar için sürekli döküm yönteminden istifade edilmektedir. Geleneksel sürekli döküm yönteminde, katılaşan metal kalıp yüzeyine temas ederek hareket etmektedir. Bu yöntemde sabit veya osilasyon hareketleri yapan kalıplar kullanılmaktadır. İleri ve geri hareket etmesinden dolayı sürtünme oluşur. Bu durum malzemenin yüzeyinde mikro çatlakların veya benzer kusurların oluşmasına yol açabilir. Kalıp yüzeyi için yağlama yağı kullanılabilir. Bazı kalıplar kendinden yağlamalı grafittir. Böylelikle sürtünmeyi / yapışmayı azaltmaktadırlar. Bunun sonucunda hatalı yüzey bölgesini azalmaktadır. Bu kusurlu bölge genellikle haddelemeden önce yüzeyi temizlenir. Hareketli kalıpta sürekli döküm ile üretilen şerit ve plakalar düşük kusurlu yüzeye sahiptir. Bu ürünler, yüzey temizleme olmadan haddelenebilir. Sürekli döküm yönteminde kalıp konumuna bağlı olarak (dikey veya yatay) sürekli döküm makineleri dikey veya yatay olabilir[15].

3.6.1 Yatay Sürekli Döküm

Bu yöntem daha çok bakır ve alüminyum alaşımlarının dökümünde kullanılır. Grafit su soğutmalı sabit kalıplarla yatay sürekli döküm ve ikiz merdaneli döküm bu tipin en popüler yöntemidir.

Sürekli dökümde su soğutma (birincil ve ikincil) ile katılaşma oranı diğer döküm yöntemlerinden daha yüksektir, bu nedenle sürekli döküm ile üretilmiş ürünler daha düzgün, daha ince tane yapısına ve gelişmiş mekanik özelliklere sahiptir [15].

Yatay sürekli döküm yönteminde metal ergitme ocağında ergitildikten sonra tutma ocağına aktarılır. Tutma ocağı çıkışında seramik kalıp genellikle bakır plakaları ile kaplıdır. Bakır plakaların etrafında dolaşan su vasıtası ile birincil soğutma işlemi gerçekleştirilir. Seramik kalıp içerisinde katılaşan metal çekme makinesi vasıtası ile dışarıya aktarılmaya devam eder. Bu esnada ikincil soğutma işlemi gerçekleştirilir. Ardından taşınabilirliğin artırılması amacı ile sarıcı makine ile sarılır (Şekil 3.9).

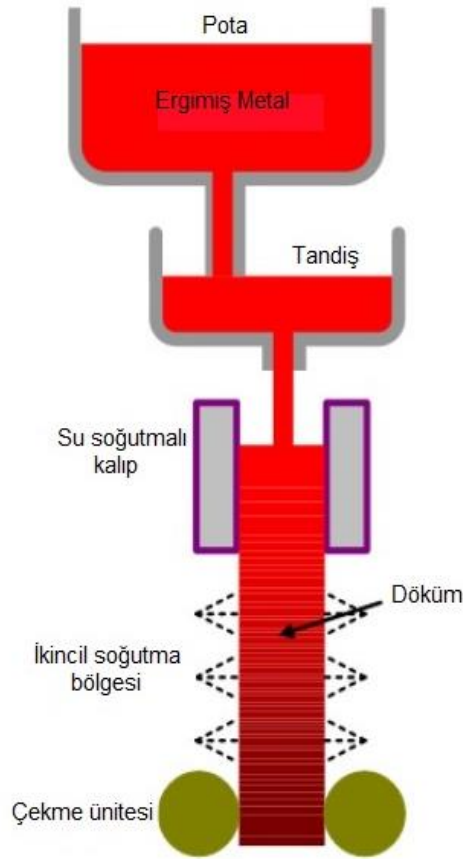


Şekil 3.9 Yatay sürekli döküm [16]

3.6.2 Dikey Sürekli Döküm

Ergimiş metalin sürekli olarak aktarıldığı, döküm işlemi için gerekli sıvı metali kontrol edilebilir bir hızla besleyen ara potaya tandış adı verilmektedir. Döküm, kalıptan çıktığında, ikincil soğutma bölgesinde, döküm yüzeyine püskürtülen su

(veya havalı su) ile soğutulur. Dikey sürekli döküm makinelerinin çoğu, dökümü büken ve şeklini dikeyden yataya değiştiren ikincil kalıplar ile donatılmıştır. Dökümü gerçekleştirilen metal geri çekilir. Daha sonra bir kesme makinesi ile kesilir. Ardından kalıptan çıkarılır. Döküm işlemi, kalıba bir durdurucu yerleştirilmesiyle başlar. Durdurucunun üzeri katılaşmaya başladıktan sonra ergimiş metalin dökümü devam eder. Durdurucu, daha sonra dökümden ayrılır (Şekil10).



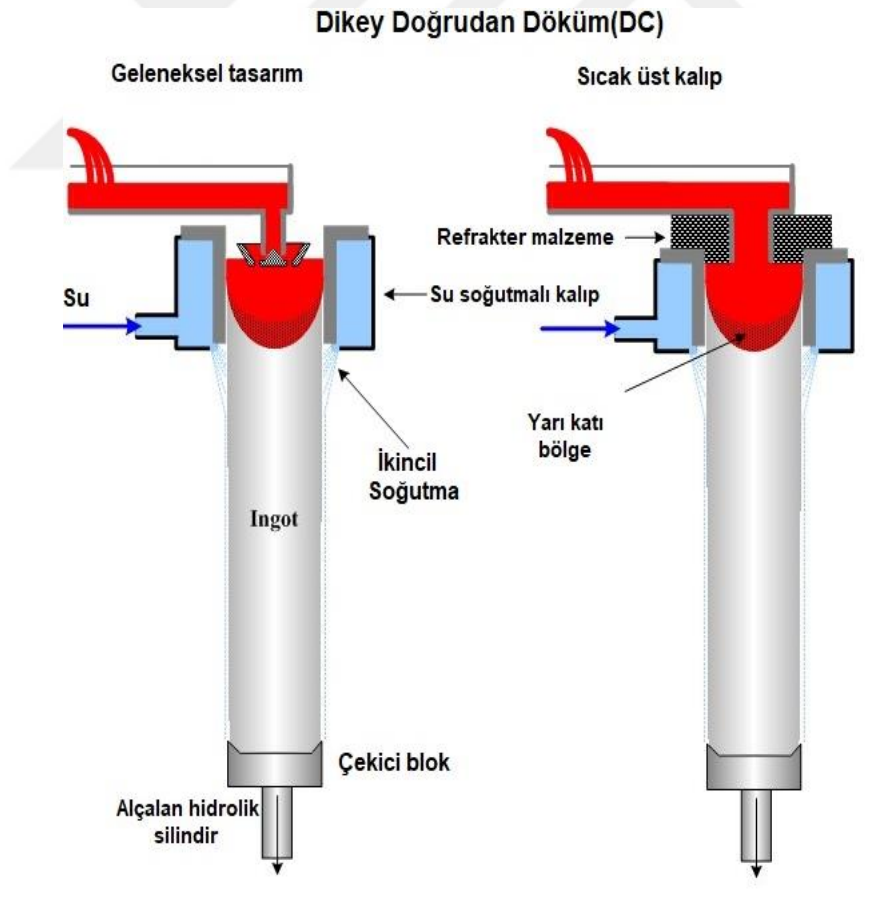
Şekil 3.10 Dikey sürekli döküm [15]

3.6.2.1 Direct Chill Sürekli Döküm

Direct chill dikey yarı sürekli döküm işlemi, daha sonra yeniden ısıtılan, ve sıcak haddelenen ve sarılı uzun levhalar üretmek için kullanılır [17]. Direct Chill dökümde metalin katılaşması su soğutmalı kalıpta başlar. Ergiyik metal, bir oluk ve dikey bir borudan (nozül) kalıp boşluğuna akar. Sıvı metalin akışında metal azaldığında musluğun çıkış aralığını artırır. Sıvı metal yükseldiğinde daraltan bir vana ile

ayarlanır. Alüminyum veya bakır alaşımlarından yapılan kalıbın altında delikler bulunur. Ortaya çıkan külçenin yüzeyine deliklerden akan su jetleri, onun doğrudan soğumasını ve katılaşmasını sağlar. Katılaşma esnasında ısının çoğu ikincil soğutma ile giderilir. Sadece %20'si kalıp içerisinde bulunun su çevrimleri ile giderilir. Metal ikincil soğutma bölgesinde katılaşır ve soğur. Sıvı metalin bulunduğu kısmın derinliği genellikle 200-500 mm'dir. Bu döküm işleminde kalıp genellikle çok dardır (75-150 mm). Döküm hızı normalde 5-15 cm/dakikadır. Direct Chill döküm yönteminde döküm işleminden önce kalıbın alt kısmına bir durdurucu blok yerleştirilir. Durdurucunun bulunduğu seviyeye kadar sıvı metalle doldurulduğunda proses başlar. Daha sonra, bir hidrolik silindir tarafından yönlendirilen durduru blok, döküm külçesini kalıptan çekerek alçalmaya başlar. Çekici belirlenen noktaya geldiğinde döküm işlemi sona erer (Şekil 3.11)[18].

Bu döküm yöntemi genellikle, demir dışı metallerin (alüminyum alaşımları, bakır alaşımları, magnezyum alaşımları) dikey yarı sürekli dökümü için kullanılır [15].



Şekil 3.11 Direct Chill Sürekli Döküm [18]

3.6 Haddeleme Prosesi

3.6.1 Haddeleme Prosesi ve Tanımlar

Haddeleme en önemli metal şekillendirme işlemidir. Demir ve demir dışı metallerin ve alaşımlarının %90'ından çoğu nihai hale getirilmek için haddelemeye tabi tutulur. Haddelenmiş metallerin kullanılabilir şekilleri, (Şekil 3.12) ve (Şekil 3.13)'da gösterildiği gibi plaka, levha, şerit, folyo, ray, kiriş, kanal, aç, çubuk, çubuk ve dikişsiz boru gibi farklı bölümlerdir[14].

Haddeleme işleminde, metal iki döner silindirik merdane arasındaki boşluktan geçer. Böylelikle yüksek sıkıştırma gerilimi uygulanarak kalıcı deformasyon yapılmış olur[14].

Merdaneler düz veya yivli olabilir. Her bir pasoda merdaneler arası sabittir. Her bir pasoda merdane arası mesafe azalır. Silindirler elektrikli tahrik sistemi (motor, şanzıman, mil) ile ters yönde döndürülür[14].

Merdanelerin dönme yönüne bağlı olarak, giriş malzemesi merdaneler arasındaki boşluğa bir uçtan girer ve diğer uçtan azaltılmış bir enine kesit ile çıkar, yuvarlanma boşluğu alanı, giriş malzemesinin enine kesit alanından daha az tutulur. Haddeleme işleminde nihai kalınlığa ulaşmak için ardı ardına merdanelerin arasından geçer. Geçişlerin her biri sırasında, rulo boşluğu, iki rulo birbirine yaklaştırılarak veya malzemenin azalan enine kesit alanına sahip farklı rulo boşlukları setinden geçmesine izin verilerek ayarlanır[14].

Rulmanlara monte edilen ruloların tüm montajı, rulo boşluk ayar tesisleri ve rulo tahrik düzenlemesi ile iki döküm çerçevesinin (muhafazalar olarak adlandırılır) boşlukları arasında tutulan yatak bloklarında (takozlar) tutulur. Tüm düzeneğe "haddehane standı" denir. Bir veya daha fazla girdi malzemesi grubundan bitmiş haddelenmiş ürünler elde etmek için diğer gerekli ve ilgili ekipmanla birlikte bir veya daha fazla sayıda hadde tezgahına haddehane veya hadde tesisi denir[14].

Haddeleme işleminde kullanılan farklı şartlara ve metota göre gruplandırılır. Bunlar:

- 1) Malzemenin sıcaklığına göre; sıcak haddeleme (yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklık), ılık haddeleme ve soğuk haddeleme olarak isimlendirilir.
- 2) Haddelenmiş ürünün şekline göre; düz parçalar veya içi boş haddeleme.
- 3) Yuvarlanma yönü; uzunlamasına, enine ve eğriltme.
- 4) Merdane dönme yönünün tersine çevrildiği, haddehane çalışması sürekli (tek yönlü) ve ters haddeleme modu.

Basit haddeleme yönteminde eşit çaptı merdana kullanılır. Her iki merdenin hızı birbirine eşittir. Birbirlerine ters yönde dönerler. Böylelikle çıkan malzemenin mekanik özellikleri homojen olur. Bu işlemde malzeme sadece merdanelerden gelen kuvvet ile hareket eder [14].

3.6.2 Sıcak ve Soğuk Haddeleme Prosesi

Metalurjik açıdan, haddeleme işlemi sıcak haddeleme (I) ve soğuk haddeleme (II) olmak üzere iki geniş kategoride sınıflandırılabilir.

3.6.2.1 Sıcak Haddeleme

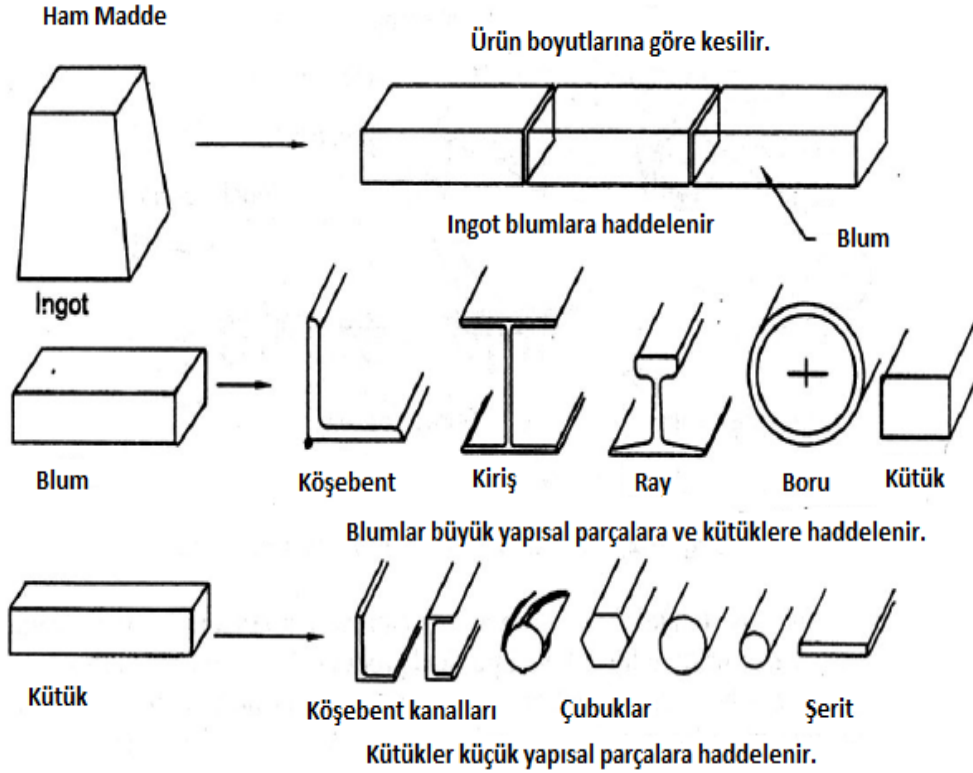
Sıcak haddelemede, malzeme YKR sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta haddelenir. Sıcak haddelemenin iki yönden faydası bulunmaktadır. İlk olarak, yüksek sıcaklıkta herhangi bir metal veya alaşımın gücü azalır. Böyle kalınlık indirmek için gerekli güç azalır. Bu nedenle haddelemede daha küçük güce sahip haddeleme makineleri kullanılabilir. Bir malzemenin YKR sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta haddelenmesinin diğer faydası, malzeme sertleşmeksizin büyük miktarda plastik deformasyon yapılabilmesidir. Gerinim sertleşmesiyle, deformasyon stresi arttıkça, malzeme sert ve kırılgan hale gelir. Sonuç olarak, malzemenin deforme olması gittikçe zorlaşır ve sınırın ötesinde deformasyon çeşitli hatalara veya kusurlara yol açar[14].

Slabların levha veya şerit ürünlere haddelenmesi, kalınlığın azaltılması ve tane inceltmesi için gerçekleştirilir. Sıcak haddelenebilen bakır ve bakır alaşımları için en hızlı ve en ekonomik indirgeme yöntemi sıcak haddelemedir. Levhayı sıcak haddelemeye hazırlamak için, üst veya gaga diye nitelendirilen kısım testere ile kesilir ve daha sonra ısıtma için bir fırına taşınır. Aynı alaşımdan levhalar veya

Çubuklar çok fazla gruplanır ve fırına beslenir. Fırın sıcaklığı ve slabların fırının her bir kısmından geçme süresi, slabın kalınlığı, uzunluğu ve genişliğine göre uygun olarak ayarlanır [17].

Sıcak haddelemede en önemli parametre sıcaklıktır. Sıcak haddeleme işleminde sıcaklık alaşıma göre belirlenir. Çok yüksek veya çok düşük bir sıcaklıkta sıcak haddeleme denenirse slablar hasar görür ve hurdaya çıkarılması gerekir. Bu duruma ilaveten işlem sonrası tane boyutunu etkileyen en önemli faktör sıcaklıktır. Belirtilen zellikleri karşılamak için sonraki işlemler (yani soğuk işleme ve tavlama) bu tane boyutuna bağlıdır. Bazı alaşımlarda, belirli elementer belirli sıcaklıkların üzerinde zeltiye alınır. Ardından daha düşük sıcaklıklarda çökelir. Sıcak haddelemeyi bu sıcaklığın üzerinde bitirilir ve hızlıca soğutulursa zelti sertleşmesi de uygulanabilir. Yapılan bu işlemlerle malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri arttırılabilir. [17].

İngotların blumlara ve blumların kütüklere haddelenmesi ve kütüklerin yapısal bölümler, çubuklar, plakalar ve şeritler gibi farklı kullanılabilir ürünlere daha fazla haddelenmesi, sıcak haddeleme yoluyla haddelenir. Sıcak haddeleme ile üretilen ürünler (şekil 3.12)'de verilmiştir [14].



Şekil 3.12 Sıcak haddeleme ile üretilen ürünler [14]

3.6.2.2 Soğuk Haddeleme

Bir malzemenin haddelenmesi oda sıcaklığında veya malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapıldığında buna soğuk haddeleme denir. Açıkçası, soğuk haddelemede sıcak haddelemenin avantajları yoktur. Bu yöntemde uygulanması gereken güç daha fazladır. Ayrıca, haddelenme sırasında pekleşme meydana gelir. Malzemenin dayanımı, indirgeme miktarının artmasıyla artar[14].

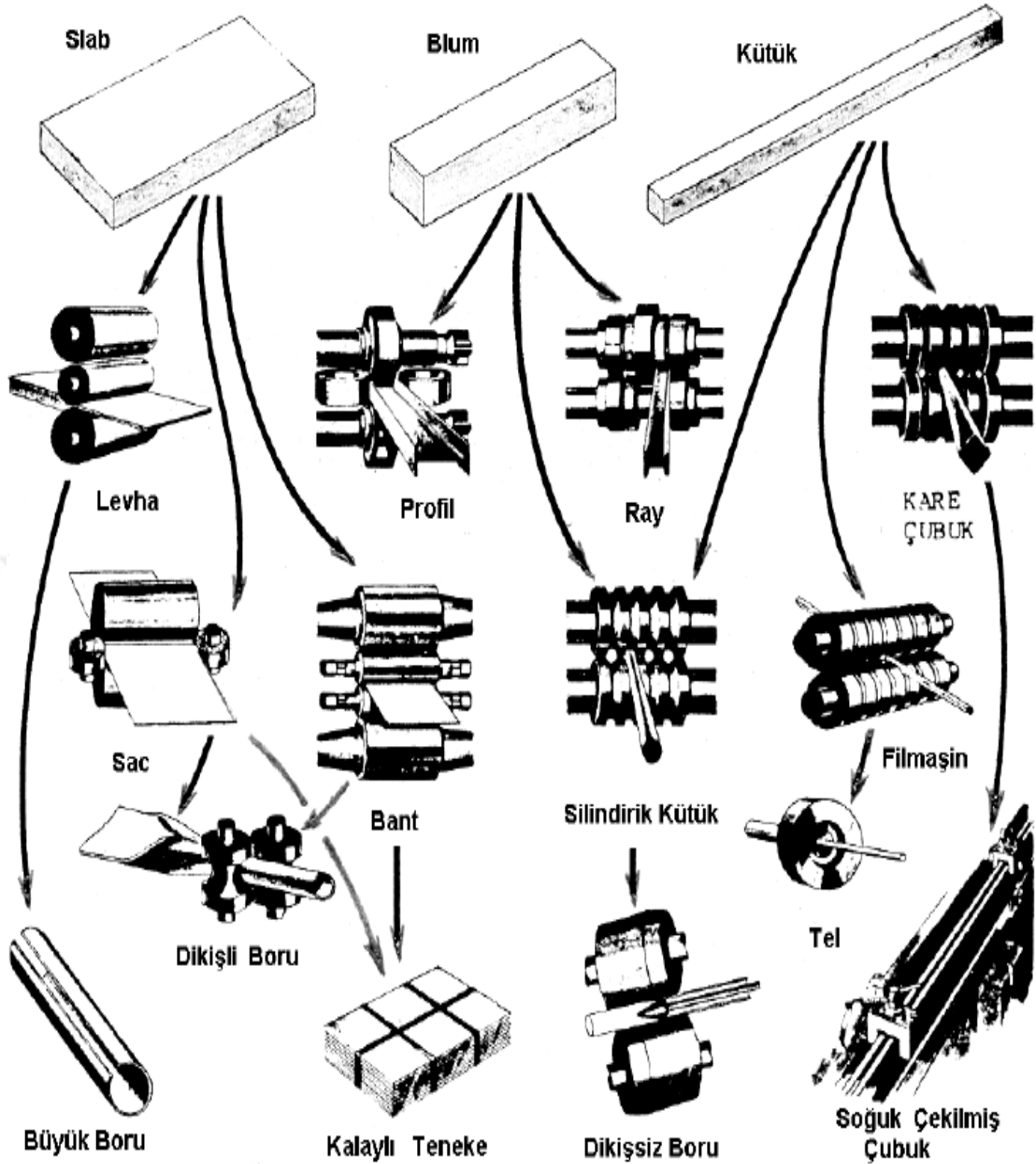
Sıcak haddelemenin soğuk haddelemeye kıyasla bazı avantajları bulunmaktadır. Soğuk haddeleme işlemi öncesinde işlem sonrası malzemenin tane boyutunu öngörmek mümkündür. Böylelikle proses için istenilen mekanik özelliklere uygun hareket edilebilir. Soğuk haddeleme işleminde işlem yönü doğrultusunda taneler uzar. Tane hadde yönünde uzadıkça yüzey alanı artar. Hacmi ise aynı kalır. Bunun sonucu olarak efektif tane boyutu azalır. Haddeleme işlemi devam ettikçe, uzun taneler kırılır. Böylelikle tane boyutu giderek küçülür. Malzemede pekleşme arttıkça sertleşir[14].

Plastik şekil verme belirli bir indirgmeden sonra, soğuk haddelenmiş malzeme daha fazla haddelenemeyecek kadar sert ve kırılgan olur. Bu aşamada, soğuk haddelenmiş malzeme yeniden kristalizasyona tabi tutulur. Fırın sıcaklığı ve proses süresi değiştirilerek malzemenin tane boyutu kontrol altına alınabilir [14].

Soğuk haddeleme genellikle levha, şerit ve folyo gibi yassı haddelenmiş ürünler üretmek için yapılır. Haddelenmiş ürünün uzunluğu çok büyük olduğunda, malzeme sarılır ve bobin formunda kullanılır[14].

Soğuk haddelemede, deformasyon derecesi, yani herhangi bir haddeleme geçişinde yassı ürünün kalınlığındaki azalma, yüksek haddeleme ayırma kuvvetinden kaçınmak için düşük tutulduğundan, genellikle gerekli sayıda ara tavlama ile birkaç haddeleme geçişi gereklidir. Aynı yönde tane deformasyonu olan birkaç haddeleme geçişi, soğuk haddelenmiş ürünlerin çeşitli mekanik özelliklerine yönelimli bir değişkenlik verir. Bu tür yönlü eğilim (anizotropi) genellikle haddeleme işleminin son geçişinden sonra tavlamadan sonra bile kalır. Özelliklerin bu yönlülüğü, soğuk haddelenmiş malzemenin daha sonraki işlenmesi sırasında dikkate alınmalıdır[14].

Soğuk haddelenmesi esnasında malzeme, iki düz merdane arasından geçer. Soğuk haddelenmiş nihai ürünün kalınlığının en ve boyda sabit tutulması için hadde makinelerinde belirli gelişmiş yöntemler kullanılmaktadır.[14].



Şekil 3.13 Haddeme işleminden geçen çeşitli bitmiş ve yarı bitmiş çelik ürünlerinin üretimi için şematik akış şeması [14]

3.7 Bakır Isıl İşlemi

Isıl işlem, genel olarak, önceden belirlenmiş bir sıcaklığa kadar ısıtmayı, bu sıcaklıkta tutmayı ve son olarak çok yavaş bir hızda soğutmayı içerir. Isıl işlem proseslerinin çeşitli amaçları bulunmaktadır. Bunlar; katılaşma, işleme, dövme, haddeme veya kaynak sırasında oluşan iç gerilmeleri hafifletmek, sünekliği ve tokluğu iyileştirmek veya eski haline getirmek, işlenebilirliği geliştirmek, kimyasal

homojenliği ortadan kaldırmak ve tane boyutunu istenilen boyutlara getirmektedir[19].

Bakır alaşımları için bitmiş ürünler genel olarak döküm ürünleri ve işlem yapılmış ürünler olarak sınıflandırabilmektedir. Bu ürünler tel, kablo, levha, şerit, çubuk, boru, dövme, döküm ve toz metalurjisi şekillerinden oluşur [20].

Bakır ve bakır alaşımlarından yapılan ürünler belirli amaçlara bağlı olarak, homojenleştirme, yeniden kristalizasyon, gerilim giderme ve çökelme sertleştirme gibi çeşitli amaçlarla ısıt işleme tabi tutulmaktadır [19], [20].

3.7.1 Homojenizasyon

Difüzyon tavlaması olarak da bilinen bu işlem, herhangi bir yapısal düzensizliği gidermek için kullanılır. Dendritler, sütunlu tanecikler ve kimyasal homojensizlikler kırılğanlığı artırır ve bakırın sünekliğini ve tokluğunu azaltır. Ayrılmış bölgeler elimine edilir. Difüzyon sonucunda bu işlemlle kimyasal olarak homojen bir yapı elde edilir [19].

Homojenleştirme, esas olarak kalay ve nikel içerenler olmak üzere, bazı döküm ve sıcak işlenmiş malzemelerde bulunan segregasyonu çözmek ve dağıtmak için uygulanmaktadır.

Difüzyon ve homojenizasyon, kalay bronzlarında, silikon bronzlarında ve bakır nikellerde diğer bakır alaşımlarının çoğuna göre daha yavaş ve daha zordur. Bu nedenle, bu alaşımlar genellikle sıcak veya soğuk işleme operasyonlarından önce uzun süreli homojenleştirme işlemlerine tabi tutulur.

Yüksek kalaylı fosfor bronzları (%8 Sn'nin üzerinde) aşırı segregasyon için belirtilmiştir. Bu alaşımlar bazen sıcak işlenmiş olsalar dahi; olağan uygulama, onları soğuk haddelemektir. Bu durum ilk olarak kırılğan ayrılmış kalay fazının yayılmasını gerekli kılmakta böylece mukavemeti ve sünekliği arttırmaktadır. Haddelemeden önce sertliği azaltmaktadır [20].

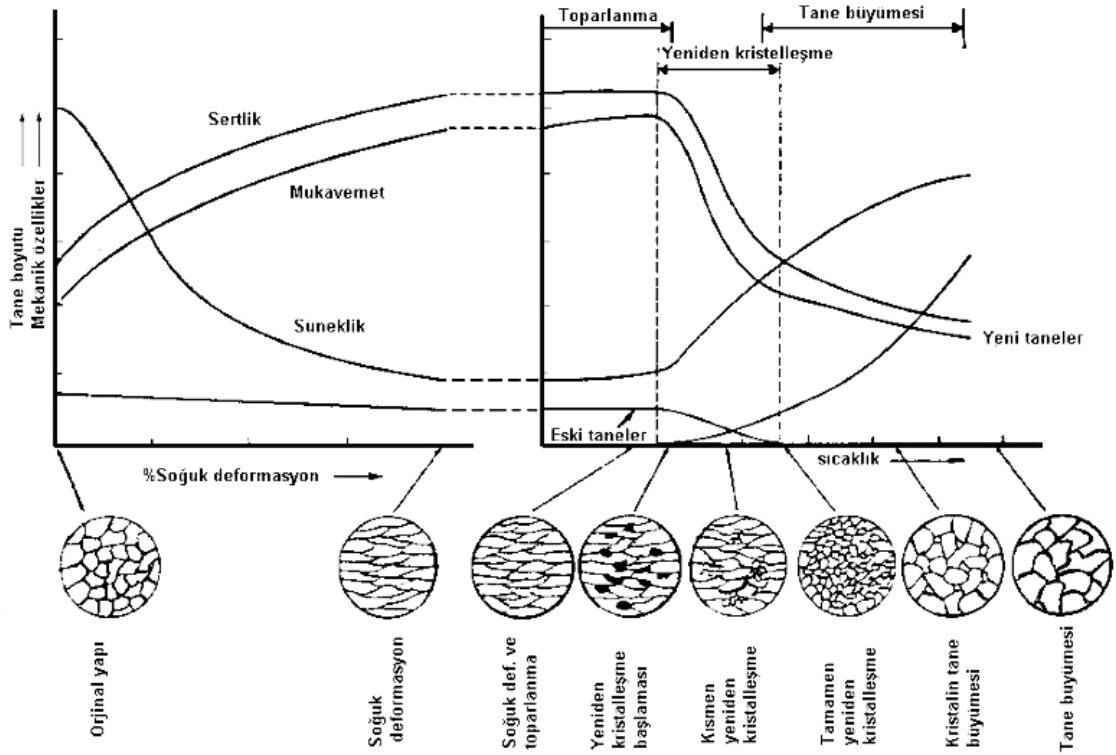
3.7.2 Tavlama (Yeniden Kristalizasyon)

Yüksek miktarda soğuk işleme tabi tutulan metaller yeniden kristalizasyon işlemine tabi tutulur. Bu işlem, metalin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine ısıtılması,

bu sıcaklıkta tutulması ve daha sonra soğutulmasından oluşur (Şekil 14). Sertlik veya mukavemette azalma ve süneklikte ise artışla sonuçlanır[17] Yeniden kristalizasyon işlemi hem soğuk şekil verme işlemleri arasında hem de son ürüne olmak üzere uygulanmaktadır [19], [21]. Yeniden kristalizasyon tavlamasında sıcaklık, diğer tavlama işlemlerinde olduğu gibi sabit değildir. YKR sıcaklığı, belirli parametrelere bağlıdır. Bunlar; kimyasal analiz, önceki deformasyon miktarı, bekleme süresi ve haddelenmemiş ürünün tane boyutudur. Yeniden kristalizasyon işlemi yapılabilmesi için asgari de olsa deformasyona plastik şekil verme gereklidir. Deformasyon miktarı, kristalde yeterli sayıda kafes kusuru oluşacak şekilde olmalıdır. Bu kusurlar, yeni tanelerin üretimi için çekirdeklenmeyi başlatır. Deformasyon derecesi ne kadar büyükse, yeniden kristalleşme sıcaklığı o kadar düşük olur. Bekletme süresini artırarak daha düşük sıcaklıklarda yeniden kristalleşme sağlanabilir. Bununla birlikte, sıcaklığın etkisi, bekletme süresinden daha baskındır. Bu nedenle, tutma süresini arttırmak yerine yeniden kristalleşme sıcaklığının yükseltilmesi her zaman tercih edilir. Metallerin yüksek miktarda deforme edilmesi ve yeniden kristalleşme sıcaklığının hemen üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılmasıyla ince bir yapı elde edilebilmektedir [19].

Soğuk işlenmiş metalin yumuşatılması veya tavllanması, yeniden kristalleşme sıcaklığına ısıtılarak veya maksimum yumuşatma istenirse, tane büyümesine neden olmak için yeniden kristalleşme sıcaklığının çok üzerine ısıtılarak gerçekleştirilmektedir. Isıtma yöntemi, fırın tasarımı, fırın atmosferi ve iş parçasının şekli önemlidir çünkü bunlar sonuçların hassasiyetini, çıkışta mekanik özelliklerini ve tavlama maliyetini etkilemektedir [20].

Yeniden kristalizasyon işleminin amacı işlenebilirliğin iyileştirilmesi, soğuk şekil verilebilirliğin kolaylaştırılması, mekanik veya elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi ve boyutsal kararlılığın arttırılmasıdır [21].



Şekil 3.14 Plastik şekil vermenin ve yeniden kristalizasyonun mekanik özelliklere etkisi

Bakır ve pirinç işlem alaşımları için tane boyutu, yeniden kristalleşen tavlamaı değerlendirmenin standart yoludur. Tavlama sürecini etkileyen birçok husus bulunmaktadır. Bu nedenle bir metalde her zaman belirli bir tane boyutu üretecek belirli bir zaman ve sıcaklık kombinasyonunu öngörmek zordur.

İnce bir şekilde dağıtılmış ikinci bir fazın mevcudiyetiyle tane boyutunun stabilize edildiği birkaç bakır alaşımı geliştirilmiştir. Bu alaşımlar, ikinci fazın nihayet ergidiği veya kabalaştığı ve bu da tane büyümesinin ilerlemesine izin verdiği sıcaklığa kadar, yeniden kristalleşme sıcaklıklarının çok ötesindeki sıcaklıklarda son derece ince tanecik boyutunu koruyacaktır [20].

Genel olarak, iki farklı yeniden kristalizasyon tavlaması mevcuttur; yeniden kristalleşme sıcaklığının biraz üzerindeki bir sıcaklıkta gerçekleştirilen hafif tavlama ve birkaç yüz derece daha yüksek gerçekleştirilen hızlı tane büyümesinin başladığı noktanın hemen altındaki bir sıcaklıkta yumuşak tavlama bulunmaktadır.

Oksijen ihtiva eden bakır tavlânırken, malzeme kırılmasının önüne geçmek amacı ile atmosferdeki hidrojen minimumda tutulmalıdır. 480°C'nin altındaki sıcaklıklar için, hidrojen tercihen%1'i geçmemelidir [20].

3.7.4 Gerilim Giderme

Gerilim giderme, malzemelerin veya parçaların özelliklerini önemli ölçüde etkilemeden iç gerilimi hafifletmeyi amaçlayan bir işlemdir [17]. Haddeme, kesme, işleme, bükme, kaynaklama, termal işlemler ve tüm mekanik işlemler nedeniyle metallerde gerilim oluşmaktadır. Gerilmeler, parçaların uzun veya kısa süre içinde çatlamlara veya tamamen bozulmaya neden olabilecek bozulmaya neden olabilir [22].

Gerilim giderme, artık gerilimi azaltmayı veya ortadan kaldırmayı, böylece parçanın işlem sırasında çatlama veya korozyon yorgunluğu ile kırılma olasılığını azaltmayı amaçlamaktadır. Parçalar, metalin yeniden kristalleşmesine ve dolayısıyla yumuşamasına neden olmayan tavlama aralığının altındaki sıcaklıklarda gerilim giderilir [17], [20].

Bakır veya bakır alaşımlarının soğuk işlemeyle işlenmesi veya imal edilmesi sırasında plastik gerilme sonucu mukavemet ve sertlik artar. Plastik gerilmeye elastik gerilme eşlik ettiğinden, ortaya çıkan üründe artık gerilmeler kalır. Yeterli büyüklükte kalmasına izin verilirse, artık yüzey gerilme gerilimleri, depolama veya hizmet sırasında malzemenin gerilim-korozyon çatlamasına, kesme veya işleme sırasında malzemenin öngörülemeyen deformasyonuna ve işleme, lehimleme veya kaynak sırasında malzemelerin sıcak çatlamasına neden olabilir [17].

Gerilimli fosfor bronzları ve bakır nikelleri, gerilme-korozyon çatlağına karşı nispeten hafif eğilime sahiptirler; bu alaşımlar, gerilmiş metal çok hızlı bir şekilde tavlama sıcaklığına ısıtıldığında oluşan termal çatlama daha duyarlıdır. Yavaş ısıtma, bir gerilim azaltma hassasiyeti sağlamak ve ısı gerilime neden olan eş olmayan sıcaklık dağılımlarını en aza indirmektedir [20].

Görece düşük sıcaklıkta ve görece yüksek sürelerde uygulanan gerilim giderme işlemlerinde mekanik özelliklerde düşüş yaşanmaz. Bu metotta tam bir gerilim giderme meydana gelir. Yüksek sıcaklıkta düşük sürelerde uygulanan gerilim

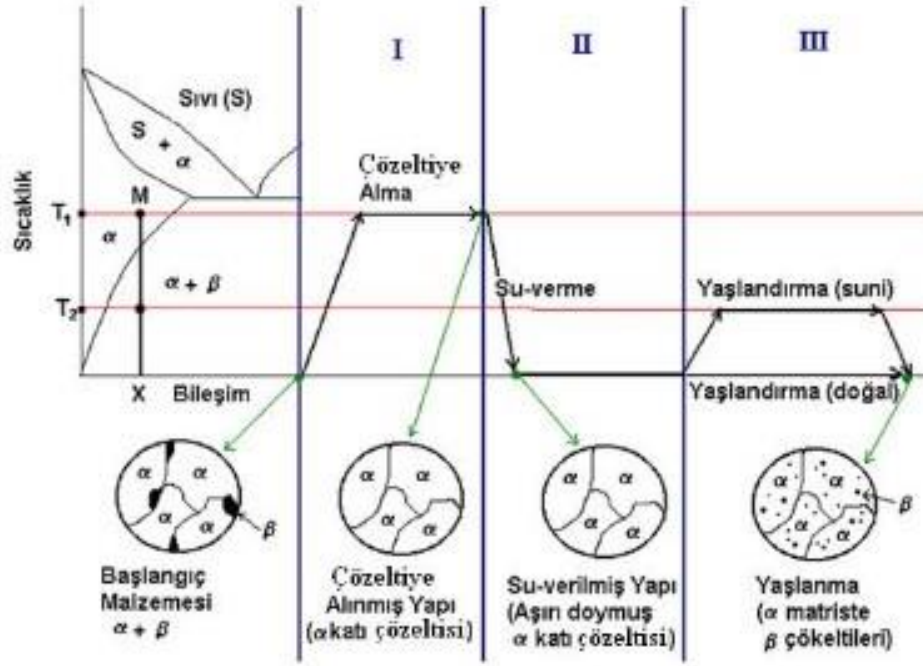
giderme işlemlerinde mekanik özelliklerde bir miktar düşme meydana gelebilir. Fakat bu metot diğer metoda kıyasla daha az maliyetlidir. Aslında, çok soğuk işlenmiş alaşımların sertliği ve mukavemeti, düşük gerilim giderici sıcaklıklar kullanıldığında ufak miktarlarda artmaktadır [20].

Gerilim gidermenin diğer bir faydası, soğuk şekillendirilmiş parçaların boyutsal hassas olmasını sağlamasıdır. Ayrıca, kaynaklı veya soğuk şekillendirilmiş yapıların gerilim giderilmesi genellikle tavsiye edilir [20].

3.7.5 Çökelti Sertleşmesi

Çökelti sertleştirilmesi uygulanan çoğu bakır alaşımı, elektrik ve ısı iletim uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu nedenle çökeltme sertleşmesi, istenen mekanik mukavemeti ve elektriksel iletkenliği arttıracak şekilde yapılmaktadır. Ortaya çıkan sertlik ve mukavemet, çözeltiye su vermenin gücüne ve çökeltme (yaşlandırma) işleminin kontrolüne bağlıdır. Bakır alaşımları, bazı alüminyum alaşımlarında olduğu gibi, ortam sıcaklığında (doğal) yaşlanma yerine yüksek sıcaklık işlemiyle sertleşir. Çökelti sertleşmesinde zamanla sertlik yükselir ve maksimuma çıktıktan sonra görece sertlik bir nebze düşer. Elektrik iletkenliği, tam olarak çökeltmiş durumda, bir maksimuma ulaşılan kadar zaman ile sürekli olarak artar.

Çökeltme sertleşmesi ısıtma işlemi solvus çizgisi eğrisi olan alaşımlarda uygulanabilmektedir [23]. Çökelti sertleştirilmesi genel olarak üç aşamada gerçekleşmektedir (Şekil 3.15). α ve β -fazları bulunduran x bileşimine sahip metal T_1 sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. β -fazı tamamen çözünene kadar beklenir. Bu işleme çözeltiye alma işlemi denir. Ardından T_1 sıcaklığındaki metale su verilerek oda sıcaklığına kadar hızlıca soğutulur. Aşırı doymuş α katı eriyiği elde edilmiş olur. T_2 sıcaklığına tekrar ısıtılarak yapay yaşlandırma veya uzun süre oda sıcaklığında bekletilerek doğal yaşlandırma işlemi uygulanabilir. Yapay yaşlandırma işlemi ile süre kısaltılması mümkündür. Fakat elde edilen mekanik özellikler doğal yaşlanmaya kıyasla görece düşüktür [24].



Şekil 3.15 Çökeltme sertleşmesi mekanizması

Birçok bakır alaşımında yüksek mukavemet, soğuk işlemeyle elde edilir. Soğuk işleme mekanik özelliklerinin üzerinde mekanik özellik elde etmek için bazı alaşımlarda çözeltiye alma ve çökeltme sertleştirilmesi uygulanır. Çökteltmeyle sertleşen bakır alaşımlarının örnekleri arasında berilyum bakırlar, (bunlardan bazıları ayrıca nikel, kobalt veya krom içerir); bakır-krom alaşımları; bakır-zirkonyum alaşımları; bakır-nikel-silikon alaşımları ve bakır-nikel-fosfor alaşımları çökelti sertleşmesi yöntemi ile sertlik kazandırılmaktadır [20].

Bu yöntemin temel avantajları aşağıda belirtilmiştir:

- Müşteri imalatı, yumuşak, çözelti tavlı durumda kolaylıkla gerçekleştirilir.
- İmalatçı tarafından gerçekleştirilen çökteltmeyle sertleştirme ısısal işlemi nispeten basittir. Genellikle havada olmak üzere orta sıcaklıklarda yapılır. Kontrollü soğutmaya gerek duyulmaz. İşlem süresi kritik bir öneme arz etmemektedir.
- Mukavemet, sertlik, süneklik, iletkenlik, darbe direnci ve elastik olmama dahil olmak üzere farklı özellik kombinasyonları, sertleştirme süreleri ve sıcaklıkları değiştirilerek elde edilebilir. Proses sonrası istenilenlere göre sertleştirme metodu seçilir.

PLASTİK ŞEKİL VERMENİN VE TAVLAMANIN ELEKTRİKSEL İLETKENLİK VE SERTLİK ÜZERİNDE ETKİSİ

Elektriksel iletkenlik; elektriği iletme, iletme gücü veya belirli bir voltaj gradyanında, bir gövde boyunca aktarılan birim alan başına düşen elektrik miktarıdır. İletkenliğin temel nedeni, her atomun en dıştaki elektronlarına (değerlik elektronları) gevşek bir tutuş uygulamasından kaynaklanmaktadır; böylece, değerlik elektronları, sıkı paketlenmiş metal çekirdekler etrafında bir tür deniz oluşturmaktadır[25].

Elektriksel iletkenlik birimi olarak, %'ce ifade edilen bir bakır standardına göre ölçülmektedir. Bir malzemenin elektriksel iletkenliği, hacim öz direnç oranının 100 katına eşit olan yüzde IACS (Uluslararası Tavlı Bakır Standardı) olarak ifade edilmektedir. 20 °C'de (68 °F) tavllanmış en yüksek saflıkta bakır (% 99,999 Cu) % 103 IACS olarak bulunmuştur [17].

Elektriksel direnç (ρ), malzemelerin fiziksel özelliklerinden biridir. Literatürde, saf metallerin elektriksel öz direnci ile ilgili birçok çalışma bulunabilir, ancak metal alaşımlarının elektriksel öz direnci ile ilgili çalışmalar çok sınırlıdır. Metal malzemelerde elektriksel iletkenlik sonucu sıcaklık, tane boyutu, plastik şekil verme miktarı, kimyasal kompozisyonundan etkilenmektedir. [26], [27].

Kafes yapısına bağlı olan bir metalin tüm özellikleri plastik deformasyondan veya soğuk işleminden etkilenir. Soğuk işlem, bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının altında çalışması olarak tanımlanabilir. Bir metal parçasının biçimini veya enine kesitini yumuşama veya yeniden kristalleşme noktasının altındaki bir sıcaklıkta, ancak genellikle oda sıcaklığında veya yaklaşık olarak değiştirme işlemidir. Süneklik azalırken çekme dayanımı, akma dayanımı ve sertlik artmaktadır.

Bir metalin plastik deformasyonu genellikle kabaca eşit büyüklükte iki parçaya ayrılabilen elektriksel dirençte bir artışa neden olur [28], [29].

$$\Delta\rho = \Delta\rho_D + \Delta\rho_v \quad (4.1)$$

$\Delta\rho_v$, nokta kusurlarının yayılabildiği sıcaklıklarda tavlamaadan sonra kaybolur, ancak $\Delta\rho_D$, yeniden kristalleşme meydana gelene kadar kalır ve dislokasyonlarla elektronların saçılmasına atfedilir. Belirli bir N dislokasyon yoğunluğu ile ilişkilendirilecek $\Delta\rho$ değerleri, birkaç metal için mevcuttur [28].

Metallerin mukavemetini arttırmak için kullanılan yöntemler genellikle elektriksel iletkenlikte belirgin bir düşüşe neden olmaktadır. Bu nedenle iletkenlik ve mekanik mukavemet arasında ters ilişki bulunmaktadır [2], [4], [5], [30].

Kristal kusurlar, metallerdeki iletim elektronları için saçılma merkezleri görevi gördüğünden, sayılarının artması direnci artırır. Deneyisel olarak, bir metalin (toplam) toplam direncinin, termal titreşimler, safsızlıklar, dislokasyonlar ve tane sınırları gibi kafes kusurlarının katkılarının toplamı olduğu gözlemlenmiştir [2].

Mukavemeti yüksek ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip metaller yapmanın yöntemi, iletken elektronların saçılması en aza indirilirken dislokasyon hareketlerinin etkin bir şekilde engellendiği uygun bir mikro yapı bulmaktır. Özel bir tür uyumlu sınır olan ikiz sınırın, geleneksel tane sınırları gibi dislokasyon hareketini bloke edebildiği bilinmektedir [31], [32], ancak ikiz sınırların elektriksel direnci , geleneksel yüksek açılı tane sınırlarından daha düşüktür [33]. Bu nedenle, yüksek yoğunlukta ikiz sınırlar içeriyorsa, bir metalin yüksek elektrik iletkenliğini kaybetmeden etkin bir şekilde güçlendirilmesi beklenir.

Termodinamik olarak bakıldığında, ikizlerin oluşumu toplam ara yüzey enerjisini azaltmaktadır. Bunun nedeni ikiz sınırları için oluşan fazla enerji, geleneksel yüksek açılı tane sınırlarından çok daha az olmasıdır. İkizler tane sınırlarında veya üçlü kavşaklarda çekirdeklenmeyi, ikizlenmenin neden olduğu yönelim değişikliği yoluyla tane sınırı enerjilerini azaltmak için tercih etmektedirler. Fazladan bir ikiz sınır oluşmasına rağmen, ara yüzey enerjilerinin toplamı (tane sınırları ve ikiz sınırları dahil) ikizlenme ile azalmaktadır. İkiz oluşumu kinetik olarak yönlendirilir. İkizlerin çekirdeklenme ve büyüme hızı şekillendirme koşulları tarafından kontrol edilir. İkizlerin oluşumu aynı zamanda güçlü bir şekilde ikiz sınırlarının doğasına ve ikiz sınır enerjisinin tane sınırı enerjisine oranına (ikiz sınır / tane sınırı) bağlıdır [2].

Kayma ve ikizlenme, plastik deformasyonda birbiriyle yarışan iki süreçtir. Tane boyutu, istifleme enerjisi, sıcaklık ve gerinim hızı, deformasyon ikizleri oluşturma eğilimini belirleyen dört temel faktördür. [34].

İkizler aracılığıyla metallerin güçlendirilmesi için yapılan çalışmalarda, kayma dislokasyonlarının ikiz sınırlarla etkileşimi önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan araştırmalarda, ikizlerin varlığının kayma bantlarının yayılmasını engellediğini ve mevcut ikiz sınırların gerinim yayılmasına engel olarak hareket etmede az çok tane sınırları gibi davrandığını belirtilmiştir. Gözlemlenen davranışın mekanik ayrıntıları geliştirilmiştir. Dislokasyon ayrışmaları enerjik olarak elverişsizdir ve ikiz kayma bantlı kesişme noktalarında bir stres konsantrasyonu gerektirir, böylece mukavemette artışa yol açar. Sonuç olarak ikizler, tane sınırlarına benzer bir güçlendirici etkiye sahip olabilecek dislokasyonların hareketini engeller olarak kabul edilebilmektedir [2].

Özel bir tür uyumlu sınır olan ikiz sınırın, geleneksel tane sınırları gibi dislokasyon hareketini bloke edebildiği bilinmektedir, ancak ikiz sınırların elektriksel direnci, geleneksel yüksek açılı tane sınırlarından daha düşüktür [31], [32], [33]. Bu nedenle, yüksek yoğunlukta ikiz sınırlar içeriyorsa, bir metalin yüksek elektrik iletkenliğini kaybetmeden etkin bir şekilde güçlendirilmesi beklenir [2].

İkizlenme ile mukavemet artışı, darbeli elektrodepozisyon tekniği (ikiz büyümesi) ve dinamik plastik deformasyon (deformasyon ikizi) ile elde edilebilir [35]. Deformasyon ikizlerinin sonucu olarak taneler incelir. Bu işlemde tane boyutunda nanometreye boyutlarına ulaşacak kadar azalma yaratabilir. [36]. Tane boyutu, istifleme hatası enerjisi (SFE), deformasyon sıcaklığı ve gerinim hızı, deformasyon ikizlerinin oluşumunu belirleyen ana parametrelerdir.[37]. Gerinim oranının arttırılması ve plastik deformasyon sıcaklığının ile matrisin istifleme enerjisinin azaltılması, daha fazla deformasyon ikizlerinin oluşumunu neden olmaktadır. İkiz sınırının önemli bir güçlendirme etkisi olmasına rağmen, ikizin iç kısımları/matris lameller ve ikiz demetler arasındaki iç kısımlar, zayıf dislokasyon-dislokasyon etkileşimi nedeniyle “zayıf bölgelerdir” [38], [39]. Sadece ikiz/matris lamel kalınlığı nanometre ölçeğine düştüğünde ikiz sınır mukavemete önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu gereklilik, endüstriyel yapısal alaşımlarda ikizlenme ile

mukavemet artışı uygulamasını sınırlamaktadır [40]. Plastik deformasyonla şekillendirilen nano ikizlenmiş bakır alaşımları, Cu-Zn, Cu-Al ve Cu-Al-Zn alaşımları gibi düşük istifleme enerjisine sahip katı çözeltiler ile güçlendirilmiş bakır alaşımlarıdır [41]. Bu alaşımlar üstün mekanik özelliklere sahip olsalar da, eksiklikleri, çözünen maddelerin elektriksel iletkenliği kaçınılmaz olarak bozmasıdır [34].

Eş kimyasal kompozisyona sahip malzemelerde yüksek açılı tane sınırına sahip olan düşük açılı tane sınırı olana kıyasla daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir. İki tane arasındaki örtüşen yüzeylerde bazı atomların her iki kafese ait olabilmektedir. Kafeste bazı atomların eksik olabilmektedir. Bu durumda atom yoğunluğunda yerel bir azalmaya neden olduğu bilinmektedir. İletken elektronların boşluklar tarafından sınıra saçılması meydana gelmekte ve bu da elektriksel direnç katkısında bulunmaktadır [42]. Düşük açılı tane sınırı düşük dislokasyon yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca tane sınırı enerjisi düşüktür [43].

YKR işlemi ile ürünün sünekliliği ve tokluğu artar [44]. Süreç, ısıtma, bekletme ve soğutmayı içerir ve ısıtma hızı, sıcaklık, sıcaklıkta süre, atmosfer ve soğutma hızının her biri sonuçları etkilemektedir [45].

Plastik şekil verme işlemi ile malzeme sertleşir. YKR veya gerilim giderme ile tekrar yumuşatılabilir. YKR 3 aşamadan oluşmaktadır. Bunlar toparlanma, yeniden kristallenme ve tane büyümesidir. Basit tek fazlı alaşımların tavlama esnasında, bu aşamalardan geçerek gerilimsiz kristaller elde edilir. Plastik şekil verme miktarı arttıkça malzemede yeniden kristalizasyon için gerekli olan sıcaklık düşer. Eş proseste yapılan YKR işleminde yüksek deformasyon uygulanmış malzemede daha eş ve daha küçük tane yapısı elde edilir.

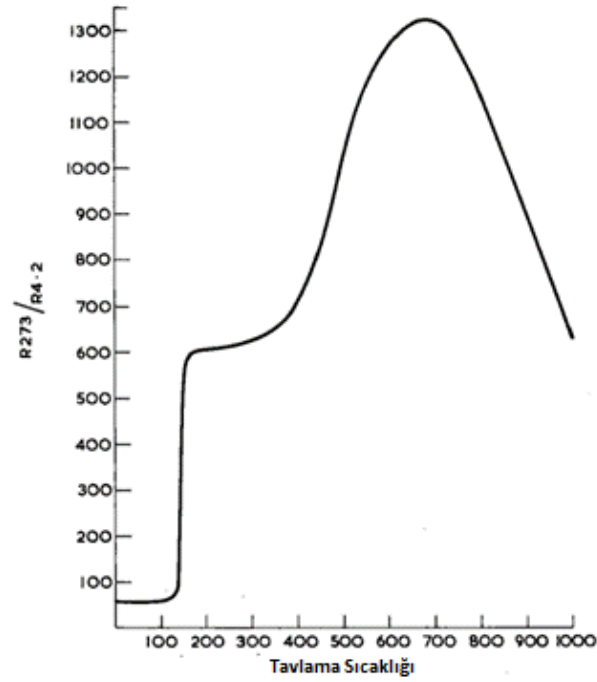
Tavlama eğrisi üç bölgeye ayrılır; toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi. Toparlanma aşamasında sertlik sabit kalır veya biraz artabilir. Ardından, yeniden kristalleştirme sırasında sertlikte büyük bir düşüş izler. Sertlik, tane büyümesi sırasında daha çok kademeli olarak azalmaya devam eder.

Toparlanma sırasında sertlik büyük ölçüde etkilenmese de diğer özellikler (örneğin elektriksel direnç), bu aşamada önemli yapısal değişikliklerin meydana geldiğini,

ancak bunların sertliğe çok hassas olmayan değişiklikler olduğunu göstermektedir. Toparlanmada kurtarma terimi, orijinal özelliklerin bazılarının bu kısa süre içinde geri kazanılması nedeniyle kullanılmaktadır. Yeniden kristalleşme sırasında plastik olarak deforme olmuş matriste nispeten yumuşak, gerilimsiz (düşük dislokasyon yoğunluğu) kristallerin oluştuğu (çekirdeklediği) ve büyüdüğü gözlenmektedir. Deforme olmuş matris bu yeni kristaller oluşuktan sonra devam ettirildiğinde, ilave tavlama yalnızca tane büyümesine neden olmaktadır [4].

Yeniden kristalleşme sıcaklığı ve süre birkaç değişkene bağlıdır. Tavlama sıcaklığındaki süre, alaşımın kimyasal bileşimi ve plastik deformasyon miktarına bağlıdır. Soğuk işlenmiş malzemenin enerjisini artıran herhangi bir değişken, onu tavllanmış duruma göre daha kararsız hale getirecektir. Bu enerji farkı, yumuşak, gerilimsiz duruma geri dönüş için "itici güç"tür ve genellikle bu enerji farkı ne kadar büyükse, süreç o kadar hızlı gerçekleşir. Bu nedenle, orijinal tane boyutu ve deformasyon sıcaklığı gibi değişkenler yeniden kristalleşme sıcaklığını etkilemektedir.

%99,999 saflıktaki Bakır için R273/R4,2 direnç oranı açısından bir saatlik tavlama eğrisi (Şekil 15)'te gösterilmektedir. Direnç oranındaki ilk artış sonunda rekristalizasyonun tamamlandığını ve ikinci direnç oranı artışının olduğu bölgede tane büyümesinin devam ettiğini göstermektedir. Daha yüksek sıcaklıkta görülen direnç oranındaki düşüşün fırın arızasından kaynaklanan hatadan olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle tane sınırı direnç deneyi için önem arz eden tavlama aşaması 200 °C ile 700 °C sıcaklık aralığındadır. Yapılan çalışmalarda tavlama sıcaklığının artışıyla beraber sürekli tane boyutunun artmaktadır[4].



Şekil 4.1 %99,999 saflıktaki bakır teller için R273/R4,2 direnç oranı ile tavlama sıcaklığı açısından bir saatlik tavlama eğrisi [4]

Tane sınırlarının elektriksel direnç üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, iletim elektronlarının ortalama serbest yolu, bir sınırla her karşılaşmada bir elektronun saçılma olasılığına (P) ve sınırlarla karşılaşmalar arasında gidilen ortalama mesafeye bağlı olacaktır. Yaklaşık olarak küresel tanecikler varsayıldığında, karşılaşmalar arasında gidilen ortalama mesafe, $2d/3$ olarak gösterilebilen bir küredeki rastgele bir akorun ortalama uzunluğu olacaktır. Ortalama tane çapı d olarak isimlendirilmiştir. Elektron ortalama serbest yol A diye isimlendirilmiştir. Bu durumda $2d/3P$ olacaktır. P λ , belirli bir malzeme için sabit olduğundan ve birim hacim başına tane sınırı alanı B / d cm birim olduğundan, normal tane şekilleri için B genellikle 2-7 olarak alınır, birim başına birim tane sınır alanı başına elektriksel öz direnç hacim $P_{gb} = 3P \cdot \rho \cdot \lambda / 2B$ ohm cm^2 olacaktır [4].

Elektrik iletkenliğinin ölçümü farklı amaçlarla yapılmaktadır. Bunlardan biri, malzemenin kusurlarının tespitidir. Elektriksel iletkenlik, malzemedeki kusurların düzenine ve miktarına bağlıdır. Elektriksel iletkenlik termal iletkenlik hakkında bilgi verir. Bu nedenle elektriksel iletkenlik ölçümleride gerçekleşir. [46].

5.1 Kullanılan Malzeme ve Makineler

5.1.1 Nordic Gold Bakır Hurdası

Kayalar Bakır Alaşımları Sanayi ve Ticaret A.Ş. 'de üretim esnasında pres sonrası elde edilen para pulu fire hurdası kullanılmıştır.

5.1.2 Katot Bakır

Katot bakır, düşük empürite miktarına sahip endüstriyel bir üretim malzemesidir. Bakır şerit, levha üretiminde, başlıca pirinç, bronz, alpaka alaşımları olmak üzere çeşitli alaşımların üretiminde kullanılmaktadır.

5.1.3 Alaşım Elementleri (Alüminyum, Çinko, Kalay)

Ticari saf birincil alüminyum, çinko ve kalay kullanılmıştır.

5.1.4 Çekirdeksiz Üst ve Alt İndüksiyon Ocakları



Şekil 5.1 Üst ve alt indüksiyon ocakları

Alt ve üst olmak üzere iki adet çekirdeksiz indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Her biri yaklaşık 5-6 ton bakır kapasitesine sahiptir. Çekirdeksiz indüksiyon ocağında, indüksiyonla ısıtma, ergiliğin en altında gerçekleşir. Bu kısım fırın içerisinde görece

küçük ve dar bir alandır. Kanal, lamine çelik bir çekirdekten ve bobin düzeneğinin etrafından geçmektedir.[47]

5.1.5 Slab Isıl İşlem Fırını

Maerz marka doğalgazlı brülörlü fırın kullanılmıştır. Fırın 20 adet slab alma kapasitesine sahiptir. 1000 °C sıcaklığa çıkma kapasitesine sahiptir.



Şekil 5.2 Maerz ısıtım fırını

5.1.6 Sıcak Haddeme Makinesi

Dökümhanede slab halinde üretilmiş olan ürünler Maerz marka ısıtım fırının ardından sıcak haddede haddelenmiştir.



Şekil 5.3 Sıcak Haddeme Makinesi

5.1.7 Şerit Isıl İşlem Fırını



Şekil 5.4 Şerit Isıl İşlem Fırını a) fırın içi b) fırın dış yüzeyi

Ebner marka ısıtım fırınları yaklaşık 4 tonluk şeritlerden üç adet alma kapasitesine sahiptir. Vakum ve indüksiyon sistemi ile çalışmaktadır.

5.1.8 Soğuk Haddeleme Makinesi



Şekil 5.5 Soğuk haddeleme makinesi

Stehling marka olan soğuk hadde makinesi sıcak haddeleme ve şerit tavlama işlemleri sonrası kullanılmıştır. Pres işlemi öncesi ve son soğuk haddeleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.1.9 Atomik Absorbsiyon Kimyasal Analiz Cihazı



Şekil 5.6 Atomik absorpsiyon spektrometresi

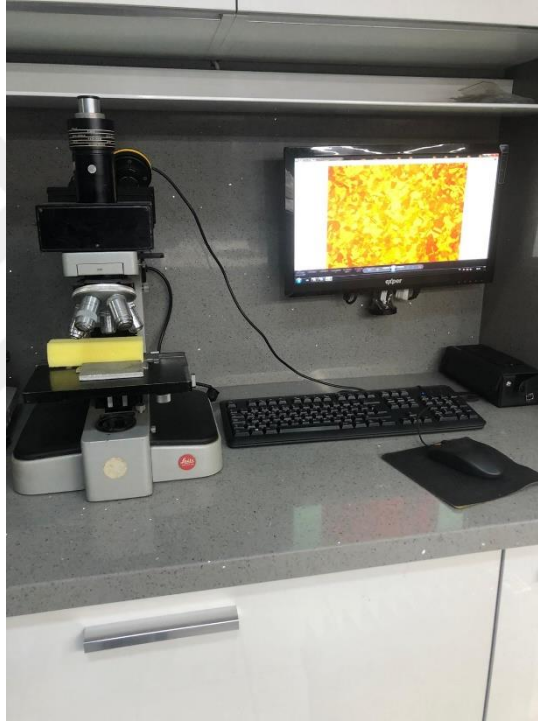
Atomik absorpsiyon spektrometresi (AAS), elementlerin derişimlerini ölçen bir tekli element tekniğidir. Temel durum atomları hava/asetilen veya azot-oksit/asetilen alevi ile üretilmektedir. Ölçülen elemente özel kullanılan oyuklu katot lambasından yayılan ışınım mevcut alevden geçirilerek parçalı katı hal dedektörü

ile ölçülür. Analizi yapılacak numune alev gönderilir. Örneğin içinde ilgili element mevcutsa, lambadan gelen ışınım absorplanır. Böylece ışınımın şiddeti düşer. Absorplanan ışınım miktarı malzeme içinde bulunan elementin derişimiyle ile ilişkilidir[48].

5.1.10 Zımpara ve Parlatma Cihazı

Vickers sertlik deneyi öncesi yüzey zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Optik mikroskop incelemesi önce zımpara işleminin ardından parlatma cihazı da kullanılmıştır.

5.1.11 Optik Mikroskop



Şekil 5.7 Optik mikroskop

Metalografik mikroskoplar, malzeme yüzeyindeki kusurları belirlemek için kullanılır. Metal malzemelerde tane sınırlarını belirlenebilir ve incelemesi gerçekleştirilir. Bu tip mikroskoplar, ışık kaynağının bir ışın ayırıcı vasıtasıyla göz merceğinin altındaki mikroskop tüpüne yerleştirildiği dikey aydınlatmayı kullanır. Işık hedef boyunca parlar ve hedef aracılığıyla numuneye odaklanır. Hedefe geri yansıyan veya saçılan ışık, daha sonra göz merceğinde tekrar görüntülenir. Bu şekilde metaller gibi opak nesneler mikroskop altında incelenebilir[49].

5.1.12 Elektriksel İletkenlik Cihazı



Şekil 5.8 Sigmascope SMP 350 Elektriksel iletkenlik cihazı

Sigmascope SMP350, demir dışı metallerin elektriksel iletkenliğini ölçmek için hassas bir portatif cihazdır. Alüminyum veya bakırın elektrik iletkenliğini hızlı ve doğru bir şekilde ölçer. Ölçülen iletkenlikten sertlik ve ısıl işlem görmüş malzemelerin mekanik özelliklerinin yorumları yapılabilmektedir. Bu, büyük sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalan bileşenlerin malzeme stabilitesini izlenmesini sağlar.

Elektrik iletkenliğini ölçmek için, cihaz faza duyarlı eddy (girdap) akımı yöntemini kullanmaktadır (DIN EN 2004-1 ve ASTM E1004'e göre).

5.1.13 Sertlik Cihazı

Bu cihazda Vickers ve Brinell cinsinden sertlik tayini yapılmaktadır. Malzeme kalınlığına göre belirli yükler kullanılır. 0 – 0,20 mm arası kalınlık için üç yük, 0,20 – 0,50 mm arası için 5 yük, 0,50 mm kalınlıklar için 5-10 arası yük kullanılır. Yüzeyi düzgün olarak hazırlanan malzeme mikroskop altına konularak netlik ayarı yapılır. Yükler yerine yerleştirilerek, malzeme yüzeyine kuvvet uygulanır. 30 saniye beklenip kuvvet kaldırılır. İz çapı ölçülerek tablodan malzemenin HV cinsinden sertliği okunur.



Şekil 5.9 EMCO TEST Dura Scan 2065 sertlik cihazı

5.2 Deney Düzenegi

Nordic gold alaşıımı (%89 Cu %5 Zn %5 Al ve %1 Sn) üst indüksiyon ocağı kullanılarak ergitildi. Kimyasal bileşim oluşturulduktan sonra alt indüksiyon ocağına aktarıldı. 1200 °C tutma ocağında 4 metre uzunluğunda 660*200 mm boyutlarında slab döküm işlemi gerçekleştirildi. Slab ısıtma fırınında 200 mm kalınlığındaki külçe, 1100 °C sıcaklıkta 5 saat bekletildikten sonra 18 mm kalınlığındaki levhalara sıcak haddelenmiştir. Frezeleme işleminin ardından soğuk haddeleme ile 15 mm'den 7 mm'ye haddelenmiştir. Şerit tavlama fırınları ile 650 °C 'de yeniden kristalizasyon işlemi uygulanmıştır. Yeniden kristalizasyon işlemine müteakip soğuk haddeleme işlemi uygulanarak 2,20 mm kalınlık elde edilmiştir. %68,57 haddeleme oranı uygulanmış metallere tekrar yeniden kristalizasyon işlemi uygulanmıştır. %24,66 haddeleme oranı ile 1,66 mm'ye indirgenerek soğuk haddeleme uygulanmıştır. 200 tonluk pres vasıtası ile pul halinde numuneler çıkartılmıştır. Her bir grup için 10 adet olmak üzere 5 farklı kimyasal bileşim, 3 farklı ısıtma sıcaklığı, üç farklı süre için referans numuneleriyle beraber 500 numune alınmıştır. Sıcaklık olarak endüstriye uygun sıcaklıklar belirlenmiş; 600, 650 ve 750 °C tercih edilmiştir. Isıtma süresi olarak 60, 90 ve 120 dk uygulanmıştır. Tüm numunelerin kimyasal bileşimi atomik adsorbsiyon cihazı ile belirlenmiş olup her

bir grup için 10 adet numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Isıl işlem uygulanmış ve referans numunelerinin mikroyapı görüntüleri ile tane boyutları optik mikroskop (OM) kullanılarak belirlenmiştir. Mikro sertlik testleri EMCOTEST Dura Scan 2065 marka kullanılarak Vickers cinsinden ölçülmüştür. Numunelerin elektriksel iletkenliği Sigmascope SMP350 marka ile % IACS cinsinden ölçülmüştür. Sertlik, tane boyutu, ısıtıl işlem sıcaklığı, ısıtıl işlem süresi ve şekil değıştirme oranları arasındaki ilişkiler elde edilmiştir.



Bu bölümde Cu₈₉Zn₅Al₅Sn₁ alaşımında deneysel olarak ölçülen kimyasal bileşimi, yeniden kristalizasyon sıcaklığının, yeniden kristalizasyon süresinin tane boyutuna, sertliğe ve elektriksel iletkenliğe olan etkisinin sonuçlarını verilerek birbirleri ile mukayese edilmiştir. Her bir kısmın kendi içerisinde sonuçları ve tartışması birlikte verilmiştir.

6.1 Kimyasal Bileşim Analizi ve Elektriksel İletkenliğe Olan Etkisi

Saf bakırın tüm katkı maddeleri, katı çözeltideki element ve miktara bağlı olarak elektrik iletkenliğini azaltmaktadır. [50]Çözünürlüğü aşan elementler yalnızca küçük düşüslere neden olmaktadır [17]. Tablo 6.1'teki veriler, bakırdaki her bir elementin oda sıcaklığında çözünürlüğünü ve %ağ.1'lik direnç artışı göstererek her elementin elektriksel iletkenliği düşürme derecesini verilmiştir. Birden fazla öge eklendiğinde kümülatif bir etki oluşturmaktadır.

Tablo 6.1 Eklenen metallerin elektriksel dirençte artış miktarları [51]

Element	25 °C Sıcaklıkta Çözünürlüğü	Elektriksel İletkenlikte Dirençte Artış (%1 İlave Edildiğinde) $\mu\Omega \cdot \text{cm}$
Ag	0.1	0.355
Al	9.4	2.22
As	6.5	5.67
Au	100	0.185
B	0.06	8.25
Be	0.2	4.57
Ca	-	4.77
Cd	0.5	0.172
Co	0.2	7.3
Cr	0.03	4.9
Fe	0.14	10.6
Ga	20	1.27
Ge	11	3.2
Hg	...	0.32
In	3	0.615
Ir	1.5	2
Mg	1	4.2
Mn	24	3.37
Ni	100	1.2
O	0.0002	21
P	0.5	14.3
Pb	0.02	1.02
Pd	40	9.57
Pt	100	0.635
Rh	20	1.5
S	0.0025	18.6
Sb	2	2.9
Se	0.002	8.5
Si	2	7
Sn	1.2	1.65
Te	0.0005	4
Ti	0.4	21.6
Zn	30	0.286
Zr	0.01	8

Tablo 6.2 Numunelerin kimyasal kompozisyonu ve elektriksel iletkenlikleri

Şerit No	%IACS	Cu	Zn	Sn	Pb	Fe	Ni	Mn	P	S	Al
1	15,620	88,9291	5,3753	0,6852	0,0118	0,0246	0,2259	0,0124	0,0090	0,0020	4,7252
2	15,829	89,0298	5,3041	0,6668	0,0102	0,0296	0,1888	0,0101	0,0086	0,0017	4,7502
3	15,929	89,1318	5,2051	0,6434	0,0129	0,0321	0,1988	0,0103	0,0083	0,0013	4,7560
4	15,661	89,2490	5,1289	0,6930	0,0088	0,0493	0,1156	0,0105	0,0090	0,0013	4,7348
5	15,623	89,3868	4,9176	0,7459	0,0101	0,0382	0,1049	0,0095	0,0090	0,0013	4,7768

Cu₈₉Zn₅Al₅Sn₁ alaşımasının farklı dökümlerinden elde edilen kimyasal bileşimler Tablo 6.2’de verilmiştir. Yapılan bütün çalışmalar oda sıcaklığında ve çözünürlük sınırının altında çalışılmıştır. Her bir döküm için 10 farklı numune alınmış olup ortalamaları alınarak sonuçlar elde edilmiştir. Bu alaşımdaki tüm alaşım elementleri üzerinden ampirik formül üretilmiştir (Denk. 6.1).

Elektriksel iletkenlik (%IACS)

$$\begin{aligned} &= 100 - (1,694[\%Zn] + 10,164[\%Sn] + 6,292[\%Pb] \\ &+ 53,351[\%Fe] + 9,075[\%Ni] + 20,57[\%Mn] + 86,8175[\%P] \\ &+ 121[\%S] + 13,431[\%Al]) \end{aligned}$$

(6.1)

Yapılan inceleme neticesinde elde edilen ampirik formülün Tablo 6.1’ te ki değerler ile örtüştüğü ve oransal olarak benzerlik gösterdiği gözükmemektedir. Elektriksel iletkenliği etkileyen en önemli iki elementin fosfor ve kükürt olduğu gözükmemektedir.

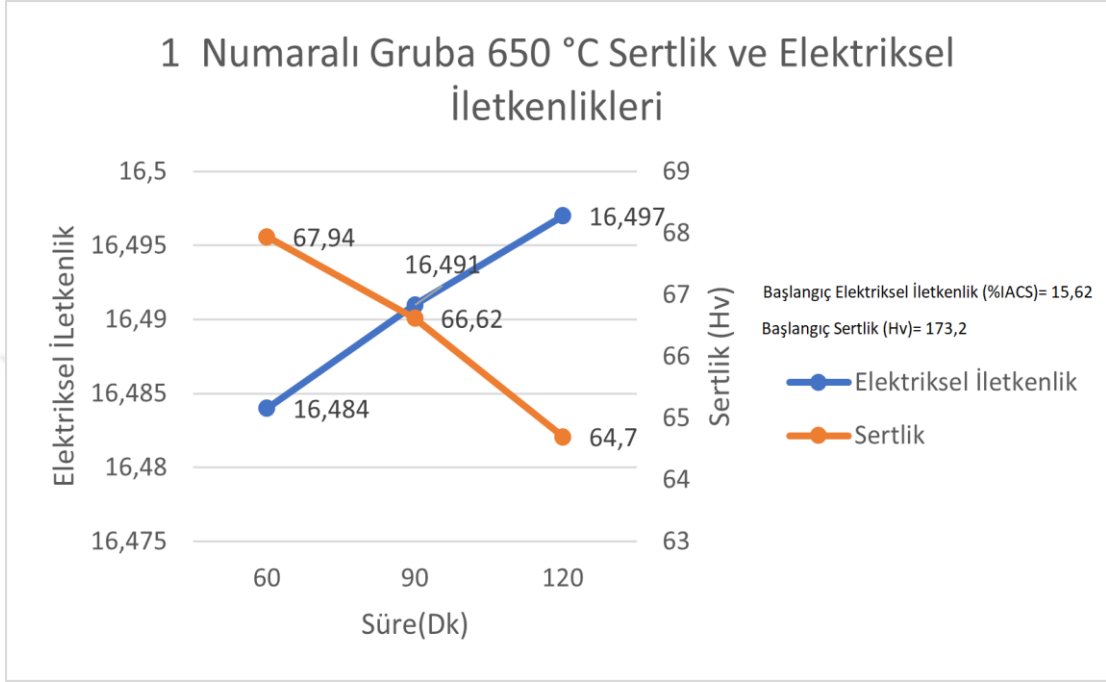
En yüksek fosfor ve kükürt içeriğine sahip olan 1 numaralı dökümün en düşük elektriksel iletkenliğe sahip olduğu görülmektedir. Cu miktarının görece yüksek ve en düşük P ve S içeriğine sahip olan 3 numaralı dökümde elektriksel iletkenlik görece en yüksektir.

4 numaralı numunenin elektriksel iletkenlik değerinin düşük gelmesinin en önemli sebebi Fe içeriğidir. 5 numaralı dökümde görece yüksek Cu içermesine rağmen ana alaşım elementlerinden olan Sn’nin bileşimde yüksek olarak kullanılmasından dolayı elektriksel iletkenliği görece yüksektir.

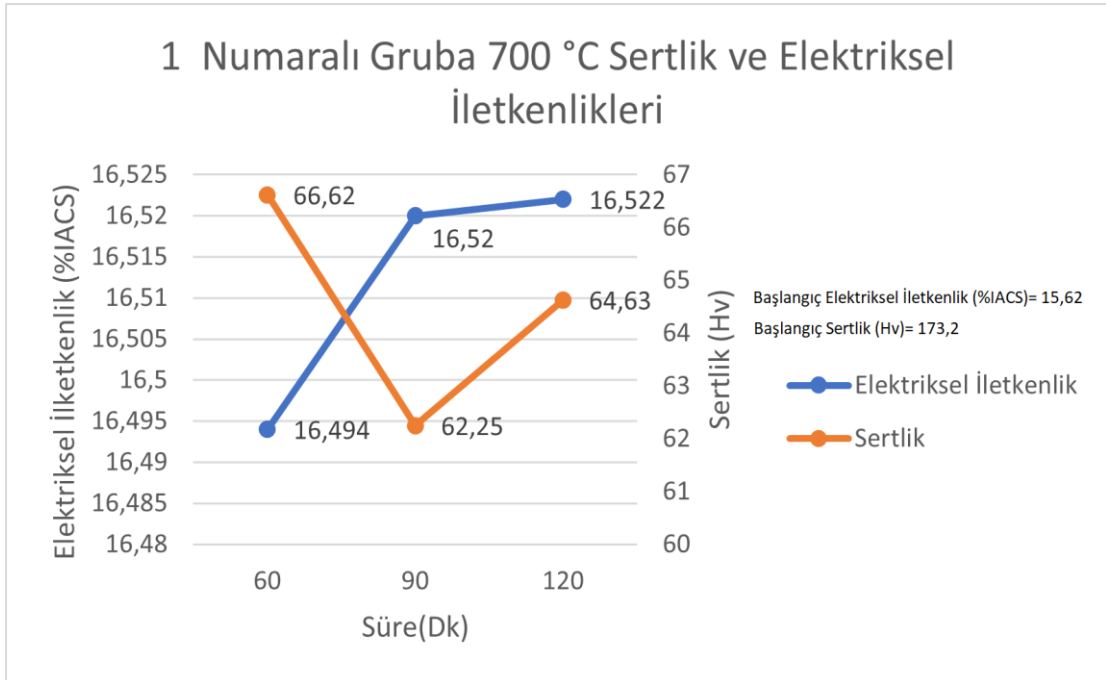
6.2 Yeniden Kristalizasyon Prosesinde Isıl İşlem Sıcaklığının ve Süresinin Elektriksel İletkenliğe ve Sertliğe Etkisi

Soğuk deformasyon sırasında gerinim sertleşmesi nedeniyle sertlik artar. Diğer parametrelerin yanı sıra, kafes yapısının bozulması elektronların geçişini engeller ve elektriksel iletkenliği azaltır. Bu etki saf metallerde azdır ancak alaşımlarda dikkate değer derecede yüksektir [52]. Soğuk şekillendirme, elektrik iletkenlik üzerinde küçük bir düşüşe neden olan etkili bir mukavemetlendirme yöntemidir [53].

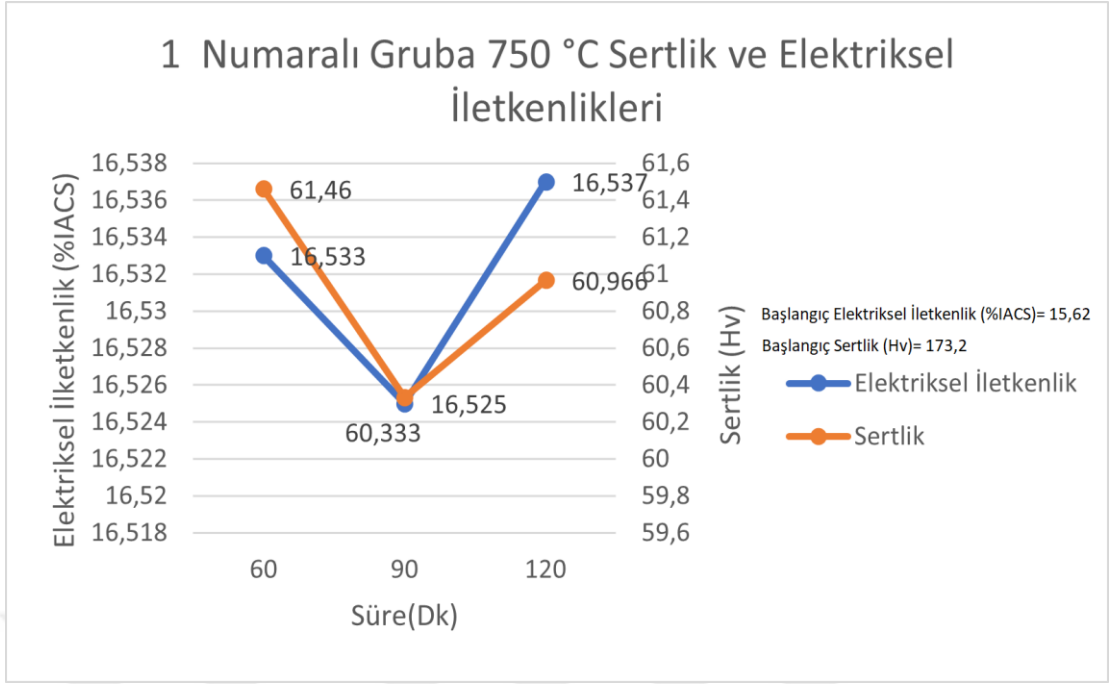
Tane sınırları, iletim elektronları için saçılma merkezleri sunar. Yeniden kristalizasyon ısı işlem süresi ve sıcaklığı arttıkça, tüm bileşimlerde tane boyutunu arttırmaktadır[43]. Tane sınırları bakır alaşımlarında elektrik direncini yükseltir[4].



Şekil 6.1 1 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

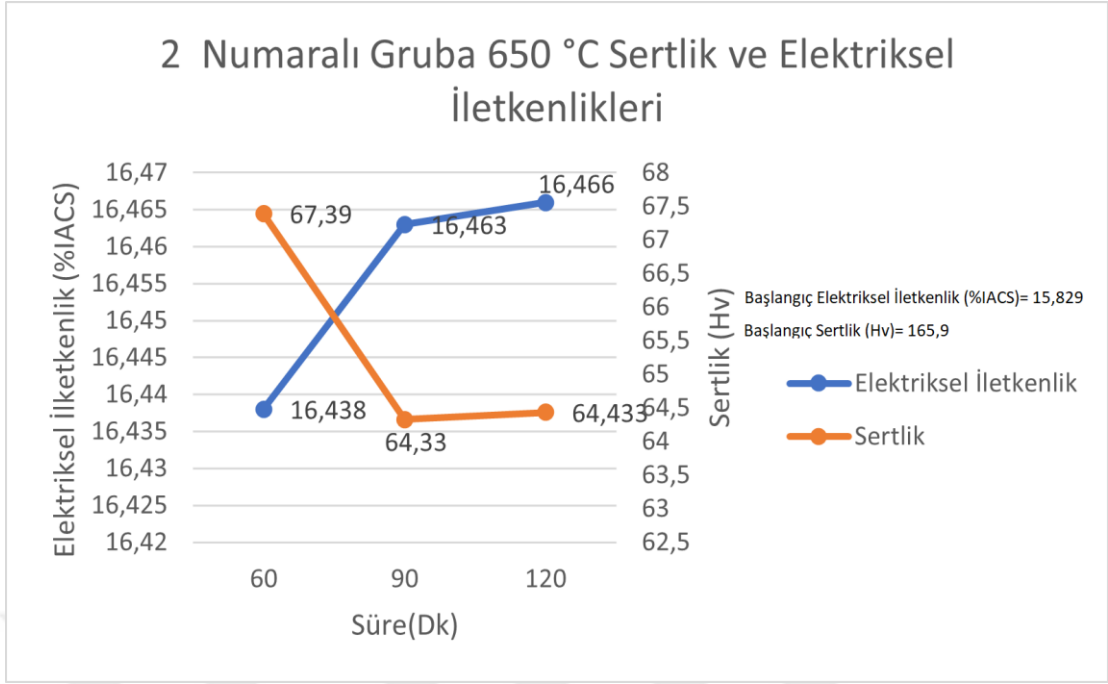


Şekil 6.2 1 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

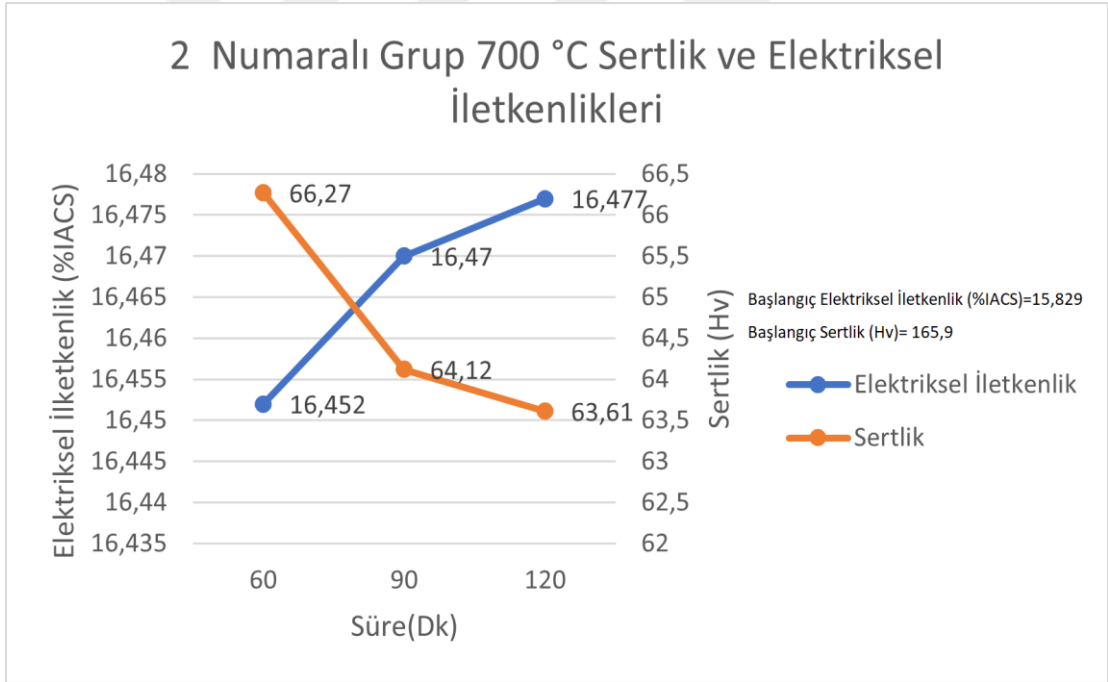


Şekil 6.3 1 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

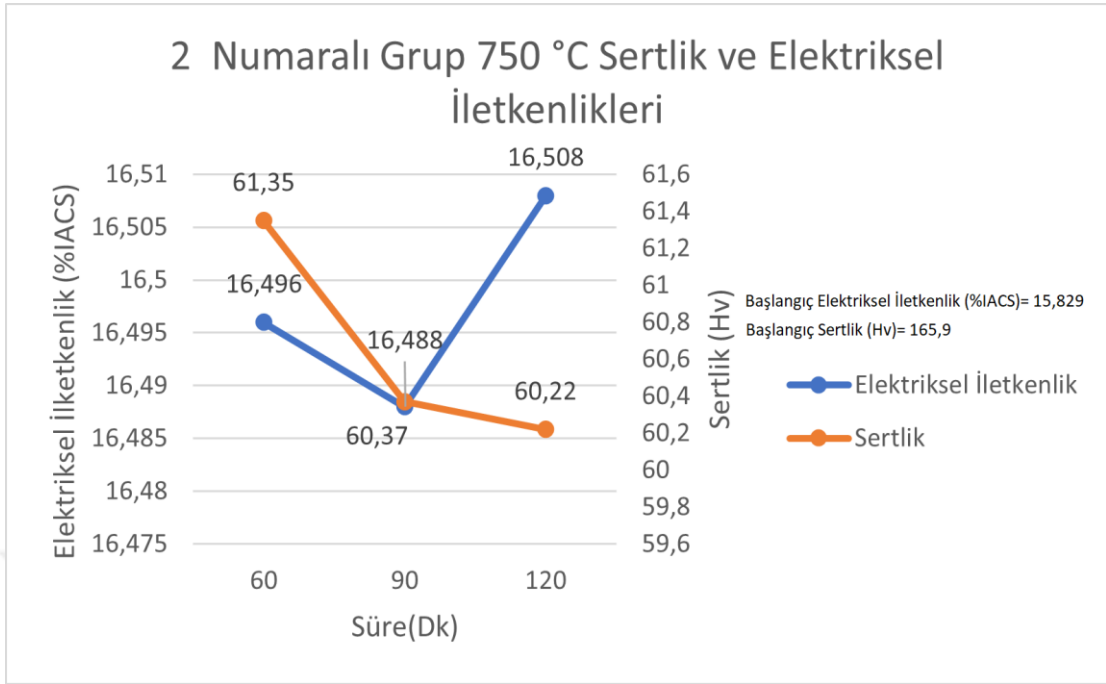
%25 haddelme işlemi gerçekleştirilmiş 1 numaralı grubun başlangıç elektriksel iletkenliği 15,62 %IACS ve mikro sertliği 173,2 HV 'dir. 650, 700 ve 750 °C Isıl işlem sıcaklıkları ile 60, 90 ve 120 dk sürelerinden sonra elde edilen sonuçlarda 750 °C sıcaklık ve 120 dk sürede en yüksek elektriksel iletkenlik olan 16,497 %IACS ve en düşük sertlik olan 60,966 HV sertlik ortalaması ölçülmüştür. En düşük ısıl işlem sıcaklığı ve ısıl işlem süresi olan 650 °C ve 60 dk için görece en düşük elektriksel iletkenlik 16,484 %IACS ve en yüksek mikro sertlik 67,94 HV ortalaması ölçülmüştür.



Şekil 6.4 2 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

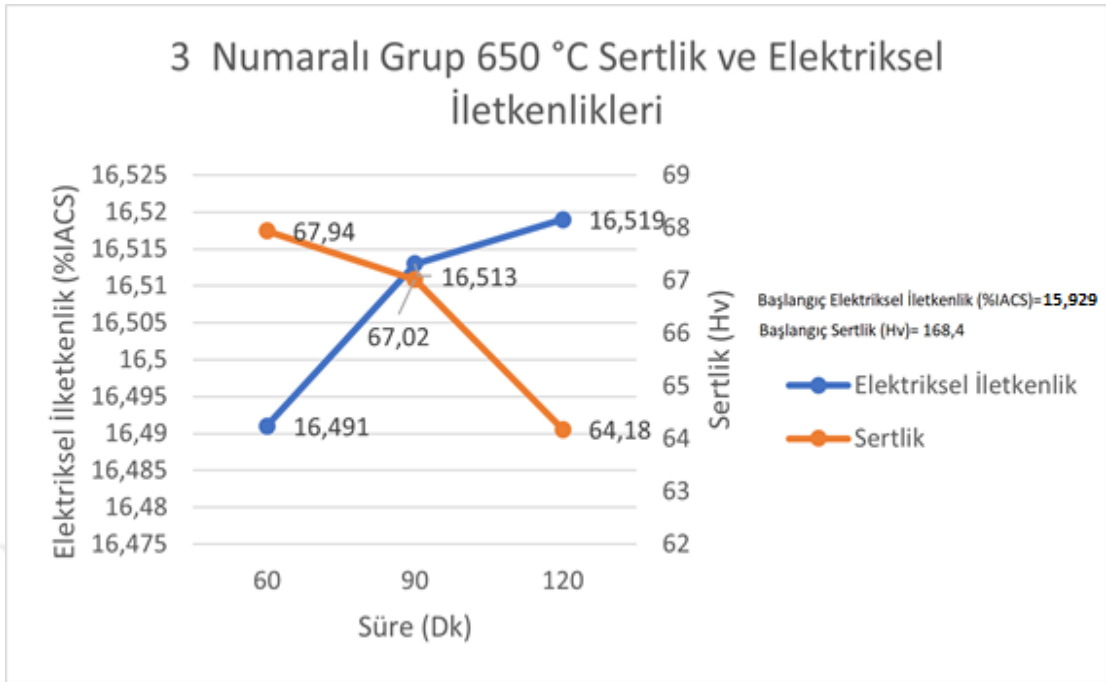


Şekil 6.5 2 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

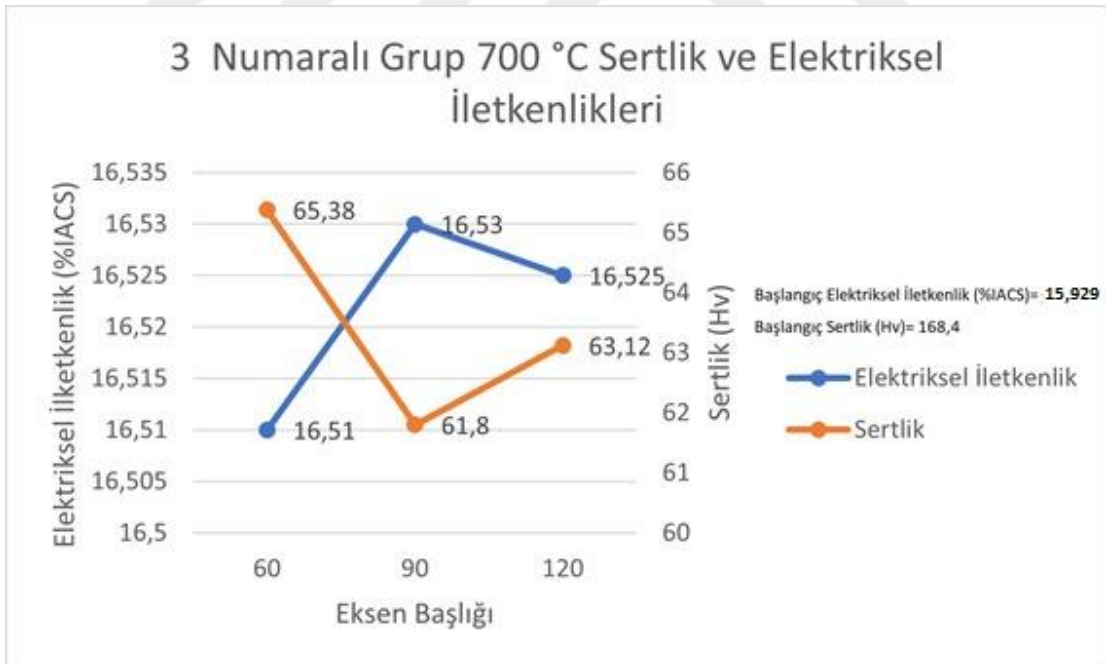


Şekil 6.6 2 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

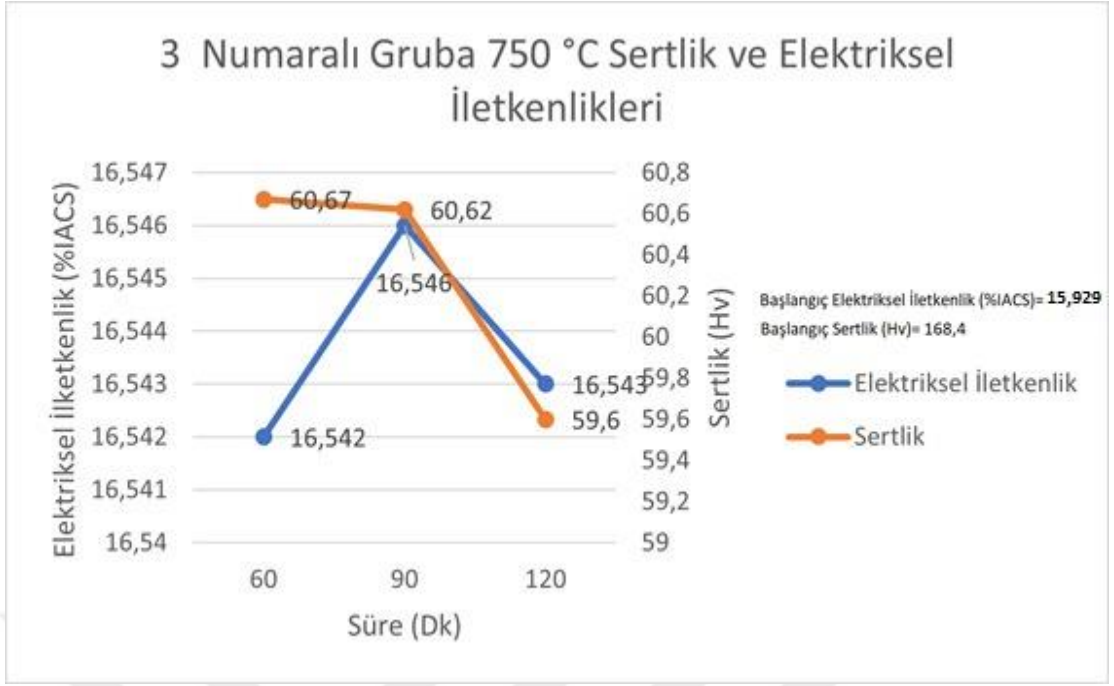
%25 haddeme işlemi gerçekleştirilmiş 2 numaralı grubun başlangıç elektriksel iletkenliği 15,829 %IACS ve mikrosertliği 165,9 HV 'dir. 650, 700 ve 750 °C ısıtım işlem sıcaklıklarında ve 60 ,90 ve 120 dk ısıtım işlem sürelerinden sonra elde edilen sonuçlarda ise 750 °C sıcaklık ve 120 dk sürede en yüksek elektriksel iletkenlik olan 16,508 %IACS ve en düşük sertlik olan 60,22 HV sertlik ortalaması ölçülmüştür. En düşük ısıtım işlem sıcaklığı ve ısıtım işlem süresinde 650 °C ve 60 dk görece en düşük elektriksel iletkenlik 16,438 %IACS ve en yüksek mikro sertlik 67,39 HV ortalaması ölçülmüştür.



Şekil 6.6 3 Numaralı grup 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

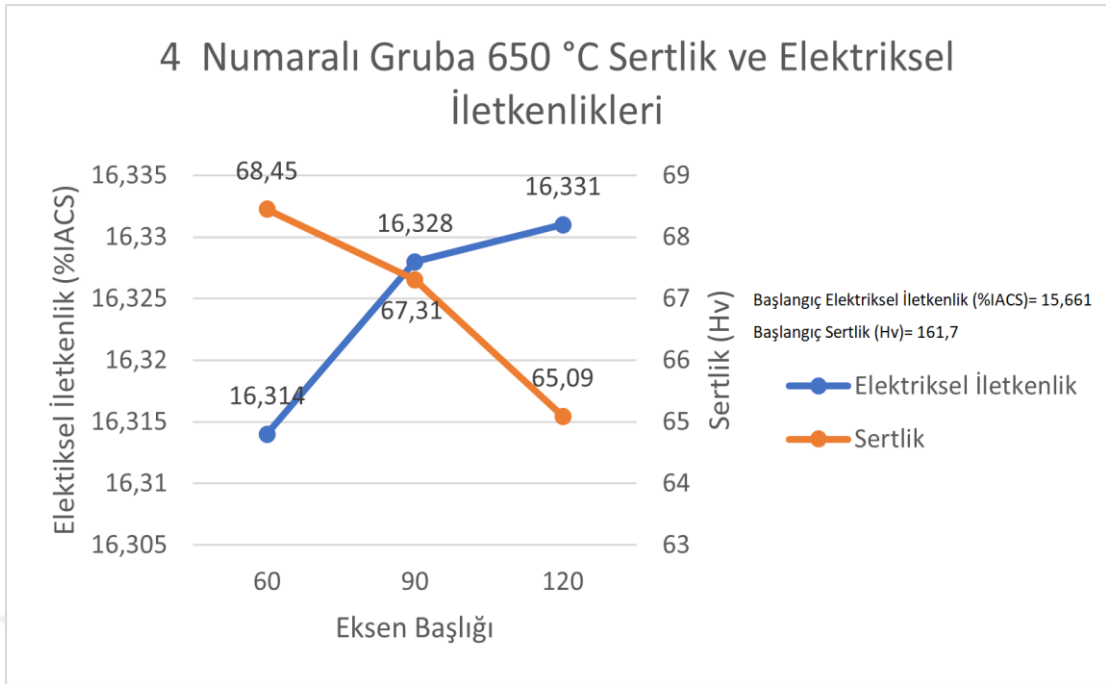


Şekil 6.7 3 Numaralı grup 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

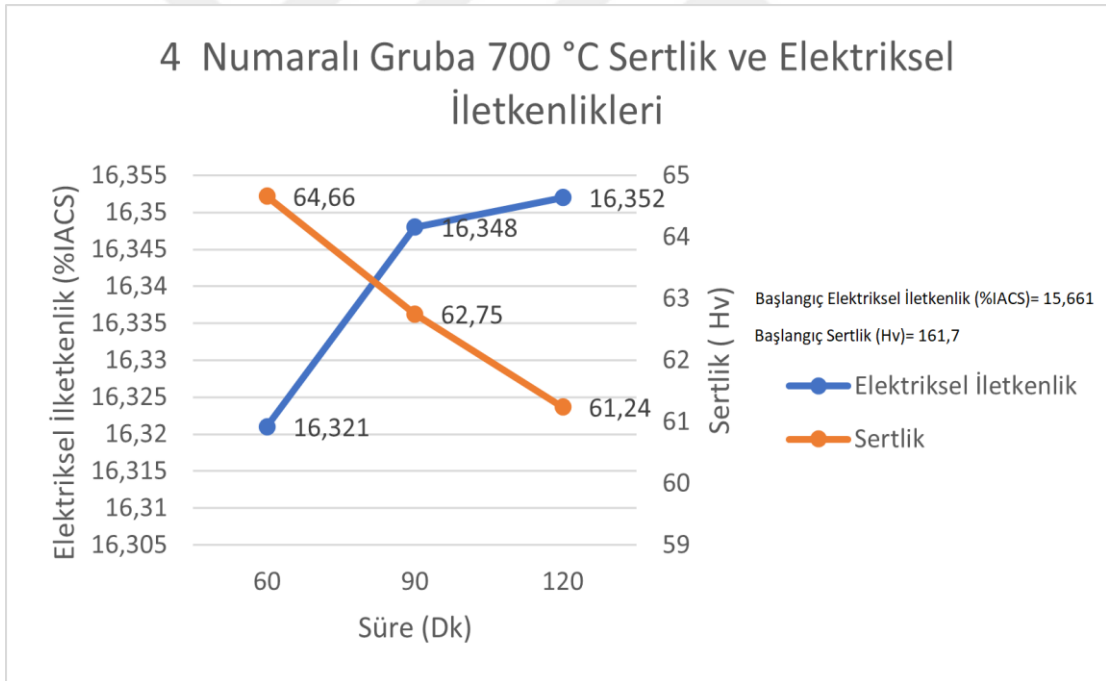


Şekil 6.8 3 Numaralı gruba 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

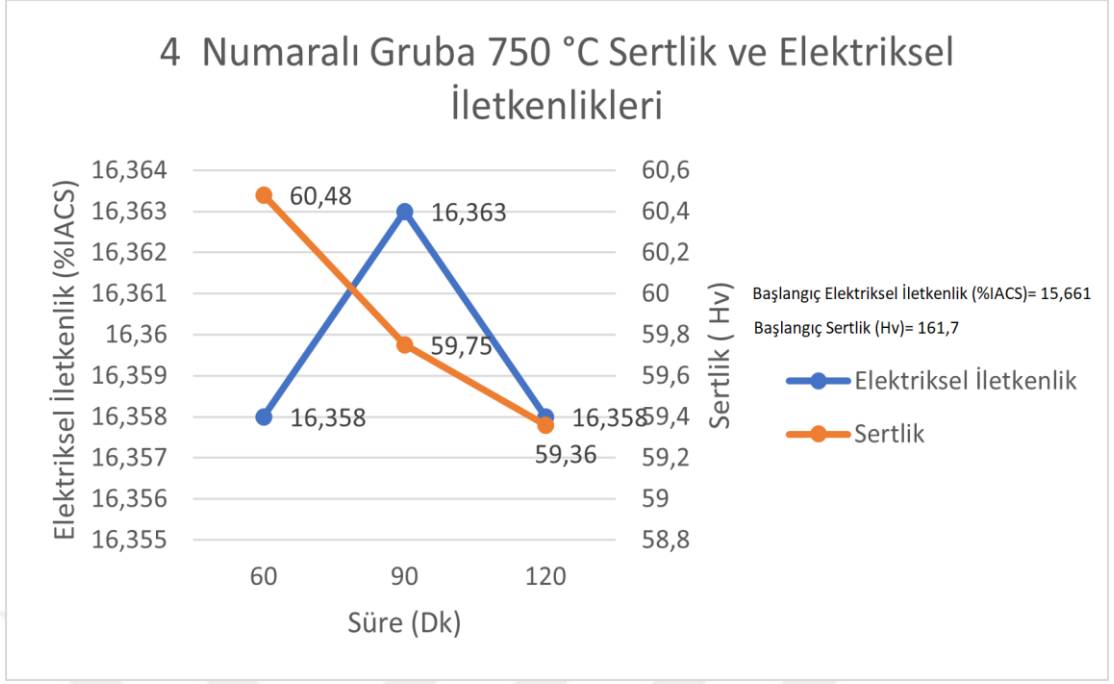
%25 haddeme işlemi gerçekleştirilmiş 3 numaralı grubun başlangıç elektriksel iletkenliği 15,929 %IACS ve mikrosertliği 168,4 HV 'dir. 650, 700 ve 750 °C ısıtım sıcaklıklarında ve 60 ,90 ve 120 dk ısıtım sürelerinden elde edilen sonuçlarda 750 °C sıcaklıkta 60 dk ısıtım uygulanan numunelerin ortalaması 16,542 %IACS iken aynı sıcaklığın 90 ve 120 dk ısıtım süreleri için sırasıyla 16,546 ve 16,543'tür. 750 °C'de elde edilen elektriksel iletkenlik sonuçlarında görece en yüksek ve birbirlerine yakın elektriksel iletkenlik değerleri elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise maksimum ısıtım süresi ve maksimum ısıtım sıcaklığı olan 750 °C ve 120 dk ısıtım süresinde 59,6 HV olarak ölçülmüştür. En düşük ısıtım sıcaklığı ve ısıtım süresi olan 650 °C ile 60 dk 'da görece en düşük elektriksel iletkenlik 16,491 %IACS ve en yüksek mikro sertlik 67,94 HV ortalaması ölçülmüştür.



Şekil 6.9 4 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

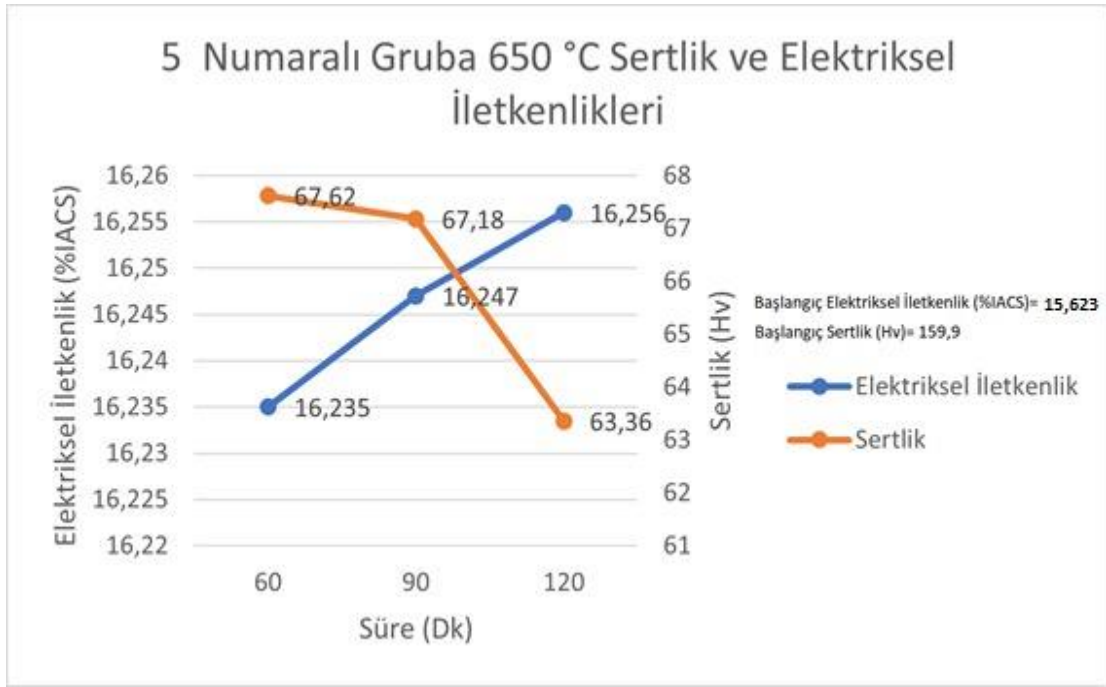


Şekil 6.10 4 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

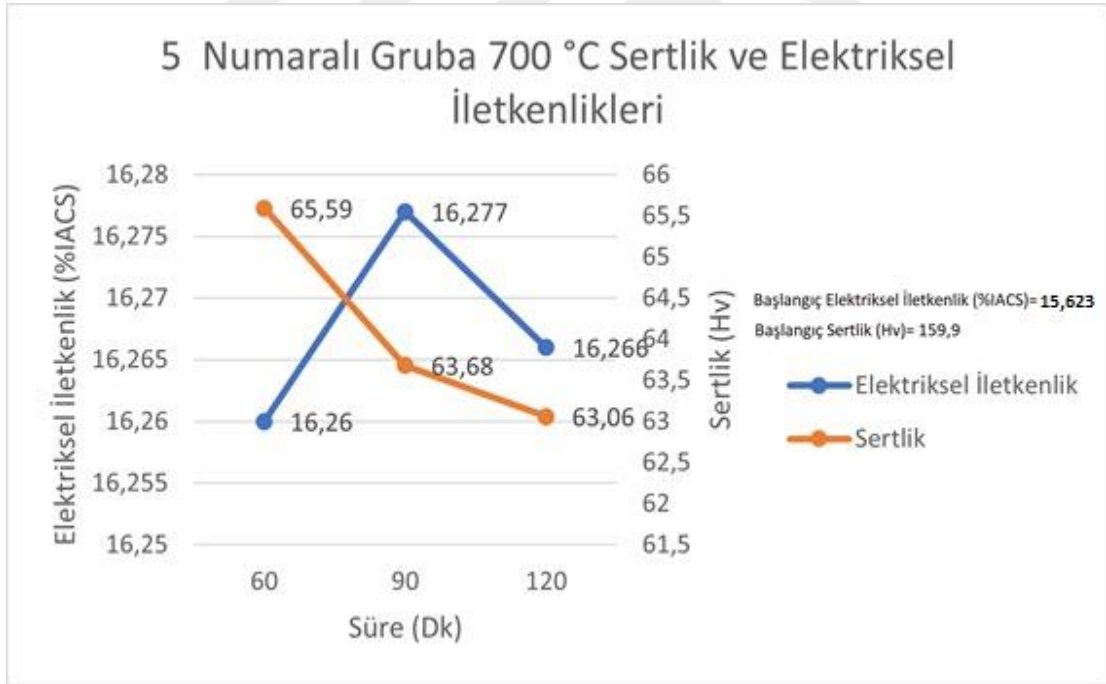


Şekil 6.11 4 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri

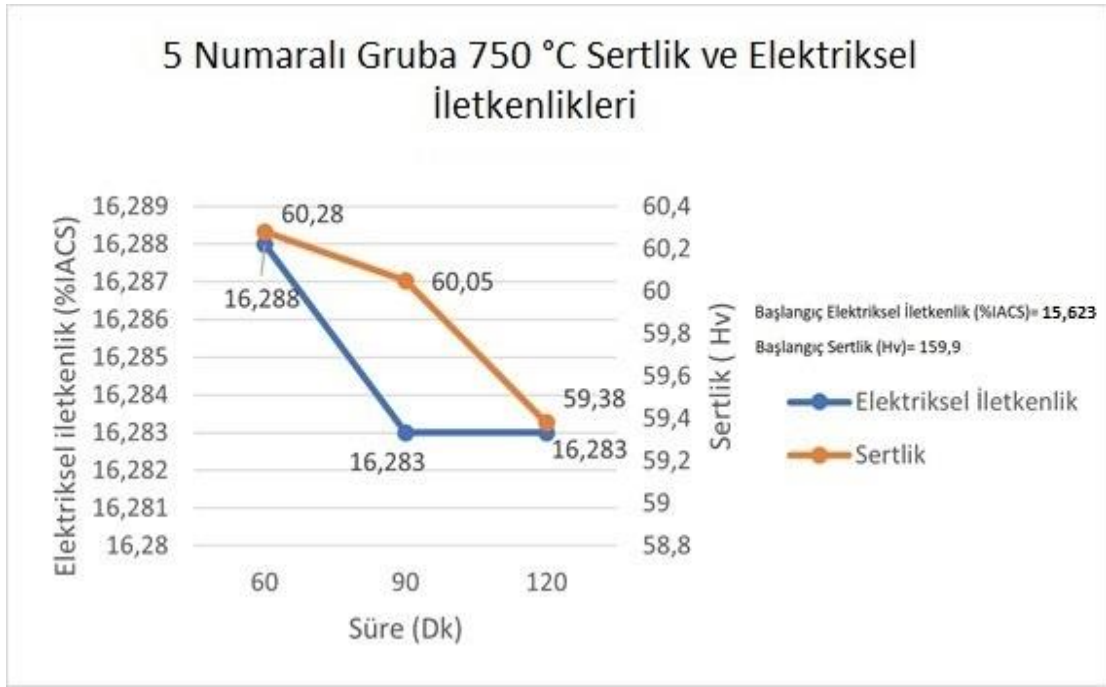
%25 haddeme işlemi gerçekleştirilmiş 4 numaralı grubun başlangıç elektriksel iletkenliği 15,661 %IACS ve mikrosertliği 161,7 HV 'dir. 650, 700 ve 750 °C ısıtım sıcaklıklarında ve 60 ,90 ve 120 dk ısıtım işlem süresi uygulama sonrası elde edilen sonuçlarda 750 °C sıcaklıkta 60 dk ısıtım işlem uygulanan numunelerin ortalaması 16,358 %IACS iken 90 ve 120 dk ısıtım işlem süreleri için sırasıyla 16,363 ve 16,358 %IACS'dir. 750 °C'de elde edilen elektriksel iletkenlik sonuçlarında görece en yüksek ve birbirlerine yakın elektriksel iletkenlik değerleri elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise maksimum ısıtım işlem süresi ve maksimum ısıtım işlem sıcaklığı olan 750 °C ve 120 dk ısıtım işlem süresinde 59,36 HV olarak ölçülmüştür. En düşük ısıtım işlem sıcaklığı ve süresinde 650 °C ve 60 dk'de görece en düşük elektriksel iletkenlik 16,317 %IACS ve en yüksek mikro sertlik 68,45 HV ortalaması ölçülmüştür.



Şekil 6.12 5 Numaralı grubun 650 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri



Şekil 6.13 5 Numaralı grubun 700 °C sertlik ve elektriksel iletkenlikleri



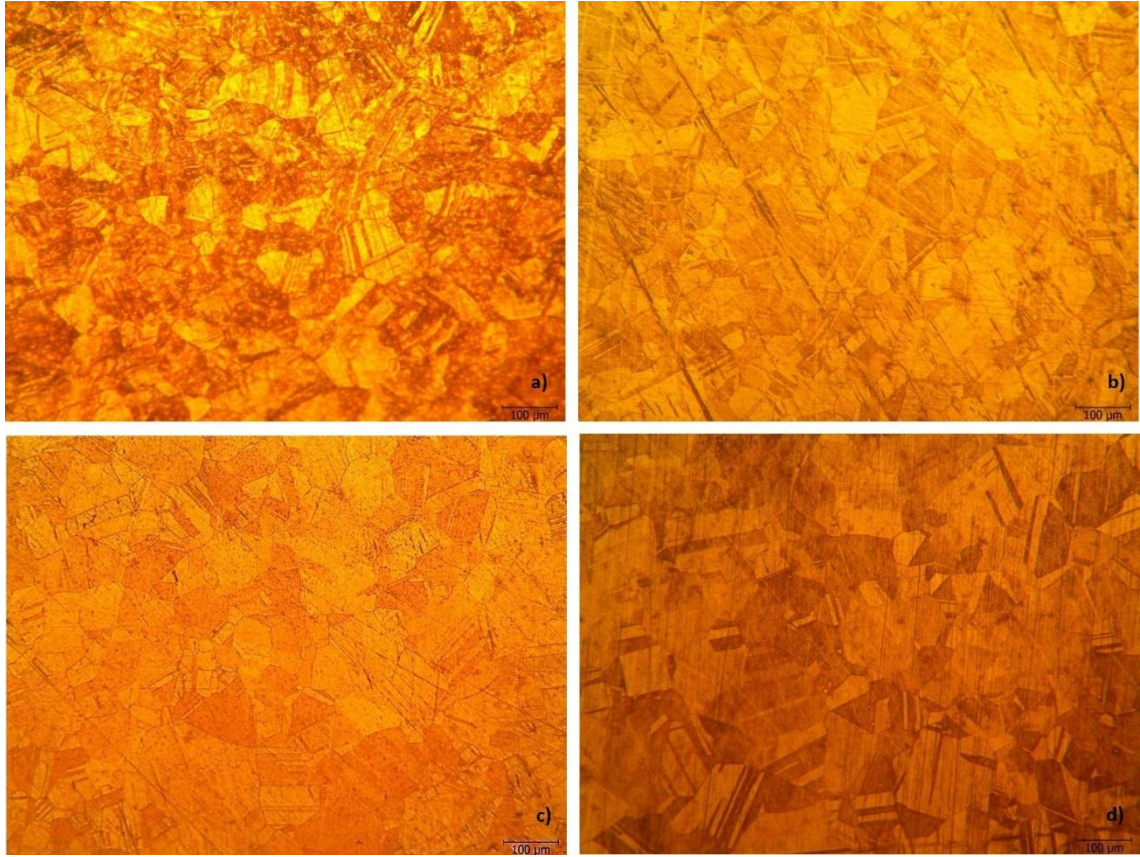
Şekil 6.14 5 Numaralı grubun 750 °C sertlik ve elektriksel İletkenlikleri

%25 haddeme işlemi gerçekleştirilmiş 5 numaralı grubun başlangıç elektriksel iletkenliği 15,623 %IACS ve mikrosertliği 159,9 HV 'dir. 650, 700 ve 750 °C ısıtım sıcaklıklarında ve 60 ,90 ve 120 dk ısıtım işlem süresi uygulama sonrası elde edilen sonuçlarda 750 °C sıcaklıkta 60 dk sürede ortalama 16,288 %IACS değeri elde edilirken, aynı sıcaklıkta 90 ve 120 dk için elektriksel iletkenlik ortalamaları aynı değer olan 16,283 %IACS'dir. 750 °C'de elde edilen elektriksel iletkenlik sonuçlarında görece en yüksek ve birbirlerine yakın elektriksel iletkenlik değerleri elde edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise maksimum ısıtım işlem süresi ve maksimum ısıtım işlem sıcaklığı olan 750 °C ve 120 dk ısıtım işlem süresinde 59,38 HV olarak ölçülmüştür. En düşük ısıtım işlem sıcaklığı ve süresi olan 650 °C ile 60 dk'da görece en düşük elektriksel iletkenlik 16,235 %IACS ve en yüksek mikro sertlik 67,62 HV ortalaması ölçülmüştür.

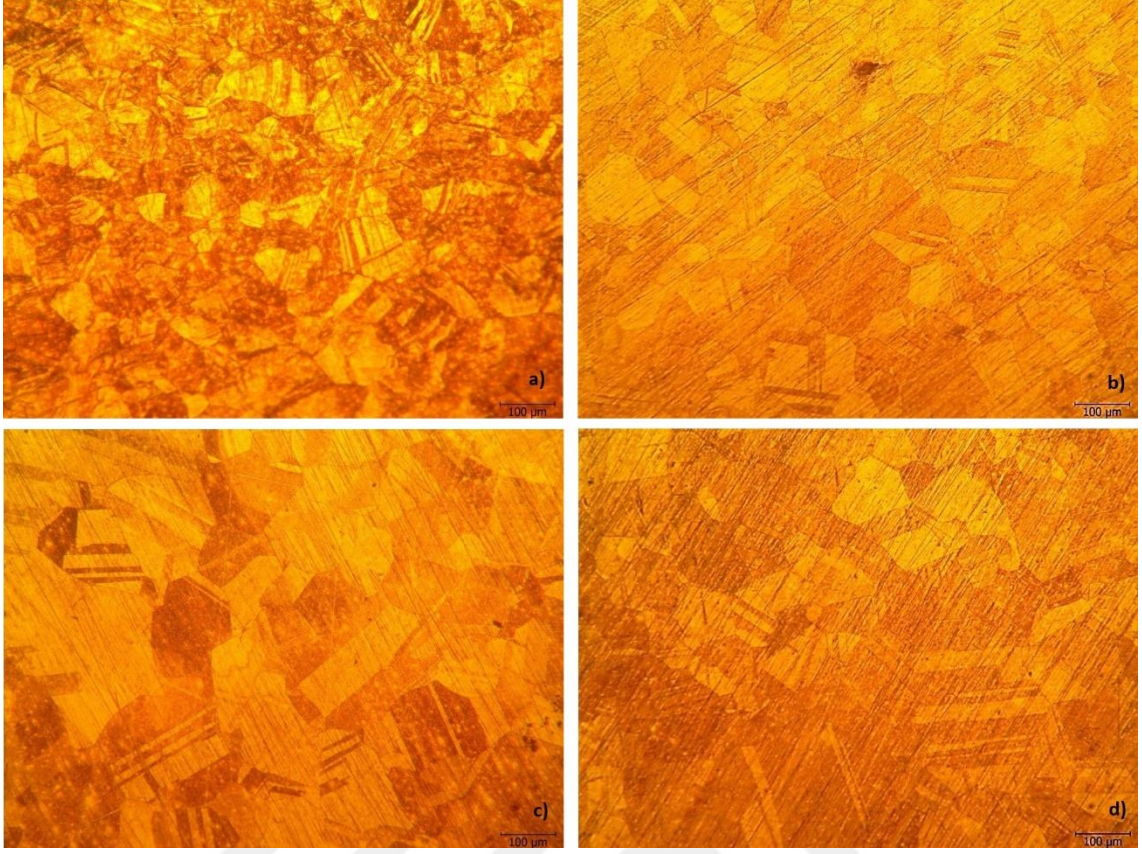
Yapılan genel incelemeler neticesinde yeniden kristalizasyon sıcaklığının ve süresinin artması sertliği olumsuz yönde etkilerken elektriksel iletkenliği artırıcı yönde etki etmektedir. Sabit 750 °C sıcaklık ve sabit 120 dk prosesleri birbirleri ile mukayese edildiğinde sıcaklık ve sürenin artmasının elektriksel iletkenliğe olan katkısı küçüktür. Tavlama süresinin arttırılması yeniden kristalleşme sıcaklığını düşürdüğü gözükmetedir.

Avner safsızlıkların ve kafes kusurlarının tane sınırlarında toplandığını ve numunedeki elektron hareketini engellediğini ve bunun da artan sınır hacmi ile elektrik iletkenliğinde bir düşüşe neden olduğunu bildirmiştir. Yeniden kristalizasyon işlemi ile gerinim enerjisi tekrar kazanılır. Böylelikle elektriksel iletkenlikte artış meydana gelir [52].

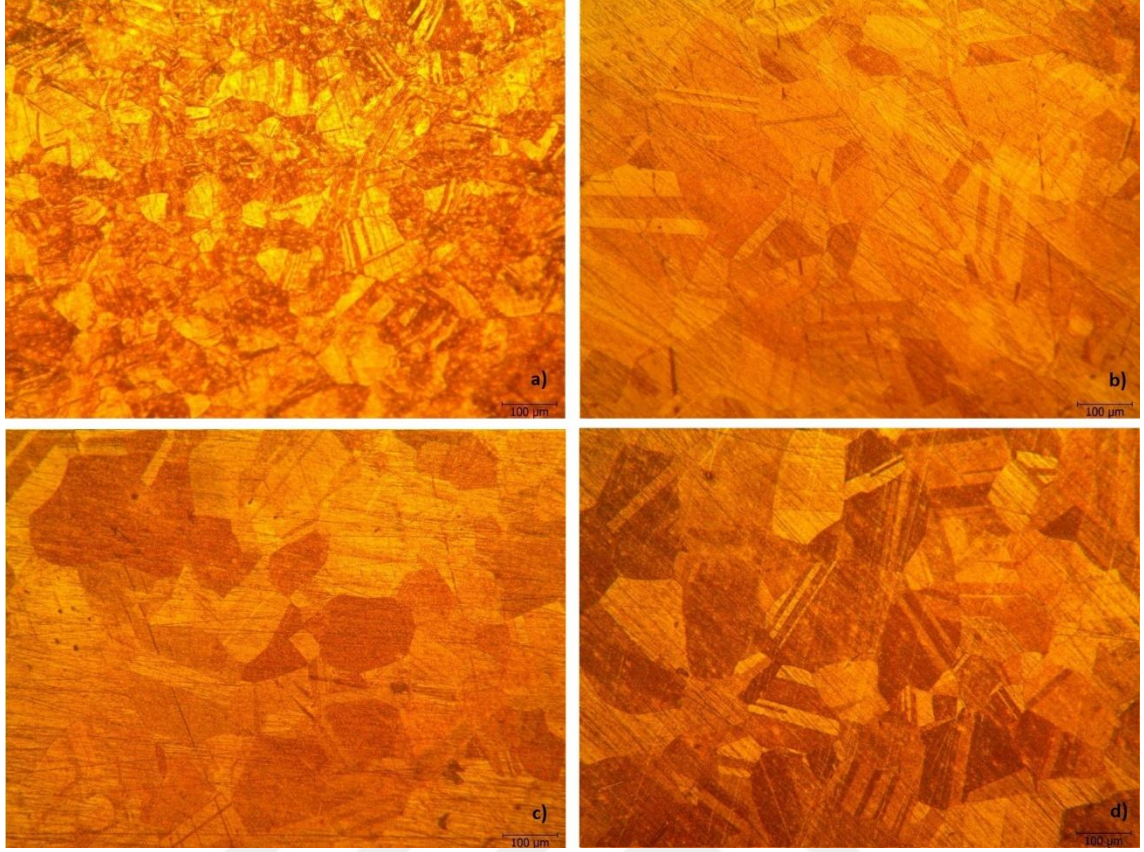
6.3 Yeniden Kristalizasyon Prosesinde Isıl İşlem Sıcaklığının ve Süresinin Mikroyapıya Etkisi



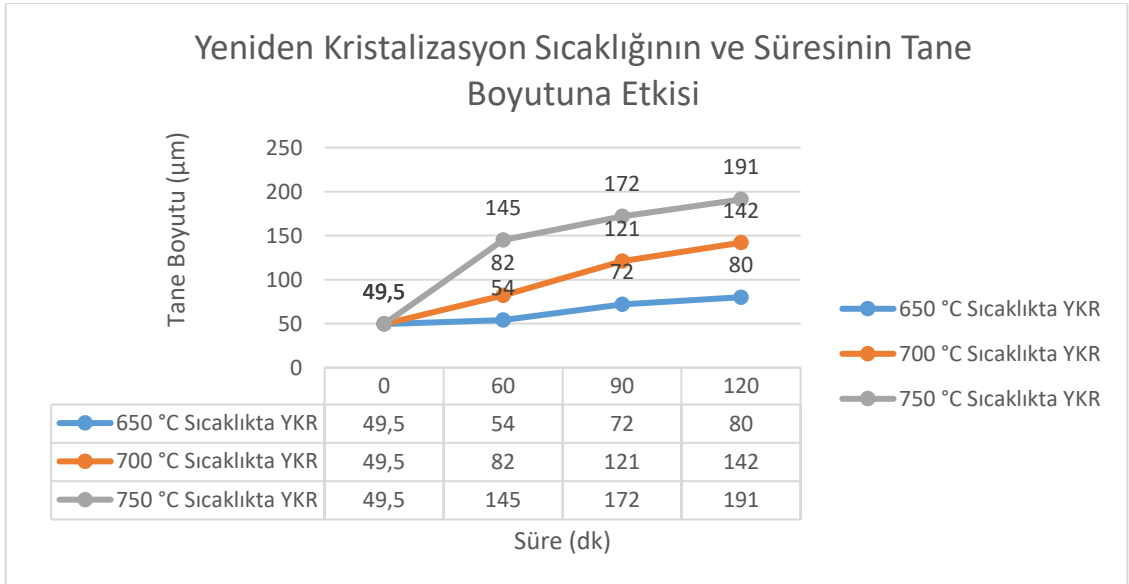
Şekil 6.15 650 °C Sıcaklıkta Yapılan a) Referans b) 60 dk. c) 90 dk d) 120 dk yeniden kristalizasyon uygulanmış numune mikroyapıları



Şekil 6.16 700 °C'de yapılan a) Referans b)60dk. c)90 dk d)120 dk yeniden kristalizasyon uygulanmış numune mikroyapıları



Şekil 6.17 750 °C'de yapılan a) Referans b)60dk. c)90dk d)120 dk yeniden kristalizasyon uygulanmış numune mikroyapıları



Şekil 6.18 Yeniden kristalizasyon sıcaklığının ve süresinin tane boyutuna etkisi

Bir metalin mekanik özellikleri ve davranışı büyük ölçüde dislokasyon içeriğine ve yapısına, tanelerin boyutuna ve tanelerin yönüne veya dokusuna bağlıdır. Bu sınırların kristalografisi kontrol edilebilirse, malzemelerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğu bilinmektedir [54].

Deformasyon ikizlenmeleri ne kadar yüksekse elektriksel dirençte o denli artış gözlemlenmektedir yani elektriksel iletkenlik değeri düşüş eğilimindedir. Plastik şekil verme sonrası hem ikiz sınırları hem de gerilmiş tane sınırları, dirençte bir artışa neden olabilmektedir[55]. Yeniden kristalizasyon işlemi ile uzayan tanelerin giderilmesinden sonra yeni tanelerin oluşması ile elektriksel iletkenlikte yükseliş meydana gelmektedir.

Yapılan incelemeler neticesinde yeniden kristalizasyon sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta sürenin arttırılması ile tane büyümesi kolaylaşır ve nihai tane boyutunu artırır. Yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklık ne kadar düşükse, son tane boyutu da o kadar ince olduğu görülmektedir. Bunlara ilaveten tavlama sıcaklığının artması ile tane boyutunun da artışı daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir.

Süre ve sıcaklığın artması ile ikizlenmeler artmaktadır.

Tane boyutunun kimyasal bileşime göre elektriksel iletkenlik üzerinde zayıf bir etkiye sahip olduğu gözükmemektedir. Tane boyutu ve doku, esas olarak yeniden kristalleştirme işlemiyle belirlenir. Doğru seçilmiş hurda tercihi ile doğru proses edilerek sıvı metal temizliği yapıldığında istenilen kimyasal bileşime ulaşmak ve yüksek elektriksel iletkenlik elde etmek mümkündür.

- [1] "What is Electrical Conductivity?", Available at: <https://matmatch.com/learn/property/electrical-conductivity>. Accessed.
- [2] Lu, L. Shen, Y. Chen, X. Qian, L. ve Lu, K., (2004). "Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper", Science, 304: 422-426.
- [3] Brandes, E. Brook, G. ve Paufler, P., (1993). "Smithells Metals Reference Book. Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, 1992. 1746 Seiten, Preis 150£, ISBN 0-7506-1020-4", Crystal Research and Technology, 28: 530-530.
- [4] Andrews, P. West, M. ve Robeson, C., (1969). "The effect of grain boundaries on the electrical resistivity of polycrystalline copper and aluminium", Philosophical Magazine, 19: 887-898.
- [5] Pry, R. ve Hennig, R., (1954). "On the use of electrical resistivity as a measure of plastic deformation in copper", Acta Metallurgica, 2: 318-321.
- [6] "Meeting Future Copper Demand", Available at: <https://sustainablecopper.org/meeting-future-copper-demand/>. Accessed.
- [7] Sahin, M., (2018). "Bakır Nedir? Nereelerde Kullanılır?", Available at: <https://www.enerjiportali.com/bakir-nedir-nereelerde-kullanilir/>. 16.08.2021.
- [8] ETHEM, M.Y., (1974). "Bakırın Özellikleri, Alaşımları ve Minarelleri", Bilimsel Madencilik Dergisi, 13: 3-7.
- [9] "Copper", Available at: <http://scienceviews.com/geology/copper.html>. 16.08.2021.
- [10] "Nordic gold" Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Nordic_Gold. 16.08.2021.
- [11] "What is Nordic Gold ?", Available at: copperalliance.eu/resources/what-is-nordic-gold . 16.08.2021.
- [12] ARAMA, M.T.V. ve MÜDÜRLÜĞÜ, G., "Türkiye ve Dünyada Bakır".
- [13] Davenport, W.G. King, M.J. Schlesinger, M.E. ve Biswas, A.K., (2002). Extractive metallurgy of copper: Elsevier.
- [14] Ray, S., (2016). Principles and applications of metal rolling: Cambridge University Press.
- [15] "Continuous casting", Available at: www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=continuous_casting. 16.08.2021.
- [16] Kopeliovich, D.D., (2012). "Horizontal continuous casting in graphite mold", Available at: www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=horizontal_continuous_casting_in_graphite_mold. 16.08.2021.

- [17] Davis, J., ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys, ASM International, Materials Park, OH, USA, 2001, ed^eds.
- [18] Kopeliovich, D.D., "Direct Chill (DC) casting", Available at: www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=direct_chill_dc_casting#direct_chill_dc_casting_process. 16.08.2021.
- [19] Rajan, T. Rajan, T.S. Sharma, C. ve Sharma, A., (2011). Heat treatment: principles and techniques: PHI Learning Pvt. Ltd.
- [20] (2001). "Heat Treating of Copper and Copper Alloys".
- [21] Dossett, J.L. ve Boyer, H.E., (2006). Practical heat treating: Asm International.
- [22] Bryson, W.E., (2015). Heat treatment: Master control manual: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- [23] Kayalı, E.S. ve Ensari, C., (2000). Metallerde plastik şekil verme ilke ve uygulamaları: İTÜ.
- [24] Karaaslan, A., (2010). "Mühendislik Alaşımları İçin Faz Diyagramları", Literatür Yayınları: 1-343.
- [25] Çetinarslan, C.S., (2009). "Effect of cold plastic deformation on electrical conductivity of various materials", Materials & design, 30: 671-673.
- [26] Bayram, Ü. ve Maraşlı, N., (2018). "Thermal conductivity and electrical resistivity dependences on growth rate in the directionally solidified Al-Cu-Ni eutectic alloy", Journal of Alloys and Compounds, 753: 695-702.
- [27] Rudnev, V. Loveless, D. ve Cook, R.L., (2017). Handbook of induction heating: CRC press.
- [28] Basinski, Z. Dugdale, J. ve Howie, A., (1963). "The electrical resistivity of dislocations", Philosophical Magazine, 8: 1989-1997.
- [29] Nie, B. Yin, Z.-m. Zhu, D.-p. Peng, Y.-y. Jiang, F. ve Huang, J.-w., (2007). "Effect of homogenization treatment on microstructure and properties of Al-Mg-Mn-Sc-Zr alloy", Journal of Central South University of Technology, 14: 452-455.
- [30] Brandes, E.A. ve Brook, G., (2013). Smithells metals reference book: Elsevier.
- [31] Christian, J.W. ve Mahajan, S., (1995). "Deformation twinning", Progress in materials science, 39: 1-157.
- [32] Dahlgren, S. Nicholson, W. Merz, M. Bollmann, W. Devlin, J. ve Wang, R., (1977). "Microstructural analysis and tensile properties of thick copper and nickel sputter deposits", Thin Solid Films, 40: 345-353.
- [33] Sutton, A.P., (1995). "Interfaces in crystalline materials", Monographs on the Physics and Chemistry of Materials: 414-423.

- [34] Li, R. Kang, H. Chen, Z. Fan, G. Zou, C. Wang, W. Zhang, S. Lu, Y. Jie, J. ve Cao, Z., (2016). "A promising structure for fabricating high strength and high electrical conductivity copper alloys", *Scientific reports*, 6: 20799.
- [35] Li, Y. Tao, N. ve Lu, K., (2008). "Microstructural evolution and nanostructure formation in copper during dynamic plastic deformation at cryogenic temperatures", *Acta materialia*, 56: 230-241.
- [36] Huang, C. Hu, W. Yang, G. Zhang, Z. Wu, S. Wang, Q. ve Gottstein, G., (2012). "The effect of stacking fault energy on equilibrium grain size and tensile properties of nanostructured copper and copper–aluminum alloys processed by equal channel angular pressing", *Materials Science and Engineering: A*, 556: 638-647.
- [37] Zhang, Y. Tao, N. ve Lu, K., (2011). "Effects of stacking fault energy, strain rate and temperature on microstructure and strength of nanostructured Cu–Al alloys subjected to plastic deformation", *Acta materialia*, 59: 6048-6058.
- [38] Huang, Q. Yu, D. Xu, B. Hu, W. Ma, Y. Wang, Y. Zhao, Z. Wen, B. He, J. ve Liu, Z., (2014). "Nanotwinned diamond with unprecedented hardness and stability", *Nature*, 510: 250-253.
- [39] Tian, Y. Xu, B. Yu, D. Ma, Y. Wang, Y. Jiang, Y. Hu, W. Tang, C. Gao, Y. ve Luo, K., (2013). "Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride", *Nature*, 493: 385-388.
- [40] Xiao, G. Tao, N. ve Lu, K., (2009). "Microstructures and mechanical properties of a Cu–Zn alloy subjected to cryogenic dynamic plastic deformation", *Materials Science and Engineering: A*, 513: 13-21.
- [41] Bahmanpour, H. Kauffmann, A. Khoshkhoo, M. Youssef, K. Mula, S. Freudenberger, J. Eckert, J. Scattergood, R. ve Koch, C., (2011). "Effect of stacking fault energy on deformation behavior of cryo-rolled copper and copper alloys", *Materials Science and Engineering: A*, 529: 230-236.
- [42] Van der Voort, E. ve Guyot, P., (1971). "On the electrical resistivity by scattering on metallic grain boundaries", *Physica status solidi (b)*, 47: 465-473.
- [43] Abbas, S.F. Seo, S.-J. Park, K.-T. Kim, B.-S. ve Kim, T.-S., (2017). "Effect of grain size on the electrical conductivity of copper–iron alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 720: 8-16.
- [44] Tong, X. You, G. Ding, Y. Xue, H. Wang, Y. ve Guo, W., (2018). "Effect of grain size on low-temperature electrical resistivity and thermal conductivity of pure magnesium", *Materials Letters*, 229: 261-264.
- [45] Kannan, K. Vetrano, J. ve Hamilton, C., (1996). "Effects of alloy modification and thermomechanical processing on recrystallization of Al-Mg-Mn alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27: 2947-2957.
- [46] Eldrup, M. ve Singh, B.N., (1998). "Influence of composition, heat treatment and neutron irradiation on the electrical conductivity of copper alloys", *Journal of nuclear materials*, 258: 1022-1027.

- [47] Gandhewar, V.R. Bansod, S.V. ve Borade, A.B., (2011). "Induction furnace-A review", International Journal of Engineering and Technology, 3: 277-284.
- [48] "Atomik Absorpsiyon Spektrometresi", Available at: merlab.metu.edu.tr/tr/atomik-absorpsiyon-spektrometresi. Accessed.
- [49] Shannon, R.R., (2016). "Microscope", Available at: <https://www.britannica.com/technology/microscope/The-theory-of-image-formation>. 16.08.2021.
- [50] Maki, K. Ito, Y. Matsunaga, H. ve Mori, H., (2013). "Solid-solution copper alloys with high strength and high electrical conductivity", Scripta materialia, 68: 777-780.
- [51] Caron, R., (2016). "Copper: alloying".
- [52] Avner, S.H., (1974). Introduction to physical metallurgy: McGraw-hill New York.
- [53] Lu, D.-P. Wang, J. Zeng, W.-J. Liu, Y. Lu, L. ve Sun, B.-D., (2006). "Study on high-strength and high-conductivity Cu-Fe-P alloys", Materials Science and Engineering: A, 421: 254-259.
- [54] Alexandreanu, B. ve Was, G.S., (2001). "A priori determination of the sampling size for grain-boundary character distribution and grain-boundary degradation analysis", Philosophical Magazine A, 81: 1951-1965.
- [55] Chen, X. Lu, L. ve Lu, K., (2007). "Electrical resistivity of ultrafine-grained copper with nanoscale growth twins", Journal of applied physics, 102: 083708.

Konferans Bildirileri

1. Çağlar Yüksel, Hüseyincan Eker, Mustafa Çiğdem, Muzaffer Türkoğlu, Yunus Emre Benkli, (2020). "Nordic Gold Alaşımında Isıl İşlemin Mekanik Özelliklere ve Elektriksel İletkenliğe Etkisi", 6. Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi: 454-458

