



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SAF BAKIRIN SOĞUK DEFORMASYON VE YENİDEN
KRİSTALLEŞME DAVRANIŞININ MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Cem AKBAŞ
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman
Yard. Doç. Dr. Selim YILDIRIM**

Temmuz, 2011

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SAF BAKIRIN SOĞUK DEFORMASYON VE YENİDEN
KRİSTALLEŞME DAVRANIŞININ MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Cem AKBAŞ
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**


**Danışman
Yard. Doç. Dr. Selim YILDIRIM**

Temmuz, 2011

İSTANBUL

Bu çalışma 04/07/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı Metalurji ve Malzeme Mühendisliği programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



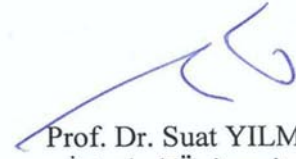
Yard. Doç. Dr. Selim YILDIRIM (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



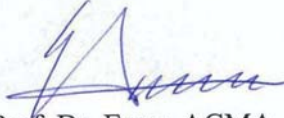
Prof. Dr. İbrahim YUSUFOĞLU
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Enver OKTAY
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Suat YILMAZ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Ercan AÇMA
İstanbul Teknik Üniversitesi
Kimya-Metalürji Fakültesi

Bu alışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliđinin 8642 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Yard. Doç. Dr. Selim YILDIRIM'a en içten dileklerle teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği ve Koordinasyon Birimine bu çalışmaya sağlamış oldukları maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen her zaman kendime örnek aldığım sayın hocalarım Prof. Dr. İbrahim YUSUFOĞLU ve Yard. Doç. Dr. Cem KAHRUMAN başta olmak üzere; çok saygıdeğer hocalarım, Araş Gör. Dr. Ahmet Orkun KALPAKLI, Araş. Gör. Dr. Sedat İLHAN, Yard. Doç. Dr. Berat YÜKSEL, Araş. Gör. Dr. Nuray BEKÖZ, Araş. Gör. Gökçe HAPÇI, Araş Gör. Dr. Eray ERZİ, Araş. Gör. Dr. Şenol ÇETİNKAYA, Araş. Gör. Dr. Melek CUMBUL ALTAY, Araş. Gör. Mert ZORAĞA, Araş. Gör. Dr. İlven MUTLU ve diğer tüm hocalarıma çalışmalarına verdikleri destekten dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Tüm yaşamım boyunca beni sonuna kadar destekleyen sevgili aileme ve küçük kardeşim Can'a çok teşekkür ederim.

Temmuz, 2011

Cem AKBAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	3
2.1. BAKIR VE GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.2. BAKIR ÜRETİMİ.....	5
2.2.1. Tel Çekme İşlemi.....	9
2.3. SOĞUK DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME.....	10
2.3.1. Toparlanma	12
2.3.2. Yeniden Kristalleşme	12
2.3.2.1. Yeniden Kristalleşme Sürecinde Aktivasyon Enerjisi.....	16
2.3.3. Tane Büyümesi	20
2.4. AŞINMA.....	21
2.4.1. Adhesiv Aşınma.....	22
2.4.2. Abrasiv Aşınma	23
2.4.2.1. Abrasiv Aşınma Mekanizmaları.....	24
2.5. SAF BAKIRIN SOĞUK DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME DAVRANIŞI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	27

3. MALZEME VE YÖNTEM	31
3.1. KULLANILAN MALZEMELER	31
3.2. YENİDEN KRİSTALLEŞME TAVLAMALARI.....	32
3.3. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	33
3.4. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR.....	34
3.4.1. Kesme İşlemi.....	34
3.4.2. Kalıplama İşlemi	35
3.4.3. Zımparalama ve Parlatma İşlemleri	35
3.4.4. Dağlama İşlemi.....	36
3.5. DSC ANALİZLERİ	36
3.6. ÇEKME TESTLERİ.....	36
3.7. AŞINMA DENEYLERİ.....	38
3.8. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ.....	40
4. BULGULAR	41
4.1. YENİDEN KRİSTALLEŞME TAVLAMALARI VE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	41
4.2. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR.....	42
4.3. DSC ANALİZLERİ	48
4.4. ÇEKME TESTLERİ.....	49
4.5. AŞINMA TESTLERİ.....	52
4.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ.....	53
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	54
5.1. YENİDEN KRİSTALLEŞME TAVLAMALARI VE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	54
5.2. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR.....	56
5.3. DSC ANALİZLERİ	56
5.4. ÇEKME TESTLERİ.....	58
5.5. AŞINMA TESTLERİ.....	60
5.6. GENEL SONUÇLAR	63

KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: 2009 yılında dünya üzerinde en çok bakır üreten 20 ülke ve bin ton cinsinden ürettikleri bakır miktarları [2].	4
Şekil 2.2	: Bakır üretim yöntemlerinin şematik gösterilişi [3].	6
Şekil 2.3	: Ticari olarak bakırın üretim ve kullanım alanları [3].	8
Şekil 2.4	: Tel çekme işleminin şematik görünümü [10].	9
Şekil 2.5	: Çok kristalli saf bakırda soğuk işlemden depolanan enerji [14].	11
Şekil 2.6	: Soğuk deformasyon ve tavlama ile malzemede meydana gelen değişikliklerin şematik gösterilişi [18].	13
Şekil 2.7	: Saf bakırda deformasyon miktarıyla a) depolanan enerji, b) yeniden kristalleşme sıcaklığının değişimi [21].	14
Şekil 2.8	: Tane birleşmesiyle tane büyümesinin şematik gösterilişi [14].	21
Şekil 2.9	: Adhesiv aşınma [31].	22
Şekil 2.10	: Abrasiv aşınma [31].	23
Şekil 2.11	: Çeşitli malzemelerde küresel sertliğin abrasiv aşınma direncine etkisi [31].	24
Şekil 2.12	: Çeşitli aşındırıcı maddelerle malzemelerin aşınmasında kullanılan deney yöntemleri [31].	26
Şekil 3.1	: Vickers sertlik ölçümünde oluşan iz [25].	34
Şekil 3.2	: Metalografik incelemelerde kullanılan kalıplar (a) birinci kalıplama grubu (80FI, 63SD ve 55SD), (b) ikinci kalıplama grubu (63YK ve 55YK).	35
Şekil 3.3	: Çekme testi numunesinin şematik gösterilişi [44].	37
Şekil 3.4	: Çekme testinde kullanılan numuneler	37
Şekil 3.5	: Deneyde kullanılan (a) abrasiv aşınma cihazı, (b) numune ve yükün yerleşimi.	38
Şekil 3.6	: (a) Aşınma testi numuneleri (b) aşınma testi numunelerinin teknik resmi	39
Şekil 4.1	: 80FI kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları	43
Şekil 4.2	: 63SD kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.	44
Şekil 4.3	: 55SD kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.	45
Şekil 4.4	: 63YK kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.	46
Şekil 4.5	: 55YK kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.	47
Şekil 4.6	: 55SD kodlu numunenin (a) $\beta = 10^\circ\text{C}/\text{dak}$, (b) $\beta = 20^\circ\text{C}/\text{dak}$, (c) $\beta = 30^\circ\text{C}/\text{dak}$ ’lık farklı ısıtma hızlarındaki DSC eğrileri.	48
Şekil 4.7	: (a) 80FI, (b) 63SD, (c) 63YK, (d) 55SD ve (e) 55YK kodlu numunelerin çekme eğrileri.	51

Şekil 4.8	: (a) 80FI, (b) 63SD, (c) 63YK, (d) 55SD ve (e) 55YK kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin (120 nolu zımpara, 5 kg yük) SEM görüntüleri.	53
Şekil 5.1	: 63SD kodlu bakır telin farklı yeniden kristalleşme sıcaklıklarında, farklı sürelerdeki sertlik değişimi.	54
Şekil 5.2	: 55SD kodlu bakır telin farklı yeniden kristalleşme sıcaklıklarında, farklı sürelerdeki sertlik değişimi.	55
Şekil 5.3	: $\ln(\beta/T_m^2) - 1000/T$ diyagramı	57
Şekil 5.4	: $\ln(\beta) - 1000/T$ diyagramı.	57
Şekil 5.5	: Bakır tellerin çekme mukavemetleri.	58
Şekil 5.6	: Bakır tellerin % kopma uzamaları.	59
Şekil 5.7	: Bakır tellerin 40 nolu zımpara kullanılarak, 1 kg ve 5 kg yük altında abrasiv aşınma davranışları.	60
Şekil 5.8	: Bakır tellerin 120 nolu zımpara kullanılarak, 1 kg ve 5 kg yük altında abrasiv aşınma davranışları.	61
Şekil 5.9	: 40 ve 120 nolu zımparalarla gerçekleştirilen aşınma testlerinde aşınma miktarının değişimi.	62

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri [4,5].....	3
Tablo 2.2	: Bakır atomunun özellikleri [4,5].	4
Tablo 2.3	: Saf bakıra atomsal % 0,01 kadar element ilavesinin yeniden kristalleşme sıcaklığına etkisi[14].	14
Tablo 2.4	: Bazı metallerin yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları [18]....	15
Tablo 3.1	: Deney çalışmalarında kullanılan malzemelerin kodları ve numune özellikleri	32
Tablo 3.2	: Yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıkları ve süreleri.....	33
Tablo 3.3	: Aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği parametreler	39
Tablo 4.1	: 63SD kodlu numunenin farklı yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıklarında tavlama süresi ile sertlik (HV) değişimi.	41
Tablo 4.2	: 55SD kodlu numunenin farklı yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıklarında tavlama süresi ile sertlik (HV) değişimi.	42
Tablo 4.3	: Numunelerin çekme mukavemeti ve kopma uzamaları	51
Tablo 4.4	: Bakır tellerin aşınma test sonuçları.	52

SEMBOL LİSTESİ

A	: frekans faktörü
A_o	: orjinal kesit alanı
A_d	: deformasyon sonrası kesit alanı
d	: yoğunluk
D_o	: numune çapı
D₁	: numunenin baş kısmının çapı
E	: aktivasyon enerjisi
F	: soğuk işlem serbest enerjisi
f(α)	: fraksiyonel dönüşüm modeli
G	: ağırlık
g(α)	: fraksiyonel dönüşüm modeli integrali
k	: reaksiyon hız sabiti
L_o	: numune ilk ölçü uzunluğu
L_s	: numune son ölçü uzunluğu
L_T	: numune toplam uzunluğu
M	: yükleme ağırlığı
P	: yük
r	: çap
R	: gaz sabiti
s	: aşınma yolu
S	: entropi
t	: süre
T	: sıcaklık
T_o	: başlangıç sıcaklığı
T_m	: pik tepe noktası sıcaklığı
W_r	: aşınma direnci
α	: fraksiyonel dönüşüm
β	: ısıtma hızı
σ_ç	: çekme mukavemeti
θ	: indirgenmiş süre

ÖZET

SAF BAKIRIN SOĞUK DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME DAVRANIŞININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Teknolojide metal malzemelerin şekillendirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılır ve uygulanan yönteme bağlı olarak malzeme belirli özellikler kazanır. Yassı mamul, tel, boru gibi ürünlerin imalinde uygulanan haddeleme, derin çekme, ekstrüzyon, presleme, dövme gibi işlemler soğukta veya sıcakta yapılır. Metal malzemelerde soğuk deformasyonla şekillendirme geniş çapta uygulanır. Bu nedenle, malzemelerin soğuk şekillendirme davranışının malzeme yapısı ve işlem parametrelerine ne şekilde bağlı olduğunun bilinmesi gerekir. Bu bilgiler teknolojide kaliteli üretimi sağladığı gibi üretim hızını ve dolayısıyla üretim maliyetini de etkiler.

Bu çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan % 99,99 safiyetindeki saf elektrolitik bakırın soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme davranışları incelenmiştir. Bu amaçla, orijinal bakır filmanın (Ø8 mm), % 38 ve % 53 oranlarında soğuk deformasyona uğratılmış ve yeniden kristalleşme tavlamları yapılmıştır.

Deneysel çalışmalar sonucunda; % 38 soğuk deformasyona uğramış bakır tel numune için yeniden kristalleşme sıcaklığı 225°C olarak, % 53 soğuk deformasyona uğramış bakır tel numune için bu sıcaklık 220°C olarak tespit edilmiştir. DSC analizleriyle % 53 soğuk deformasyona uğramış elektrolitik saf bakır telin yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi 94-98 kJ/mol olduğu belirlenmiştir. % 38 soğuk deformasyona uğramış bakır tel numunenin çekme mukavemeti % 49 artış göstermiştir, % 53 soğuk deformasyona uğramış bakır tel numunenin çekme mukavemeti % 62 artış göstermiştir. Soğuk deformasyon sonucunda kazanılan sertlik ve mukavemet değerlerinin abrasiv aşınma dayanımına önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür.

SUMMARY

THE EFFECT OF COLD DEFORMATION AND RECRYSTALLIZATION BEHAVIOR ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF PURE COPPER

In technology, some methods used for forming metallic materials. Depend on applied method the material gets specific properties. Rolling, wire drawing, extrusion, pressing and forging processes apply at cold or warm treatments for forming wire, tube etc. Forming with cold deformation usually applies to metallic materials. Cold deformation depends on material structure and process parameters. That information effects quality manufacturing, production rate and of course manufacturing cost.

In this study, cold deformation and recrystallization behaviour of pure electrolytic copper with 99.99% purity which is commonly used in industry, was examined. With this aim, original copper wire rod ($\text{\O}8$ mm), was cold deformed of 38% and 53% and recrystallization annealing was performed.

As a result of experimental studies, recrystallization temperature for the sample which was cold deformed of 38% was determined as 225°C and for the sample which was cold deformed of 53% was determined as 220°C . Recrystallization energy of activation energy of electrolytic pure copper which were cold deformed of %53 was determined as relatively 94-98 kJ/mol with the DSC analyses. Tension strength of copper wire sample, which was cold deformed of 38%, showed 49% increase and tension strength of copper wire sample, which was cold deformed of 53%, showed 62% increase. It is found out that hardness and strength values that were obtained at the end of cold deformation had not an important effect on the abrasive wear strength.

1. GİRİŞ

Teknolojide metal malzemelerin şekillendirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılır ve uygulanan yönteme bağlı olarak malzeme belirli özellikler kazanır. Yassı mamul, tel, boru gibi ürünlerin imalinde uygulanan haddeme, derin çekme, ekstrüzyon, presleme, dövme gibi işlemler soğukta veya sıcakta yapılır.

Metal malzemelerde soğuk deformasyonla şekillendirme geniş çapta uygulanır. Bu nedenle, malzemelerin soğuk şekillendirme davranışının malzeme yapısı ve işlem parametrelerine ne şekilde bağlı olduğunun bilinmesi gerekir. Bu bilgiler teknolojide kaliteli üretimi sağladığı gibi üretim hızını ve dolayısıyla üretim maliyetini de etkiler.

Hem kolay şekillendirilebilirlik hem de yüksek iletkenlik özelliklerinden dolayı saf bakırın endüstrideki kullanım alanları çok geniştir. Özellikle elektrik elektronik sanayinde yaygın olarak kullanılan saf bakırın çok küçük boyutlara kadar (ince tel şeklinde) şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu plastik deformasyon sırasında malzemenin sertliği ve dayanımı artarken sünekliği azalır. Plastik deformasyon sırasında belirli bir değere gelindiğinde malzemenin daha fazla soğuk şekillendirilemediği yani kırıldığı görülür. Daha ince boyutlara kadar plastik şekillendirmeyi yapabilmek için tavlama işlemine ihtiyaç duyulur. Tavlama işlemi sırasında malzemede sırasıyla toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi mekanizmaları görülür [1].

Yeniden kristalleşme, deforme olmuş tanelerin yerini yeni tanelerin alması esasına dayanır. Bu olay sonucunda malzeme soğuk işlem ile kazanmış olduğu tüm mekanik özelliklerini kaybeder. Buna bağlı olarak malzeme tekrar soğuk işleme tabi tutulabilmektedir.

Yeniden kristalleşme davranışının belirlenebilmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler; optik mikroskop ile yeniden kristalleşmiş kısımların belirlenmesi, sertlik ölçümü farklılıkları, kalorimetre ölçümleri, nötron dağılımı, elektrik direnci, EBSD (Electron Back Scattered Diffraction) ve DSC (Differential Scanning Calorimetry) yöntemleridir.

Bu çalışmanın amacı, teknolojik önemi nedeniyle saf bakırda, soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşmenin işlem parametrelerine bağlı olarak metalografik etüdünü yapmak, farklı deformasyon oranları için yeniden kristalleşme sıcaklıklarını belirlemek, yeniden kristalleşme için gerekli olan aktivasyon enerjisini tespit etmek, mekanik özelliklerde meydana gelen değişiklikleri belirlemek ve gözlem sonuçlarını işlem parametreleri açısından daha önce yapılmış çalışmalarla birlikte irdeleyerek optimize etmektir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. BAKIR VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Bakır, insanlık tarihi açısından en önemli metallerin başında gelir. Bakıra tarihte ilk defa Kıbrıs'ta rastlandığından tüm dillerdeki isimlerinin Cyprium kelimesinden türediği tahmin edilmektedir. Tarih öncesi çağlardan biri olan “Bakır Çağı (yaklaşık M.Ö. 5000-3000)” adını bakır metalinden almaktadır. Bakır ve birçok bakır alaşımı tarih boyunca medeniyetlerin kurulumunda ve gelişmesinde çok önemli rol oynamıştır [2].

Atom numarası 29 olan bakır, 1 B grubu geçiş elementidir. Diğer metallerle bileşik oluştururken + 1 ve + 2 değerliklerini alır [3]. Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile bakır atomunun özellikleri sırasıyla Tablo 2.1 ve Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.1: Bakırın fiziksel ve kimyasal özellikleri [4,5].

Simgesi	Cu
Ortalama atomik kütle	63,546 g
Sertliği	Brinell: 874 MN m ⁻² Mohs: 3 Vickers: 369 MN m ⁻²
Yoğunluğu	8,94 g/cm ³
Ergime noktası	1083,4 °C
Kaynama noktası	2567 °C
Ergime ısısı	43 kcal
Elektrik iletme Özelliği	%99,95
İletkenlik	Elektrik: 0,596 10 ⁶ cm ⁻¹ Ω ⁻¹ Isı: 4,01 W cm ⁻¹ K ⁻¹
Isınma ısısı	0,38 J g ⁻¹ K ⁻¹
Buhar basıncı	0,0505 Pa (1084,6°C)
Fiziki hali (20°C ,1 atm)	Katı

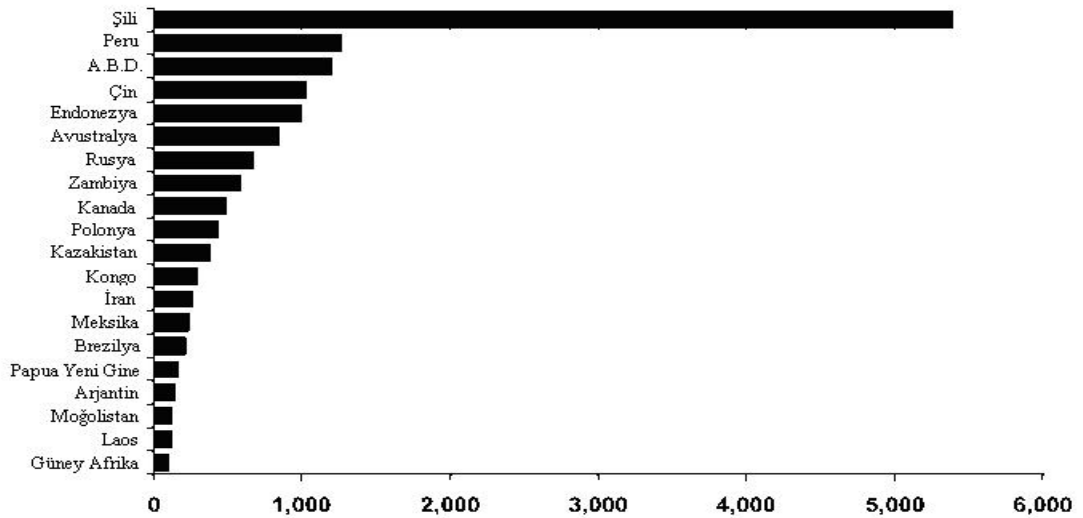
Altın ve gümüş gibi yumuşak bir metal olan bakır, aynı zamanda kolay şekillendirilebilir ve sünektir. Sıcak veya soğuk olarak şekillendirilebilen bakır, bu işlem sayesinde son derece küçük boyutlara kadar (insan saç telinden daha ince) inceltilmektedir [2,3].

Tablo 2.2: Bakır atomunun özellikleri [4,5].

Atomik yarıçap	1,57 Å
Atomik hacim	7,1 cm ³ mol ⁻¹
Kovalent yarıçap	1,17 Å
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik
İyonik yarıçap	0,73 Å
İyonlaşma enerjisi	745,5 kJ mol ⁻¹

Şekillendirilebilirliğinin yanı sıra gümüşten sonra en iyi elektrik iletkenliğine sahip olan bakır endüstriyel olarak çok büyük önem teşkil etmektedir. Gümüş bakıra nazaran daha pahalı olduğu, bakır alaşımları olan pirinç ve bronz ise saf bakır kadar elektriği iletmedikleri için saf bakırın kullanımı tercih edilmektedir. Bakır elektrik iletkenliğine paralel olarak son derece iyi bir ısı iletkenidir ve korozyona dayanıklıdır [2,5,6].

Günümüzde dünyanın pek çok yerinde çıkarılsa da, dünyada bakır rezervlerinin yoğun olduğu en büyük cevher kuşağı Amerika kıtasının batısı boyunca Şili'den geçerek Peru, Meksika'dan sonra, Arizona, New Mexico, Nevada, Utah (ABD) ve Kanada'yı içine alan jeolojik bir zondur. Türkiye'nin dünya üretimindeki payı ise, % 0,40'ın altındadır [2,3,7]. 2009 yılında dünya üzerinde en fazla bakır üreten 20 ülke ve ürettikleri bakır miktarı bin ton cinsinden Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1: 2009 yılında dünya üzerinde en çok bakır üreten 20 ülke ve bin ton cinsinden ürettikleri bakır miktarları [2].

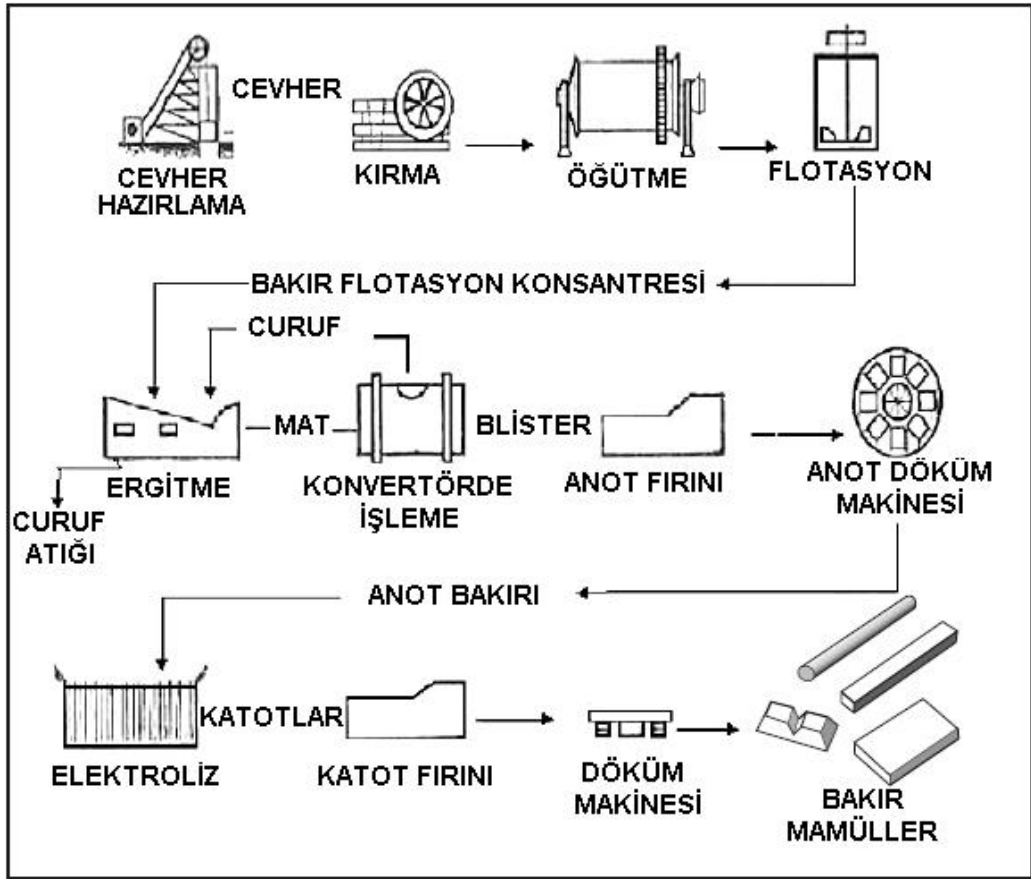
2.2. BAKIR ÜRETİMİ

Genel olarak; uygun jeolojik, ekonomik, çevresel ve yasal şartlarda bir cevherin işletilebilmesi mümkündür [2].

Dünya bakır üretiminin % 80'i sülfürlü cevherlerden yapılmaktadır. Bakır içeren 160'tan çok mineral bilinmektedir. Dünya bakır yataklarının yarısı kalkopirit filizi biçimindedir. Bakır çeşitli pirometalurjik, hidrometalurjik ve elektrometalurjik metotların kullanılmasıyla cevherlerinden saf olarak üretilmektedir. Pirometalurjik metotlar, sülfürlü, oksitli ve nabit bakır cevherlerine, hidrometalurjik metotlar ise düşük tenörlü oksitli bakır cevherlerine uygulanır. Elektrometalurjik metotlar ise hem pirometalurjik hem de hidrometalurjik yöntemlerin son kademesi olarak iki yöneme de uygulanmaktadır. Böylece, pirometalurji metotlarıyla elde edilen saf olmayan bakır, elektrolitik arıtmaya tabi tutularak saf katot bakıra çevrilir. Benzer şekilde hidrometalurjik yollarla sulu çözeltiye alınan bakır, elektrokazanım yoluyla katotta saf olarak toplanabilmektedir [2].

Birincil bakır üretimi bakır içeren cevherlerin çıkarılmasıyla başlar. 3 temel bakır madenciliği yöntemi vardır; açık maden işletmeciliği, yer altı madenciliği ve liç yöntemi. Açık maden işletmeciliği yöntemi dünyada en yaygın bakır madenciliği türüdür [2,8].

Bakır cevheri çıkarıldıktan sonra kırılma ve öğütmeyi takiben flotasyon işlemine tabi tutulur. Elde edilen bakır konsantresi yaklaşık %30 oranında bakır içerir ve bu oran % 20 – 40 arasında değişebilir. Bu işlemi takiben ergitme işlemi uygulanır ve ergitme işlemi kavurma prosesini de içerebilmektedir. Böylece % 50 – 70 oranında bakır içeren “mat” elde edilmiş olur. Ergimiş mat konvertörde işlenerek % 98,5 – 99,5 bakır içeren blister bakır üretilir. Bir sonraki aşamada blister bakır ateşte rafinasyon veya elektrorafinasyon işlemi için yeniden ergitme ve anot döküm yöntemleriyle saflaştırılır. Elektrorafinasyon işlemi sonucunda, katotta elde edilen bakır en az % 99,99 safiyettedir [2]. Bakır mamullerinin üretimine kadar kullanılan yöntemler şematik olarak Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2: Bakır üretim yöntemlerinin şematik gösterilişi [3].

Alternatif olarak hidrometalurjik yöntemde bakır düşük tenörlü oksit cevherlerden liç ve elektrokazanım prosesleriyle elde edilir. Elde edilen sonuç elektrorafınasyonla aynı ürünü verir.

Cevherlerden üretilen rafine bakır üretimi birincil bakır üretimi olarak adlandırılırken, hammadde kaynağı olarak hurda kullanıldığında ise bu yöntem ikincil bakır üretimi adını alır. Bakır hurdalar, mamul ya da yarı mamul üretimi sırasındaki imalat artıklarından (yeni hurda) hem de kullanım ömrünü tamamlamış ürünlerden (eski hurda) oluşmaktadır. Geri dönüşüm yoluyla elde edilen rafine bakır üretiminde de birincil bakır üretimine benzer yöntemler kullanılmaktadır [2].

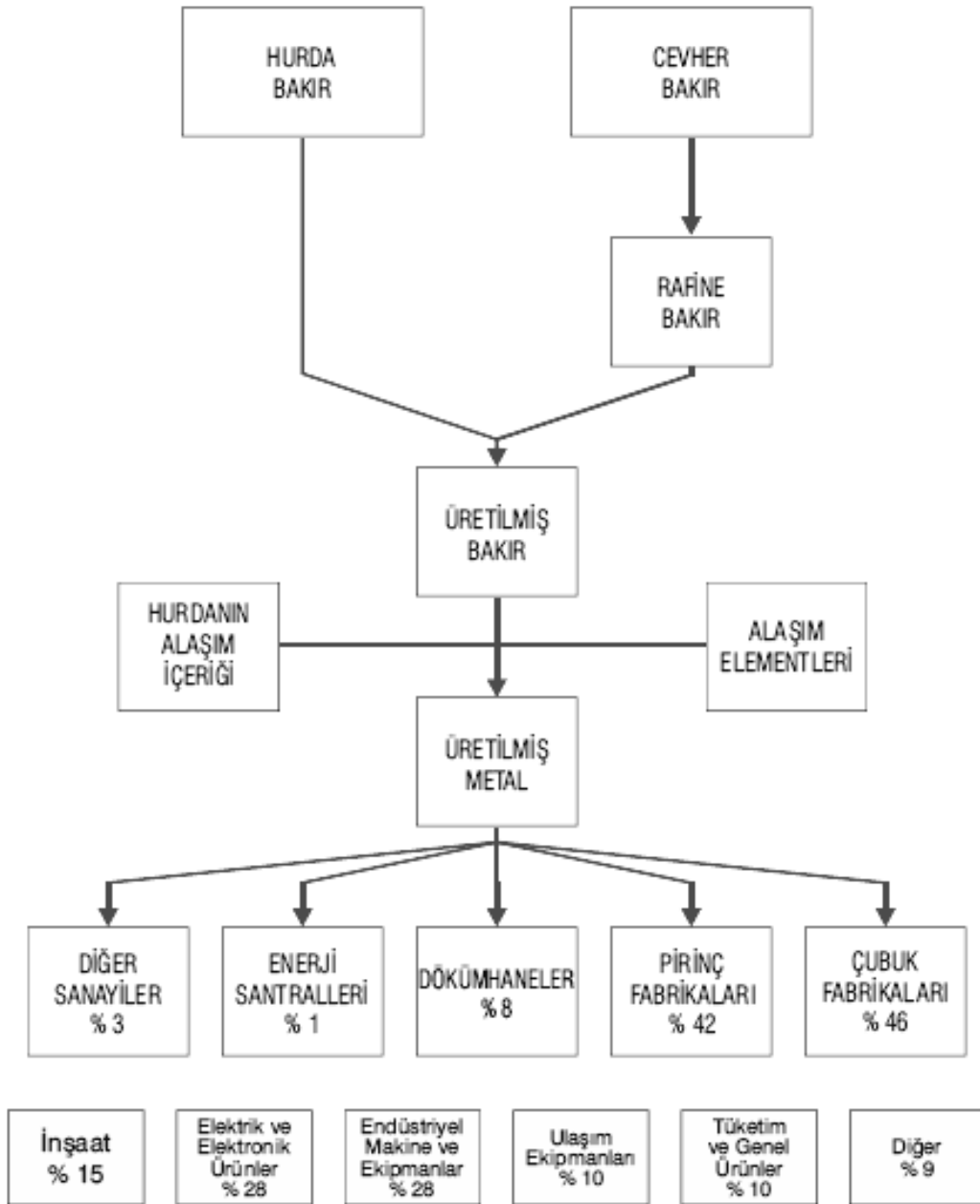
Ticari bakırları içerdiği oksijen miktarına göre üç sınıfa ayırmak mümkündür.

- Bünyesinde % 0,04 – 0,05 oksijen içeren bakır.
- Deokside edilmiş bakır. Bu tür bakır oksijen içermez, fakat bir miktar deoksidan ilavesi içerir.
- Oksijensiz elektrolitik bakır. Bu tip bakır oksijen ve deoksidan kalıntıları içermez.

Bakırı oksijenden arıtmak için deoksidan katkı elementleri kullanılır. En önemli deoksidan elementleri şu şekilde sıralanır: Çinko (Zn), fosfor (P), silisyum (Si), kalsiyum (Ca), berilyum (Be), alüminyum (Al) ve magnezyum (Mg).

Bu oksijen giderici elementlerin bakır bünyesinde fazla olması elektrik iletkenliğini bir hayli düşürmektedir. Oksijensiz bakır elektrolitik rafine bakırın daha fazla arıtılarak oksijen içermeyen ortamlarda dökümü neticesinde elde edilir [2].

Ticari bakırın üretim yerleri ve ürünlerin hangi alanlarda kullanıldığına ait bilgiler Şekil 2.3'de verilmiştir.

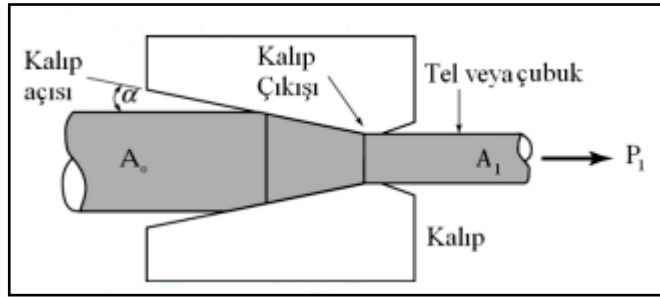


Şekil 2.3: Ticari olarak bakırın üretim ve kullanım alanları [3].

Birçok metal şekillendirme işlemi, metallerin büyük ölçüde plastik şekil değiştirme yapabilmeleri ile mümkün olmaktadır. Bu işlemlerin en ilkel olanı çekiçle döverek şekillendirmektir. Bu çeşit kütle şekillendirme yöntemleri; dövme, haddeleme, ekstrüzyon, tel ve çubuk çekme olarak dörde ayrılmaktadır [9]. Bu çalışmanın temelini oluşturan bakır çubuklar tel çekme yöntemi ile şekillendirildiğinden bu yöntemden ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

2.2.1. Tel Çekme İşlemi

Tel çekme, nispeten daha kalın kesitli olan bir telin, bir matris içerisinde geçirilerek kesitinin küçültülmesi işlemidir. Tel kesitleri genellikle daireseldir. Ancak kare veya altıgen kesitli teller de çekilebilmektedir. Dairesel kesitli çubuklar çekilerek cıvata, saplama gibi elemanların üretiminde kullanılırlar, dolayısıyla daha büyük kesite sahiptirler. Teller ise kablo ve yayların üretiminde kullanıldıklarından dolayı daha küçük kesitlidirler. Bakır filmaşinler tel çekme işlemi ile daha küçük boyutlara inceltilmektedir [10]. Tel çekme işleminin şematik görünümü Şekil 2.4’de verilmiştir.



Şekil 2.4: Tel çekme işleminin şematik görünümü [10].

Çelik tellerin çekme işleminde öncelikle filmaşinler kangal halinde hammadde olarak getirilir. Bu filmaşinlerin üzerlerinde önceki sıcak işlem ve ortam şartları sebebiyle pas olabildiğinden pas giderme işlemi yapılmalıdır. Paslı haldeyken çekme işlemi yapılırsa kalıp aşınması ya da çıkan ürünün yüzeyinde kusur oluşumlarına rastlanmaktadır.

Pas, mekanik veya kimyasal yolla giderilmektedir. Mekanik yolla pas gidermede birbirine dik iki makara üzerinde kıvrılan telin yüzeyindeki oksit çatlatılır. Daha sonra tel metal fırçalar arasından geçirilerek tel temizlenir. Diğer bir mekanik yöntem ise metal bilya püskürtmektir.

Kimyasal işlem (dekapaj) ile oksit giderme ise sülfürik asit (H_2SO_4) ve hidroklorik asit (HCl) banyolarında yapılır. Filmaşin kangalları asit banyolarına daldırılıp pas tabakasının kalınlığına ve banyonun asitlik derecesine göre belli bir süre banyoda

tutulur. Banyodan çıkarılan kangallar sıcak veya soğuk suda iyice yıkanarak asit kalıntılarında temizlenir [10].

Asit kalıntılarının tamamen giderilmesi için kangallar kireç banyosuna daldırılır. Böylece son kalan asit kalıntıları kireçle nötrale edilmiş olur. Son olarak filmaşinler su ile tekrar yıkanır ve 100°C'lik etüvlerde kurutulurlar.

Soğuk tel çekme işleminde genellikle kuru çekme yapılır. Tel toz şeklindeki sodyum sabun içerisinde geçirilir ve böylece yağlama yapılmış olur. Islak çekme yapılıyorsa tel sıvı yağın içerisinde geçirilir. Islak çekme sadece 0,5 mm'den ince tellerde uygulanır. Bakırın soğuk çekme işleminde mineral yağ kullanılmaktadır.

Soğuk çekme işlemi yapıldıktan sonra tel işlenemeyecek kadar sertleşirse sertleşmenin giderilmesi için yeniden kristalleşme tavı yapılır. Genellikle, sıcak haddelenmiş olan çekilecek telin kolay çekilebilmesi için ön tavlama yapılarak tel çekme işlemine başlanır. Çekme işlemi yapıldıktan sonra malzeme sertleşir ve çekilemeyecek duruma gelir. Tel çekmeye devam edebilmek için ara tavlama (yeniden kristalleşme) uygulanır [10].

2.3. SOĞUK DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME

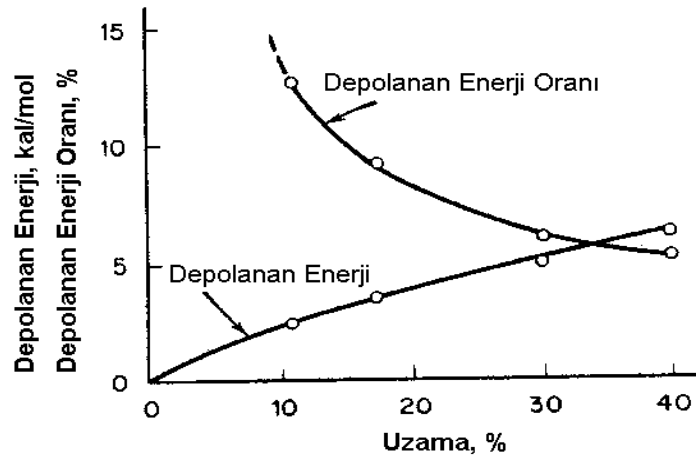
Mutlak ergime sıcaklığının yarısından daha düşük sıcaklıklarda yapılan plastik deformasyonun soğuk işleme karşılık geldiği kaba kural olarak belirlenmiştir. Soğuk işlem genellikle haddelemede, tel ve boru çekmede, dövme veya basınçlı şekil vermede uygulanır [11,12].

Metale plastik deformasyon uygulandığında dislokasyon yoğunluğu ve buna bağlı olarak sertliği ve dayanımı artar, sünekliği ve tokluğu ise düşer. Hareket eden dislokasyonlar ya kaymayı oluşturur ya da başka dislokasyon, tane sınırı gibi engeller ile durdurulur. Engellerin önünde (mesela tane sınırlarında) dislokasyonların yığılması bitişik tanedeki gerilmeyi artırır. Artan gerilme, bitişik tane içindeki dislokasyon kaynaklarını harekete geçirir. Bu şekilde plastik deformasyon taneden taneye geçerek

ilerler ve tüm malzeme plastik deformasyonla şekil değişimine uğrar. Plastik şekil değişimine uğramış metalin kristal tane yapısı bozulur; taneler şekil verme yönü doğrultusunda uzar [13].

Plastik deformasyon miktarı arttıkça dislokasyon yoğunluğu da artar. Dislokasyonlar birbirlerinin hareketlerini engelledikleri için dislokasyon hareketi zorlaşır. Bu olaya pekleşme veya deformasyon sertleşmesi denilir.

Plastik şekil değiştirme miktarının artması ile öyle bir noktaya gelinir ki, artık malzeme şekil değiştirmeye uğratılamaz, çatlaklar oluşur ve kırılır. Dislokasyon bölgesindeki atomlar denge durumundan uzaklaştıkları için dislokasyon yoğunluğunun artması (gerilmiş yay gibi) malzemelerin iç enerjisini artırır. Plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketlerinden kaynaklanan atom boşluklarının oluşması da soğuk deformasyona uğramış metallerde enerji kaynağı olarak kabul edilir. Soğuk işlemden harcanan enerjinin çoğu ısıya dönüşür, fakat bir kısmı deformasyonla oluşmuş çeşitli kafes hatalarına bağlı deformasyon enerjisi olarak metalde depolanır. Depolanan enerji miktarı, deformasyon şiddetine, metalin bileşimi, deformasyon hızı, sıcaklık gibi parametrelere bağlıdır. Yapılan araştırmalar sonucunda genel olarak depolanan enerji miktarının, soğuk işlemden harcanan enerji miktarının % 10'u kadar olduğunu göstermiştir [12,13,14,15]. Çok kristalli saf bakırda (% 99,999) uzama miktarına bağlı olarak depolanan enerji miktarı Şekil 2.5'te verilmiştir. Buradan, deformasyon miktarı arttıkça depolanan enerji miktarının arttığı görülmektedir.



Şekil 2.5: Çok kristalli saf bakırda soğuk işlemden depolanan enerji [14].

Soğuk işlem metaldeki dislokasyonların yoğunluğunu artırır. Oluşan bu dislokasyonların kendilerine özgü enerjileri vardır. Dislokasyon yoğunluğu arttıkça, depolanan enerji miktarı da artar. Plastik deformasyon sırasında dislokasyon hareketlerinden kaynaklanan atom boşluklarının oluşması da soğuk deformasyona uğramış metallerde enerji kaynağı olarak kabul edilir [11,14].

Soğuk işlem sırasında atomlar arası boşlukların oluşması ve bu boşlukların konsantrasyonunun giderek artması sebebiyle malzemedeki yırtılma ve çatlama oluşur. Bu nedenle soğuk işlem sırasında malzeme zaman zaman tavllanır.

Tavlama soğuk işlem görmüş bir malzemenin sabit bir sıcaklıkta belirli bir süre tutulmasıdır. Tavlama esnasında soğuk işlem yapısı bozulur. Malzeme yapısındaki bu değişim üç aşamada gerçekleşir. Bunlar sırasıyla toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesidir.

2.3.1. Toparlanma

Bir metal soğuk deformasyona uğradığında birçok fiziksel ve mekanik özelliği değişir. Soğuk deformasyon; mukavemet, sertlik ve elektrik direncini artırır, sünekliği azaltır.

Denge durumu bozulan atomlar denge durumuna gelme eğilimindedir. Dışarıdan bir enerji (ısı) verilecek olursa, malzeme eski düzenli haline gelir. Orijinal hale dönüşün ilk aşaması olan toparlanma evresinde dislokasyonlar düzene girer ve malzemenin soğuk işlem mukavemetinde veya sertliğinde bir miktar düşüş kaydedilir. Bu olay ters işaretli dislokasyonların bir araya gelmesiyle meydana gelir [11,14,16].

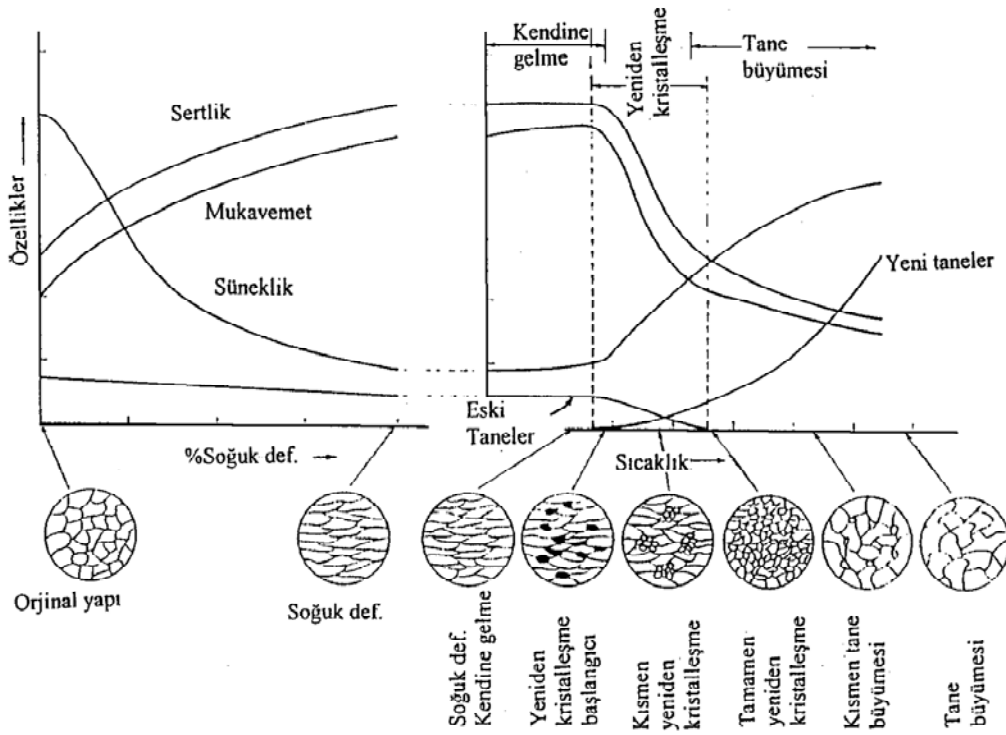
2.3.2. Yeniden Kristalleşme

Soğuk deformasyona uğramış malzemenin tavlama sırasında toparlanma evresini yeniden kristalleşme takip eder. Toparlanma ve yeniden kristalleşme temel olarak farklı iki olaydır. Yeniden kristalleşme, soğuk işlem sonucunda deforme olmuş tanelerin yerini tamamen yeni tanelerin almasıdır. Bu nedendir ki yeniden kristalleşme;

Katı (soğuk işlem görmüş) \longrightarrow Katı (yeniden kristalleşmiş)

şeklindeki bir katı-katı dönüşümüdür. Bunun sonucu olarak malzeme soğuk işlem ile kazandığı mekanik özelliklerini tamamen kaybeder [17,18]. Soğuk deformasyon ve tavlama ile malzemede meydana gelen değişikliklerin şematik gösterilişi Şekil 2.6'da verilmiştir.

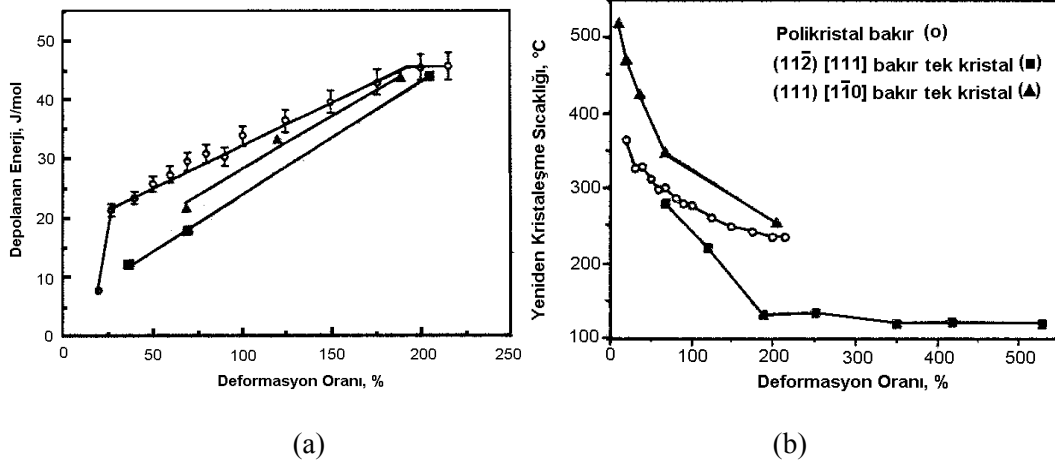
Dislokasyon yoğunluğunun fazla olduğu yüksek enerjili bölgelerde yeni kristal çekirdekleri oluşur. Bu çekirdeklerin boyutlarının büyümesiyle malzemenin yeniden kristalleşmesi tamamlanır [19].



Şekil 2.6: Soğuk deformasyon ve tavlama ile malzemede meydana gelen değişikliklerin şematik gösterilişi [18].

Yeniden kristalleşme sıcaklıkla aktive olan bir prosestir. Bu nedenle yeniden kristalleşmeyi etkileyen en önemli parametre sıcaklık ve işlem süresidir. Yeniden kristalleşmeyi etkileyen diğer parametreler; deformasyon miktarı, metalin saflık derecesi ve başlangıç tane boyutudur [11,14,15,20].

Deformasyon miktarının artması ile malzemede hatalı bölgeler çoğalır, buna bağlı olarak depolanan enerji artar, çekirdekleşme kolaylaşır ve bu nedenle yeniden kristalleşme için gerekli olan kuluçka süresi azalır. Aynı sıcaklıkta tavlandığında daha fazla soğuk deformasyon gören metal daha hızlı yeniden kristalleşmektedir. Deformasyon oranının depolanan enerjiye ve yeniden kristalleşme sıcaklığına etkisi Şekil 2.7’de görülmektedir [13].



Şekil 2.7: Saf bakırda deformasyon miktarıyla a) depolanan enerji, b) yeniden kristalleşme sıcaklığının değişimi [21].

Yeniden kristalleşme hızı saf metallerde daha yüksektir. Metalin % 0,01 kadar dahi olsa az miktarda yabancı atom içermesi, yeniden kristalleşme sıcaklığını önemli ölçüde yükseltebilir. Çözünen atomun yeniden kristalleşme hızına etkisi, düşük konsantrasyonlarda çok daha fazladır [14,15]. Saf bakıra atomsal % 0,01 kadar element ilavesinin yeniden kristalleşme sıcaklığına etkisi Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3: Saf bakıra atomsal % 0,01 kadar element ilavesinin yeniden kristalleşme sıcaklığına etkisi[14].

İlave edilen element	Yeniden kristalleşme sıcaklığındaki artış, °C
Ni	0
Co	15
Fe	15
Ag	80
Sn	180
Te	240

Düşük miktardaki elementlerin yeniden kristalleşme sıcaklığına belirgin olarak etki etmesi, tane sınırlarıyla çözünen atom etkileşmesi sebebiyledir. Yabancı bir atomun tane sınırlarına yerleşmesiyle, tane sınırının hareket kabiliyeti düşer. Yeniden kristalleşmede tane sınırı hareketi çekirdek oluşup büyümesi için gereklidir. Bu sınırlarda yabancı atomların varlığı, ikinci faz veya empüritelere tane sınırı hareketini engeller ve bu yüzden yeniden kristalleşme hızını düşürür [11,22].

Çok kristalli bir metal soğuk şekillendirilirse, tane sınırları kristallerdeki kayma hareketini engeller. Sonuç olarak, tane sınırlarına yakın olan kristal kafesleri tane içindekilerden daha fazla distorse olurlar. Tane boyutunun azalması tane sınırı miktarını artırır ve böylece tane sınırlarına yakın, distorse olmuş kafes miktarı artar. Böylece ince taneli yapıda, mümkün çekirdeklenme noktası sayısı artmış olur. Bu nedenle ince taneli malzemelerde çekirdeklenme hızı artar ve yeniden kristalleşmiş tanelerin boyutu küçülür [14].

Yeniden kristalleşme sıcaklığı; soğuk deformasyona uğramış metalin belirli bir standart sürede % 50'sinin yeniden kristalleştiği sıcaklık olarak tanımlanır. Standart süre genellikle bir saattir.

Teorik olarak yeniden kristalleşme sıcaklığı bir metalin mutlak ergime sıcaklığının 0,3-0,5 katı değerleri arasındadır. Yeniden kristalleşme sıcaklığındaki küçük artış ve yükselişler yeniden kristalleşme süresini oldukça etkilemektedir [14,22]. Bazı metallerin ergime noktaları ve yeniden kristalleşme sıcaklıkları Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4: Bazı metallerin yeniden kristalleşme ve ergime sıcaklıkları [18].

Metal	Yeniden kristalleşme sıcaklığı (°C)	Ergime noktası (°C)
Alüminyum	175	660
Kurşun	25	327
Kalay	25	232
Bakır	250	1083
Nikel	700	1453
Magnezyum	150	650
Çinko	50	420

2.3.2.1. Yeniden Kristalleşme Sürecinde Aktivasyon Enerjisi

Soğuk deformasyon işlemi gören metal malzemenin iç enerjisi artar. Bu enerji tavlama işlemi uygulandığında yeniden kristalleşmenin başladığı anda açığa çıkar. Yeniden kristalleşme için gerekli olan aktivasyon enerjisini hesaplamak için Kissinger [23] ve Ozawa [24] yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler temel olarak analizler sonucunda, egzotermik olarak gelişen kristalleşme sırasında DTA diyagramlarında görülen piklerin tepe noktasındaki sıcaklık değerine dayanmaktadır.

Soğuk deformasyona uğramış bir metalin serbest enerjisi ΔF , tavllanmış bir metalin serbest enerjisinden yaklaşık olarak depolanmış deformasyon enerjisi kadar fazladır. Uygulanan plastik deformasyon malzemenin entropisini artırır, fakat bu artış kalıntı deformasyon enerjisi sebebiyle iç enerjideki artışa göre düşüktür [11,14].

$$\Delta F = \Delta E - T\Delta S \quad (2.1)$$

Bu nedenle, serbest enerji denklemindeki (2.1) $T\Delta S$ terimi ihmal edilebilir ve;

$$\Delta F \approx \Delta E \quad (2.2)$$

elde edilir. Burada ΔF ; soğuk işlem serbest enerjisi, ΔE ; iç veya depolanan deformasyon enerjisi, ΔS ; soğuk işlemden dolayı entropi artışı ve T ; mutlak sıcaklıktır.

Soğuk işlenmiş malzemelerin serbest enerjisi, tavllanmış metallerekinden daha yüksek olduğundan denge konumuna dönme eğilimleri vardır ve bu nedenle gerekli koşullar sağlandığında yumuşayabilirler. Soğuk işlem halinin karmaşıklığı sebebiyle malzeme genellikle basit işlemden önceki halini alması birkaç farklı reaksiyonla meydana gelir. Bu reaksiyonların çoğu atom, atom boşluğu hareketi (yayılma) ile ilgilidir ve bu yüzden son derece sıcaklığa duyarlıdır. Reaksiyon hız sabitlerinin sıcaklıkla değişimi Arrhenius bağıntısı ile verilmektedir. Tek adımda oluşan ısısal bozunma reaksiyonları için birim zamanda fraksiyonel dönüşümde meydana gelen değişim aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k f(\alpha) \quad (2.3)$$

Arrhenius bağıntısı basit tek aşamalı bir reaksiyona ait hız bağıntısındaki hız sabitini sıcaklık, aktivasyon enerjisi ve eksponansiyel öncesi faktörün bir fonksiyonu şeklinde vermektedir.

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2.4)$$

2.4 bağıntısının, 2.3 bağıntısında yerine konması ile

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2.5)$$

2.5 bağıntısı elde edilmektedir, bu bağıntıdaki A, E ve $f(\alpha)$ parametreleri kinetik üçlü olarak adlandırılmaktadır.

Yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi tespit edilirken eğer numune sıcaklığı kontrollü ve sabit bir ısıtma hızı ile değiştiriliyorsa (nonizotermal çalışma) herhangi bir t anındaki T sıcaklığı,

$$T = T_0 + \beta t \quad (2.6)$$

Bağıntısından hesaplanmaktadır. Bu bağıntının diferansiyeli alınacak olursa

$$\frac{dT}{dt} = \beta \quad (2.7)$$

2.7 bağıntısı elde edilir. 2.5 bağıntısı, 2.7 bağıntısı ile ilişkilendirilirse

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (2.8)$$

bağıntısı elde edilir. 2.8 bağıntısının integrasyonu ile

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (2.9)$$

bağıntısı elde edilir.

$$y = \frac{E}{RT} \quad (2.10)$$

dönüşümünün yapıldığı, 2.10 bağıntısının diferansiyeli alınacak olursa;

$$dT = -\frac{E}{R} \frac{dy}{y^2} \quad (2.11)$$

bağıntısı elde edilir. 2.11 bağıntısı 2.9 bağıntısında dT yerine yazılırsa

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} \int_y^{\infty} \frac{\exp(-y)}{y^2} dy = A\theta \quad (2.12)$$

$$\theta = \frac{E}{\beta R} p(y) \quad (2.13)$$

bağıntısı elde edilmektedir. 2.12 bağıntısının sağ teriminin kısmi integrasyonu alınacak olursa,

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} \frac{\exp(-y)}{y^2} \left(1 - \frac{2!}{y} + \frac{3!}{y^2} - \dots\right) \quad (2.14)$$

bağıntısı elde edilmektedir. 2.10 bağıntısı yerine konduğunda

$$g(\alpha) = \frac{AR}{\beta E} T^2 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \left(1 - 2! \frac{RT}{E} + 3! \left(\frac{RT}{E}\right)^2 - \dots\right) \quad (2.15)$$

2.15 bağıntısı elde edilir. Bu denklemin düzenlemesi ile

$$\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) = \left[\ln \frac{AR}{\beta E} \left(1 - 2! \frac{RT}{E} + 3! \left(\frac{RT}{E}\right)^2 - \dots\right)\right] - \frac{E}{RT} \quad (2.16)$$

2.16 bağıntısı elde edilmektedir.

$$1 - \frac{2!RT}{E} + 3! \left(\frac{RT}{E}\right)^2 - \dots \cong 1 \quad (2.17)$$

şeklindeki Coats-Redfern yaklaşımı kullanılarak Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) tarafından önerilen bağıntı elde edilmektedir [25],

$$\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{E}\right) - \ln g(\alpha) - \frac{E}{RT} \quad (2.18)$$

Farklı ısıtma hızları kullanılarak çizilen TGA diyagramlarından α 'nın sabit olarak seçildiği noktada $\ln(\beta/T^2)$ ile $1/T$ arasında çizilerek elde edilen doğrunun denkleminde aktivasyon enerjisi hesaplanmaktadır.

DTA eğrilerindeki pikleri tepe noktalarına karşılık gelen sıcaklıklar dikkate alınarak $\ln(\beta/T_m^2)$ ile $1/T_m$ arasında çizilerek elde edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanması Kissinger Yöntemi olarak bilinmektedir [23,25,26].

Ancak Ozawa, Kissinger yönteminde DTA diyagramlarında piklerin dönüm sıcaklıkları kullanılarak aktivasyon enerjisinin hesaplanmasının dönüşümünün n'nci mertebeden bir reaksiyona göre yürüdüğü durumlarda mümkün olmayacağını

$$\frac{AR T^2}{\beta E} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = A\theta = g(\alpha) \quad (2.19)$$

ve

$$A\theta = 1 \quad (2.20)$$

olduğunu dikkate alarak 2.20 bağıntısında $g(\alpha)=1$ olarak alınması gerektiğini ve aktivasyon enerjisinin 2.21 ve 2.22 nolu bağıntılarda verilen denklemlerden yararlanılarak hesaplanabileceğini belirtmiştir [25].

$$\ln(\beta) = -1,052 \frac{E}{RT_m} - 5,331 + \ln\left(\frac{AE}{R}\right) \quad (2.21)$$

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = \ln\left(\frac{AE}{R}\right) - \frac{E}{RT_m} \quad (2.22)$$

$$\ln p(\beta) = -5,331 - 1,052y \quad (2.23)$$

2.23 bağıntısı ile verilen Doyle yaklaşımını kullanan Flynn-Wall-Ozawa (FWO) Yönteminde 2.12 bağıntısının integre edilmiş şekli

$$\ln(\beta) = \ln\left(\frac{AE}{R}\right) - \ln g(\alpha) - 5,332 - 1,052 \frac{E}{RT} \quad (2.24)$$

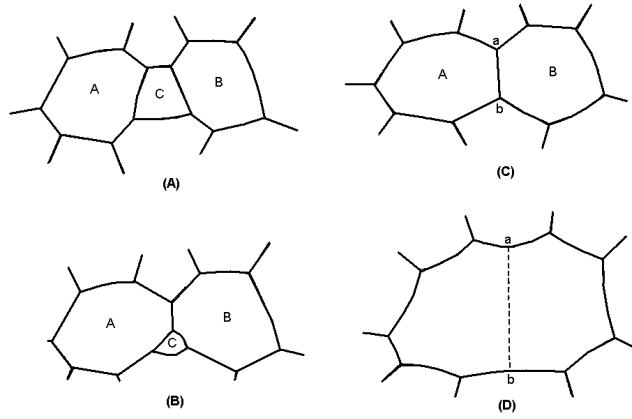
kullanılmaktadır. Değişik sıcaklıklardaki eş dönüşüm değerleri kullanılarak aktivasyon enerjisi değerleri hesaplanırken $\ln(\beta)$ ile $1/T$ arasında çizilerek elde edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanmaktadır [25].

2.3.3. Tane Büyümesi

Yeniden kristalleşen tanelerin uzun süre tavllanması sonucunda tane büyümesi meydana gelir. Büyük taneler küçük tanelerden daha düşük serbest enerjiye sahiptirler. İdeal koşullar altında bir metal için en düşük enerji hali tek kristaldir. Tamamen yeniden kristalleşmiş bir metalde tane büyümesi için gerekli kuvvet tane sınırlarının yüzey enerjisinden gelir. Taneler boyutça büyüyüp, sayıları azaldıkça, tane sınırları azalır. Böylece tane sınırlarının yüzey enerjisi azalmış olur. Tane büyümesini açıklayabilecek

en basit örnek; yüzey enerjisini azaltmak için büyüyen sabun köpüğüdür. Sabun köpüğü, hücrel büyüme için ideal şekilde gösterir. Sabun köpüğünün içindeki gazın basıncı yüzey gerilmesi sebebiyle dış kısımdan daha yüksektir [11,14].

Tane büyümesi tane sınırlarının hareketi ve tane birleşmesi mekanizmasıyla gerçekleşir. Tane birleşmesi basit olarak aralarında düşük enerjili tane sınırı bulunan iki tanenin birleşerek tek bir tane haline gelmesi esasına dayanır [14,27]. Bu birleşmenin kademeleri Şekil 2.8’de görülmektedir.



Şekil 2.8: Tane birleşmesiyle tane büyümesinin şematik gösterilişi [14].

2.4. AŞINMA

Birbirine temas eden mühendislik malzemelerin, birbirlerine sürtünmesi neticesinde meydana gelen aşınma, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Aşınma, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma parçalarının oluşumu neticesinde ortaya çıkan malzeme kaybıdır[28]. DIN 50320’de aşınma; “kullanılan malzeme yüzeylerinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılması suretiyle meydana gelen değişiklik” olarak tanımlanmaktadır [29].

Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleşebilir. Bunlar bölgesel ergimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel anlamda oluşan

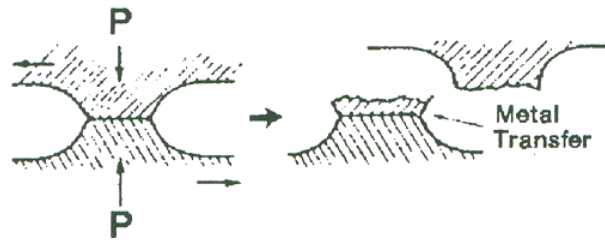
ayrılmazdır. Uygulamada aşınma kapsamına, daha çok yüzeyden fiziksel anlamda ayrılan malzemenin sebep olduğu hasarlar dahil edilmektedir.

Bir aşınma sisteminde; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket aşınmanın temel unsurunu oluşturur. Bütün bu unsurların oluşturduğu sisteme “Tribolojik Sistem” adı verilir [28,30].

Başlıca dört aşınma mekanizması vardır: Adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, oyuklanma veya yenme, kimyasal veya korozyif etki. Pratikte birden fazla aşınma mekanizması aynı anda tesir eder ve kombine aşınma olarak etki gösterir; fakat genellikle bir mekanizma diğerlerinden daha baskındır [31].

2.4.1. Adhesiv Aşınma

Özellikle birbiriyle kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen kaynaklanma (veya yapışma) olayının bir sonucudur. Birbiri üzerinde kayan yüzeylerdeki gerilmeler küçük yüklemelerle dahi akma gerilmesi sınırına erişirler veya geçerler. Böylece temas eden metaller arasında yapışma kuvvetleri kendini gösterir. Bu nedenle bir parçadan diğerine malzeme geçişi soğuk kaynaklanma ve küçük parçaların kopması olayları meydana gelir (Şekil 2.9).



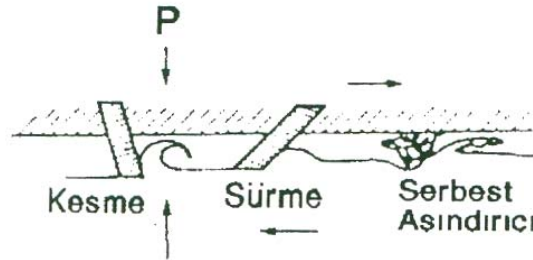
Şekil 2.9: Adhesiv aşınma [31].

Adhesiv aşınma en sık rastlanan aşınma türü olmasına rağmen genellikle hasarı hızlandırıcı etkide bulunmaz. Adhesiv aşınma bir metalin yüzeyinin başka bir metal yüzeyindeki bağıl hareketi sırasında birbirlerine kaynamış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar.

Eğer iki metal aynı sertlikte ise aşınma her iki yüzeyde de oluşur. Metaller arasındaki yağlamanın mükemmel olması, yüzeye etki eden yükün azaltılması ve malzemenin sertliğinin artırılması adhesiv aşınmayı azaltır. Sonuç olarak adhesiv aşınma; yüzeye etkiyen normal yükü, kayma yolu ile ve aşınan malzemenin yüzey sertliği ile orantılıdır [32].

2.4.2. Abrasiv Aşınma

Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasiv aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınma; biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbiriyle temas halindeyken kayma sırasında meydana gelir. Şekil 2.10'da sert bir malzemenin yumuşak bir malzemedan çapak şeklinde abrasiv aşınma parçaları alışı görülmektedir.

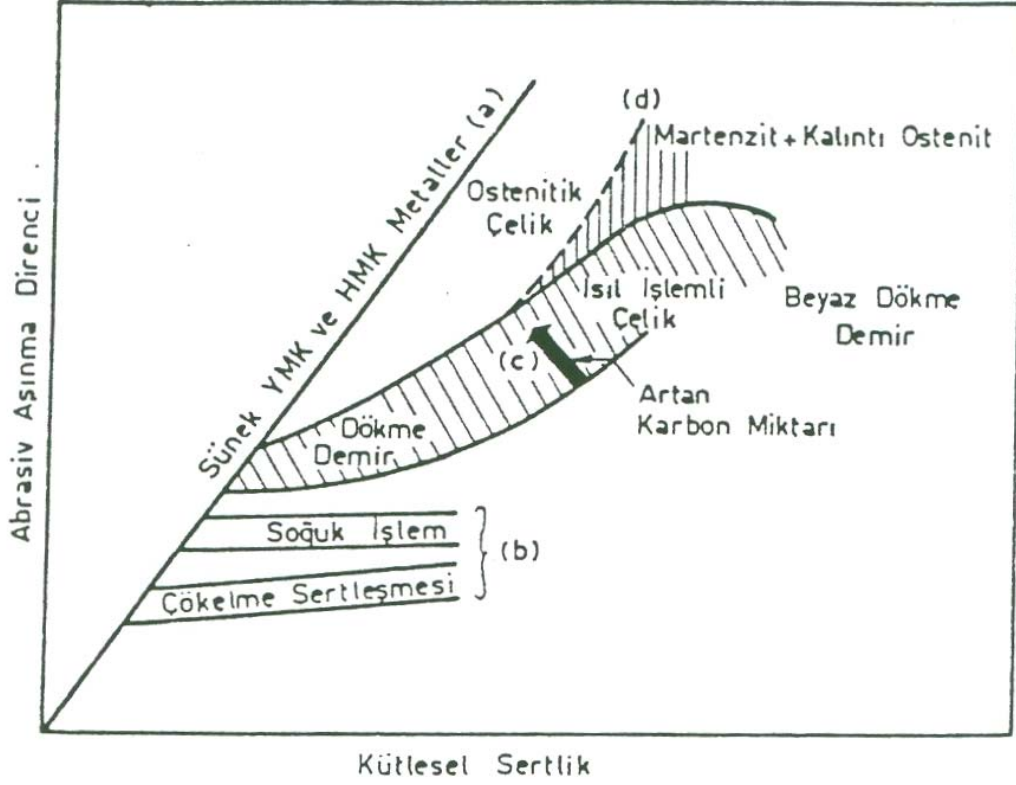


Şekil 2.10: Abrasiv aşınma [31].

Sert parçacıkların yumuşak metale batması da abrasiv aşınmaya sebep olabilmektedir. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma tarzı verilebilir [33].

Abrasiv aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden yük azaltılarak düşürülebilir. Böylece parçacıkların yüzeye daha az batması ve çapak kaldırılması sırasında daha az iz bırakması sağlanır. Yüzeyin sertliğinin aşındırıcının sertliğinden daha büyük olmasıyla da abrasiv aşınma minimuma indirilebilir. Bunun için malzeme açısından; daha sert

alaşım kullanılabilir, sertlik arttırmak amacıyla ısıl işlem uygulanabilir veya malzeme yüzeyi sert bir tabaka ile kaplanabilir (nitrasyon, elektrokaplama, metal püskürtme vb. yöntemlerle) [34]. Şekil 2.11’de çeşitli malzemelerde sertlik ile abrasiv aşınma direnci arasındaki ilişki görülmektedir.



Şekil 2.11: Çeşitli malzemelerde küresel sertliğin abrasiv aşınma direncine etkisi [31].

2.4.2.1. Abrasiv Aşınma Mekanizmaları

Sert parçacığın üzerine, yüzeye normal yönde etkiyen kuvvet bileşeni, parçacığın yüzeye batmasına, yüzeye paralel olan kuvvet bileşeni ise, parçacık ile yüzey arasında oluşacak yüzey hareketine (teğet harekete) ve böylece yüzeyin abrasiv aşınmasına sebep olur.

Abrasiv aşınma, oymalı sürtünme aşınması (gouging abrasion), koparmalı sürtünme aşınması (grinding abrasion) ve erozyon aşınması olmak üzere üç gruba ayrılabilir.

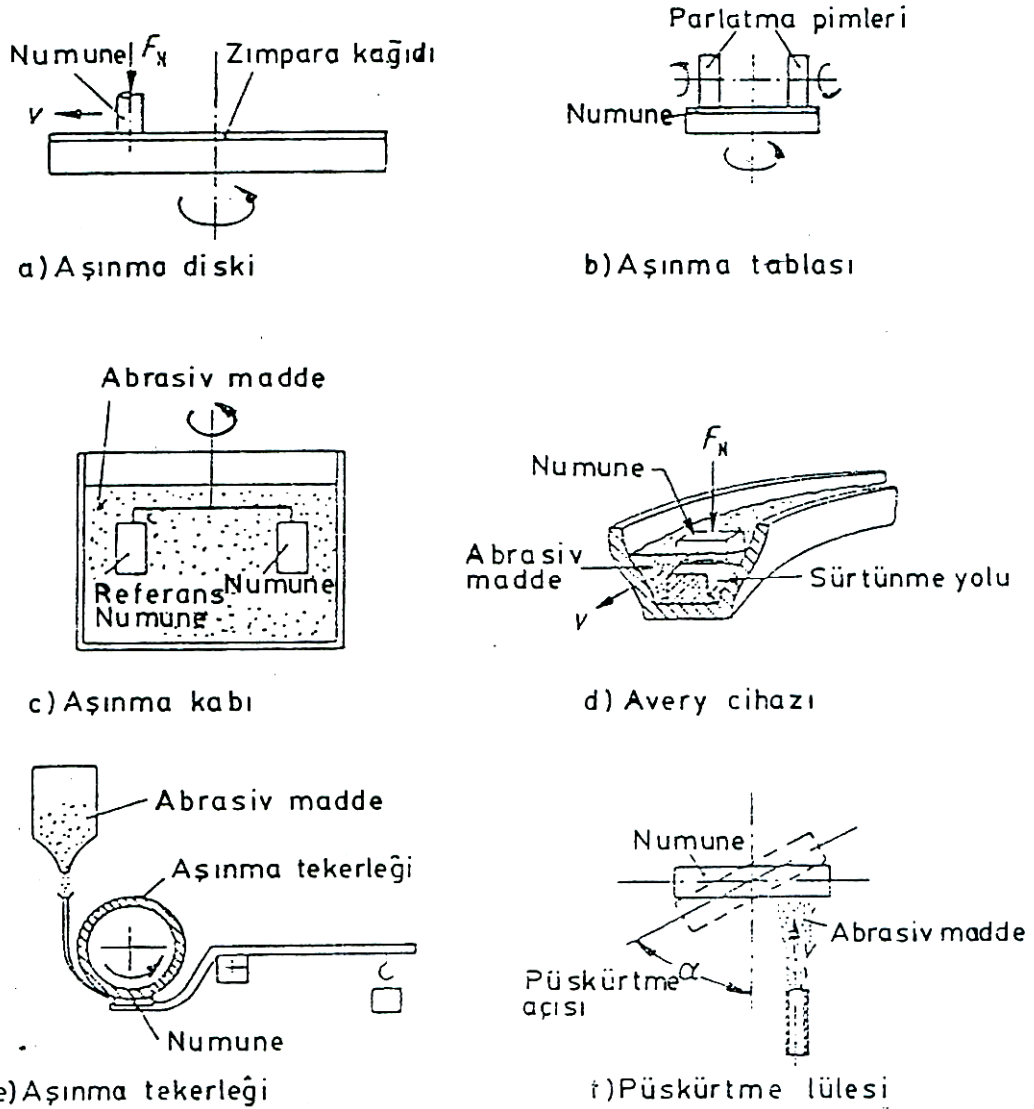
Oymalı sürtünme aşınması genellikle yüzeyin masif fiziksel deformasyonuna sebep olur. Aşırı yüklemeler etkisiyle meydana gelen oymalı sürtünme aşınmasına örnek

olarak; en ağır çalışma koşullarında çalışan kazıcı, kırıcı gibi maden araçlarında görülen aşınma verilebilir [28].

Koparmalı sürtünme aşınması, yüksek yükler altında aşınma parçalarının kırılarak, küçük keskin köşeli parçacıklar oluşturup yüzeyi delerek ve çizerek malzeme kaybına sebep olmasıyla meydana gelir. Aşındırıcı taneler bir yüzeyde sabitleşmiş veya yüzeyler arasında serbestçe tutulabilir (üç boyutlu aşınma). Üç boyutlu aşınma iki boyutlu aşınmadan daha az etkilidir. Çünkü serbest parçacıklar aşınma süresinin %90'ında kesmeden yuvarlanırlar. Koparmalı sürtünme aşınmasına örneğin, bilyalı değirmenlerde rastlanır. Öğütme aşınması gibi aşındırıcının ezildiği durumda aşınma mekanizması basit kesme mekanizmasından biraz farklı olabilir. Aşındırıcının ezilmeden önce yuvarlanarak malzeme yüzeyinin kesme fırsatı vardır. Temas noktasındaki basma gerilmesi, yüzeyde aşınmaya sebep olur. Sünük bir malzemede aşındırıcı yüzeye batabilir. Birçok batma izinin yan yana gelmesiyle malzeme sonuçta yorulma ile kırılana kadar ileri-geri akabilir. Sert malzeme yüzeylerinde ise az miktarda plastik deformasyon gerçekleşir. Bu durumda aşınma, yüzeyin gevrek olarak çatlamasının bir sonucu olarak gerçekleşir. Tekrarlı gerilmeler altında yorulma sebebiyle yüzey altı çatlakları oluşması ihtimali de vardır.

Erozyon aşınması ise, gaz veya sıvı gibi bir akışkanda asılı aşındırıcı tanelerin yüzeye çarpması sonucu meydana gelir. Akışkan içindeki aşındırıcı parçacıkların yüzeye çarpması metal yüzeyinden parçacıkların kopmasına sebep olur. Her temas metal yüzeyinde küçük bir iz oluşturur. Sıcaklık ve akış hızı arttıkça aşınma hızlanır. Bazı durumlarda ortamın kendisi korozif olabilir ve yüzeyin her yerinde aşınmaya yardım eder. Erozyon aşınmasına örnek olarak gemi pervanelerinde çok sık rastlanan aşınma verilebilir. Akış halindeki sıvılarda ani basınç düşmesi sonucu oluşan gaz kabarcıkları da aşınmaya neden olmaktadır. Bu gaz kabarcıklarının metal yüzeyine çarparak oluşturduğu aşınmaya kavitezyon aşınması adı verilmektedir.

Abrasiv aşınmanın belirlenmesi için çeşitli malzemeler ve buna bağlı olarak çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler Şekil 2.12’de görülmektedir.



Şekil 2.12: Çeşitli aşındırıcı maddelerle malzemelerin aşınmasında kullanılan deney yöntemleri [31].

Aşınma deneylerinde aşınmanın ölçüm yöntemlerinden ağırlık farkı metodu, ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dahilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir.

Ağırlık farkı metodunda aşınma direnci (W_r), denklem 2.25 ile hesaplanmaktadır.

$$W_r = \frac{d \cdot M \cdot s}{\Delta G} \quad (2.25)$$

2.5. SAF BAKIRIN SOĞUK DEFORMASYON VE YENİDEN KRİSTALLEŞME DAVRANIŞI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürde çeşitli özelliklerdeki saf bakırın soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme davranışı ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Benchabane ve diğ. [35], soğuk deformasyona uğramış saf bakırın (% 99,999 safiyette) yeniden kristalleşme davranışını mikrosertlik ve kalorimetre yardımıyla incelemişlerdir. Çalışmalarında 2 mm kalınlığında ve % 70 oranında soğuk deforme edilmiş numuneler kullanmışlardır. DSC analizlerini argon atmosferi altında 10, 20 ve 30°C/dak'lık ısıtma hızlarıyla gerçekleştirmişlerdir. Vickers mikrosertlik yöntemiyle 100 g yük altında sertlik ölçümü yapmışlardır. Kissinger, Ozawa ve Boswell yöntemlerini kullanarak yeniden kristalleşme aktivasyon enerjilerini tespit etmişlerdir. 10°C/dak'lık ısıtma hızında yeniden kristalleşme sıcaklığını 266,3°C olarak bulmuşlardır. Yeniden kristalleşme sıcaklıkları 20°C/dak'lık ısıtma hızında 287,5°C ve 30°C/dak ısıtma hızında ise 295,3°C olarak tespit edilmiştir. % 70 oranında soğuk deformasyona uğramış numunelerin sertlik değeri 100 HV olarak bulunmuştur. Yeniden kristalleşmenin gerçekleşmesinden sonra numunelerin sertlikleri 50 HV olarak ölçülmüştür. DSC analizleri ile aktivasyon enerjisini 58 kJ/mol, mikrosertlik ölçümleri ile 52 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Sonuç olarak yeniden kristalleşme kinetiğinden yola çıkarak mikrosertlik ölçümleri ve DSC analizleri sonucunda hesaplanan aktivasyon enerjilerinin birbirleriyle örtüştüğünü belirtmişlerdir.

Krüger ve Woldt [36], % 92 oranında soğuk deformasyona uğramış % 99,96 safiyetindeki saf bakırın yeniden kristalleşme kinetiğini, bir aktivasyon enerji dağılımı kullanarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov

(JMAK) kinetik modellemelerini kullanmışlardır. Deneylerini, Perkin-Elmer tipi DSC cihazında gerçekleştirmişlerdir. Uyguladıkları Isıtma hızları 2, 5, 8, 10, 16, 20 ve 40 °C/dak'dır. Aktivasyon enerjisi dağılımı kapsamında izotermal ve izotermal olmayan dönüşüm eğrileri elde etmişlerdir. Bu dönüşüm eğrileri yaklaşık aynı sonucu vermiştir.

Hutchinson ve diğ. [37], oksijensiz yüksek iletkenlikte (OFHC) bakırın yeniden kristalleşme kinetiğini incelemişlerdir. Başta gümüş olmak üzere çok düşük oranda empüriteler içeren OFHC bakır 225°C'lik tuz banyosunda tavlama işlemi yapılmıştır. Çalışmalarındaki soğuk deformasyon oranı ise % 93'tür. DSC analizlerini Perkin-Elmer cihazında 10°C/dak ısıtma hızında gerçekleştirmişlerdir. Tavlama sonucunda yeniden kristalleşme sıcaklığını 225°C olarak belirlemişler ve yeniden kristalleşme sırasında depolanan enerjiyi 0,66 J/g olarak bulmuşlardır.

Mohamed ve Bacroix [38], tek ve çok kristalli soğuk deformasyona uğramış saf bakırın statik yeniden kristalleşmesinde depolanan enerjinin rolü hakkında çalışmışlardır. Deneylerinde % 35 oranında soğuk deformasyona uğramış saf bakır numuneler kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda soğuk deformasyon sırasında depolanan enerjiyle kritik yeniden kristalleşme sıcaklığının düştüğünü saptamışlardır.

Donthu ve diğ. [39], DSC yöntemiyle elektrokaplanmış bakır filmlerin yeniden kristalleşmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisinin tespiti ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında 200 mm kalınlığındaki silisyum alt tabakası üzerine 1,5 µm kalınlığında bakır filmler kaplamışlardır. Kullandıkları ısıtma hızı 10°C/dak'dır. Oda sıcaklığından 300°C'ye kadar ısıtmayı gerçekleştirmişlerdir. 90,8°C sıcaklıkta dönüşümün yani yeniden kristalleşmenin gerçekleştiğini saptamışlardır.

Gao ve diğ. [40], farklı saflıktaki çok kristalli bakırda sıcak deformasyon davranışı ile gerçekleşen dinamik yeniden kristalleşmenin etkisini incelemişlerdir. % 99,99, % 99,9999 ve % 99,99999 saflıktaki bakır numuneler kullanmışlardır. Numuneler 523 K sıcaklıktan 773 K sıcaklığına kadar 10^{-4} s^{-1} gerilim hızıyla deforme edilmiştir. % 99,99 saflığındaki numune için aktivasyon enerjisini 245 kJ/mol, % 99,9999 saflığındaki numune için 208 kJ/mol ve % 99,99999 saflığındaki numune için ise 212 kJ/mol olarak bulmuşlardır.

Hong ve diğ. [41], bakır levha yüzeyine deformasyon ve yeniden kristalleşme mekanizmalarının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında % 93 oranında soğuk deformasyona uğramış bakır levha kullanmışlardır. % 99,99 saflıktaki bakır levha 550°C sıcaklıkta 1 saat süre ile tavlannmıştır. Çalışmalarında soğuk deformasyon işlemini belirli bir yönde gerçekleştirmişler daha sonra yapılan tavlama işlemi ile bu yönün değiştiğini tespit etmişlerdir. Bunun nedeni ise yeniden kristalleşme sırasında oluşan yeni tanelerdir.

Yıldırım [42], 25µm orijinal tane boyutuna sahip saf bakır (OFHC-Cu) numuneleri farklı sıcaklıklarda tavlannarak, ortalama 50, 100 ve 150µm tane boyutuna sahip numuneler elde etmiştir. Farklı tane boyutuna sahip numuneler, 300, 405, 500 ve 700 °C sıcaklıklarda ($0.42-0.75T_m$) ve 1, 2, 5, 10, 20 ve 50 mm/dak çene hızlarında ($5.6 \times 10^{-4} - 2.8 \times 10^{-2} \text{ sn}^{-1}$) çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri sonunda numunelerin çekme yönündeki kesitleri metalografik olarak incelenerek; yeniden kristalleşme miktarı ve tane boyutu saptanmış; ayrıca mikro sertlikleri ölçülmüştür. Kırık yüzeyler, stereo ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Deney sonuçları, saf bakır numunelerin başlangıç tane boyutunun, malzemenin yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışına önemli ölçüde etki ettiğini göstermiştir. Uygulanan deney koşullarında, 25, 100, 150 µm tane boyutuna sahip numunelerde kısmi ve 50µm tane boyutuna sahip numunede ise tamamen dinamik yeniden kristalleşmenin yer aldığı saptanmıştır. Numunelerde, maksimum süneklik, 50 µm tane boyutunda, 700°C ve 10 mm/dak çekme hızında elde edilmiş ve süneklik artışının “dinamik yeniden kristalleşmeden” kaynaklandığı anlaşılmıştır. Başlangıç tane boyutunun 50 µm altında olması halinde deney koşullarının tane büyümesine yol açarak sünekliği olumsuz yönde etkilediği ve benzer durumun iri taneli numunelerde de ortaya çıktığı görülmüştür. Dinamik yeniden kristalleşmenin yer aldığı numunelerde, tipik sünek kırılma görülürken, iri taneli numunelerde tane sınırlarının kayması sonucu intergranüler kırılma saptanmıştır. Ayrıca deney sonuçları, dinamik yeniden kristalleşme ve dolayısıyla maksimum süneklik için, başlangıç tane boyutuna bağlı olarak, işlem sıcaklığı ve deformasyon hızı açısından belirli koşulların sağlanması gerektiğini ortaya koymuştur.

Baudin ve diğ. [43], EBSD (Electron Back Scattered Diffraction) yöntemiyle, soğuk olarak çekilmiş ETP (Electrolytic Tough Pitch) bakırın tavlama sırasında ikiz oluşumu ve yeniden kristalleşme davranışını incelemişlerdir. % 52 ve % 94 soğuk deformasyon değerleri arasındaki oranlarda tane sınırlarında depolanan enerjilerin her tane sınırı için farklı olduğunu belirtmişlerdir. Gerilmenin artışı ile tane sınırında ikiz oluşumunun azaldığını ve bu durumun tane boyutundaki azalmanın bir sonucu olduğunu ortaya koymuşlardır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 KULLANILAN MALZEMELER

Soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme davranışı deneylerinde %99,99 safiyetinde bakır çubuklar kullanılmıştır. Kullanılan bakır, yaklaşık %0,0005 civarında oksijen ve ayrıca empürite olarak az miktarda gümüş (Ag) içermektedir.

Numuneler, AK-KUR Bakır Metal San. Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilmiştir. Üç farklı özellikte numune kullanılmıştır. Bunlar; 8 mm çapında herhangi bir soğuk deformasyon işlemine tabi tutulmamış filmaşın ve bu filmaşından tel çekme yoluyla elde edilmiş 6,3 ve 5,5 mm çaplarındaki, sırasıyla % 38 ve % 53 oranlarında soğuk deformasyona uğratılmış tellerdir.

Soğuk deformasyon oranları 3.1 bağıntısından hesaplanmıştır.

$$\text{Soğuk Deformasyon Oranı (\%)} = [(A_o - A_d) / A_o] \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$A_o = \pi \cdot r_o^2 = \pi \cdot (4 \text{ mm})^2 = 50,265 \text{ mm}^2$$

$$A_d = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot (3,15 \text{ mm})^2 = 31,172 \text{ mm}^2$$

$$A_d = \pi \cdot r_2^2 = \pi \cdot (2,75 \text{ mm})^2 = 23,758 \text{ mm}^2$$

6,3 mm çaplı numunenin soğuk deformasyon yüzdesi;

$$\text{Soğuk Deformasyon Oranı (\%)} = [(50,265 - 31,172) / 50,265] \cdot 100 = \% 37,98 \approx \% 38$$

5,5 mm çaplı numunenin soğuk deformasyon yüzdesi;

Soğuk Deformasyon Oranı (%) = $[(50,265 - 23,758) / 50,265] \cdot 100 = \% 52,73 \approx \% 53$ olarak belirtilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin kodları ve numune özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerin kodları ve numune özellikleri

Numune Kodu	Numune Adı
80FI	8 mm çapında orijinal filmaşın
63SD	6,3 mm çapında % 38 soğuk deformasyonlu tel
55SD	5,5 mm çapında % 53 soğuk deformasyonlu tel
63YK	6,3 mm çapında yeniden kristalleşmiş tel
55YK	5,5 mm çapında yeniden kristalleşmiş tel

3.2. YENİDEN KRİSTALLEŞME TAVLAMALARI

63SD ve 55SD kodlu numunelerin yeniden kristalleşme sıcaklıklarının tespiti için farklı sıcaklıklarda yeniden kristalleşme tavlama yapılmıştır. Denemeler 1 cm boyunda numunelerle Binder marka etüvde gerçekleştirilmiştir. Maksimum 300°C’ye kadar çıkabilen etüvde tavlama normal atmosfer şartlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada etüv kullanılmasının nedeni sıcaklık hassasiyetinin fırınlardan daha iyi olmasıdır. Yeniden kristalleşme sıcaklıklarında 1°C’lik değişimin dahi önemli olması sebebiyle sıcaklık aralığı daha hassas olarak ayarlanabilen etüv tercih edilmiştir.

Saf bakırın yeniden kristalleşme sıcaklığının yaklaşık 250°C mertebelerinde olduğu bilinmektedir [18]. Fakat başta deformasyon oranı olmak üzere bazı parametrelerin bu sıcaklığı etkilediği bilindiğinden, numuneler bir başlangıç sıcaklığı seçilerek yarım saat aralıklarla tavlama yapıldıktan sonra sertlik ölçümleri yapılmıştır. Malzemelerin 1 saat

tavlama süresi sonucunda soğuk deformasyona uğramadan önceki sertlik değerine düştükleri sıcaklık yeniden kristalleşme sıcaklığı olarak kabul edilmektedir.

Deneyde uygulanan yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıkları ve süreleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2: Yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıkları ve süreleri.

63SD		55SD	
Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Tavlama Süreleri (dak)	Tavlama Sıcaklıkları (°C)	Tavlama Süreleri (dak)
100	0 - 420	200	0 - 420
200	0 - 420	210	0 - 240
220	0 - 300	215	0 - 180
224	0 - 150	217	0 - 120
225	0 - 60	219	0 - 90
250	0 - 30	220	0 - 60

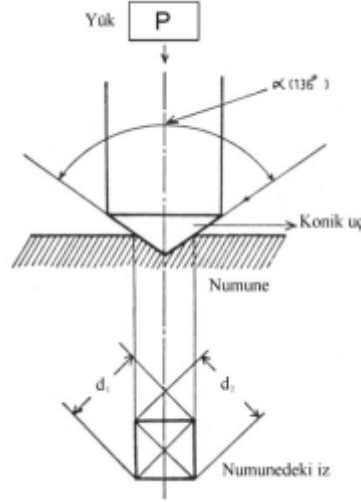
3.3. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Sertlik ölçümleri Zwick marka 187.5 model Universal sertlik test cihazı ile yapılmıştır. Cihaz 3 kg’dan 187,5 kg’a kadar yük uygulayabilmektedir. Çalışmalarımızda sertlik ölçümü 3 kg’lık yük altında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçüm yöntemi olarak Vickers kullanılmıştır.

Öncelikle herhangi bir işlem görmemiş 80FI kodlu numunenin sertliği ölçülüp, 63SD ve 55SD kodlu numunelerin yeniden kristalleşme tavlamaları esnasındaki sertlik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sertlik ölçümü yapılırken, numune üzerinde beş farklı bölgeden alınan sertlik değerlerinden en küçük ve en büyük değer göz önüne alınmamış, diğer üç değerın ortalaması hesaplanmıştır. Yeniden kristalleşme tavlamaları esnasında yarım saat aralıklarla sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Vickers sertlik ölçüm yönteminin kullanım alanı çok geniştir. Çok yumuşak ve çok sert malzemeler için uygun bir yöntemdir, tabanı kare ve tepe açısı 136° olan

standartlaştırılmış piramit şeklinde bir elmas ucun, uygulanan yük altında numune yüzeyine batırılması sonucu bir iz oluşturması esasına dayanır. Numune yüzeyinde oluşan iz kare tabanlıdır. Oluşan izin simetrik olan köşegen ortalamalarının belirlenmesi ile Vickers sertlik değeri hesaplanır [44]. Vickers sertlik ölçümü sırasında oluşan izin şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Vickers sertlik ölçümünde oluşan iz [25].

3.4. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

Metalografik çalışmalar kesme, kalıplama, zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden oluşmaktadır. Bu işlemler, saf bakır numunelerin mikroyapı değişimlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Kesme İşlemi

8 mm, 6,3 mm ve 5,5 mm çapında çubuk şeklinde temin edilen numuneler, Buehler marka abrasiv kesme makinesinde 1 cm yükseklikte olacak şekilde kesilmiştir.

DSC deneylerini yapabilmek amacıyla ise 5,5 mm çaplı numuneden 150 mg'lık parçalar Buehler marka hassas kesme cihazında kesilmiştir.

3.4.2. Kalıplama İşlemi

Kalıplama işlemi soğuk ve sıcak kalıplama olarak ikiye ayrılmaktadır. Sıcak kalıplama yöntemi yeniden kristalleşmeye sebep olabileceğinden, çalışmamızda soğuk kalıplama yöntemi kullanılmıştır. 1 cm yüksekliğe sahip numuneler kesme işlemi sonrasında, epoksi reçine kullanılarak gruplar halinde kalıplanmışlardır. Zımparalama ve dağlama işlemlerinden önce gerekli olan kalıplama işlemi ile numunelerin kolay tutulması ve gruplar halinde mikroyapılarına bakılması sağlanmıştır.

İlk kalıplama grubu 80FI, 63SD ve 55SD kodlu numunelerin enine ve boyuna kesitlerini içermektedir. İkinci kalıplama grubu ise 63YK ve 55YK kodlu numunelerin enine ve boyuna kesitlerinden oluşturulmuştur. Toplam 5 farklı numunenin enine ve boyuna kesitlerini içeren kalıplama grupları Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2: Metalografik incelemelerde kullanılan kalıplar (a) birinci kalıplama grubu (80FI, 63SD ve 55SD), (b) ikinci kalıplama grubu (63YK ve 55YK).

3.4.3. Zımparalama ve Parlatma İşlemleri

Kalıplama işlemi takiben numuneler Buehler marka, Metaserv 2000 model aşındırma ve parlatma cihazında sırasıyla 80, 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımparalarla aşındırılmıştır. Bu aşama sonrasında numunelerin yüzeyleri Buehler marka parlatma çuhalarında 0,05 mikron γ - alümina ve distile su kullanılarak parlatılmıştır.

3.4.4. Dağlama İşlemi

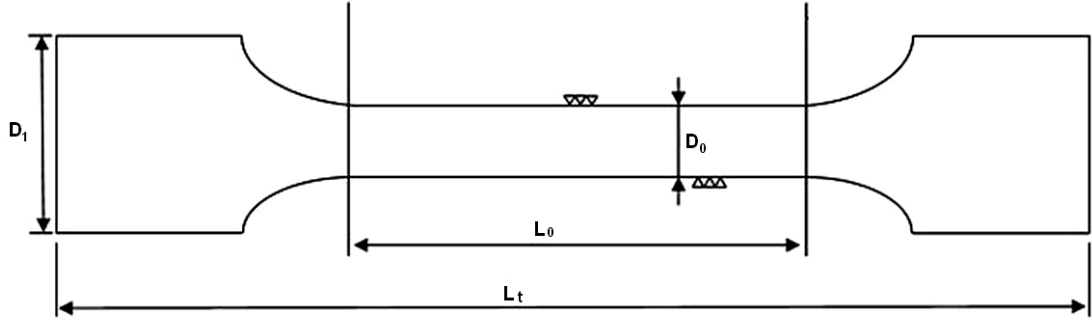
İç yapı özelliklerini ortaya çıkarmak için numunenin uygun bir kimyasal reaktifle dağlanması gerekmektedir. Dağlayıcı olarak 95 ml saf alkol, 2 ml HCl ve 5 g FeCl₃ kullanılmıştır. Kullanılan FeCl₃ pelet şeklinde alınmış daha sonra havanda dövülerek çözelti içerisine toz halinde ilave edilip, karıştırılarak çözünmesi sağlanmıştır. Dağlama sonrası yapıdaki farklı faz taneleri veya farklı kafes yönelmesine sahip aynı fazın taneleri dağlayıcıdan etkilenerek parlaklığı bozulur (çukurlaşır), böylece optik metalurji mikroskopunda daha koyu renkli görünürler. Dağlanmış olan numunelerin mikroyapıları Olympus marka optik metalurji mikroskopunda incelenmiştir.

3.5. DSC ANALİZLERİ

55SD kodlu numunenin termal analizi, argon atmosferinde DSC/DTA-TG cihazı (TA SDT Q600) ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan numunelerin ağırlıkları 150 mg olacak şekilde kesilerek hazırlanmıştır. Referans maddesi olarak α -Al₂O₃ baz alınmıştır. Analizler sırasında alümina kroze kullanılmıştır. Deneyde numuneler 10, 20 ve 30°C/dak'lık farklı ısıtma hızlarıyla oda sıcaklığından 400°C' ye kadar ısıtılmıştır. Aktivasyon enerjileri; Kissinger ve Ozawa yöntemleriyle incelenmiştir.

3.6. ÇEKME TESTLERİ

Çekme testleri, endüstride metalik malzemelerin akma gerilmesi, çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk, % uzama ve % kesit daralması gibi mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan üniversal testlerdir. Çekme numuneleri dairesel ya da dikdörtgen kesitli olabilir. Çalışmamızda tellerin kesitine bağlı olarak dairesel kesitli çekme numuneleri kullanılmıştır. Çekme numunelerinin şematik görünümü Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3: Çekme testi numunesinin şematik gösterilişi [44]

2 mm/dak hızla gerçekleştirilen çekme testleri, Shimadzu marka AG-IC 100 kN tipinde universal çekme cihazında yapılmıştır. Deneyde kullanılan numunelerin görünümü Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Çekme testinde kullanılan numuneler

Çekme mukavemeti (σ_{φ}), Denklem 3.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

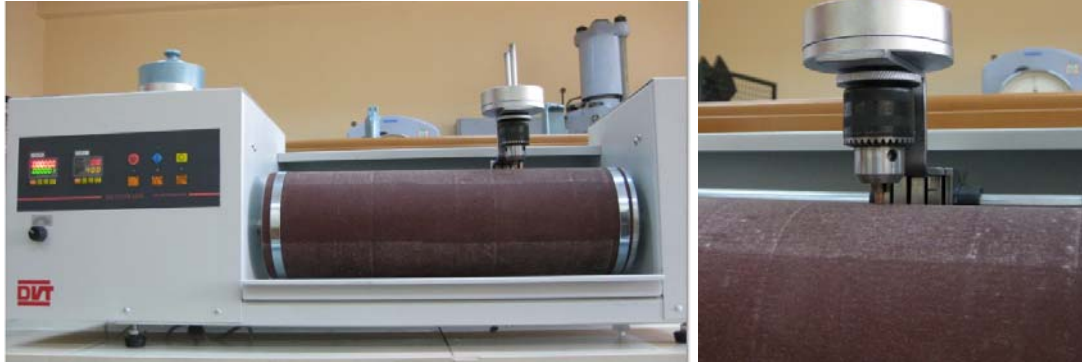
$$\sigma_{\varphi} = \frac{P}{A_0} \quad (3.2)$$

Yüzde uzama miktarı (e), Denklem 3.3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$e = \frac{L_s - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.3)$$

3.7. AŞINMA DENEYLERİ

Soğuk deformasyona uğramış tellerin başta sertlik ve mukavemet olmak üzere özelliklerindeki değişimlerin aşınma dayanımına etkisini belirlemek amacıyla aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri Devotrans marka bant zımpara aşındırıcı kullanılan abrasiv aşınma cihazında yapılmıştır (Şekil 3.5).

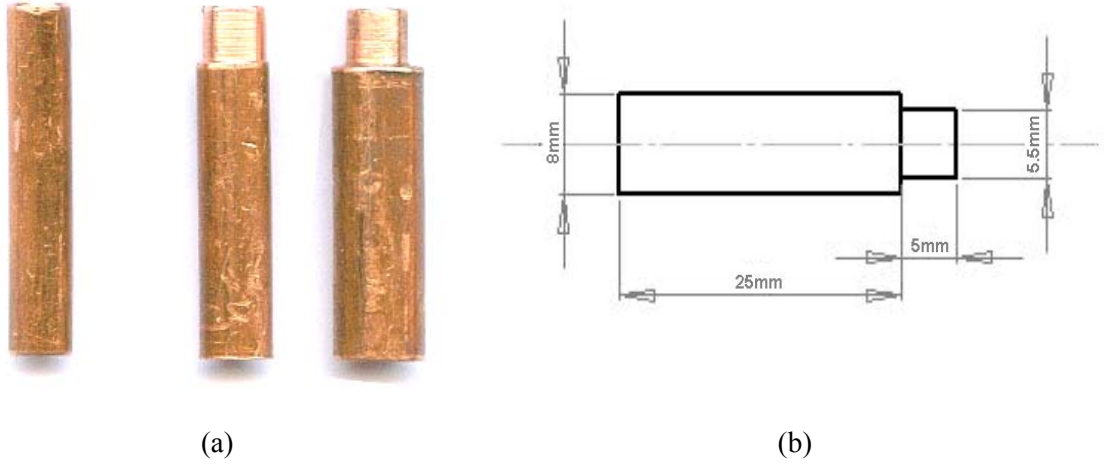


(a)

(b)

Şekil 3.5:Deneyde kullanılan (a) abrasiv aşınma cihazı, (b) numune ve yükün yerleşimi.

Numunelerin aşınma sonrası kütle kayıpları dikkate alınarak aşınma dayanımları belirlenmiştir. Numunelerin kütle kaybının tam olarak karşılaştırılabilmesi için 80FI, 63SD ve 63YK kodlu numunelerin uç kısımları en ince kesitli teller olan 55SD ve 55YK kodlu numuneler ile eşit çapa (5,5 mm) tornalama işlemi ile getirilmiştir. Aşınma deneyinde kullanılan numuneler ve bu numunelerin teknik resmi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: (a) Aşınma testi numuneleri (b) aşınma testi numunelerinin teknik resmi

Aşınma davranışına aşındırıcı tane boyutu ve aşınma yükünün etkisini de görebilmek amacıyla, aşınma deneyleri 40 ve 120 nolu bant zımparalar kullanılarak, 1 kg ve 5 kg olmak üzere iki farklı yük altında gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri 30 dev/dak (14 m/dak) sabit aşınma hızında ve 20 m sabit aşınma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği parametreler Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3: Aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği parametreler.

Numune Kodu	Zımpara No	Yük, kg
80FI	40	1
		5
	120	1
		5
63SD	40	1
		5
	120	1
		5
55SD	40	1
		5
	120	1
		5
63YK	40	1
		5
	120	1
		5
55YK	40	1
		5
	120	1
		5

Aşınma sırasındaki ağırlık kaybının tespiti için; aşınma öncesi ve sonrasında ağırlık ölçümleri AND marka GF-600 model, 0,001 g ölçüm hassasiyetine sahip, maksimum 610 g ağırlığa kadar ölçüm yapabilen hassas terazi ile yapılmıştır.

Ağırlık kaybı; aşınma öncesi tartım ile aşınma sonrası tartımın farkı olarak tanımlanmaktadır. Yoğunlukları farklı olmayan bakır tellerin ağırlık kayıpları deney sonuçlarında aşınma oranı olarak değerlendirilmiştir.

3.8. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ

Aşınma deneyleri sonrasında aşınan yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. SEM çalışması için numuneler pirinç numune tutucusuna karbon bantla yapıştırılmıştır.

4. BULGULAR

Saf bakırın soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme davranışının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini belirlemek için Bölüm 3'te açıklanan deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesiyle aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

4.1. YENİDEN KRİSTALLEŞME TAVLAMALARI VE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Soğuk deformasyona uğramamış 8 mm çapındaki filmanın sertliği 51,75 HV olarak bulunmuştur.

63SD kodlu numunenin farklı yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıklarında tavlama süresine bağlı olarak ölçülen ortalama sertlik değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1: 63SD kodlu numunenin farklı yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıklarında tavlama süresi ile sertlik (HV) değişimi.

Tavlama Süresi (dak)	Tavlama Sıcaklığı, °C					
	100	200	220	224	225	250
0	119,2	119,2	119,2	119,2	119,2	119,2
30	117,26	113,5	116,76	107,725	109,22	55,73
60	113,42	110,98	113,2	95,6	52,78	--
90	113,04	112,88	113,7	84,75	51,92	--
120	114,72	109,32	85,37	64,45	51,85	--
150	113,2	108,46	79,97	51,875	51,71	--
180	114,03	109,42	76,03	--	51,80	--
210	112,9	110,7	74,24	--	51,83	--
240	113,6	106,02	70,95	--	51,86	--
270	112,87	105,6	63,87	--	--	--
300	113,5	105,2	53,58	--	--	--
330	114,07	106,3	--	--	--	--
360	113,3	105,64	--	--	--	--
390	113,03	106,16	--	--	--	--
420	112,93	103,24	--	--	--	--

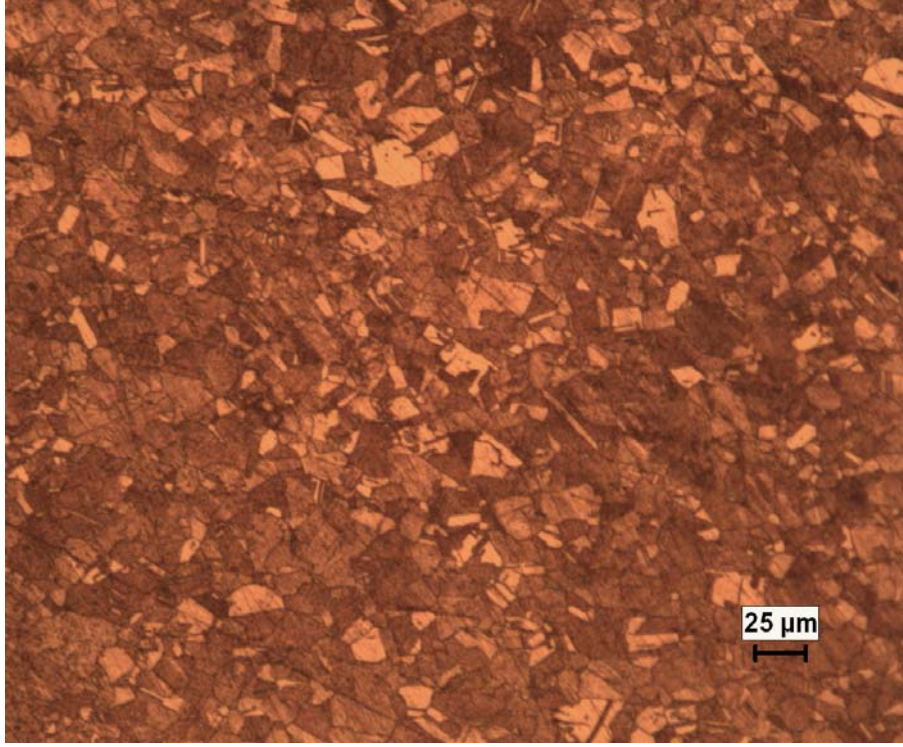
55SD kodlu numunenin farklı yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıklarında tavlama süresine bağlı olarak ölçülen ortalama sertlik değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2: 55SD kodlu numunenin farklı yeniden kristalleşme tavlama sıcaklıklarında tavlama süresi ile sertlik (HV) değişimi.

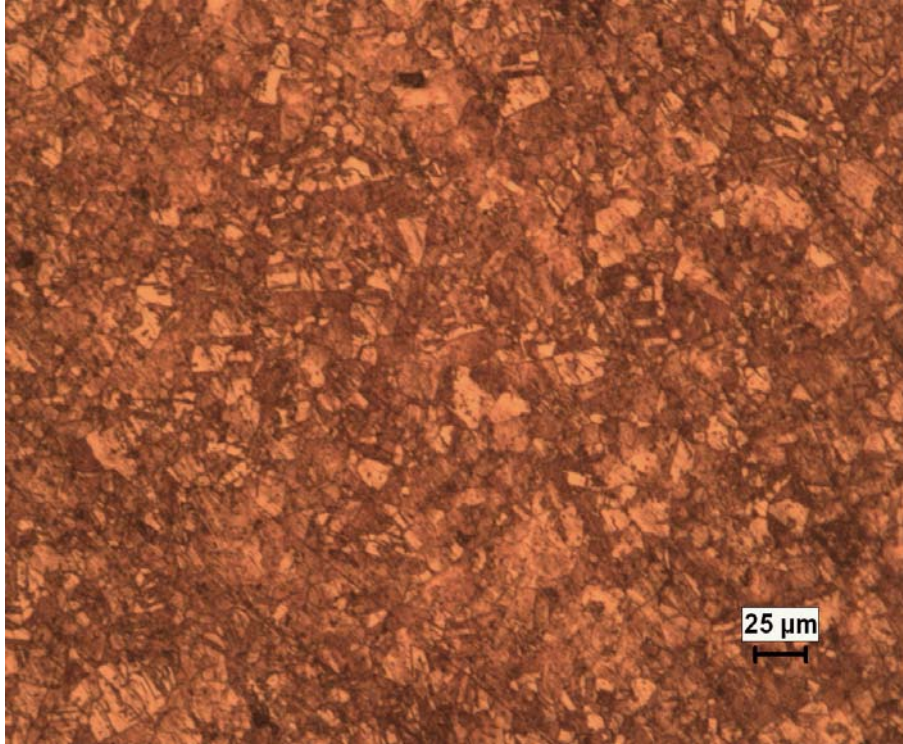
Tavlama Süresi (dak)	Tavlama Sıcaklığı, °C					
	200	210	215	217	219	220
0	128,2	128,2	128,2	128,2	128,2	128,2
30	116,45	116,5	108,08	98,44	92,85	95,925
60	109,975	108,5	83,8	80,33	69,2	53,6
90	110,125	79,2	69,82	67,78	56,1	--
120	105,04	73,13	71,08	54,45	52,20	--
150	104,075	69,125	60,68	51,80	51,90	--
180	102,36	71,075	55,9	--	51,93	--
210	86,38	60,5	--	--	51,76	--
240	90,56	53,825	--	--	51,50	--
270	79,16	--	--	--	--	--
300	69,46	--	--	--	--	--
330	61,9	--	--	--	--	--
360	67,58	--	--	--	--	--
390	62,325	--	--	--	--	--
420	65,93	--	--	--	--	--

4.2. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

Çalışmada kullanılan elektrolitik saf bakır filmaşın (80FI), % 38 ve % 53 oranında deformasyona uğramış numuneler (63SD, 55SD) ile yine bu numunelerin tavlama sonucu elde edilen numunelerin (63YK, 55YK) enine ve boyuna kesit mikroyapıları sırasıyla Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5’de verilmiştir.

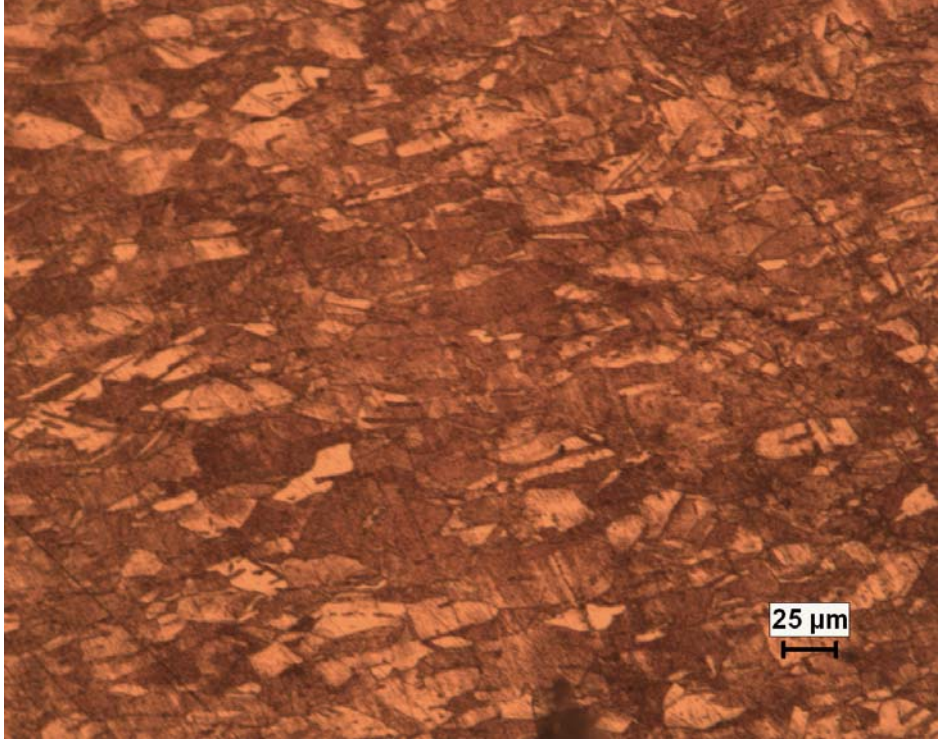


(a) boyuna kesit

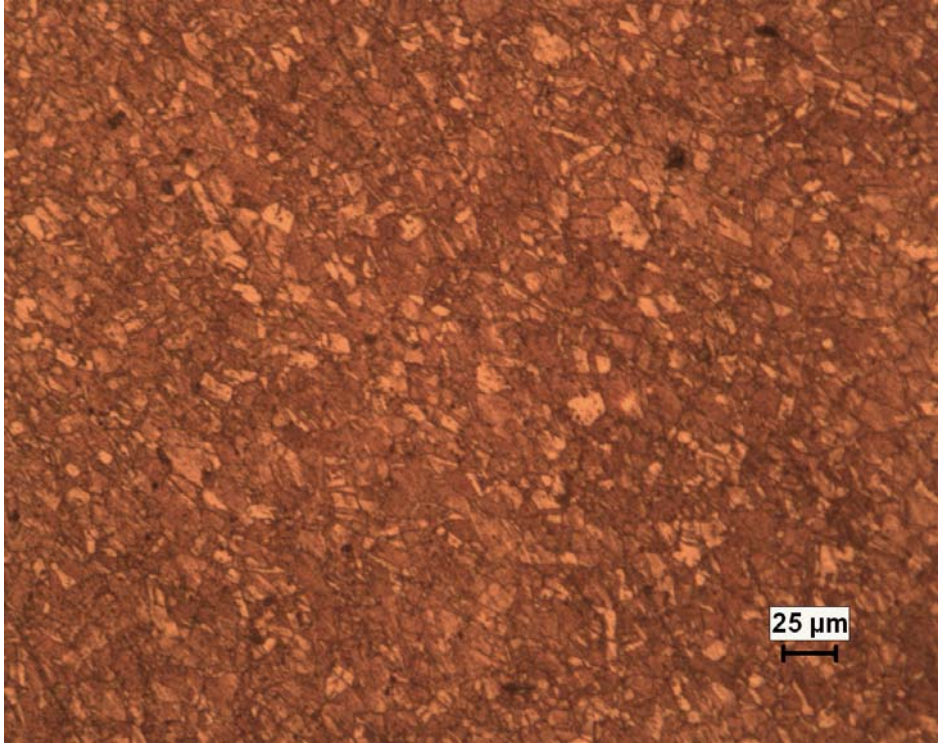


(b) enine kesit

Şekil 4.1: 80FI kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.

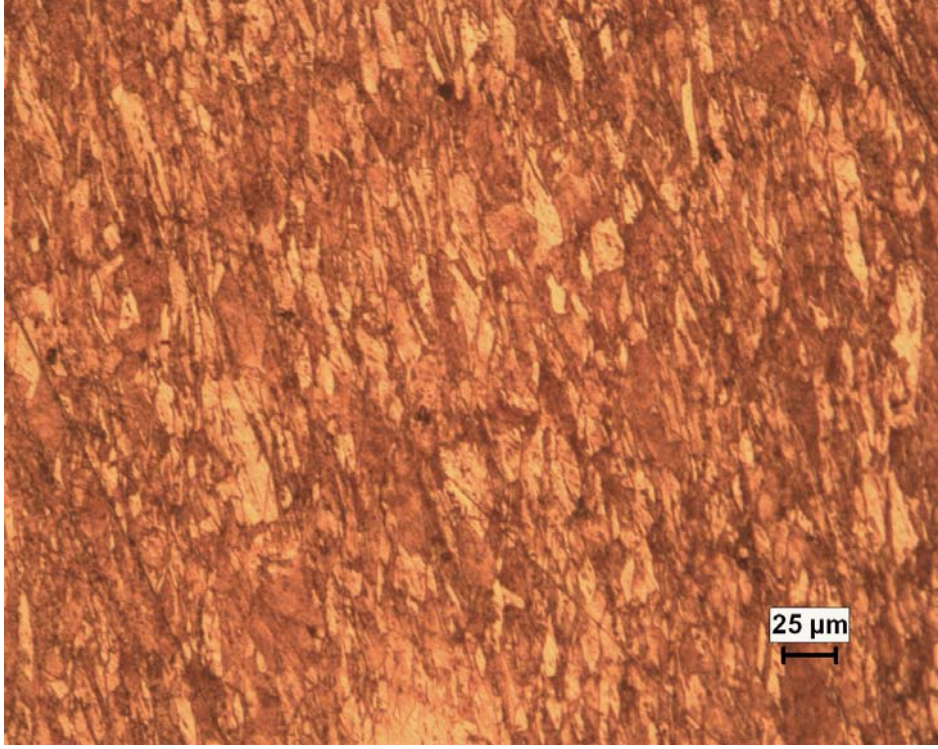


(a) boyuna kesit

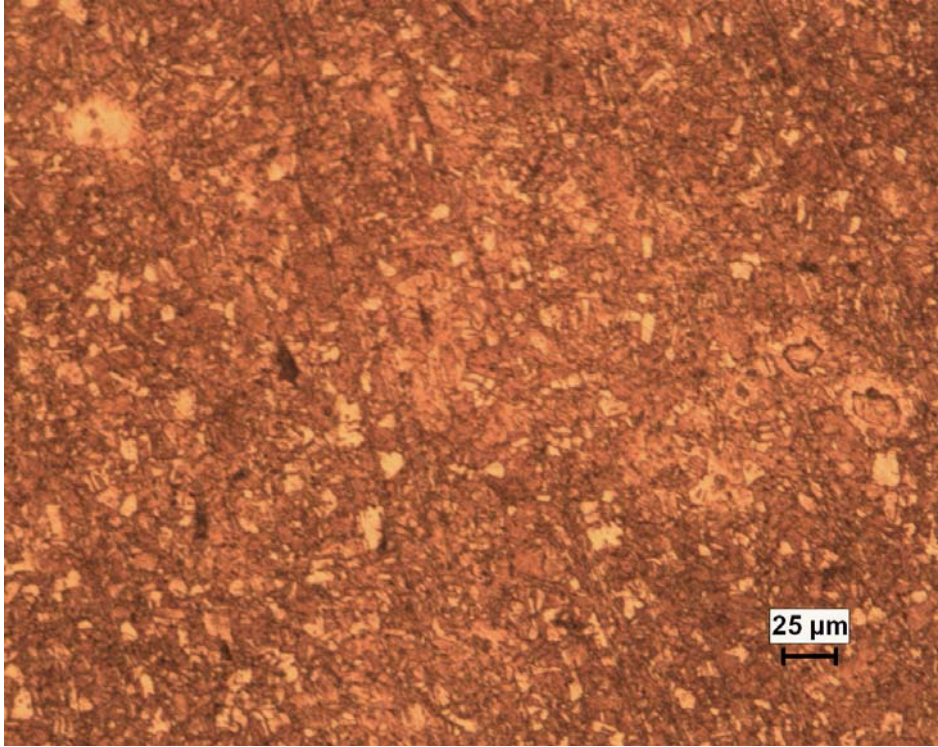


(b) enine kesit

Şekil 4.2: 63SD kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.

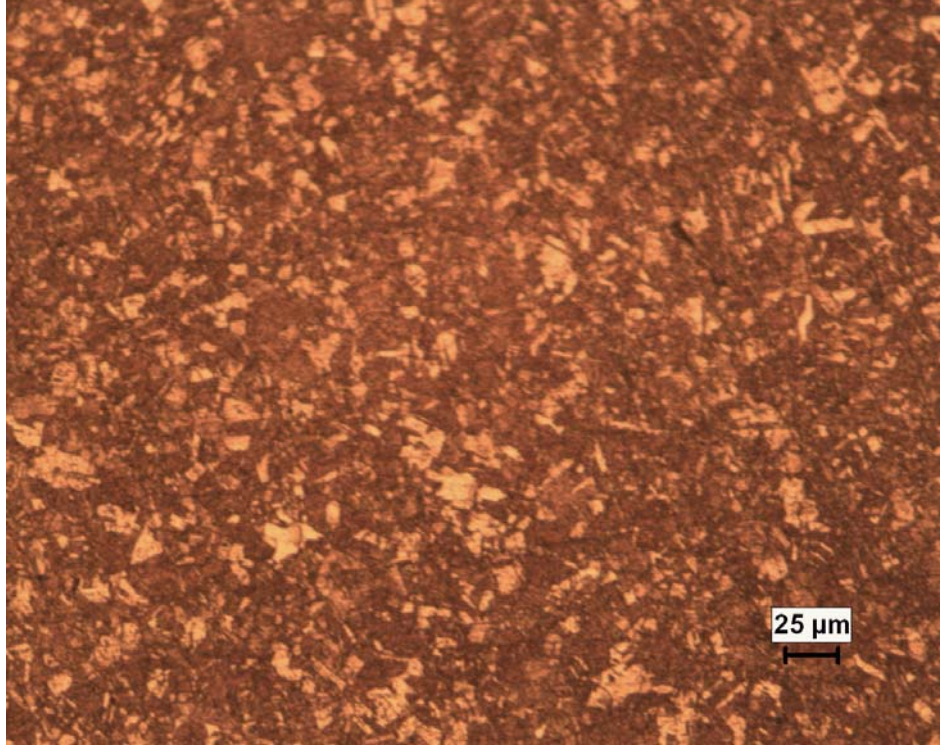


(a) boyuna kesit

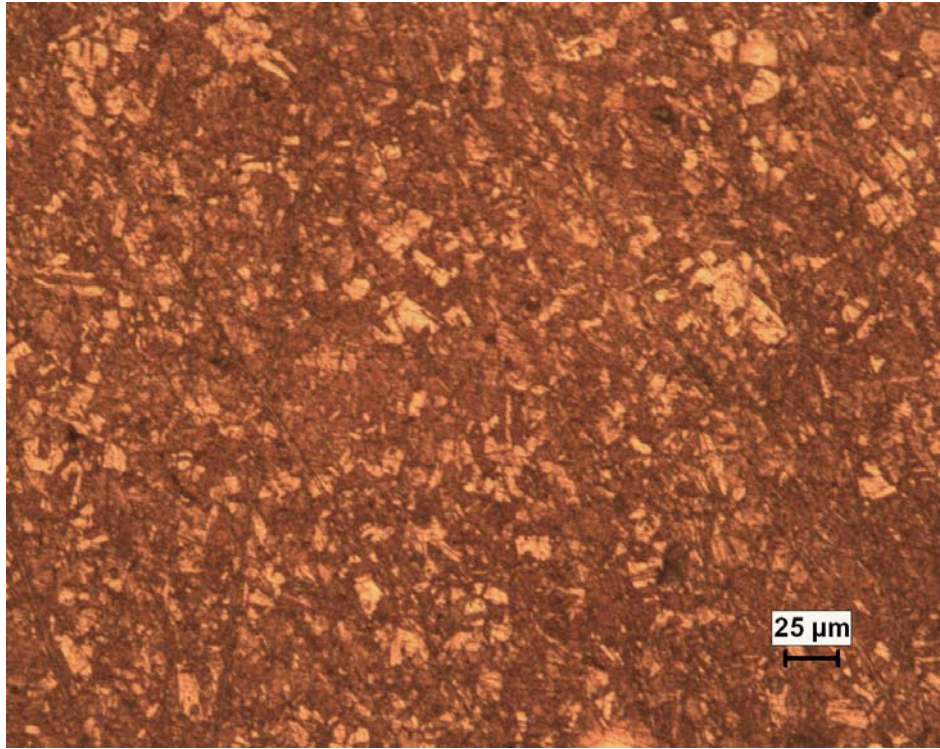


(b) enine kesit

Şekil 4.3: 55SD kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.

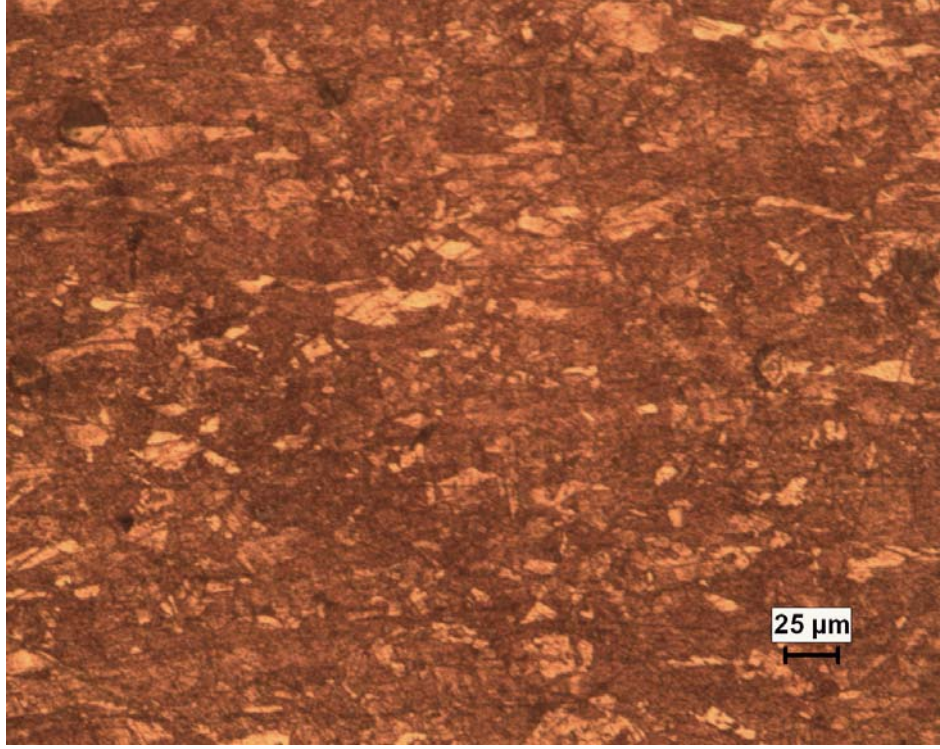


(a) boyuna kesit

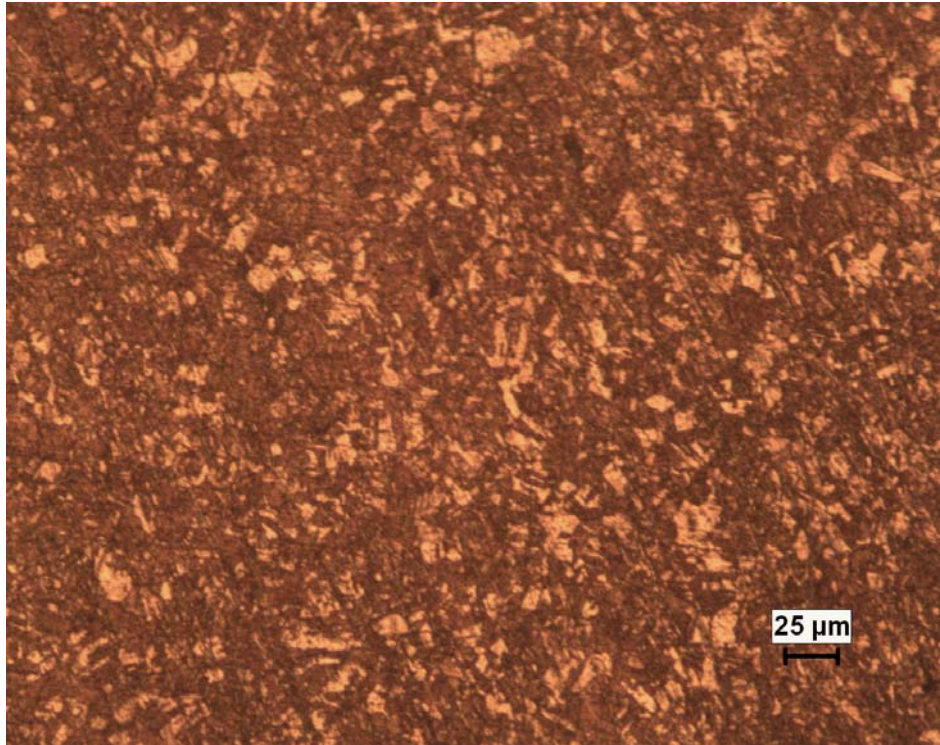


(b) enine kesit

Şekil 4.4: 63YK kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.



(a) boyuna kesit

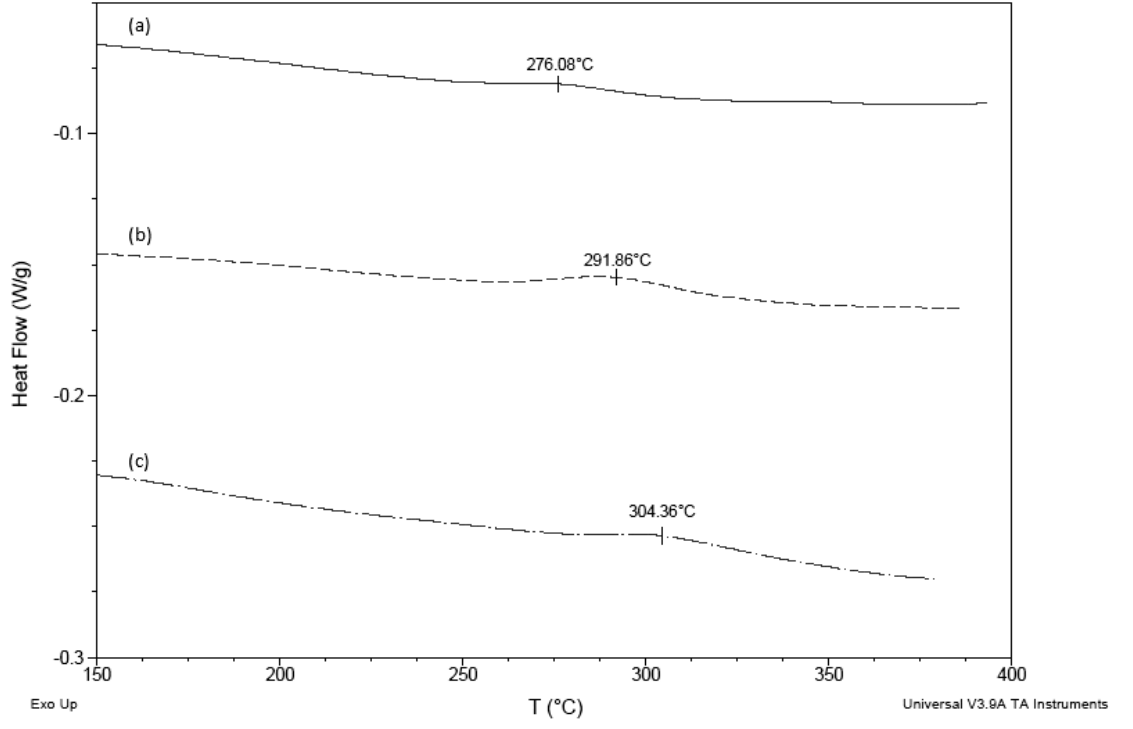


(b) enine kesit

Şekil 4.5: 55YK kodlu numunenin (a) boyuna ve (b) enine kesitlerinin mikroyapı fotoğrafları.

4.3. DSC ANALİZLERİ

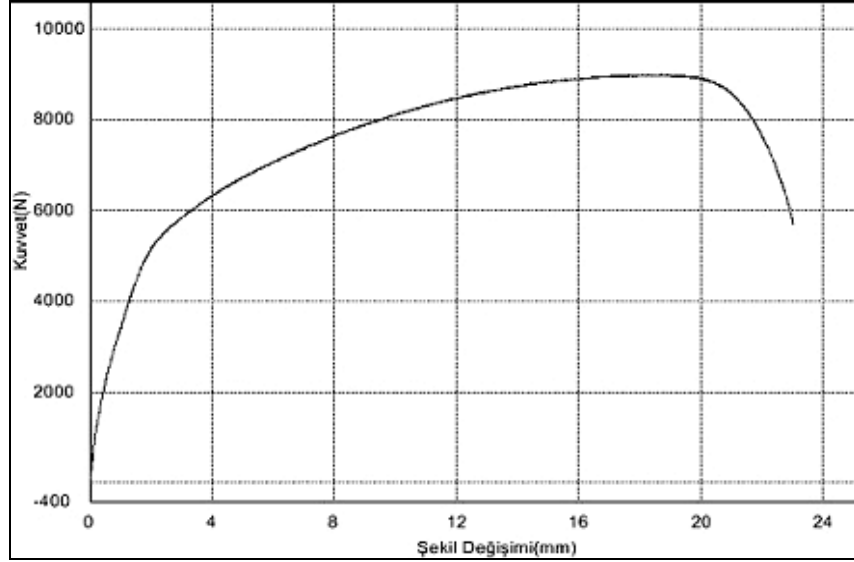
55SD kodlu numune için DSC analizleri 10, 20 ve 30°C/dak'lık ısıtma hızlarında gerçekleştirilmiş ve bu üç farklı ısıtma hızına ait Şekil 4.6'da verilen eğriler elde edilmiştir.



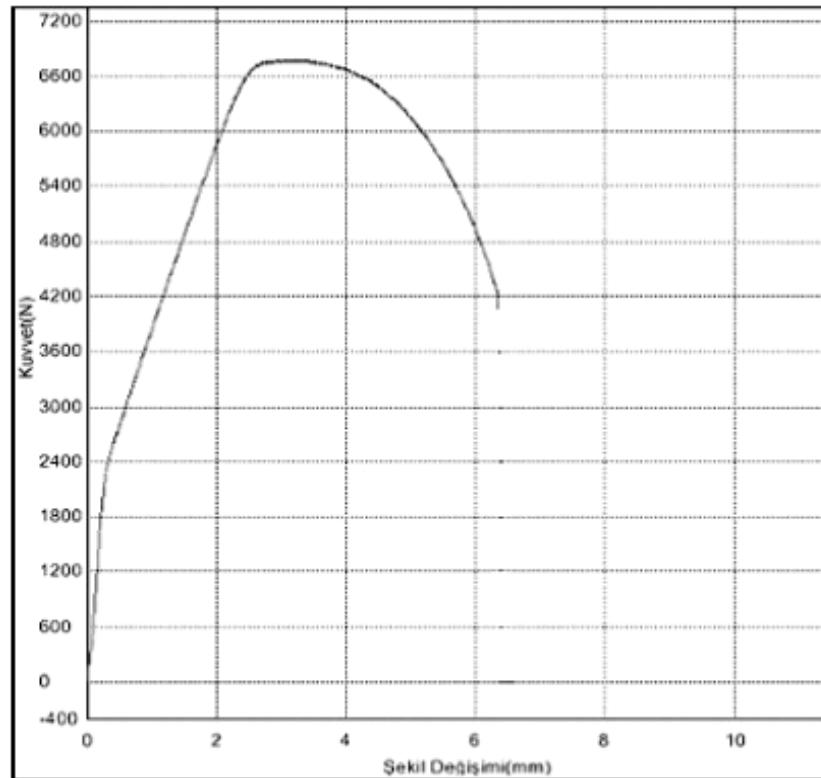
Şekil 4.6: 55SD kodlu numunenin (a) $\beta = 10^\circ\text{C}/\text{dak}$, (b) $\beta = 20^\circ\text{C}/\text{dak}$, (c) $\beta = 30^\circ\text{C}/\text{dak}$ 'lık farklı ısıtma hızlarındaki DSC eğrileri.

4.4. ÇEKME TESTLERİ

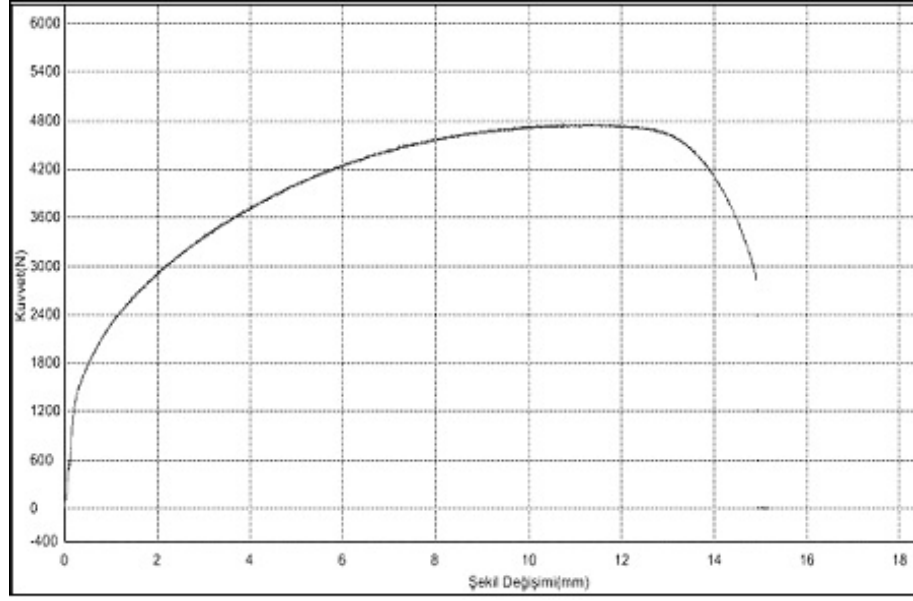
Bakır tellerin çekme eğrileri Şekil 4.7'de verilmiştir.



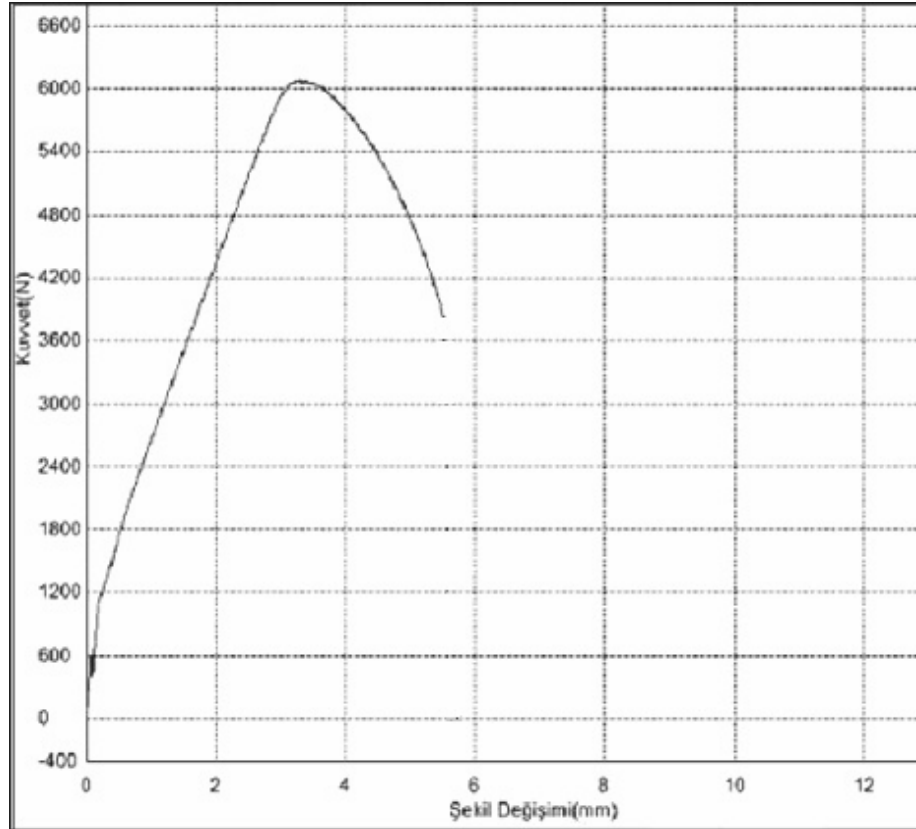
(a)



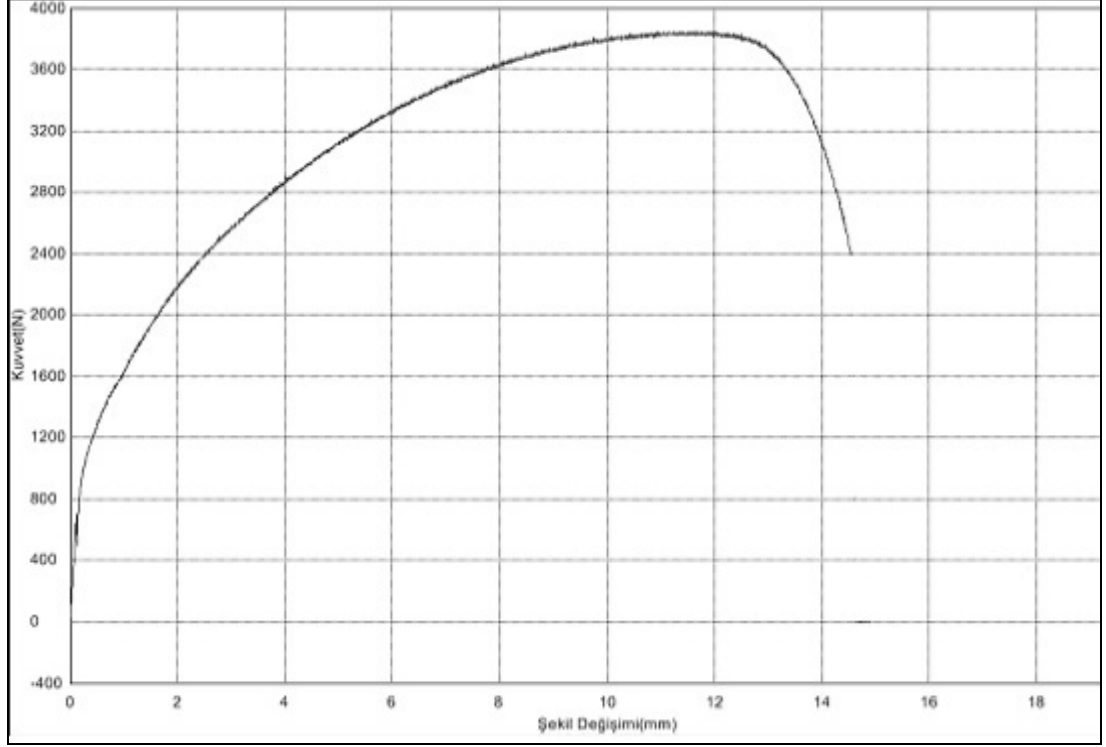
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.7: (a) 80FI, (b) 63SD, (c) 63YK, (d) 55SD ve (e) 55YK kodlu numunelerin çekme eğrileri.

Çekme testleri sonucunda çekme eğrilerine bağlı olarak elde edilen mukavemet ve süneklik değerleri Tablo 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.3: Numunelerin çekme mukavemeti ve kopma uzamaları

Numune	Çekme Mukavemeti (σ_c), MPa	Kopma Uzaması (e), %
80FI	234	49
63SD	348	18
55SD	379	18
63YK	242	50
55YK	241	53

4.5. AŞINMA TESTLERİ

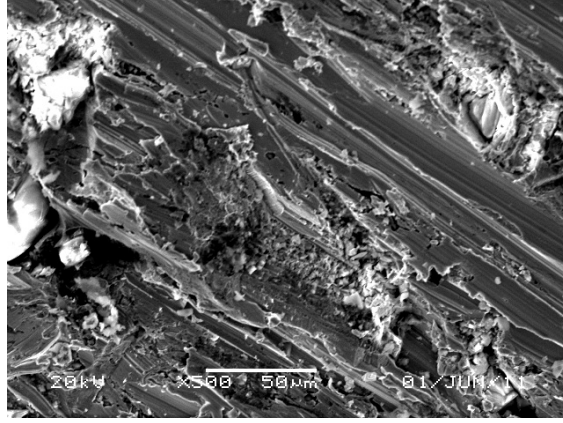
Bakır tellerin farklı aşınma parametrelerinde gerçekleştirilen aşınma testlerindeki aşınma ağırlık kayıpları ve buna bağlı olarak hesaplanan aşınma dirençleri Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.4: Bakır tellerin aşınma test sonuçları.

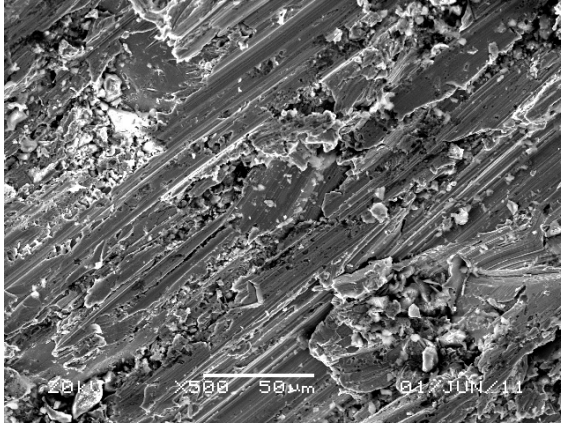
Numune	Zımpara No	Yük, kg	Ağırlık kaybı, mg
80FI	40	1	147
		5	650
	120	1	92
		5	--
63SD	40	1	150
		5	694
	120	1	102
		5	520
55SD	40	1	157
		5	714
	120	1	104
		5	538
63YK	40	1	147
		5	676
	120	1	90
		5	508
55YK	40	1	145
		5	686
	120	1	96
		5	440

4.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ

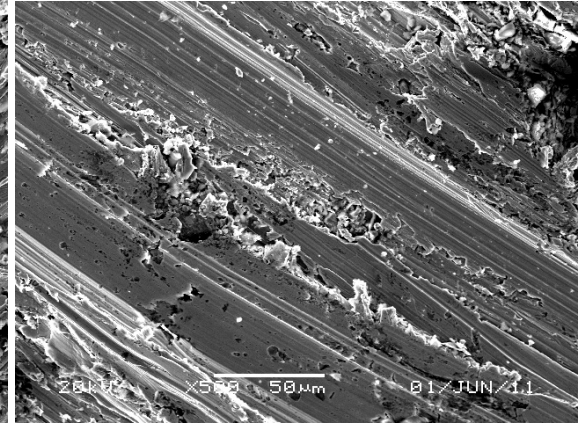
Aşınma deneyleri sonucunda numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.8’de verilmiştir.



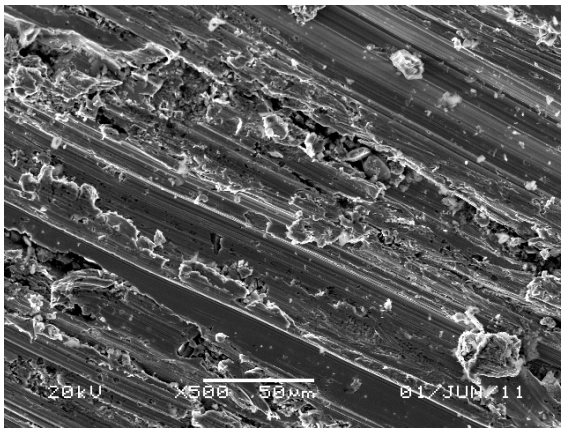
(a)



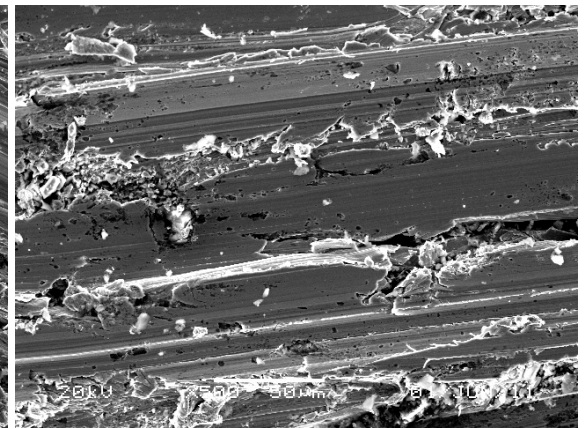
(b)



(c)



(d)



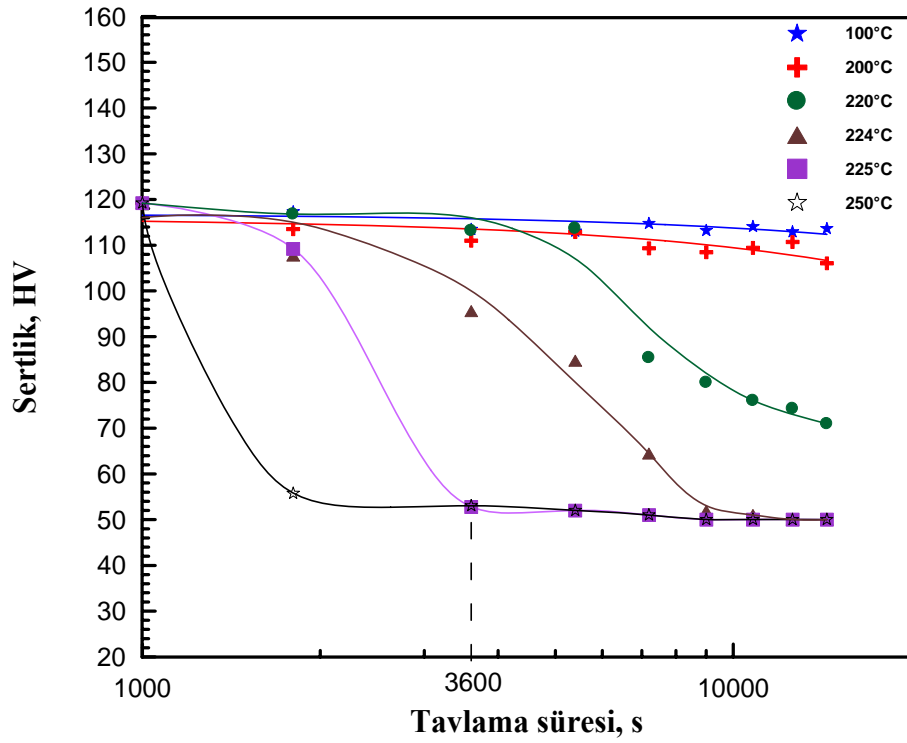
(e)

Şekil 4.8: (a) 80FI, (b) 63SD, (c) 63YK, (d) 55SD ve (e) 55YK kodlu numunelerin aşınma yüzeylerinin (120 nolu zımpara, 5 kg yük) SEM görüntüleri.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1. YENİDEN KRİSTALLEŞME TAVLAMALARI VE SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

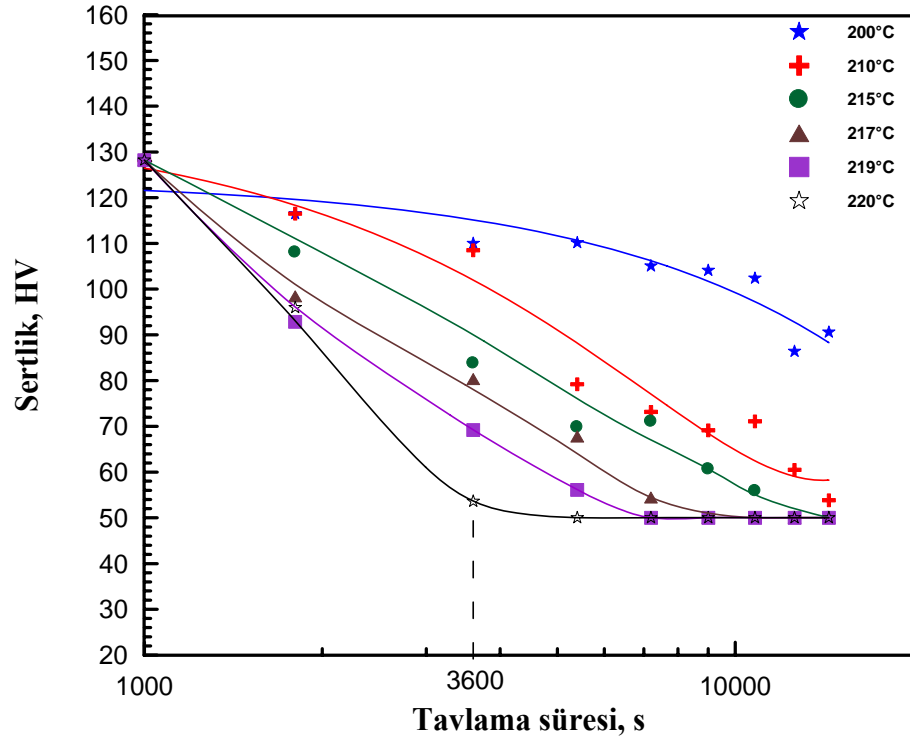
Şekil 5.1’de 63SD kodlu soğuk deformasyona uğramış bakır telin farklı yeniden kristalleşme sıcaklıklarında, farklı sürelerdeki sertlik değişim eğrileri görülmektedir. Bakır filmaşinin (80FI), % 38 soğuk deformasyon sonrasında sertliğinin % 130 oranında (51,75 HV’den 119,2 HV’e) arttığı görülmektedir.



Şekil 5.1: 63SD kodlu bakır telin farklı yeniden kristalleşme sıcaklıklarında, farklı sürelerdeki sertlik değişimi.

Şekil 5.1’de görüldüğü üzere % 38 soğuk deformasyona uğramış numunenin yeniden kristalleşme sıcaklığı 225°C olarak tespit edilmiştir.

Şekil 5.2’de 55SD kodlu soğuk deformasyona uğramış bakır telin farklı yeniden kristalleşme sıcaklıklarında, farklı sürelerdeki sertlik değişim eğrileri görülmektedir. Bakır filmaşinin (80FI), % 53 soğuk deformasyon sonrasında sertliğinin % 148 oranında (51,75 HV’den 128,2 HV’e) arttığı görülmektedir.



Şekil 5.2: 55SD kodlu bakır telin farklı yeniden kristalleşme sıcaklıklarında, farklı sürelerdeki sertlik değişimi.

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi % 53 soğuk deformasyona uğramış numunenin yeniden kristalleşme sıcaklığı 220°C olarak tespit edilmiştir.

Soğuk deformasyon oranının % 38’den % 53’e çıkarılmasının çalışılan saf bakır tel numunelerinin yeniden kristalleşme tavlama sıcaklığını 225°C’den 220°C’a düşürdüğü, bulunan bu değerlerin literatürle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır [21].

Tavlamalar sırasında bakır numunelerin yüzeyinde ince bir oksit filmi oluştuğu gözlenmiştir, fakat sertlik ölçümleri sonucunda bu filmin sertlik değerlerine herhangi bir etkisi olmadığı belirlenmiştir.

5.2. METALOGRAFİK ÇALIŞMALAR

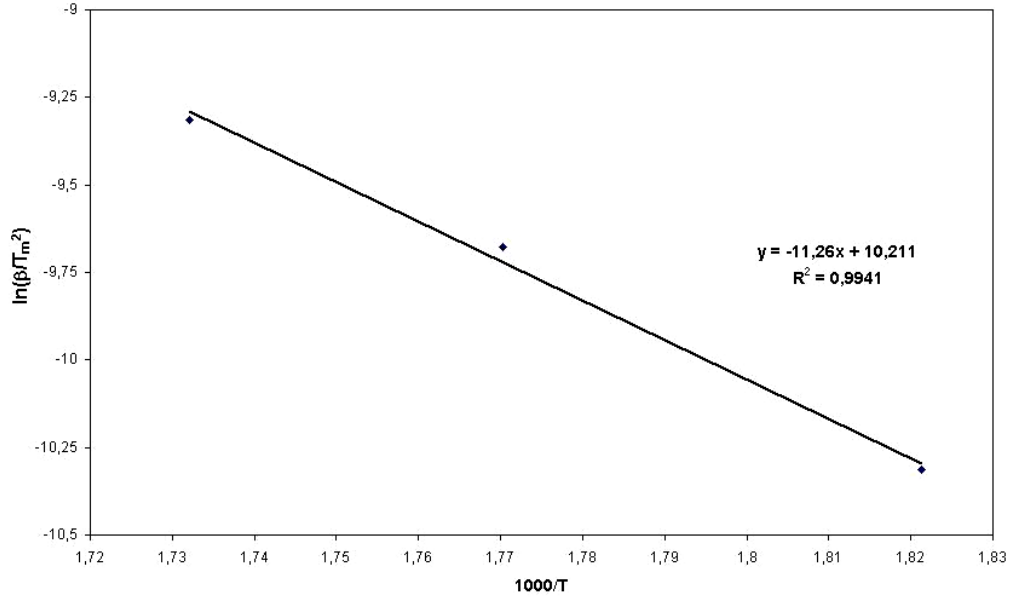
Çalışmaların gerçekleştirildiği bakır tel numunelerinden 80FI kodlu bakır filmaşinin enine ve boyuna kesitinde gerçekleştirilen metalografik incelemeler sonucunda, her iki kesitin de eş eksenli tanelerden oluştuğu görülmüştür. 80FI kodlu numunenin orijinal ortalama tane boyutunun 25 µm olduğu tespit edilmiştir.

% 38 ve % 53 oranlarında soğuk deformasyona uğramış 63SD ve 55SD kodlu saf bakır tel numunelerinin boyuna kesitlerine ait mikroyapılarda uzamış bakır taneleri açıkça görülmektedir.

63SD ve 55SD kodlu numunelerin tespit edilen yeniden kristalleşme sıcaklıklarında bir saat tavlınması ile elde edilen 63YK ve 55YK kodlu bakır tellerin enine ve boyuna kesitlerine ait mikroyapılarda eş eksenli yeniden kristalleşmiş bakır taneleri görülmektedir. Yeniden kristalleşen numunelerin (63YK ve 55YK) ortalama tane boyutunun soğuk deformasyon öncesi başlangıç tane boyutuna (25 µm) oranla daha ince olduğu mikroyapılardan görülmektedir. Daha fazla soğuk deformasyona uğramış 55YK numunesinin yeniden kristalleşmiş ortalama tane boyutunun (12 µm), 63YK numunesinin yeniden kristalleşmiş ortalama tane boyutundan (9 µm) daha ince olduğu görülmüştür [14].

5.3. DSC ANALİZLERİ

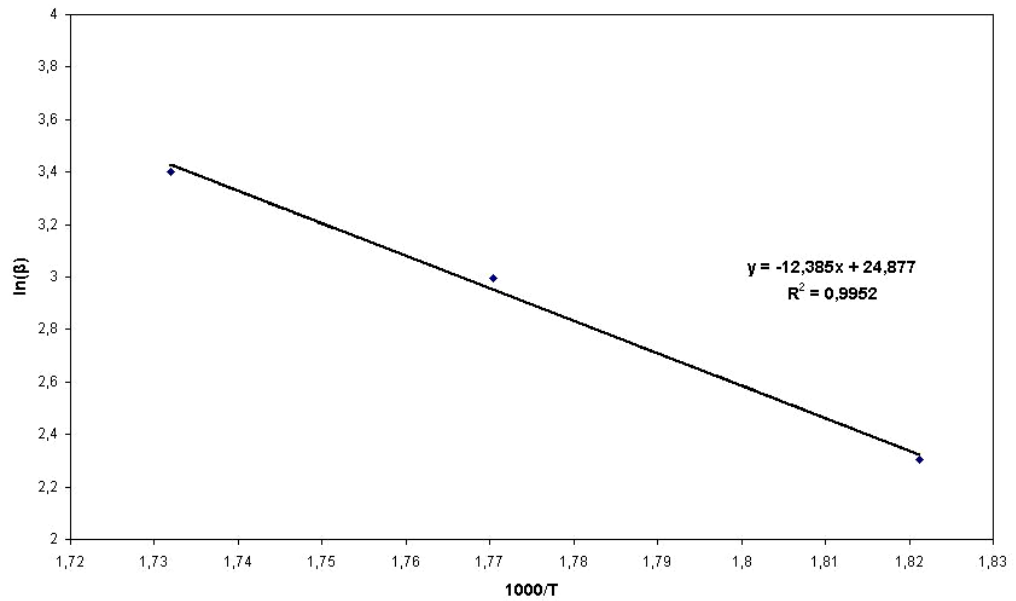
DSC analizleri sonucunda elde edilen ekzotermik piklerin tepe noktaları dikkate alınacak olursa; Kissinger yöntemine göre $\ln(\beta/T_m^2)$ ile $1000/T$ arasında grafik çizildiğinde oluşan doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisini belirlemek mümkündür. Kissinger yöntemine göre çizilen grafik Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3: $\ln(\beta/T_m^2) - 1000/T$ diyagramı.

Kissinger yöntemine göre çizilen grafiğin eğiminden hareketle yapılan hesaplamalar sonucunda yeniden kristalleşme için gerekli aktivasyon enerjisi 93,62 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

Ozawa yöntemine göre $\ln(\beta)$ ile $1000/T$ arasında grafik çizildiğinde oluşan doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisini belirlemek mümkündür. Ozawa yöntemine göre çizilen grafik Şekil 5.4'de görülmektedir.



Şekil 5.4: $\ln(\beta) - 1000/T$ diyagramı.

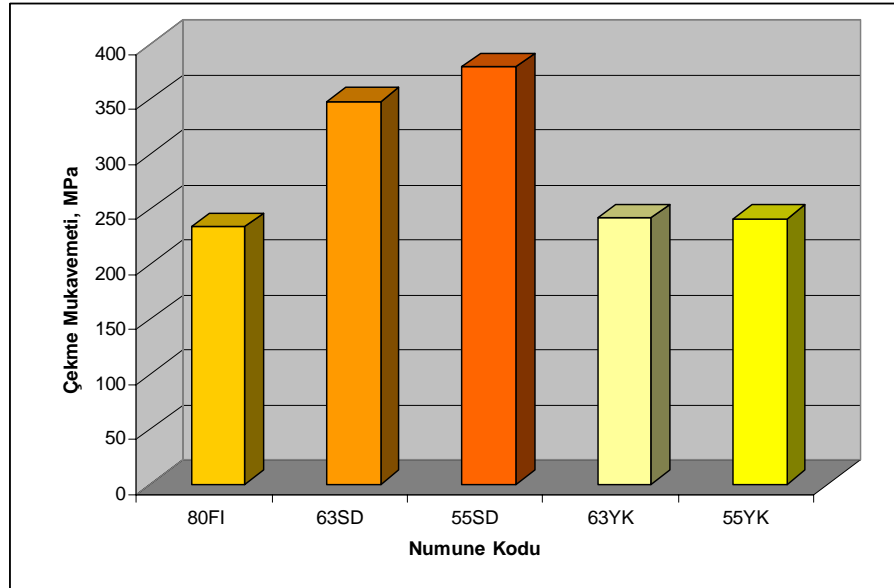
Ozawa yöntemine göre çizilen grafiğin eğiminden yapılan hesaplamalar sonucunda yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi 97,88 kJ/mol olarak hesaplanmıştır.

Bu iki yöntem ile elde edilen aktivasyon enerjileri dikkate alındığında, sonuçların birbirine uyumlu olduğu, 55SD kodlu numune için yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisinin 94-98 kJ/mol mertebelerinde olduğu söylenebilir.

Benchabane ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada % 70 oranında soğuk deforme olmuş saf bakırın yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisi 58 kJ/mol olarak tespit edilmiştir [35]. Bu çalışmada, aktivasyon enerjisi belirlenen 55SD kodlu numunenin deformasyon oranı daha düşük olduğundan (% 53), yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisinin daha yüksek değerlerde olması sonuçların uyumluluğunu göstermektedir.

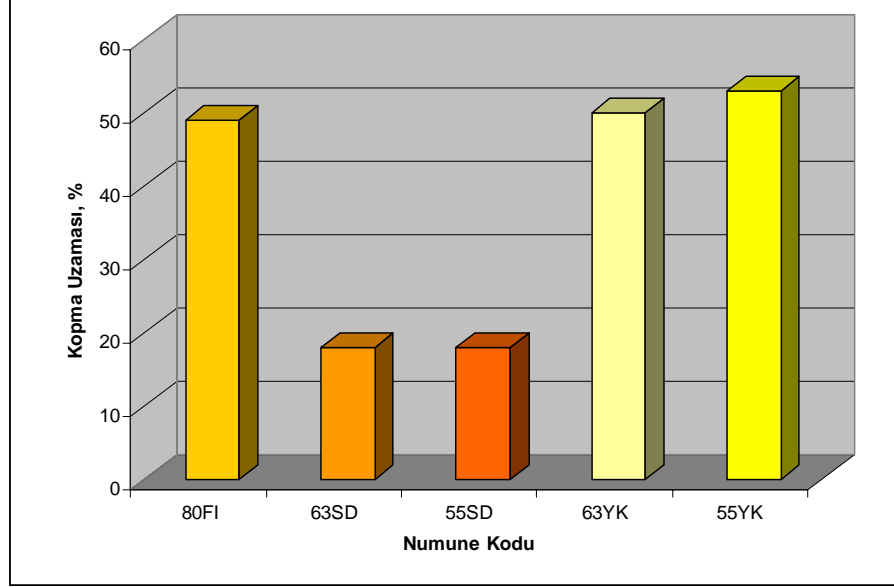
5.4. ÇEKME TESTLERİ

Bakır tellerin çekme testleri sonucunda elde edilen çekme mukavemetleri Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5: Bakır tellerin çekme mukavemetleri.

Bakır tellerin çekme testleri sonucunda elde edilen % kopma uzamaları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Bakır tellerin % kopma uzamaları.

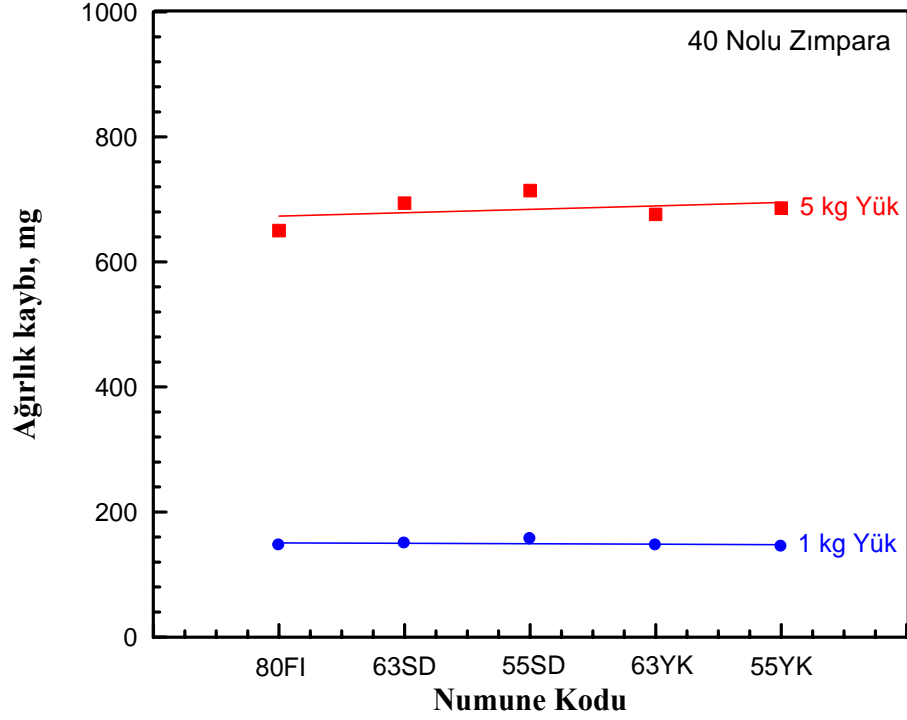
80FI kodlu orijinal bakır filmaşinin % 38 soğuk tel çekme deformasyonuna uğratılması sonucu elde edilen 63SD kodlu bakır telin çekme mukavemeti 234 MPa'dan 348 MPa'a (% 49) artış göstermiştir. Buna karşılık kopma uzaması % 49'dan % 18'e düşmüştür.

80FI kodlu orijinal bakır filmaşinin % 53 soğuk tel çekme deformasyonuna uğratılması sonucu elde edilen 55SD kodlu bakır telin çekme mukavemeti 234 MPa'dan 379 MPa'a (% 62) artış göstermiştir. Buna karşılık kopma uzaması % 49'dan % 18'e düşmüştür.

Yeniden kristalleşme tavlamları sonucu elde edilen 63YK ve 55YK kodlu bakır tellerin çekme mukavemeti ve süneklik değerleri, 80FI kodlu orijinal bakır filmaşinden bir miktar yüksek, fakat hemen hemen eşit kabul edilebilecek seviyelerdedir. Orijinal ve yeniden kristalleşmiş numuneler arasındaki mukavemet ve süneklik farklarının tane boyutu farklarına dayandığı düşünülmektedir.

5.5. AŞINMA TESTLERİ

Bakır tellerin 40 nolu zımpara kullanılarak, 1 kg ve 5 kg yük altında abrasiv aşınma davranışları Şekil 5.7’de gösterilmiştir.

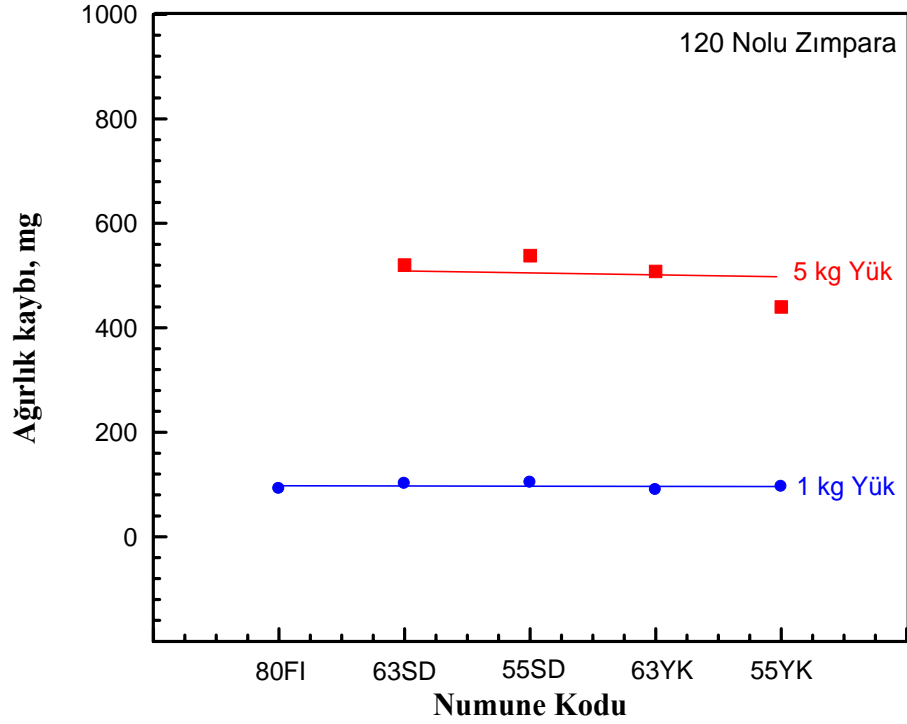


Şekil 5.7: Bakır tellerin 40 nolu zımpara kullanılarak, 1 kg ve 5 kg yük altında abrasiv aşınma davranışları.

Orijinal (80FI), soğuk deformasyona uğramış (63SD, 55SD) ve yeniden kristalleşmiş (63YK, 55YK) numunelerin aşınma davranışları arasında kayda değer bir fark olmadığı anlaşılmaktadır. 40 nolu zımpara ile gerçekleştirilen deneylerde aşınma yükünün 1 kg’dan 5 kg’a artırılması ile aşınma miktarının önemli bir şekilde arttığı görülmektedir.

Bakır tellerin 120 nolu zımpara kullanılarak, 1 kg ve 5 kg yük altında abrasiv aşınma davranışları Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

Orijinal (80FI), soğuk deformasyona uğramış (63SD, 55SD) ve yeniden kristalleşmiş (63YK, 55YK) numunelerin aşınma davranışları arasında kayda değer bir fark olmadığı anlaşılmaktadır. 120 nolu zımpara ile gerçekleştirilen deneylerde aşınma yükünün 1 kg’dan 5 kg’a artırılması ile aşınma miktarının önemli bir şekilde arttığı görülmektedir.

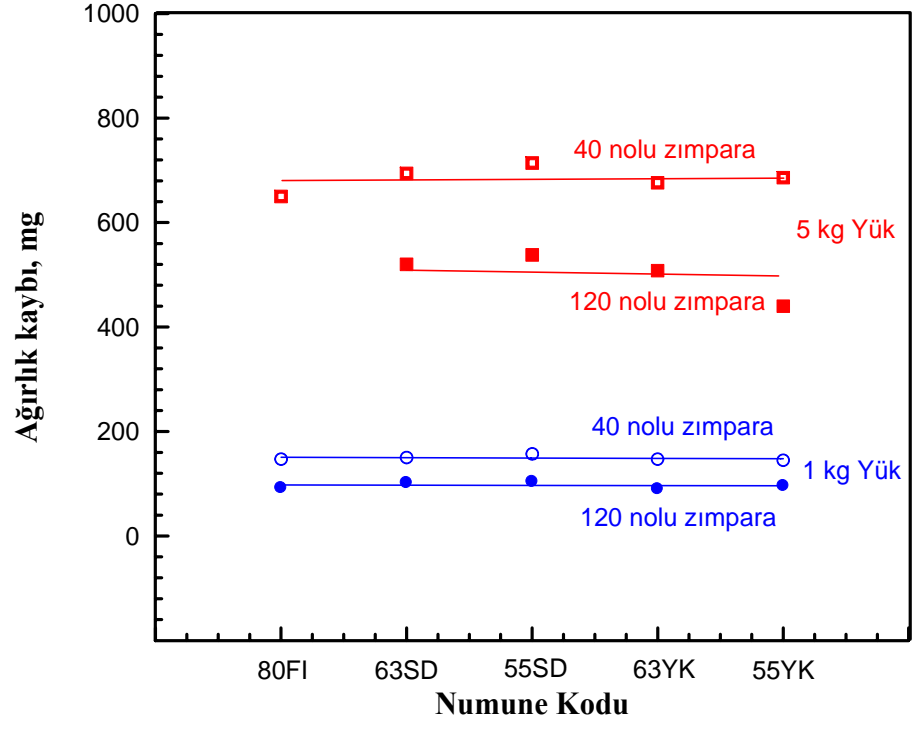


Şekil 5.8: Bakır tellerin 120 nolu zımpara kullanılarak, 1 kg ve 5 kg yük altında abrasiv aşınma davranışları.

40 ve 120 nolu zımparalarla gerçekleştirilen aşınma testlerinde aşınma miktarının değişimi Şekil 5.9'da görülmektedir.

Aşındırıcı tane boyutunun artması ile her iki yük altında da (1 ve 5 kg) abrasiv aşınma miktarının arttığı görülmektedir.

Numunelerin 120 nolu zımpara ve 5 kg yük altında gerçekleştirilen aşınma testlerinden sonra aşınma yüzeylerinin SEM incelemelerinde abrasiv aşınma izleri açık olarak görülmektedir. Aşınma miktarlarının benzer olmasından dolayı, aşınma iz görünüşleri de benzerdir, aşındırıcı batma derinliği ve genişliğinde fark görünmemektedir.



Şekil 5.9: 40 ve 120 nolu zımparalarla gerçekleştirilen aşınma testlerinde aşınma miktarının değişimi.

5.6. GENEL SONUÇLAR

Saf bakır tellere uygulanan soğuk deformasyon ve yeniden kristalleşme tavlamlarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri hakkında genel olarak aşağıdakiler söylenebilir:

% 38 soğuk deformasyona uğramış bakır telin (63SD) yeniden kristalleşme sıcaklığı 225°C olarak belirlenirken, % 53 soğuk deformasyona uğramış bakır telin (55SD) yeniden kristalleşme sıcaklığı 220°C olarak belirlenmiştir. Soğuk deformasyon miktarının artması saf bakırın yeniden kristalleşme sıcaklığında düşüşe sebep olmuştur.

Saf bakır tellerin (80FI) başlangıç tane boyutu 25 µm olarak belirlenmiştir. % 38 soğuk deformasyona uğramış bakır telin 225°C'de yeniden kristalleşmesi sonucu (63YK) tane boyutu 12 µm, % 53 soğuk deformasyona uğramış bakır telin 220°C'de yeniden kristalleşmesi sonucu (55YK) tane boyutu 9 µm olarak belirlenmiştir. Artan soğuk deformasyon miktarı yeniden kristalleşmiş tane boyutunda düşüşe sebep olmuştur.

55SD kodlu numune için yeniden kristalleşme aktivasyon enerjisinin 94-98 kJ/mol mertebelerinde olduğu belirlenmiştir.

80FI kodlu orijinal bakır filmaşinin; % 38 soğuk tel çekme deformasyonuna uğratılması sonucu elde edilen 63SD kodlu bakır telin çekme mukavemeti % 49 artış göstermiştir, % 53 soğuk tel çekme deformasyonuna uğratılması sonucu elde edilen 55SD kodlu bakır telin çekme mukavemeti % 62 artış göstermiştir. Buna karşılık kopma uzamaları % 49'dan % 18'e düşmüştür.

Soğuk deformasyon sonucunda kazanılan sertlik ve mukavemet değerlerinin abrasiv aşınma dayanımına önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Aşınma yükünün ve aşındırıcı tane boyutunun artması ile tüm numunelerde aşınma miktarının arttığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. KAYALI, E.S. ve ENSARİ, C., 1986, *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
2. International Copper Study Group, 2010, *The World Copper Factbook* [online], ICSG-Lisbon, <http://www.icsg.org/images/stories/pdfs/2010Worldcopperfactbook.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 12 Şubat 2011].
3. KOÇAK, H., 2006, *Bakır Alaşımları El Kitabı*, Sağlam Metal, İstanbul.
4. ARSLAN, O., 2006, *Bakır Sektör Profili*, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul.
5. CHEREMISINOFF, N.P., 1996, *Material Selection Deskbook*, Noyes Publication, New Jersey, 978-0-8155-1400-8.
6. YAZAN, H.A., AKAR, A., ÖZMERİH, L., 2006, *Bakır ve Bakır Ürünlerinin Kullanım Alanları*, M.T.A. Enstitüsü Teknoloji Şubesi, <http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/pdf>, [Ziyaret Tarihi: 23 Temmuz 2010].
7. DPT Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 2001, *Metal Madenler Alt Komisyonu Bakır-Pirit Çalışma Grubu Raporu*, Ankara, 975-19-2861-3.
8. AKGÜN, S., 2006, *Bakır ve Alaşımları* [online], Gazi Üniversitesi, http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/bakir_ve_alasimleri.html, [Ziyaret Tarihi: 28 Temmuz 2010].
9. VURAL, M., 2005, *EÜT 231 Üretim Yöntemleri* [online], İstanbul Teknik Üniversitesi, <http://web.itu.edu.tr/vuralmu/eut18.pdf>. [Ziyaret Tarihi: 14 Ağustos 2010].
10. AY, İ., 2004, *İmalat Yöntemleri II*, Balıkesir Üniversitesi, <http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/iy2/lecture10.pdf>, [Ziyaret Tarihi: 26 Ağustos 2010].
11. BRYNE, J.G., 1965, *Recovery, Recrystallization and Grain Growth*, The Macmillan Co., New York.
12. ASKELAND, D.R., 1990, *The Science and Engineering of Materials*, Chapman & Hall, London, 0534, 553966

13. ÜN, H., 2007, *Metallerde Ergime ve Kristalleşme*, Malzeme Bilgisi 3, Pamukkale Üniversitesi, http://hun.pau.edu.tr/ders_notlari/malzeme_bilgisi/Malzeme_ders3_kristal_olusumu.pdf, [Ziyaret Tarihi: 22 Eylül 2010].
14. REED-HILL, R.E., 1973, *Physical Metallurgy Principles*, Litton Educational Publishing, New York, 0534, 921736
15. AVNER, S.H., 1974, *Introduction to Physical Metallurgy*, Mc Grow-Hill Book Company, New York, 007, 0024952
16. SMALLMAN, R.E., 1976, *Modern Physical Metallurgy*, Butterworth & Co. Ltd., London, 0750, 645644
17. DIETER, G.E., 1976, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 0070, 168938
18. BOZKURT, N., 1994, *Isıl İşlem*, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi Matbaası, İstanbul, 975, 404449
19. GUY, A.G., 1972, *Introduction to Material Science*, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, 0070, 253102
20. CLARK, S.D. ve VARREY, W.R., 1962, *Physical Metallurgy for Engineers*, Litton Educational Publishing Inc., New York, 8123900071
21. LIU, L., BAKER, I., 1993, The Dependence of Recrystallization Temperature and Stored Energy on Rolling Strain in Polycrystalline Copper, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 28, 197-200.
22. HUMPHREYS, F.J., HATHERLY, M., 1995, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Oxford, Pergamon, 0080441645
23. KISSINGER, H.E., 1957, *Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis*, Anal. Chem., 29, 1702-6.
24. OZAWA, T., 1992, Estimation of Activation Energy by Isoconversion Methods, *Thermichim. Acta.*, 203, 159-65.
25. ÇAVUŞ, H., 2010, *Amonyumheptamolibdatın ısıl bozunma ürünlerinin hava, inert ve kendi oluşturdukları gaz ortamlarında ısıl bozunma kinetiği*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
26. MITTEMEIJER, E.J., 1992, Analysis of the Kinetics of Phase Transformations, *J. Mater. Sci.*, 27, 3977-87.
27. NIELSEN, J.P., 1965, *The Grain Coalescence Theory, in Recrystallization, Grain Growth and Textures*, Papers Presented at a Seminar of the ASM, Ohio, 141-165.

28. HUTCHINGS, I.M., 1992, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge, 0-340-56184.
29. DIN 50320, 1979, *Verschleiss*.
30. ASM HANDBOOK, 1975, *Failure Analysis and Prevention 8th Edition, Vol. 10, ASM, Metals, USA, 0871704951*
31. YILDIRIM, S., 27 MnSi 5 ve MnNiMoCr 5 4 kalite zincir çeliklerinin mekanik ve aşınma özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü
32. KAYALI, E.S., ÇİMENOĞLU, H., 1990, *Hasar Analizi Semineri*, TMMOB Met. Müh. Od., 101-107.
33. ÖZCAN, E., 2001, *CNC Tezgahlarda kullanılan kesici takımlarda takım aşınmasının kesme performansına dinamik etkileri*, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
34. ÇELİK, H., 1991, *Kaynak edilebilen kobalt ve demir esaslı alaşımların yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışları*, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü
35. BENCHABANE, G., BOUMERZOUG, Z., THIBON, I., GLORIANT, T., 2008, Recrystallization of Pure Copper Investigated by Calorimetry and Microhardness, *Materials Characterization*, 59, 1425-1428.
36. KRUGER, P., WOLDT, E., 1992, The Use of An Activation Energy Distribution for The Analysis of The Recrystallization Kinetics of Copper, *Acta Metall. Mater.* Vol. 40, No. 11, 2933-2942.
37. HUTCHINSON, B., JONSSON, S., RYDE, L., 1989, On The Kinetics of Recrystallization in Cold Worked Metals, *Scripta Metallurgica*, Vol. 23, 671-676.
38. MOHAMED, G., BACROIX, B., 2000, Role of Stored Energy in Static Recrystallization of Cold Rolled Copper Single and Multicrystals, *Acta Mater.*, Vol. 48, 3295-3302.
39. DONTU, S., VORA, M.M., LAHIRI, S.H., TOMPSON, C.V., YI, S., 2003, Activation Energy Determination for Recrystallization in Electroplated-Copper Films Using Differential Scanning Calorimetry, *Journal of Electronic Materials*, Vol 32., 531-536.
40. GAO, W., BELYAKOV, A., MIURA, H., SAKAI, T., 1998, Dynamic Recrystallization of Copper Polycrystals with Different Purities, *Materials Science and Engineering*, A265, 233-239.
41. HONG, S.H., JEONG, H.T., CHOI, C.H., LEE, D.N., 1996, Deformation and Recrystallization Textures of Surface Layer of Copper Sheet, *Materials Science and Engineering*, A229, 174-181.

42. YILDIRIM, S., 2001, *Saf bakırın yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışı: dinamik yeniden kristalleşme ve dinamik tane büyümesi*, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü.
43. BAUDIN, T., ETTER, A.L., PENELLE, R., 2006, Annealing Twin Formation and Recrystallization Study of Cold-Drawn Copper Wires from EBSD Measurements, *Materials Characterization*, Vol 58, 947-952.
44. KAYALI, E.S., ENSARİ, C., DİKEÇ, F., 1996, *Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri*, İ.T.Ü. Rektörlüğü, Sayı 1580, 975-561-098-7.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladıktan sonra 2004 yılında İstanbul Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde başladığı lisans eğitimini 2008 yılında tamamladı. 2008 yılında İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans eğitimine başladı.