

19377

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEL ÇEKME İŞLEMİNDE BAKIRIN VE BAKIR OKSİT
İNKLUZYONLARININ DEFORMASYON DAVRANIŞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Mustafa M. ARIKAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 HAZİRAN 1991

Tezin Savunulduğu Tarih : 3 TEMMUZ 1991

Tez Danışmanı : Prof.Dr. E.Sabri KAYALI

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Feridun DİKEÇ

: Y.Doç.Dr. H. ÇİMENOĞLU

TEMMUZ 1991

T. C.

Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

ÖNSÖZ

Tezimin her aşamasında fikir ve önerilerinden faydalandığım saygıdeğer hocam Sayın E. Sabri KAYALI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin yürütülmesinde bana her bakımdan yardımcı olan Sayın Y. Doç. Dr. Hüseyin ÇİMENOGU'na ve yine büyük yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşlarım Yük. Müh. S. Mohammed KHOEE'ye, Müh. Selim YILDIRIM'a ve Teknisyen Mızrap CANIBEYAZ'a teşekkür ederim.

Ayrıca deney numunelerini temin ettiğimiz SARKUYSAN A.Ş.'ne, görüntü analizi deneylerini yaptığımız Küçük-çekmece Nükleer Araştırma Merkezinden Sayın Doç. Dr. Bedri İPEKOĞU'na ve Ahmet AKŞİT'e, numunelerin parlatılması aşamasında yardımcı olan TÜBİTAK'tan Sayın Dr. Sakin ZEYTİN'e ve Müh. Hasan ÇEP'e de teşekkür etmek isterim.

HAZİRAN 1991

Met. Müh. Mustafa M. ARIKAN

İ Ç İ N D E K İ L E R

ÖZET	v
SUMMARY	vi
BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM 2. DEFORMASYON TÜRLERİ	2
2.1. Sıcak işlem	2
2.2. Soğuk işlem	5
2.3. Soğuk işlemdeki Deformasyon Davranışının Belirlenmesi	8
2.3.1. Kademeli Soğuk Deformasyona Uğratılmış Malzemelerin Akma Diyagramı	9
2.3.2. Deformasyon Sertleşmesi Hızı	9
2.3.3. Deformasyon Sertleşmesi Üssü	10
BÖLÜM 3. METALİK MALZEMELERİN DEFORMASYON DAVRANIŞINA İNKLÜZYONLARIN ETKİSİ	12
3.1. Metallerde İnküzyon Belirleme Metodları Ve Görüntü Analizi	12
3.2. Deformasyon Sırasında İnküzyonların Davranışı	23
BÖLÜM 4. BAKIR TEL ÜRETİMİ	28
4.1. Bakır Türleri	28
4.2. Bakır Çubuk Üretim Metodları	31
4.3. Bakır Çubukların Kalite Kontrolü	36
BÖLÜM 5. BAKIR TEL ÜRETİMİNDE MİKROYAPISAL DEĞİŞİMLER VE İNKLÜZYONLARIN DAVRANIŞI	37

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
6.1. Kullanılan Malzemeler	40
6.2. Kullanılan Cihazlar	40
6.3. Sertlik Deneyleri	40
6.4. Çekme Deneyleri	41
6.5. Burma Deneyleri	41
6.6. Metalografik Çalışmalar	41
6.7. Görüntü Analizi Deneyleri	43
BÖLÜM 7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME	44
BÖLÜM 8. GENEL SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	59



ÖZET

Bu çalışmada tel çekme işlemi sırasında oksijenli bakırın deformasyon davranışı ile bakır oksit inklüzyonlarının deformasyon özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla SCR prosesinde sürekli döküm ve haddeleme metodu ile üretilmiş 8 mm çapındaki oksijenli bir bakır filmasından soğuk tel çekme ile elde edilmiş çeşitli çaplardaki bakır teller kullanılmıştır. Bu tellerde bulunan bakır oksit inklüzyonlarının deformasyon özelliklerini belirlemek için görüntü analizi metodu ile tellerin enine ve uzunlamasına kesitlerinde düzlemsel inklüzyon yoğunluğu, miktarı ve boyutları ölçülmüştür.

Ayrıca tel çekmedeki soğuk işlemin malzemenin mekanik özelliklerine etkisini tesbit etmek için; sertlik, çekme ve burma deneyleri ile çeşitli mekanik özellikleri de belirlenmiştir.

Farklı çaplardaki tellerin çekme deneyiyle belirlenen akma mukavemetinin (σ), tel çekmedeki deformasyon oranına (ϵ) göre çizilen akma diyagramının analizinden, bakır telin tel çekme sırasındaki deformasyon davranışının, soğuk işlem için uygulanan en genel denklemlerden biri olan Holloman denklemi ile karakterize edilemeyeceği tesbit edilmiştir.

Deformasyon sertleşmesi hızının (θ) artan tel çekme deformasyonu ile bir minimum ve bir maksimum yaptığı belirlenmiştir. Literatürde θ 'nın maksimuma ulaştığı deformasyon oranının tel çekme sırasında meydana gelen dinamik toparlanma olayı ile ilgili olduğu belirtilmektedir.

Bakır oksit inklüzyonlarının deformasyon özellikleri ile ilgili olarak, artan tel çekme deformasyonu ile bu inklüzyonların boyutlarının hem enine hem de uzunlamasına kesitlerde azaldığı, birim alana düşen ortalama sayılarının ise uzunlamasına kesitte arttığı gözlenmiştir. Bu ise bakır oksit inklüzyonlarının tel çekme işlemi sırasında kırılarak küçüldüğünü ve sayılarının arttığını göstermektedir.

DEFORMATION BEHAVIOUR DURING DRAWING OF COPPER WIRES AND COPPER OXIDE INCLUSIONS

SUMMARY

Deformation behaviour during drawing of copper wires and copper oxide inclusions were investigated in this work. Most copper rods are now produced using continuous casting and hot working processes. Then copper wires have traditionally been manufactured by wire drawing which is a cold working process.

Hot working is generally applied to the metals in the first steps of the metal working. Recovery processes occur in the hot working and large strains can be reached without strain hardening.

Cold working is applied with plastic deformation methods to the materials. Plastic deformation both provides dislocation movement and causes new dislocation occurrence. The cause of the increase in the strength after the cold working is strain hardening. Strain hardening occurs as a result of interactions of the dislocations each other and various obstacles which prevent their movement. Metal's strength and hardness increases and ductility decreases after the cold working.

Because inclusions can significantly influence material properties and behaviour, they have been studied extensively. Inclusions are usually categorized according to origin, i.e., exogenous or indigenous. Exogenous inclusions come from external sources such as slag or refractories. Indigenous inclusions arise from naturel processes, such as deoxidation or precipitation of sulfides. Most inclusion studies concentrate on the indigenous types because they can be controlled by the melting practice and they are more numerous and more predictable in distribution.

Indigenous inclusions are usually classified by composition, such as oxides or sulfides. Inclusions are also categorized by size, i.e., microscopic or macroscopic. In general, indigenous inclusions are small. Macroscopic inclusions are usually exogenous in origin, but small exogenous inclusions are also observed.

A variety of methods have been used to measure or describe inclusion content. These methods involve the following:

- Chart comparison
- Counting
- Volume fraction determination.

Inclusion analysis requires quantification of the amount, size, shape and distribution of inclusion types.

Most standart charts used in inclusion analysis depict fields at 100X magnification, thus providing a large field of view for rapid assessment of a large surface area. For steels with low inclusion content, higher magnifications may be required for detection and classification. It is very difficult to translate ratings at higher magnifications to 100X standarts.

In examining a sample, the entire polished surface, or a specific area, is usually examined starting at one corner. Contiguous field selection's employed. Ratings can be qualitative, i.e., the operator rates only the worst conditions, or quantitative, i.e., every field is rated.

Chart methods are generally used in two ways. The simplest procedure is to find the worst fields of each type that are depicted in the chart and rate them. Then the averages of these ratings on each sample are calculated to represent the heat. The second method requires rating every field within a given area on each sample.

Numerous nonchart methods have been proposed for rating inclusion content. In one of these methods based on the stereological principles, a point-counting procedure is used. In this standart, an eyepiece reticle with 20 horizontal and vertical lines is used. Field selection is performed randomly, and at least 30, but preferably 60 fields are measured. The number of grid

points occupied by inclusions is counted and volume fraction is calculated by means of a formula. 400X magnification is recommended.

Although stereological methods have the potential for rigorously describing inclusions, manual determination of all the required parameters with adequate accuracy is quite tedious. Therefore, automation answers a long-recognized need in microstructural analysis for more precise data for quality control and structure-property studies. Because use of automated devices eliminates operator fatigue and reduces analysis time, more measurements can be conducted more accurately. This is important because materials are not homogenous. To obtain better-quality data, a larger sample area and more samples must be analyzed. Thus, image analysis can provide better statistical accuracy and more meaningful results.

Image analysis consists of sample selection and preparation, image processing, measurement, and data analysis and output.

Images can be provided from diverse sources; however, the most common input peripheral is the optical microscope. All analyzers use a scanner to display the image on a TV screen. Each system uses a central electronic processor for image detection and measurement of stereological and nonstereological parameters. Most systems incorporate data-handling devices, which range from desktop calculators to minicomputers. Finally, each system has a device to produce a hard copy of the data.

The primary mode of feature detection is gray-level thresholding. Setting the threshold to detect only gray levels within specific ranges enables selective detection of constituents. More sophisticated image analyzers can perform feature-specific measurements; that is, each distinct feature in the field is measured individually.

The amount, size, distribution, type and shapes of the inclusions are important while their effects on the mechanical properties are detected. Inclusions cause the occurrence of internal cracks in the structure of steel. During the plastic deformation of the steels, sulfide inclusions fracture or creates voids separating

at the matrix-sulfide interfaces. The fracture of steel takes place by means of the joining of these interface voids.

The major uses of copper wires studied in this work are based principally on its high electrical conductivity. Since this property is adversely affected by almost all other elements which go into solid solution in copper, metal purity becomes of major concern. When the electrolytically refined copper is melted, it picks up oxygen from gases in contact with the liquid metal. Oxygen is too small an atom to go into substitutional solid solution and too large an atom to be dissolved interstitially to any degree. Thus it exists in solidified copper as Cu_2O , cuprous oxide. The major differentiation between the several grades of unalloyed copper is the amount of oxygen present and/or the amount of residual deoxidizer element. The grades of unalloyed copper can be categorized as electrolytic tough pitch copper (ETP), oxygen-free high conductivity copper (OFHC), deoxidized high-phosphorus copper (DHP), deoxidized low phosphorus copper (DLP), silver bearing copper.

Copper wire rods have traditionally been manufactured mainly by hot rolling wire bars or extruding billets, but in the recent years, the development of new continuous casting techniques to produce copper wire rods has displayed conventional procedures so the hot rolling process of copper wire bars and continuous cast billets could be exchanged for a combination of continuous casting and rolling in the same heat. The close connection between continuous casting and direct hot rolling of the cast strand takes advantage of the high temperature of the strand for the rolling process, thereby reducing energy consumption. In addition, smaller cast sections close to the dimensions of the final products can be produced and these cast products can be further processed without hot rolling. Most copper wire rods are now produced using continuous casting and rolling, for example, Southwire Continuous Rod (SCR), Dip Forming, Contirod, Outokumpu and Properzi processes.

Most of the deformation in copper between $\epsilon=0.25$ to $\epsilon=1$ occurs by microband formation during the drawing of the wire rod. Macro shear bands frequently were found in plain strain deformation processes, such as rolling, after moderate strains ($\epsilon>1$). At large strains ($\epsilon>2$), shear bands assume dominant role in deformation of copper. Dynamic recovery occurs at large strains and

evidence of dynamic recrystallization has been observed at very large strains ($\epsilon > 4$).

The aim of this study is to investigate the deformation behaviour during drawing of copper wires and copper oxide inclusions. For this purpose, the copper wires drawn to different diameters between 8 - 1.8 mm at 10 passes were used. These wires were drawn from a copper wire rod (8 mm in diameter) produced by SCR process which contains 393 ppm oxygen. At the wire drawing process, mean area reduction was about 30 % at each pass. Total reduction of area was 94.9 %.

To determine the mechanical properties of cold drawn wires, samples were taken after each drawing operation for hardness, tensile and torsion tests.

Hardness tests were performed on a microhardness testing machine. Tensile and torsion tests were performed on a hydraulic tensile testing and a torsion testing machines respectively. Three tests were carried out after each drawing operation and mechanical properties were determined as the average of the three results.

Samples for metallographic examinations were taken from drawn wires in various diameters. Longitudinal and cross sections were prepared from these samples. All specimens used for optical metallography were prepared using standart polishing techniques.

Inclusion analyses were performed on polished cross and longitudinal sections using an Optomax V image analyzer.

Wires at each strain were subjected to microhardness test and observed that hardness first increased then stayed constant after a certain strain value ($\epsilon = 1.2$) with the increasing drawing strain.

According to the data obtained from the tensile test of the copper wires; it was detected that the yield strength increased and percent elongation decreased with the increasing drawing strain up to a certain strain value ($\epsilon = 1.4$), then did not change after this value.

The flow curves of the materials were obtained as the envelope of tensile yield stress versus wire drawing true strain curves. The averages of the yield strengths of three tensile tests after each drawing operation were plotted as flow stress against true strain which is the amount of deformation introduced by wire drawing.

It was observed that the material had two different strain hardening exponent values when the flow curve was plotted in Log-Log scale, and it was also understood that the flow curve could not be characterized by the Holloman equation. Also it was detected that the strain hardening rate curve had a minimum at $\epsilon=1.8$ and a maximum at $\epsilon=2.5$. The maximum at $\epsilon=2.5$ is related to the dynamic recovery process which occurs during the wire drawing reported in the literature.

Number of twist to failure of the copper wires stayed constant up to a certain strain value ($\epsilon=0.8$) then increased with the increasing wire drawing strain.

It was observed that the longest dimension and breadth values of copper oxide inclusions decreased at both cross and longitudinal sections with the increasing drawing strain. Average number of these inclusions per unit field did not change at the cross section, but increased at longitudinal section of the copper wires with the increasing drawing strain. It can be concluded from these results that the copper oxide inclusions in the tough-pitch copper break and become smaller at both sections during the wire drawing operation and their numbers increase at the longitudinal section with the increasing drawing strain.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bakıra plastik şekil verme sırasında bakır matris şekil değişimine uğrarken bakırın içinde genellikle oksitler şeklinde bulunan inklüzyonlar da tatbik edilen deformasyona karşı bir reaksiyon gösterirler. Bu çalışmada bakır içindeki inklüzyonların tatbik edilen deformasyon ile nasıl bir davranış gösterdiklerini belirlemek amaçlanmıştır. Bu amaçla farklı çaplara çekilmiş bakır tellerde enine ve uzunlamasına kesitlerde "görüntü analizi (image analysis)" yapılmıştır. Bu analizde malzeme içindeki inklüzyonların sayısı, düzlemsel yoğunluğu ve boyutları incelenmiş ve bulunan bu değerlerden çeşitli bilgiler türetilerek inklüzyonların deformasyon davranışı belirlenmeye çalışılmıştır.

Aynı zamanda bu malzemeler üzerinde çeşitli mekanik deneyler yaparak tel çekmede soğuk işlemin malzemenin mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi de amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2. DEFORMASYON TÜRLERİ

Metalik malzemelerin plastik deformasyonu en genel olarak belirli düzlemlerde ve doğrultularda atomların kayması ile gerçekleşir. Kaymanın kolaylıkla olmadığı durumlarda ise deformasyona ikizlenme katkıda bulunabilir. Yüksek sıcaklıklarda ve düşük deformasyon hızlarında çok kristalli metalik malzemelerin deformasyonu ise, tane sınırlarının kayması veya atomların yayınma ile yerdeğiştirmesi yani yayınma sürünmesi mekanizmaları ile olur. Sonuç olarak, metalik malzemelerin deformasyon mekanizmaları,

- Kayma
- ikizlenme
- Tane sınırlarının kayması
- Yayınma sürünmesi

dir.

Metalik malzemelerin elastik veya plastik deformasyona karşı direnci atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinden ileri gelmektedir. Plastik deformasyonu gerçekleştiren işlemler, metalik malzemelerin yapısındaki nokta, çizgi ve yüzey hataları gibi yapı hataları ile de ilgilidir [1].

2.1. Sıcak işlem

Sıcak işlem, deformasyon işlemi sırasında toparlanma işlemlerinin olduğu ve bundan dolayı deformasyon sertleşmesi olmadan büyük deformasyonların sağlandığı sıcaklık ve deformasyon hızı şartlarında yapılan deformasyon ile ilişkilidir. Tipik olarak bir döküm ingotu dövülmüş ürüne dönüştürmenin ilk adımında haddeleme, ekstrüzyon

veya dövme gibi sıcak deformasyon işlemleri kullanılır. Sıcak işlemdeki birim şekil değişimi çekme veya sürünme deneylerindeki göre büyüktür ($\epsilon \approx 2-4$). Sıcak işlem genellikle $0.6T_m$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda ve $0.5-500 \text{ s}^{-1}$ mertebesindeki yüksek deformasyon hızlarında yapılır (T_m ; °K olarak ergime sıcaklığı) [2].

Sıcak işlem metale şekil vermek için gerekli olan enerjinin azalmasına yolaçmaktan başka, çatlama olmadan akma kabiliyetinin de artmasına yolaçar, aynı zamanda sıcak işlem sıcaklıklarındaki hızlı yayınma döküm-ingot yapısının kimyasal bileşimindeki homojensizliğin azalmasını da sağlar. Boşluklar ve poroziteler, bu boşlukların kaynamasıyla giderilir ve kalın sütunsal döküm taneleri parçalanır ve daha küçük eşeksenli yeniden kristalleşmiş taneler halinde rafine edilir. Sıcak işlem dolay oluşturan yapıdaki bu değişiklikler, döküm haline göre süneklik ve toklukta bir artışa sebep olur.

Bununla beraber sıcak işlemin bazı dezavantajları da vardır. Genellikle yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı için metal ve fırın atmosferi arasındaki reaksiyonlar problem olurlar. Olağan olarak sıcak işlem havada yapılır ve oksidasyon oluşur ve önemli bir miktarda metal kaybı olabilir. Titanyum gibi reaktif metaller oksijenle şiddetli bir şekilde gevrekleşirler, bu yüzden koruyucu bir atmosferde sıcak olarak şekil verilerek havadan korunmalıdır. Sıcak işlenmiş çeliğin yüzeyindeki karbonsuzlaşma ciddi bir problem olabilir ve karbonsuzlaşmış tabakayı kaldırmak için sık sık iyi bir yüzey işleme gereklidir. Oksitli ortamda haddeme sıcak haddelenmiş ürünlerde iyi yüzey elde edilmesini zorlaştırır ve genleşme ve büzölmelere müsaade edildiği için sıcak işlenmiş fabrika ürünleri için boyutsal toleranslar soğuk işlenmiş olanlarınkinden daha büyüktür. Sıcak işlenmiş

metallerin yapısı ve özellikleri genellikle soğuk işlenmiş ve tavlanmış metallerde olduğu gibi bütün kesit boyunca pek üniform değildir. Deformasyon yüzey tabakalarında daha büyük olduğu için, bu bölgede metal daha küçük, yeniden kristalleşmiş bir tane boyutuna sahip olacaktır. Soğuma sırasında iç kısımlar dış kısımlardan daha uzun bir süre yüksek sıcaklıklarda kalacağından, deformasyon sıcaklığından yavaş olarak soğuyan büyük parçaların iç kısımlarında tane büyümesi oluşabilir.

Bir metalin sıcak işlem için alt sıcaklık sınırı; metalin bulunduğu sıcaklıktaki zaman içinde deformasyon sertleşmesini gidermek için yeniden kristalleşme hızının yeterince hızlı olduğu en düşük sıcaklıktır. Belli bir metal veya alaşım için, alt sıcak işlem sıcaklığı; deformasyon miktarı ve metalin bulunduğu sıcaklıktaki zaman gibi faktörlere bağlıdır. Deformasyon miktarı arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı azaldığı için, sıcak işlem için alt sıcaklık sınırı büyük deformasyonlar için azalır.

Sıcak işlem için üst sınır ergime yada aşırı oksidasyonun olduğu sıcaklık ile belirlenir. Genellikle maksimum deformasyon sıcaklığı ergime sıcaklığının 50°C altı ile sınırlıdır. Bu, düşük ergime noktalı malzemenin segrege olmuş bölgeler ihtimaline karşı tedbirli davranmak içindir.

Çoğu sıcak deformasyon işlemi çok sayıda paso veya adımda yapılır. Genellikle ara pasolar için deformasyon sıcaklığı, düşük akma gerilmesi ile sağlanan ekonomi avantajından faydalanmak için minimum deformasyon sıcaklığının oldukça üstünde tutulur. Bu sıcaklıklarda yeniden kristalleşmeden sonra bir miktar tane büyümesi oluşumu muhtemeldir. Genellikle ince tane boyutlu bir ürün arzu edildiği için yaygın uygulama; son paso için

deformasyon sıcaklığını soğuma sırasında tane büyümesinin ihmal edilebileceği noktaya düşürmektir. "Bitiş sıcaklığı" genellikle minimum yeniden kristalleşme sıcaklığının az üzerindedir. Yeniden kristalleşmiş küçük tane boyutu sağlamak için son pasodaki deformasyon miktarı rölatif olarak büyük olmalıdır.

Sıcak işlemden kararlı deformasyon hızının sıcaklık ve gerilmeye bağımlılığı [2],

$$\dot{\epsilon}_s = A(\sin h \alpha \sigma)^{n'} e^{-Q/RT} \quad (2.1)$$

olarak verilmektedir. Burada A, α ve n' deneysel olarak tesbit edilmiş sabitelerdir. Metale bağlı olarak, sıcak işlemden yumuşamadan sorumlu olan iki mekanizma vardır. Alüminyum ve alfa demirde "dinamik toparlanma" yumuşama mekanizmasıdır, sürünme deformasyonunda olduğu gibi çapraz kayma ve tırmanma ile iyi gelişmiş bir alttane yapısının meydana gelmesi ile oluşur. Sıcak işlem için aktivasyon enerjisi, sürünme ve yayınma için olana eşittir. Düşük istif hatası enerjili metallerde (bakır, nikel ve östenitik paslanmaz çelik), sıcak deformasyondaki yumuşama için aktivasyon enerjisi sürünme için olandan daha büyüktür. Bu metaller için yumuşama prosesi "dinamik yeniden kristalleşme"dir.

2.2. Soğuk işlem

Soğuk işlem malzemeye plastik şekil verme metodları ile tatbik edilir. Plastik şekillendirme hem dislokasyonların hareketini sağlar, hem de yeni dislokasyonların oluşumuna sebep olur. Soğuk işlem sonunda mukavemetin artmasının sebebi deformasyon sertleşmesidir. Deformasyon sertleşmesi, dislokasyonların birbirleri ve dislokasyonların hareketini zorlaştıran çeşitli engeller ile etkileşimi sonucunda olur.

Soğuk işlem ile malzeme mukavemetindeki artış soğuk işlem miktarı ile orantılıdır. Tavlanmış bir malzemede dislokasyon yoğunluğu $10^6-10^8 \text{ cm}^{-2}$ civarındadır. Soğuk işlem görmüş bir malzemede dislokasyon yoğunluğu yaklaşık olarak 10^{12} cm^{-2} değerine ulaşmıştır [1].

Soğuk işlem sonucunda malzemenin taneleri deformasyon yönünde uzar ve belirli kristallografik doğrultularda yönlenirler. Tanelerde dislokasyon yoğunluğunun artması yanında bir çok atom boşluğu da meydana gelir, aynı zamanda malzemenin yoğunluğunda bir miktar azalma görülür.

Soğuk işlem sonucunda malzeme yapısında meydana gelen dislokasyon yoğunluğunun, malzemenin mukavemetine etkisi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanabilir [1,2]:

$$\sigma_p = \sigma_1 + \alpha G b \phi^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

Burada;

σ_p : Plastik deformasyon gerilmesi

σ_1 : Sürtünme gerilmesi

G : Kayma elastiklik modülü

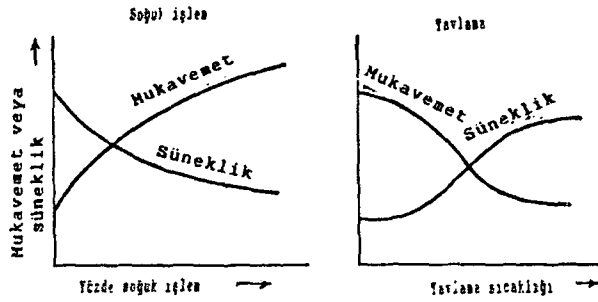
b : Burgers vektörü

ϕ : Dislokasyon yoğunluğu

α : Bir sabit (genellikle 0.3 ile 0.6 arasındadır)

Soğuk işlem sırasında sarfedilen enerjinin bir kısmı dislokasyon enerjisine çevrilir, bir kısmıysa, ısı halinde kaybolur. Böylece enerjinin büyük bir kısmı dislokasyon enerjisi halinde malzeme içinde depo edilmiş olur. Soğuk işlem ile bir metalin mukavemet ve sertliğinde artış, sünekliğinde ise azalma olur. Soğuk deformasyon aşırı miktarda olduğu zaman, istenen boyut ve şekle gelmeden metal çatlar. Bu yüzden, bu gibi güçlüklerden kaçınmak için, soğuk deformasyon işlemleri

genellikle, soğuk işlem görmüş metali yumuşatmak ve yeniden süneklik kazandırmak için ara tavlama işlemleri ile birkaç adımda yapılır. Bu tekrarlı soğuk işlem-tavlama sırası genellikle "soğuk işlem-tavlama çevrimi" olarak adlandırılır. Şekil 2.1 şematik olarak bu çevrimdeki özellik değişimlerini göstermektedir.



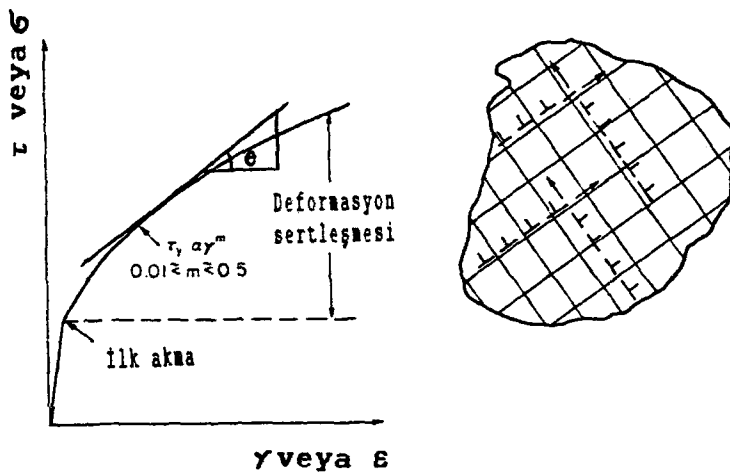
ŞEKİL 2.1. Soğuk işlem-Tavlama Çevriminde Mukavemet ve Sünekliğin Tipik Değişimi [2].

Soğuk işlem-tavlama çevrimini uygun şekilde ayarlayarak parça, istenen derecede bir deformasyon sertleşmesi ile üretilebilir. Eğer nihai işlenmiş ürünün tam tavllanmış malzemeden daha mukavemetli olması gerekiyorsa o zaman son işlem, istenen mukavemeti sağlayacak uygun bir derecede deformasyonlu, bir soğuk işlem adımı olmalıdır. Muhtemelen bu işlemi, kalıntı gerilmeleri gidermek için bir gerilmeden kurtulma işlemi takip eder. Nihai üründe belli bir mukavemet-süneklik kombinasyonunu sağlayacak böyle bir prosedür, aynı özellik kombinasyonlarını tamamen soğuk işlenmiş bir malzemeyi kısmen yumuşatma ile başarmaya çalışmaktan daha başarılıdır, çünkü yeniden kristalleşme işlemi rölatif olarak hızlı bir şekilde ilerler ve fırındaki küçük sıcaklık dalgalanmalarına karşı oldukça hassastır. Eğer nihai parçanın tamamen yumuşatılmış durumda olması istenirse, o zaman son soğuk işlem adımını bir tavlama işlemi takip eder.

Şerit ve tel gibi soğuk işlenmiş ürünleri, son tavlamayı takip eden soğuk deformasyon derecesine bağlı olarak farklı sertliklerde üretmek adettir. Soğuk işlenmiş durum, tavllanmış (yumuşak) durum, çeyrek sert, yarı sert, üç-çeyrek sert, tam sert ve aşırı sert olarak adlandırılır. Her sertlik durumu, tavlamayı takip eden farklı bir soğuk kesit daralması yüzdesinde elde edilir.

2.3. Soğuk işlemdaki Deformasyon Davranışının Belirlenmesi

Kristaller akma gösterdiğinde, malzemedeki dislokasyonlar hareket ediyor demektir. Çoğu metaller birkaç kayma düzlemine sahiptir; meselâ {111} düzlemlerinde kayma gösteren YMK yapı dört kayma düzlemine sahiptir. Bu kesişen düzlemlerdeki dislokasyonlar birbirleriyle etkileşim göstererek birbirlerinin hareketini engeller ve engellerde yığılarak dislokasyon yoğunluğunun artmasına sebep olurlar. Sonuç; gerilme-birim şekil değişimi eğrisinde akmadan sonra keskin bir artış olan, deformasyon sertleşmesidir (Şekil 2.2).



ŞEKİL 2.2. Dislokasyonların Kesişmesinin Sebebi Deformasyon Sertleşmesidir [3].

2.3.1. Kademeli Soğuk Deformasyona Uğratılmış Malzemelerin Akma Diyagramı

Malzemeler deformasyona uğradıkça oluşan deformasyon sertleşmesinden dolayı akma mukavemetleri artar ve çeşitli deformasyon kademelerindeki "gerilme-birim şekil değişimi" eğrilerinin akma gerilmesi noktaları birleştirildiğinde, yani tel çekmedeki kesit küçültmelerindeki gerçek birim şekil değişimine karşı akma mukavemetleri işaretlendiğinde o malzemeye ait "akma diyagramı" elde edilir. Akma diyagramının incelenmesi ile deformasyon sertleşmesinin büyük deformasyon oranlarında doyuma ulaştığı yani akma diyagramının belli bir deformasyon değerinden sonra YMK metaller için belli bir gerilme seviyesinde hemen hemen sabit kaldığı görülür. Malzemenin deformasyon sertleşmesi üssü n 'de artan deformasyon ile birlikte sıfıra doğru azalır ve bu değere yakın bir değerde hemen hemen sabit kalır (Şekil 2.2). Eğer birim şekil değişimi plastik kararsızlık için gerekli olan değerden büyük olursa kırılma oluşur [4]. Böylece düşük n değerleri malzemenin kırılma ihtimalini arttırır. Malzemeye daha fazla şekil verebilmek için tavlama işlemi yapmak gereklidir.

2.3.2. Deformasyon Sertleşmesi Hızı

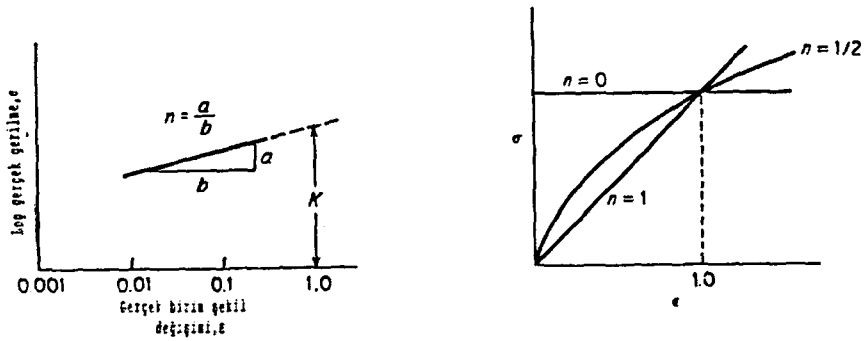
Deformasyon sertleşmesi hızı (θ) , $(\sigma-\epsilon)$ eğrisinin üniform plastik deformasyon bölgesinin eğiminden bulunabilir, yani $\theta = d\sigma/d\epsilon$ bize deformasyon sertleşmesi hızını vermektedir. Genellikle SPH metallerin deformasyon sertleşmesi hızı kübik yapıllı metallerinkinden daha düşüktür. Sıcaklığın artışı deformasyon sertleşmesi hızını düşürür [2].

2.3.3. Deformasyon Sertleşmesi Üssü

Birçok metalin üniform plastik deformasyon bölgesindeki (σ - ϵ) eğrisi, aşağıdaki basit bağıntı ile ifade edilebilir:

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2.3)$$

Holloman bağıntısı olarak bilinen bu bağıntıda n , deformasyon sertleşmesi üssü ve K ise mukavemet katsayısıdır. Maksimum yüke kadar olan gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi verileri logaritmik eksenlerde bir diyagram üzerine işaretlenecek olursa, eğer bu veriler yukarıdaki (2.3) denkleminde uyuyorsa çizilen diyagramın düz bir doğru vermesi gerekmektedir (Şekil 2.3.a). Bu doğrunun eğimi n 'yi verir ve K ise $\epsilon=1$ 'deki gerçek gerilmedir. Deformasyon sertleşmesi üssü $n=0$ 'dan (ideal plastik katı) $n=1$ 'e (elastik katı) kadar değerler alabilir (Şekil 2.3.b). Çoğu metaller için n , 0.10 ile 0.50 arasında değerlere sahiptir (Tablo 2.1).



ŞEKİL 2.3. a. Gerçek Gerilme-Birim Şekil Değişimi Eğrisinin Log-Log İşaretlenmesi, b. $\sigma = K\epsilon^n$ ilişkisinin Çeşitli Şekilleri [2].

TABLO 2.1. Oda Sıcaklığında Metaller için n ve K'nın Değerleri [2].

Metal	Durum	n	K, MPa
%0.05 C'lu çelik	Tavlanmış	0.26	530
SAE 4340 çeliği	Tavlanmış	0.15	640
%0.6 C'lu çelik	Su verilmiş ve 540°C'da temp.	0.10	1570
%0.6 C'lu çelik	Su verilmiş ve 705°C'da temp.	0.19	1230
Bakır	Tavlanmış	0.54	320
70/30 pirinci	Tavlanmış	0.49	900

BÖLÜM 3. METALİK MALZEMELERİN DEFORMASYON DAVRANIŞINA İNKLÜZYONLARIN ETKİSİ

3.1. Metallerde inklüzyon Belirleme Metodları ve Görüntü Analizi

İnklüzyonlar malzeme özellik ve davranışını önemli derecede etkilediği için geniş bir şekilde incelenmektedirler. Inklüzyonlar genellikle orijinine göre yani harici veya yerli olarak sınıflandırılırlar. Harici inklüzyonlar cüruf veya refrakter gibi dış kaynaklardan gelirler. Yerli inklüzyonlar ise deoksidasyon veya sülfürlerin çökmesi gibi tabii proseslerden kaynaklanırlar. Inklüzyon kelimesi tanım olarak sadece harici tipler için kullanılması gerekirken, her iki tip için de kullanılmaktadır. Ergitme pratiği ile kontrol edilebildiği için ve daha çok sayıda ve dağılım olarak daha tahmin edilebilir oldukları için çoğu inklüzyon çalışmaları yerli tipler üzerine yoğunlaşmıştır.

Yerli inklüzyonlar genellikle oksitler ve sülfürler gibi bileşim ile sınıflandırılırlar. Karbürler ve nitrürler metallere, metaldışılara olduklarından daha benzer oldukları için inklüzyon olarak düşünülmezler. Birkaç örnekte, inklüzyon belirleme için kart metodlarında nitrürler dahil edilmiştir. Inklüzyonlar büyüklük olarak yani makroskobik veya mikroskobik olarak da sınıflandırılırlar. Genelde yerli inklüzyonlar küçüktür: 100 μm çapından daha küçük (döküldüğü durumda). Makroskobik inklüzyonlar genellikle orijin olarak haricidir fakat küçük harici inklüzyonlar da gözlenmektedir. Bundan dolayı hiçkimse bütün yerli inklüzyonların boyut olarak mikroskobik olduğunu ve bütün harici inklüzyonların da makroskobik olduğunu söyleyemez.

Bu bölümde inklüzyon içeriğinin tesbiti için sadece mikroskobik metodlar incelenmektedir. Inklüzyon içeriğini ölçmek veya tanımlamak için birkaç değişik metod kullanılmaktadır [5,6]. Bu metodlar aşağıdakileri içermektedir:

- Kart mukayesesi
- Sayma
- Hacim kesri tesbiti

Inklüzyon analizi, inklüzyon tiplerinin, miktarının, boyutunun, şeklinin ve dağılımının belirlenmesini gerektirir. Birçok durumda bazen kesin kimyasal belirleme gerekli olmasına rağmen, inklüzyonları sülfürler veya oksitler olarak sınıflamak kâfidir [5]. Eğer bir enerji veya dalga boyu-ayırıcı analitik cihaz mevcutsa kimyasal belirleme basit bir işlemdir.

Kart mukayese metodları: Mümkün olan bütün inklüzyon tipi kombinasyonları sınırlı sayıdaki kart resimleri ile açık bir şekilde gösterilemez. Aynı zamanda, mikroskobik bir görünüş alanı birkaç tip inklüzyon ihtiva edebilirken her resim serisi sadece bir inklüzyon tipini tanımlamaktadır.

Inklüzyon sınıflandırma kartlarının uygulanmasında, birkaç faktör sonuçları etkiler:

- Sıcak işlem miktarı ve inklüzyon plastisitesi
- Numunelerin miktarı, yerleşimi ve yönlenmesi
- Numune hazırlama
- Büyütme ve ayırtetme gücü
- Alan başına ve numune başına incelenen alan
- Alan seçimi

İnklüzyon dövülebilirliği önemli bir kart formülasyon görüşüdür. Sıcak işlemden; gevrek, deforme olmayan inklüzyonlar kırık bir paternde dizilirken, deforme olabilen inklüzyonlar uzar. Bütün inklüzyon deformasyon dereceleri tanımlanamaz. Kartlar genellikle tipik olarak 2600-3900 mm²'lik belirli bir enine kesit alanına haddelenmeden sonraki ingot malzemesini tanımladığı için, levha metal veya tel gibi çok daha büyük deformasyonlu malzemeleri kartlarla değerlendirmek zordur.

İngot döküm metallerde, sülfürler ve oksitler rastgele dağılmamışlardır fakat üstten alta ve yüzeyden merkeze doğru değişme eğilimi gösterirler. Deoksidasyon derecesi dağılım paternini önemli bir miktarda değiştirebilir. Bu probleme ek olarak tesadüfi numune almanın pratik zorluğu, belirlenmiş test bölgelerinde sistematik numune almayı gerektirir.

Numune hazırlama kritik bir işlemdir. Çizikler, oyuklar, kuyruklu yıldız şeklindeki işaretler ve lekeler önlenmelidir.

Çoğu standart kartlar alanları, büyük bir yüzey alanının hızlı tahmini için büyük bir görünüş alanı sağlayan 100X büyütmede tanımlarlar. Az inklüzyon içerikli çeliklerin inklüzyon analizinde, tesbit ve sınıflandırma için daha büyük büyütme gerekebilir. Daha büyük büyütmeleri 100X standartlarına çevirmek çok zordur. 300 tona kadar ağırlığa sahip olabilen bir çelik dökümün inklüzyon içeriğini değerlendirmek için 6450 mm² den daha az bir toplam parlatılmış yüzey alanlı altı veya dokuz numunenin kullanımı, inklüzyon içeriğinin değişebilirliğinden dolayı tabii istatistiksel problemler oluşturur. Hiçkimse harici inklüzyon içeriğini net olarak tanımlayamaz. Bu tipleri tesbit etmek için ultrasonografi gibi diğer metodlar kullanılmalıdır.

Harici tipler için böyle bir küçük numune alanlı bir dökümdeki en kötü durumu tesbit etme ihtimali aşırı derecede düşüktür. Numune sayısı arttıkça incelenen yüzey alanı artar ve en kötü alan değerlendirmeleri daha kötü kalite gösterir.

Bir numunenin incelenmesinde, bütün parlatılmış yüzey veya özel bir alan genellikle bir köşeden başlayarak incelenir. Yakın alan seçimi kullanılır. Değerlendirmeler kalitatif olabilir yani operatör sadece en kötü durumu değerlendirir veya kantitatif olabilir yani her alan değerlendirilir. Amerika Birleşik Devletlerinde çeliklerin inklüzyon içeriğini değerlendirmek için ASTM E 45 geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu standart üç tane kartlı metodu ve bir tane de kartsız tekniği kapsar, JK (Jernkontoret) kartı çoğu çeliklerde kullanılabilir, SAE kartı genellikle düşük karbonlu karbürizasyon çelikleri için kullanılır ve modifiye edilmiş JK kartı ise düşük inklüzyon içerikli çelikler için kullanılır.

Her iki JK kartı da inklüzyonları A tipi (sülfürler), B tipi (alüminatlar), C tipi (silikatlar) ve D tipi (küresel oksitler) olmak üzere 4 sınıfta toplar. Geçmişte, inklüzyonlar hem morfoloji hem de bileşim olarak sınıflandırılmıştır fakat şimdi sadece morfoloji kullanılmaktadır. Dört tipin herbiri ayrıca beş şiddet seviyeli ince ve kalın seriler halinde derecelendirilirler. JK kartı için şiddetler, 1'den 5'e kadar, modifiye edilmiş JK kartı için 1/2'den 2½'ye kadardır. Herbir kart için, şiddetin fonksiyonu olarak alan başına toplam sülfür uzunluğu, toplam B veya C tipi dizi uzunluğu ve toplam küresel oksit sayısı hakkında bilgi elde edilir [5,6].

Kart metodları genellikle iki şekilde kullanılır. En basit işlem kartta gösterilen herbir tipin en kötü alanını bulmak ve onları sınıflandırmaktır. Daha sonra herbir numune üzerinde bu sınıflandırmaların, dökümü temsil etmesi için ortalamaları hesaplanır. İkinci metod herbir numune üzerinde belirli bir alan içindeki her alanı sınıflandırmayı gerektirir.

Kartsız sınıflandırma metodları: inklüzyon içeriğini sınıflandırma için çok sayıda kartsız metod öne sürülmüştür.

Çeşitli standartlarda tanımlanan birçok metoddan sadece Japon spesifikasyonu JIS G 0555 stereolojik prensiplere dayalı olarak kullanılan bir metoddur. Bu standartta, bir nokta-sayım işlemi kullanılmaktadır. Japon standartında 20 yatay ve düşey çizgili ölçek içeren bir mercek kullanılır. Alan seçimi rastgele yapılır ve en azından 30, tercihen 60 alan ölçülür. inklüzyonlar tarafından kaplanan ızgara noktalarının sayısı sayılır; 400X büyütme tavsiye edilir. inklüzyonlar tarafından kaplanan alan yüzdesi aşağıdaki gibi belirlenir [5]:

$$d = \frac{n}{p \cdot f} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada;

d=Temizlik indisi (% olarak hacim kesri)

n=inklüzyonların kapladığı ızgara noktalarının sayısı

p=ölçekli mercekteki toplam ızgara noktaları sayısı

f=Alan sayısı'dır.

V_V (partiküllerin hacim kesri), N_A (birim alandaki partikül sayısı) veya N_V (birim hacimdeki tane sayısı) yi tahmin için stereolojik metodlar; inklüzyon içeriğini

belirlemek için kullanılabilir. Bu metodlar kantitatif olmasına ve iyi bir hassasiyet sağlayabilmesine rağmen, kartlarda gösterilen bütün bilgiyi tanımlamak için birkaç farklı ölçüm yapılmalıdır. Meselâ; toplam hacim kesri, oksitlerin ve sülfürlerin hacim kesri kadar faydalı değildir ve en kötü alan şartları ve uzama hakkında hiçbir bilgi vermez. Oksit dizisi uzunluğunun yatak çelikleri üzerine önemli bir etkiye sahip olduğuna inanılır ve ayrı bir ölçüm gerektirir. Bundan dolayı inklüzyonları tanımlama için stereolojik metodlar bir potansiyel oluşturmalarına rağmen bütün gerekli parametrelerin yeterli hassasiyetle el ile tesbiti oldukça yorucudur.

Görüntü analizi: Görüntü analizi; el ölçümlerinin hassasiyetini ve çoğaltılabilirliğini azaltan operatör yorulma etkisini minimuma indirir. Ayrıca, mikroyapı paternlerinin, uzaysal ilişkilerin ve şekillerin bir görüntüde tanınması rölatif olarak kolay olmasına rağmen, sayım gibi güvenilir sayısal bilgilerin el ile elde edilmesi çok zordur. Bu yüzden kalite kontrol ve yapı-özellik incelemesinde kullanılan mikroyapı analizinde daha kesin bilgiye duyulan ihtiyaca otomasyon cevap verir [7].

Otomatikleştirilmiş cihazlar operatör yorulmasını yok ettiği için ve analiz zamanını azalttığı için daha kesin olarak daha çok ölçüm yapılabilir. Malzemelerin homojen olmamasından dolayı bu önemlidir. Daha kaliteli bilgiler elde etmek için, daha büyük bir numune alanı ve daha çok numune analiz edilmelidir. Böylece, görüntü analizi daha iyi istatistiksel kesinlik ve daha anlamlı neticeler sağlayabilir. Ayrıca, görüntü analizörleri milisaniyeler içinde, daha tam bir mikroyapı tanımı sağlayarak, herbir alanda birkaç ölçüm yapabilir. Son olarak, numunenin hareketi, odaklama, bilgi analizi ve formatlamada otomasyona gidilebilir.

Görüntü analizi; numune seçimi ve hazırlama, görüntü ön işlemi, ölçüm, bilgi analizi ve çıkışından ibarettir. Doğru ve çoğaltılabilir neticeler elde etmek için her adım uygun bir şekilde kontrol edilmelidir.

Görüntü analizörü elemanları: Çeşitli gelişmişlik ve maliyet seviyelerinde görüntü analizörleri mevcut olmasına rağmen, bazı özellikler yaygındır. Görüntüler çeşitli kaynaklardan sağlanabilir; bununla beraber, en yaygın giriş kaynağı optik mikroskoptur. Bütün analizörler görüntüyü bir televizyon ekranında göstermek için bir tarayıcı kullanmaktadır. Görüntü tesbiti ve stereolojik ve stereolojik olmayan parametrelerin ölçümü için her sistem merkezî bir elektronik işlemci kullanmaktadır. Çoğu sistemler masaüstü hesap makinalarından mini kompütlere kadar değişen bilgi kullanma cihazlarıyla birleşiktir. Son olarak, her sistemin bilgi kopyası elde etmek için bir cihazı vardır.

Tesbit ve ölçüm: Özellik tesbitinin ilk adımı en uygun renklendirmenin yapılmasıdır. Bu uygun renklendirme literatürde gri seviye olarak tanımlanmaktadır. Optimum tesbit doğruluğu için, numune kazanç özellikleri, mümkün olduğu kadar dar kontrastlı bir bölgeye (gri seviye) sahip olacak şekilde işlem görmelidir. Mikroskoptaki ışık kaynağı o zaman düz aydınlatma için düzenlenmelidir. Çoğu görüntü analizörlerinde ekrandaki dış değişimlere bile gölgeleme düzeltilmesi sağlayan devreler vardır.

Spesifik bölgeler içinde sadece gri seviyeleri tesbit edecek şekilde seviye ayarlama selektif bileşen tesbitini mümkün kılar.

Daha karmaşık görüntü analizörleri görüntü-özellik ölçümleri yapabilirler yani alandaki her bir ayrı özellik

tek tek ölçülür. Partikül boyutu belirleme veya şekil ölçümleri için bu teknik çok faydalıdır. Bu gibi kabiliyetler mevcut olduğunda aynı gri seviyeli özellikler, büyüklük veya şekildeki farklarla daha ileri bir şekilde ayırtedilebilir. Meselâ; bir dökme demir numunedeki değişik grafit şekilleri büyüklük veya şekil ile tasnif edilebilir ve ondan sonra ölçülebilir.

Çoğu görüntü analizörleri, ölçümleri; tam ekran (boşluk çerçevesi) üzerinde veya daha küçük bir canlı çerçeve bölgesi içinde yapabilirler. Ekrandaki düşey ve yatay çizgiler arasındaki iç ekran alanı, genellikle görüntü-özellik ölçümleri yapıldığında kullanılan canlı çerçeve bölgesidir. Canlı çerçeveyi kesen partiküller, partikül ölçüm hatalarını önlemek için tesbit edilen bölgeden çıkarılabilirler. Ekranın kenarı ile canlı çerçeve arasındaki bölge, bekçi bölgesidir.

Karmaşık görüntü analizörleri birkaç görüntüyü hafızada depolayabilir ve bu görüntüleri özellik seçimini arttırmak için değişik olarak kullanabilirler. Özellikleri aşındırma veya genişletme ve bu görüntüleri orijinal görüntüyle mukayese etme; yakın partikülleri veya birleşen dizilmiş özellikleri ayırmada faydalı olabilir. Görüntü analizi partikül sayımı için el tekniklerinden çok daha kesindir. Fakat birleşen partikülleri, bu özel görüntü basma metodları olmaksızın ele almak zordur. Görüntüyü hafızada depolamak ve yakın partikülleri kesmek için ışıklı kalem kullanmak alternatifidir. Bu daha yavaştır fakat bazı görüntülerde gerekli olabilir. Hassas sayım bir partikülün şeklinden ve kullanılan sayım metodundan da etkilenir. Küresel partikülleri saymak daha kolaydır. Daha kompleks şekiller, hassas sayımlar elde etmek için uygun sayım tekniği seçimi gerektirir.

Tarama çizgisi ve toplam resim noktaları sayısına göre tesbit edilen resim noktalarının sayısı ve dağılımına dayalı olarak ölçümler yapılır. Alan kesri, basitçe tesbit edilen resim noktaları sayısının, ölçüm alanındaki toplam resim noktaları sayısına oranıdır. Bu yüzden ölçüm sahasının gerçek büyüklüğü, kalibre edilmiş tarzda çalışmak için her bir büyütme için dereceli bir mikrometre kullanarak hassas bir şekilde tesbit edilmelidir. Bazı ölçümler kalibre edilmemiş tarzda yapılabilir fakat bu daha az yaygındır.

Diğer ölçümler daha kompleksdir. Meselâ, bilinen büyüklükteki bir görüntü sahasındaki tesbit edilmiş partiküllerin sayısını saymak için yani birim alandaki partikül sayısı N_A 'yı elde etmek için görüntü analizörü ilk önce tesbit edilmiş görüntünün ne kadarlık kısmının ayrı partiküller olduğunu tesbit etmelidir. Bir partikül, tesbit edilmemiş resim noktaları ile tamamen çevrelenmiş bir tesbit edilmiş özelliktir [7]. Bu ayırimdan sonra partiküller sayılır ve sayı, ölçüm alanına bölünür.

Boyutlarına göre ayırma birkaç şekilde yapılabilir. ortalama partikül alanı $\bar{A}$ 'yı tesbit etmek için en basit metod alan kesrini birim alandaki partikül sayısına bölmektir yani A_A/N_A 'dır. Bu; alan ölçümlerini kullanan en doğrudan metoddur. Görüntü-özellik ölçümleri birkaç mümkün metod sağlar. Birisi her özelliğin alanını ölçmek ve bütün ölçülmüş partiküllerin ortalama alanını ölçmektir. Bir diğeri herbir partikülün alanını ölçmeyi ve şekli hakkındaki bir varsayıma dayalı eşdeğer çapı hesaplamayı ihtiva eder [7]. Partiküllerin izdüşüm yüksekliği, maksimum ve minimum uzunluk, kalınlık ve benzeri gibi şeyler de ölçülebilir.

Bilgi analizi: Görüntü analizörlerinin asıl avantajı, geniş olabilen üretilmiş bilginin, kullanılmakta olan minikompütürde depolanmış programları kullanarak hemen istatistiksel olarak analiz edilebilmesidir. Rutin ölçümler için, kullanımda maksimum etkinlik sağlayan kompütürde önceden geliştirilmiş bir program depolanabilir. Program; numune, kalibrasyon, numune hareketi ve tesbit üzerine bilgi girişi için hazır olanları ihtiva eder. Daha sonra program bu fonksiyonları kontrol eder, ölçümleri elde eder, depolar ve analiz edilmiş bilgiyi çıkartır. Program; ölçümlerin rölatif doğruluğuyla ilgili operatörü harekete geçirmek ve doğruluğu düzeltmek için daha çok ölçümün gerekli olup olmadığını sormak için de ayarlanabilir. Eğer bu gerekliyse, daha çok ölçüm alınır, halihazırda elde edilmiş olanlara eklenir ve yeni sonuçlar ekranda gösterilir. Bu işlem arzu edilen hassasiyet sağlanana kadar tekrarlanır.

Bilgi analizi istatistik bilgisi gerektirir. Her durumda bu basit bir görev değildir, daha fazla inceleme gerektirir. Genelde, ölçümlerin ortalamalarının ve standart sapmasının hesaplanması bilgi analizinin temel başlangıç noktasıdır. Bu bilgiden, % 95'lik emniyet sınırı ve bilginin rölatif doğruluğu hesaplanabilir. Daha karışık incelemelerde, bilgi dağılımının tabiatını tesbit etmek gerekli olabilir. Bütün ölçümler normal (Gauss) dağılımı göstermezler, birçoğu Log-normal veya diğer dağılımları gösterirler. Farklı numunelerden alınan neticeleri mukayese için bilgi histogramları faydalıdır. Kullanıcının incelemesi için, uygun bir formatta bilgi sağlamak için, bilgi çıkışı kontrol edilmelidir. Uygun numune tanıma bilgisi de ihtiva edilmelidir.

Mümkün hatalar: Görüntü analizi ölçümlerinde, numune temsili, numune hazırlama kalitesi, ayarlama kontrollerindeki operatörün temayülü ve enstrüman hataları gibi kaynaklardan hatalar ortaya çıkabilir. Stereolojik formüllerin dayandığı varsayımlar geçersiz olduğunda da hatalar oluşabilir.

Bir veya daha çok numunenin rölatif olarak küçük bir parlatılmış alanı malzemenin rölatif olarak büyük bir kütlesi için bir miktar belirlemede kullanıldığı zaman, eğer numune alma yetersizse veya kütleyi temsil etmiyorsa hatalar oluşacaktır. Bir çelik dökümdeki inklüzyonların analizinde bu problem yaygındır. Inklüzyonların miktarı rölatif olarak veya son derece düşük olduğu ve inklüzyon dağılımı homojen olmadığı için, bir belirsizlik derecesi ile bu gibi ölçümler arasında bir ilişki kurulur. Sistematik bir numune alma planı kullanarak ve numune sayısını ve ölçülen alanı arttırarak bu hata minimuma indirilebilir. Pratikte, bu gibi ölçümler için mevcut zaman miktarı ile arzu edilen doğruluk arasında uzlaşma gereklidir.

Seçilen büyütme, ölçüm değerini ve ölçümün istatistikliğini önemli derecede etkiler. Küçük özellikler daha büyük büyütme gerektirmesine rağmen, artan büyütmeyle saha alanı azalır. Meselâ, 500X'deki saha alanı 100X'dekinin 25'de 1'idir. Bu yüzden, 500X'de aynı alanı ölçmek için, 100X'dekinin 25 katı daha fazla alan ölçülmelidir. Temel olarak büyütme seçiminde bir uzlaşma gereklidir.

Numune hazırlama da ölçüm doğruluğunu önemli derecede etkiler. Numuneler minimum engebeli olacak şekilde parlatılmalı, istenen bileşenler muhafaza edilmeli ve parlatma maddeleri kontrol edilmelidir. Numune hacmi

büyük olabileceği için, gerekli numune bütünlüğü ve kalitesini sağlamak için genellikle otomatik parlatma teçhizatı gereklidir.

Yukarıdaki problemler çözüldüğünde, numune analiz için hazırdır. Tarayıcı tübe mümkün en iyi görüntünün verildiğinden emin olmak için optik mikroskoba dikkat edilmelidir. Mikroskop temiz ve uygun bir şekilde tutulmalıdır. Çevre de dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

Birçok deney, özellik ayırtetme için dedektör eşik-sınırı ayarlanmasının en önemli enstrüman hatası olduğunu göstermiştir. Farklı operatörler tarafından veya farklı günlerde aynı operatör tarafından yapılan ölçüm çoğaltılabilirliği, tesbiti göstermek için kullanılan metoddaki değişimlerden dolayı zarar görebilir. Eşik-sınırını ayarlama için birkaç metod tavsiye edilmektedir ve çoğu cihazlar bu gibi ayarlamalar için tam otomatiktan el ile olana kadar birkaç seçimli metoda sahiptir. Özelliklerin kenarlarında engel mevcutsa, kenardaki gri seviye yansıtması merkezdekinden farklılık gösterecek ve tesbiti güçleştirecektir. Bu alanda ilave araştırma gereklidir.

3.2. Deformasyon Sırasında İnküzyonların Davranışı

İnküzyonların mekanik özelliklere etkileri belirlenirken onların miktar, büyüklük, dağılım, tür ve biçimlerinin önemi vardır [8]. İnküzyon miktarının çekme mukavemetini hemen hiç etkilemediği fakat özellikle kalınlık yönündeki tokluğun inküzyon miktarı arttıkça kötüleştiği bilinmektedir. Ancak, kalınlık yönündeki süneklik, tokluk ve yorulma özelliği çatlak oluşumuna bağlıdır. Bu olgu da çeliğin iç yapısındaki inküzyonların ortalama değerleri yerine onların belirli

bölgelerde oluşturdıkları birikimlere dayanmaktadır. Süneklik inklüzyonların toplam miktarından çok, inklüzyonların türüne bağlıdır; yorulma ömrü ise inklüzyonların büyüklüğü ile ters orantılıdır [8].

Inklüzyonlar çeliğin yapısında iç çatlak oluşumuna yol açarlar. Çeliklerin plastik deformasyonları sırasında sülfür inklüzyonlar çatlar ya da sülfür-anayapı arayüzeyleri ayrılarak boşluklar oluştururlar. Çeliğin çatlaması bu arayüzey boşluklarının birleşmesiyle ortaya çıkar. Sıcak haddelenmiş çeliklerin iç yapılarındaki uzamış sülfürlerin biçimi bu çatlama ve kopma sürecini hızlandırıcı yönde bir etki oluşturur. Uzamış sülfürler, sülfür-anayapı arayüzeyleri boyunca zayıf bağlar taşıdıklarından kalınlığına yönde sünekliği ve tokluğu etkilemektedir. Bu sebeptendir ki bir yandan inklüzyonların miktarı ve diğer yandan büyüklük ve biçimlerinin denetimi, anılan özellikleri geliştirmek için gerekli olmaktadır. Inklüzyonların çevrelerinde oluşturdıkları gerilim alanları üzerine yapılan bir araştırmanın sonuçlarına göre çeliğin mekanik özellikleri inklüzyonların toplam miktarından çok, onların büyüklük ve türlerine bağlıdır.

Değişik özellikteki inklüzyonların sıcak haddeleme sırasındaki davranışları onların, sıcak haddelenmiş çelik ürünlerin mekanik özelliklerini etkilemeleri bakımından çok önemlidir. Bunların en önemlileri Şekil 3.1 de özetlenmiştir.

	PLASTİSİTE ÖZELLİĞİ	SICAK HADDELEME ÖNCESİ	SICAK HADDELEME SONRASI	INKLÜZYON ÖRNEKLERİ
1	PLASTİK VE YUMUŞAK INKLÜZYON			— CAMSI SİLİKATLAR — MnS INKLÜZYONLAR
2	AZ PLASTİK YUMUŞAK ANKAPI İÇEREN SERT PARÇACIKLAR			— KARMASIK SÜLFÜR-OKSİTİNEKLÜZYONLAR — KİŞİ KRİSTALLEŞMİŞ SİLİKATLAR
3	ESNEMEZ VE SERT INKLÜZYON			— YÜKSEK SiO_2 İÇERİKLİ CAMSI SİLİKATLAR — NADİR TOPRAK ELEMENTLERİ OKSİT SÜLFÜRLERİ
4	ESNEMEZ VE SERT INKLÜZYONUNU			— YÜKSEK Al_2O_3 İÇERİKLİ KALSİYUM ALUMİNATLAR — KRİSTAL SİLİKATLAR
5	ESNEMEZ VE SERT INKLÜZYON KÜMESİ			— Al_2O_3 KÜMELERİ

ŞEKİL 3.1. inklüzyonların Sıcak Haddeleme Davranışları [8].

Görüldüğü gibi esnemez, sert ve yuvarlak inklüzyonlar, sıcak haddeleme sırasında biçimlerini değiştirmediklerinden anizotropi oluşturmamakta ve mekanik özellikleri de olumlu yönde etkileyebilmektedir [8].

Mekanik bir işlemin sonucu olarak ikinci-faz partikülleri kabaca bir bütün olarak cismin deformasyonuna uyan bir şekil ve dağılım takınma eğilimi gösterirler. Başlangıçta küresel olan ikinci-faz partikülleri veya inklüzyonlar, eğer matristen daha yumuşak veya sünek iseler esas işlem yönünde elipsoidal bir şekle bozulurlar. Eğer inklüzyonlar veya partiküller gevrek iseler işlem yönüne paralel olarak yönlenmiş parçalar halinde kırılırlar, halbuki partiküller matristen daha sert ve mukavim iseler şekil değiştirmeyeceklerdir [2].

İnklüzyonun şekil değiştirme kabiliyeti: Otomat çelikleri ekseriya iyi işlenebilirlik sağlayan büyük miktarlarda mangan sülfür inklüzyonları içerirler. Sülfür şekli ve miktarının işlenebilirlik üzerine etkisini gösteren bir çok çalışma yapılmıştır [5,6]. Bu gibi çeliklerde şekil değişikliklerini değerlendirmek için birkaç farklı prosedür kullanılmıştır. Carney ve Rudolphy'nin çalışmaları ve Van Vlack'in çalışmaları ile tipikleşen basit bir teknik; ingot, blum, kütük veya çubuk şekillerdeki yani sıcak kesit daraltmanın farklı kademelerindeki sülfürlerin uzunluğunun (l) genişliğine (w) oranlarını ölçmekten ibarettir. Carney ve Rudolphy 0.007 mm den daha uzun olan sülfürlerin uzunluk/genişlik oranlarını saymış ve ölçmüşlerdir. Rölatif inklüzyon boyutu v

$$v=1.08 \frac{l}{w^2} \quad (3.2)$$

ilişkisi kullanılarak bu ölçümlerden hesaplanmıştır [5]. Ortalama rölatif boyut en azından 50 inklüzyondan elde edilen bilgi kullanılarak hesaplanmıştır.

İnklüzyon dövülebilirliği için analitik işlemler Malkiewicz ve Rudnik tarafından takdim edilmiş ve daha sonra Maunder ve Charles tarafından modifiye edilmiştir. Başlangıçta küresel olan inklüzyon, sıcak deformasyon sırasında, sıcak işlem eksenine paralel herhangi bir kesit için sabit bir uzunluk/genişlik oranlı ($\lambda=b/a$) bir elipsoid haline deforme edilmektedir. Eksenel inklüzyon oranları, sıcak işlem den dolayı ürünün şekil değişiklikleriyle mukayese edilmektedir. Ürün şeklindeki değişiklik;

$$h=\frac{x^{3/2}}{y^{3/2}} \quad (3.3)$$

denklemleri ile ingotun kesit alanı x ve dövülmüş ürünün enine kesit alanı y 'ye dayalı olarak hesaplanır [5]. Burada h ; çelik ürünün kesit daralması oranıdır. Rölatif inklüzyon-çelik plastisitesini yani inklüzyonun gelişme göre şekil değiştirebilirliğini elde etmek için bu değer ölçülen görünüş oranı (aspect ratio) λ ile mukayese edilir.

Rölatif bir şekil değiştirebilirlik indisi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır [5];

$$\gamma = \frac{2 \log \lambda}{3 \log h} \quad (3.4)$$

Hiçbir şekilde şekil değiştirmeyen bir inklüzyon için bu indis sıfırdır, halbuki inklüzyon çelik kadar çok şekil değiştiriyorsa indis bir'dir. Düşük kesit daralması miktarları genellikle yüksek kesit daralması derecelerinden daha düşük indis değerleri üretir ve büyük inklüzyonlar küçük inklüzyonlardan daha yüksek indis değerleri gösterirler.

Brunet ve Bellet yassı şekillere haddelenmiş çelik için yukarıdaki denklemi ikinci bir görünüş oranı hesaplayarak değiştirmişlerdir: haddeleme yönündeki bir düzlemde daha önce tanımlanan λ oranı ve $\delta = b/c$ oranı ise haddelemeye dik yöndeki bir düzlemde inklüzyonun uzunluğu (b)'nin genişliğine (c) oranıdır. Bunlardan, deformasyon indisi γ :

$$\gamma = \frac{\log \lambda + \log \delta}{3 \log h} \quad (3.5)$$

denklemleri ile hesaplanmaktadır [5].

BÖLÜM 4. BAKIR TEL ÜRETİMİ

4.1. Bakır Türleri

Bakırın esas kullanımı, prensip olarak yüksek elektrik iletkenliğine dayanmaktadır. Bu özellik, bakırdaki katı eriyiğe giren hemen hemen diğer bütün elementler tarafından olumsuz yönde etkilendiği için metal saflığı büyük öneme sahip olmaktadır.

Bakır cevherleri genellikle çinko, kurşunlu sülfürler ve mevcut diğer sülfürlerdir. Ergitme işlemi, elektrolitik olarak rafine edilmekle yüksek saflığa ulaşacak olan oldukça kötü bir saflıkta metal üretir. Bununla beraber, elektrolitik olarak rafine edilmiş metal ergitilmelidir ve bu sırada elektrolitik saflıktaki sıvı metal ortamdaki gazlardan oksijen kapar. Oksijen yeralan katı eriyik yapmak için çok küçük bir atomdur ve arayerlerde çözünmek için bir dereceye kadar çok büyük bir atomdur. Bundan dolayı katılaştırmış bakırda bakır oksit, Cu_2O olarak bulunur. Birkaç alaşımsız bakır sınıfları arasındaki ana fark mevcut oksijen miktarı ve/veya kalıntı deoksidan element miktarıdır. Alaşımsız bakır sınıfları aşağıdaki gibidir [9]:

Elektrolitik Oksijenli Bakır (Tough Pitch, ETP), % 99.95 Cu, %0.04 oksijen, iletkenlik % 101 IACS. Bu, CDA 110 olarak tanımlanan standart elektrik teli bakırı sınıfıdır. Oksijen bakır ile bir ötektik oluşturan Cu_2O olarak bulunur. Sıcak haddemeleme ötektik yapıyı parçalar ve bundan dolayı bakır oksitler ayrılmış, yuvarlak partiküller haline gelirler. ETP bakır, hidrojen içeren redükleyici gazlar bulunduğunda yüksek sıcaklıklara meselâ, 500°C'in üstündeki sıcaklıklara maruz

bırakılmamalıdır. Hidrojen atomları hemen katı metale yayınır ve H_2O oluşturmak için Cu_2O ile reaksiyona girerler. Şiddetli gevrekliğe yolaçabilen iç boşlukları oluşturacak olan oluşan buhardan yeterli bölgesel basınç gelişir.

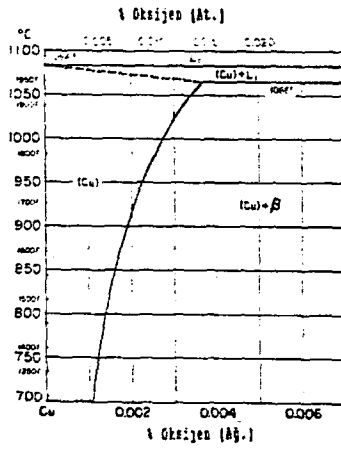
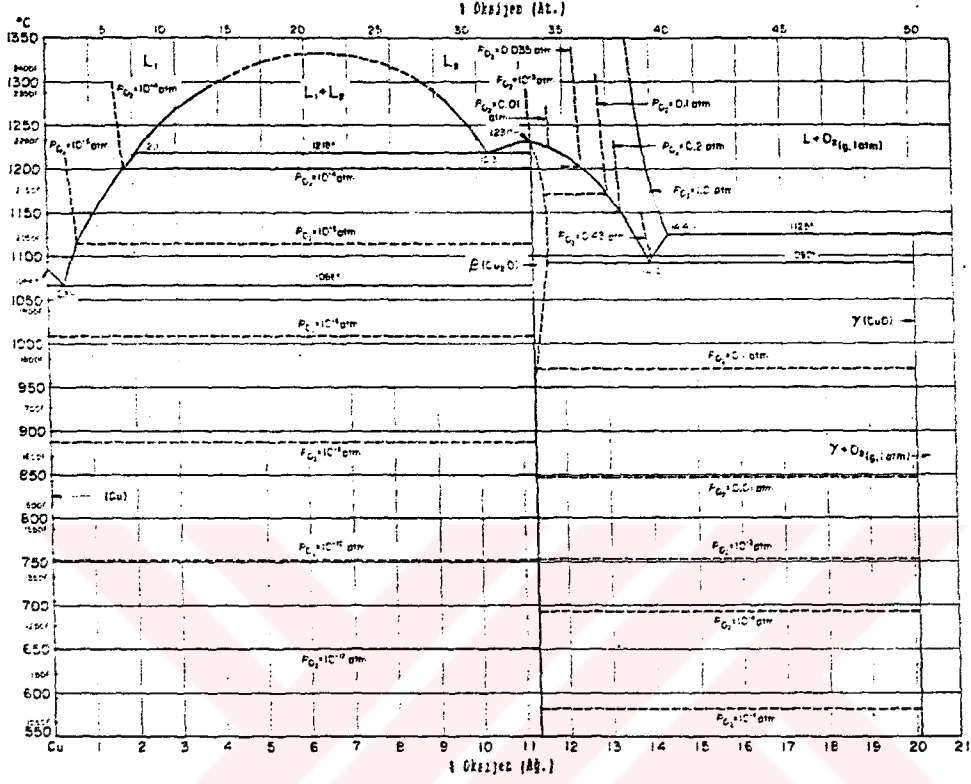
Oksijensiz Yüksek İletkenlikli Bakır (OFHC), % 99.95 Cu, % 95 IACS iletkenliği, CDA 102. Karbonmonoksit ve azot atmosferi altında elektrolitik olarak rafine edilmiş bakırı ergiterek ve dökerek, bakırdaki oksijen giderilebilir. Bununla beraber oksijen, iletkenliği etkileyen bazı empüriteleri kaldırmaya meyillidir, bu yüzden bu bakırın iletkenliği iyi olmasına rağmen ETP bakırından belirli bir miktarda daha kötüdür. Elbette normal olarak hidrojen gevrekliğine başışıklıdır fakat yüksek sıcaklıklarda katı OFHC bakıra yayınabilir ve o zaman gevrekliğe maruz olur.

Şekil 4.1.a ve b'de bakırın oksijenle yaptığı denge diyagramları görülmektedir.

Deokside Edilmiş Düşük Fosforlu Bakır (DLP), % 99.92 Cu + % 0.009 P, iletkenlik % 100 IACS'e kadar. Oksijen, elementel fosfor ile, deoksidasyon ürünü P_2O_5 'i giderecek temel bir cüruf ile çalışarak sıvı bakırdan giderilebilir. Bu reaksiyonun kimyasını kontrol etmek kolay değildir ve küçük bir kalıntı fosfor miktarı iyi iletkenliğe çok zararlıdır.

Deokside Edilmiş Yüksek Fosforlu Bakır (DHP), % 99.95 Cu + % 0.02 P, % 85 IACS iletkenliği.

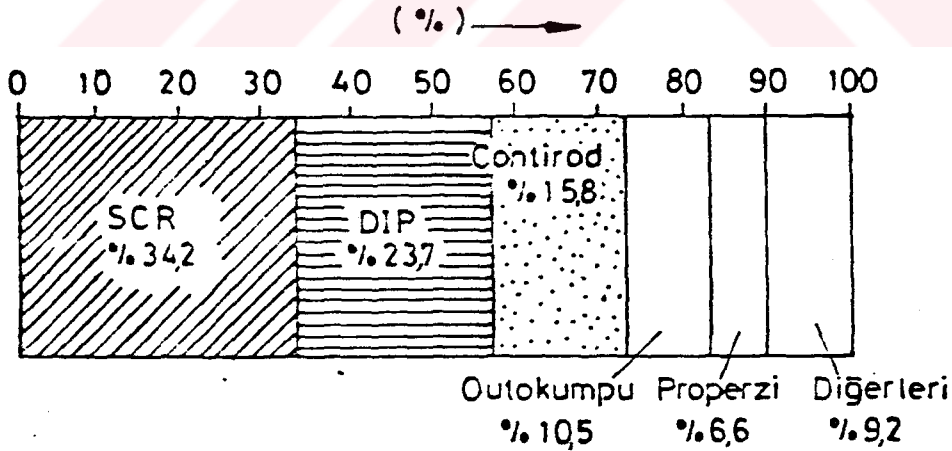
Gümüşlü Bakır, % 99.9 Cu + % 0.03 Ag içerir.



ŞEKİL 4.1. Bakırın Oksijenle Yaptığı Denge Diyagramları [10].

4.2. Bakır Çubuk Üretim Metodları

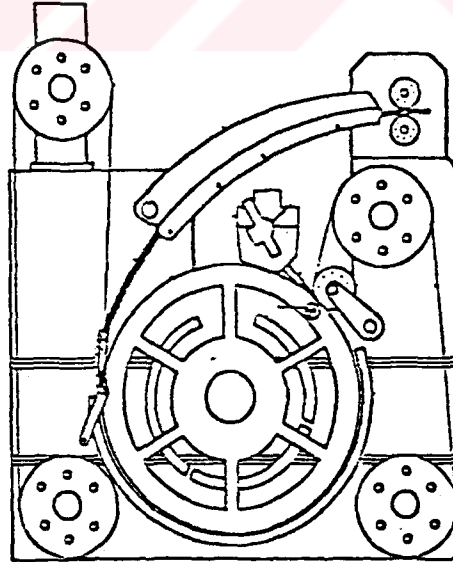
Tel üretiminde kullanılan bakır filmaşınların üretimi alışıl gelmiş metodla bakır takoz veya kütükten ekstrüzyonla veya sıcak haddeleme ile yapılmakta iken son yirmi yılda bakır filmaşın üretiminde yeni, ekonomik, sürekli döküm ve haddeleme metodları geliştirilmiştir. Bu metodlarda, bakır sürekli dökümle ya filmaşına en yakın çubuk boyutlarında katılaştırılmakta, sonra da bir soğuk işlemle tel çekmeye uygun filmaşın boyutuna getirilmekte veya farklı kesit ve şekillerde dökülüp henüz sıcak halde iken hemen sıcak haddelenerek filmaşın haline getirilmektedir [11]. Son yıllarda dünya bakır çubuk üretimi; Southwire, Contirod, Dip, Outokumpu ve Properzi gibi sürekli döküm ve haddeleme metodları ile yapılmaktadır (Şekil 4.2). Bu metodlardan , bu çalışmada ürünlerinin kullanıldığı SCR metodu aşağıda kısaca açıklanmaktadır.



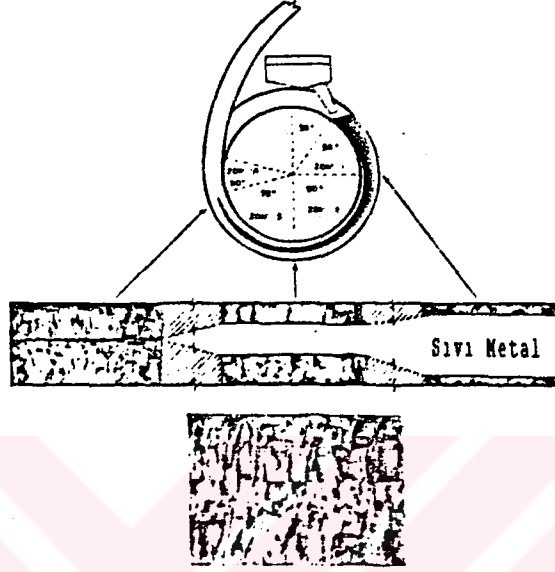
ŞEKİL 4.2. Dünya Bakır Çubuk Üretiminde Kullanılan Çeşitli Sürekli Döküm ve Haddeleme Metodlarının % Olarak Oranları [11,12].

Southwire sürekli çubuk metodu: Southwire sürekli çubuk (SCR) sistemi 1964'de geliştirilmiştir, çünkü o tarihlerde bu sürekli döküm ve haddeleme prosesi ile oksijenli bakır üretiminde hızlı bir artış olmuştur. Bu sistemler senede maksimum 250000 ton'luk kapasite ile saatte 6'dan 50 tona kadar bakır çubuk üretim hızları için dizayn edilmişlerdir [12,13]. Tekerlek çaplarını, enine kesit alanlarını ve bir dereceye kadar tekerlek temas derecesini değiştirerek bu değerler sağlanır.

Bir SCR döküm makinasının şeması Şekil 4.3'de görülmektedir. Tandıştaki ergimiş metal döküm ağzı içinden, kalıbı oluşturan dönen tekerleğe verilir. Tekerlek döndükçe metal katılaşır ve çekip çıkarılır ve haddehaneye nakledilir. Kalıp çevresel bir yivi olan tekerlekten ibarettir. Döküm veya katılaşma işlemi Şekil 4.4'de şematik olarak gösterilmektedir. Dökümün enine kesiti trapezoid şeklindedir.

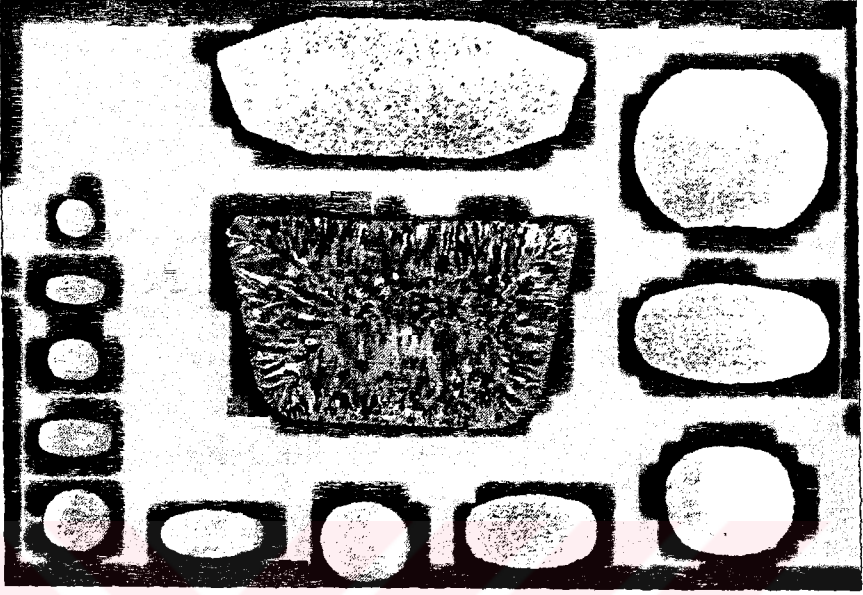


ŞEKİL 4.3. SCR Döküm Makinasının Şeması [12,13].

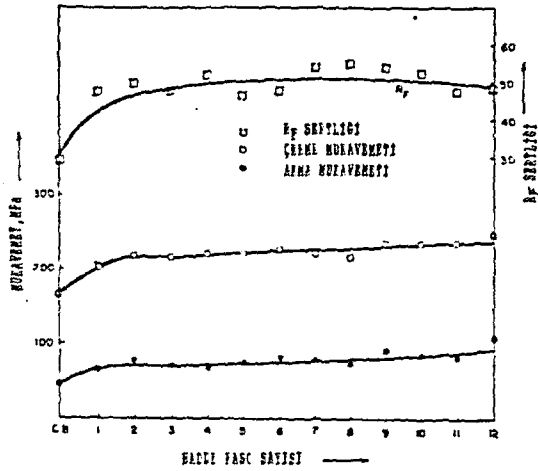


ŞEKİL 4.4. SCR Prosesinde Döküm İşleminin Şematik Gösterilişi [12,13].

Önce çubuk döküm tekerleğinden çekip çıkarılır, bir çubuk hazırlama ünitesinden geçirilir ve daha sonra oval-yuvarlak paso sırası kullanılarak çubuk haline haddelendiği kaba ve nihai işleme kademelerinden geçirilir (Şekil 4.5). Birinci pasoda, döküm halindeki tane yapısı esas itibarıyla , küçük, eşeksensiz, yeniden kristalleşmiş taneler halinde parçalanır. Birinci hadde pasosundan sonra mekanik özelliklerdeki önemli düzelme Şekil 4.6'da görülebilmektedir.

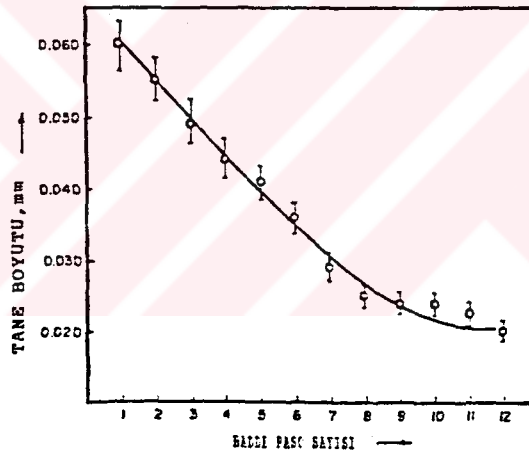


ŞEKİL 4.5. SCR Sistemindeki Yuvarlak-Oval Paso Sırasını Gösteren Makrograf [12,13].



ŞEKİL 4.6. Sıcak Deformasyonun Mekanik Özelliklere Etkisi [12,13].

Birinci pasodan sonraki her pasodaki sıcak deformasyon, bağımsız, yeniden kristalleşmiş bir yapıya sebep olduğu için mekanik özellikleri önemli bir derecede değiştirmez. Tane yapısı boyut olarak, sıcak haddeleme sırasındaki her pasodaki kesit daralması ile azalır (Şekil 4.7). Azalan tane boyutunun sebebi; malzeme sıcak haddelenirken, sıcaklıktaki yaklaşık 950°C'dan 650°C'a düşüş ile ilişkilidir. Standart SCR çubuk boyutu, yaklaşık 8 mm'lik çaptır.



ŞEKİL 4.7. SCR Sisteminde Sıcak Deformasyonun Tane Yapısına Etkisi [12,13].

4.3. Bakır Çubukların Kalite Kontrolu

Tel çekme performansı çubuk üretim parametreleri ve sonuçta çubuk kalite seviyesi ile doğrudan etkilenir. Nihai tel çekilebilirlik ile direk ilişkiye sahip kalite testlerinin doğru seçilmesi gereklidir. Bu testler şöyle sıralanabilir [14,15]:

- Yüzey inceleme
 - Göz ile inceleme
 - Girdap akımları tahribatsız muayene metodu ile inceleme
- Burma testleri
 - Burma testi
 - Tek yönlü burma testi
 - Çift yönlü burma testi
- Oksijen tesbiti
- Sülfür tesbiti
- Hidrojen tesbiti
- Çekme testi
 - Çekme mukavemeti tesbiti
 - Akma mukavemeti tesbiti
 - Yüzde uzama tesbiti
- Emisyon spektrografiyle elementel kimyasal analiz
- Tavlanabilirlik testi
- İletkenlik tesbiti
- Çözünebilir yağ konsantrasyonu testi

BÖLÜM 5. BAKIR TEL ÜRETİMİNDE MİKROYAPISAL DEĞİŞİMLER VE İNKLÜZYONLARIN DAVRANIŞI

Malin ve Hatherly altyapının düşük deformasyon seviyelerinde eşeksenli hücreler dizisinden ve seyrek mikrobandlardan ibaret olduğunu bulmuşlardır [16]. Mikrobandların optik mikroskopisi ile gözlenen kayma bandlarına karşılık gelen altyapısal özellikler olduğu gösterilmiştir. Deformasyonun devam etmesiyle mikroband yoğunluğu artar ve birlikte kümelenerek deformasyon yönüne paralel hale gelirler. Büyük deformasyonlardan sonraki mevcut uzamış alttane yapısı, hemen hemen deforme olmayan kalan hücresel matristen bağımsız olarak ortaya çıkan mikroband kümelerinden kaynaklanır. Hatherly ve Malin'e göre bakırda $\epsilon=0.25$ ile $\epsilon=1$ arasındaki deformasyonun çoğu mikroband oluşumu ile oluşur [16,17].

Orta derecede deformasyonlardan sonra ($\epsilon>1$) haddeleme gibi düzlem birim şekil değişimli deformasyon proseslerinde sık sık makro kayma bandları bulunur. Büyük deformasyonlarda ($\epsilon>2$), kayma bandları, bakırın şekil değiştirmesinde en önemli rolü üstlenir. Büyük deformasyonlarda dinamik toparlanma olmaktadır ve çok büyük deformasyonlarda dinamik yeniden kristalleşme belirtisi gözlenmiştir ($\epsilon>4$), [4].

Dislokasyon yoğunluğu, soğuk işlenmiş bir yapının esas ortalama parametresidir [18]. Bununla beraber, halihazırda orta deformasyonlardan sonra ulaşılan 10^{10} - 10^{11} cm^{-2} 'lik bir seviyeden daha yüksek dislokasyon yoğunluklarının doğrudan sayımı imkânsızdır, böylece aşırı deformasyonlara maruz kalan metallerdeki dislokasyon yoğunluklarını ölçmek imkânsızdır.

Oksijenli bakırdaki inklüzyonlar çoğunlukla Cu_2O tipindeyken oksijensiz bakırda ise Cu_2O bulunmaz. Oksijenli bakır; bakır ve bakır oksitten oluşan iki fazlı bir alaşım iken oksijensiz bakır ise tek fazlı bir malzemedir [12]. Döküm haldeki eşeksenli ve sütunsal yapılarındaki dendritlerarası ağlardaki bakır oksit partiküllerinin dizilişi potansiyel zayıflık düzlemleri olabilen sınırlara sebep olur [13]. Sıcak deformasyon sırasında oksitlerin dispersiyonu ile bu düzlemlerin yok edilmesi istenir. Sıcak deformasyon ile tane sınırlarındaki bakır oksitler disperse olarak yapı içinde homojen bir şekilde dağılmış olurlar.

Oksijenli bakırlarda, bakır oksit dizileri, malzeme soğuk işleme tâbi tutulduğunda gerilme konsantrasyonu merkezleri gibi davranan boşluklar gibi etki gösterirler [19].

İşlenmiş oksijenli bakırda, bakır oksit partikülleri boşluklarla tamamen aynı tarzda efektif enine kesiti azaltırlar. Diğer taraftan oksijensiz bakırda, bakır oksit partikülü olmadığı için, efektif enine kesiti azalmaz. Çekme deneyi ile elde edilen kırık kısımların incelenmesinden oksijenli numunede birçok boşluk olduğu görülürken oksijensiz numunede çok az boşluk olduğu görülür.

Sıcak yırtılma, düşük iletkenlik veya yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşme problemlerine sebep olabilen empüriteleri bağladığı için, bakıra oksijen ilavesi faydalıdır [13].

Literatürdeki çalışmalardan birine göre [20] artan tel çekme deformasyonu ile bakır oksit partiküllerinin görünüş oranının $\varepsilon=2.3$ 'e kadar artarak uzadığı, daha

sonra bunların kırıldığı ve bu uzama-kırılma çevriminin tel çekme sırasında sürekli olarak devam ettiği belirtilmekte, diğer bir çalışmaya göre [21] ise bu oranın tel çekme deformasyonundan etkilenmediği ifade edilmektedir.



BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler "Sarkuysan A.Ş." dan temin edilen SCR (Southwire Continuous Rod) prosesi ile üretilmiş 393 ppm oksijen içeriğine sahip ≈ 8 mm çaplı filmaşinden başlanarak aşağıdaki çaplara çekilmiş ve her çaptan numune alınmış bakır tellerdir. Bu tel çekme işlemlerinde her pasoda ortalama % 30 kesit daralması (veya $\epsilon=0.37$ gerçek deformasyon oranı) uygulanmıştır [$\epsilon=\ln(A_0/A_i)$, A_0 ; tellerin ilk kesit alanı, A_i ; i anındaki kesit alanı].

Tel Çapları (mm): 7.95-6.60-5.40-4.50-3.85-3.25-2.70-
2.35-2.05-1.80

6.2. Kullanılan Cihazlar

Görüntü analizi için quantimet cihazı ve bu cihaz ile bağlantılı bilgisayar kullanılmıştır. Mekanik deneylerde ise mikrosertlik cihazı, 4 ton kapasiteli çekme cihazı ve burma cihazı kullanılmıştır.

6.3. Sertlik Deneyleri

Çeşitli çaplara çekilmiş bakır tellerden numuneler kesilerek bakalite alınmış ve 1 kg'lık yük ile vickers ucuyla mikrosertlik deneyine tabi tutulmuştur. Mikrosertlik deneyinde her çap için en az üç sertlik ölçülerek bunların ortalamaları alınmıştır.

6.4. Çekme Deneyleri

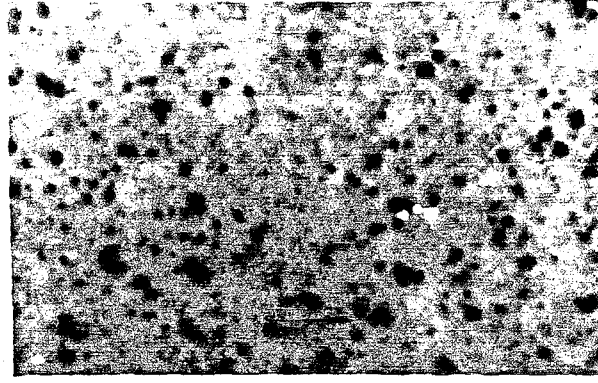
Her çaptaki tellerden, numune boyu (L) ile numune çapı (D) arasında $L=5.D$ şeklinde bir ilişki olacak boyda numuneler kesilerek ve en az üç deney yapıp ölçülen değerlerin ortalaması alınarak her telin mekanik özelliklerinden ortalama akma mukavemeti ile yüzde uzama değerleri elde edilmiştir.

6.5. Burma Deneyleri

Bu deneyler için ise DIN 51212'ye [22] uygun olarak $D \geq 5 \text{ mm}$ için $L=50.D$ ve $5 \text{ mm} > D \geq 1 \text{ mm}$ için $L=100.D$ olacak şekilde numuneler hazırlanmış ve her tel için $P=0.05.\sigma_C.A_0$ olacak şekilde germe yükü (P) seçilerek 60 d/dak burma hızında deneyler yapılmıştır (σ_C ; çekme mukavemeti, A_0 ; kesit alanı). Burma deneylerinden kırılana kadarki burma sayıları tesbit edilmiştir.

6.6. Metalografik Çalışmalar

Görüntü analizi yapabilmek için Bölüm 6.1'de belirtilen tellerden her çaptan yaklaşık 10'ar mm'lik biri enine kesiti, diğeri ise uzunlamasına kesiti incelemek için ikişer numune kesilmiştir. Daha sonra her çap için kesilen bu ikişer numune, biri yatay diğeri dikey olmak üzere bakalite alınmıştır. Bakalite alınan bu numuneler sırasıyla 150, 240, 320, 400, 600 ve 1000 nolu zımparalar ile zımparalanarak kaba parlatma yapılmıştır. Bu numuneler kalın ve ince alümina ve saf su ve daha sonra 0.25 μm 'lik elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan bu numunelerden enine ve uzunlamasına kesitte çekilen fotoğraflar Şekil 6.1 a ve b'de görülmektedir.



a.

20 μm



b

ŞEKİL 6.1. 6.60 mm Çaplı Numunenin Parlatılmış Durumdaki Enine ve Uzunlamasına Kesitteki Fotoğrafları.
(a. Enine Kesit, b. Uzunlamasına Kesit)

6.7. Görüntü Analizi Deneyleri

Bakalite alınmış ve parlatılmış her çaptaki tel numunelerin görüntü analizinde, numuneler üzerinde bakır oksit inklüzyonları açısından görüntü-alan ölçümleri (field-specific measurements) ve görüntü-özellik ölçümleri (feature-specific measurements) yapılmıştır. Ölçümlerdeki büyütme oranı 800X'dir.

Görüntü-alan ölçümleri: Bu ölçümlerde her çap, dolayısıyla her deformasyon oranı için enine kesitte 20 alan ve uzunlamasına kesitte 30 alan incelenmiş ve bakır oksit inklüzyonlarının yüzde düzlemsel yoğunluğu ile birim alana düşen sayısı tesbit edilerek bu değerlerin ortalamaları alınmıştır.

Görüntü-özellik ölçümleri: Bu ölçümlerde ise her bir çap için enine ve uzunlamasına kesitte 10'ar alan incelenmiş ve inklüzyona ait en uzun boyut, buna dik yöndeki boyut (genişlik) değerleri elde edilmiş ve her bir çap için bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Daha sonra her bir çap için enine ve uzunlamasına kesitte en uzun boyutun genişliğe oranları hesaplanarak "görünüş oranları (aspect ratios)" elde edilmiştir.

BÖLÜM 7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

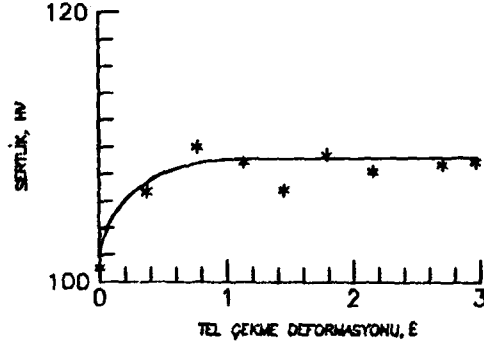
Çeşitli çaplardaki bakır tellerle sertlik, çekme ve burma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 7.1'de verilmiştir.

Tablo 7.1. Çeşitli Çaplardaki Tellerin Çeşitli Mekanik Özellikleri.

Tel çapı (mm)	Kesit daral- ması (%r)	Tel çekme def. (ε)	Sertlik (HV)	Akma geril- mesi (MPa)	Yüzde uzama	Burma sayısı
7.95	0	0	101.1	227	47.5	69
6.60	31.1	0.372	106.7	336	22.7	70
5.40	53.9	0.774	110.0	373	16.7	59
4.50	68.0	1.138	108.9	400	15.6	90
3.85	76.5	1.450	106.8	404	21.1	94
3.25	83.3	1.789	109.4	426	15.6	99
2.70	88.5	2.160	108.2	420	14.0	
2.35	91.3	2.438	105.2	408	16.7	68
2.05	93.4	2.711	108.7	426	15.0	171
1.80	94.9	2.971	108.9	423	16.7	139

Sertlik Deneyi Sonuçları

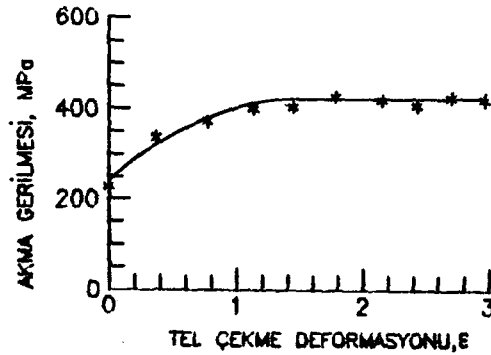
Çeşitli çaplardaki tellerin ölçülen vickers değerlerinin çekme deformasyonu ile değişimi Şekil 7.1'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ≈1.2'lik tel çekme deformasyonuna kadar sertlik 101 HV'den 109 HV'ye artmakta ve daha sonra sabit kalmaktadır.



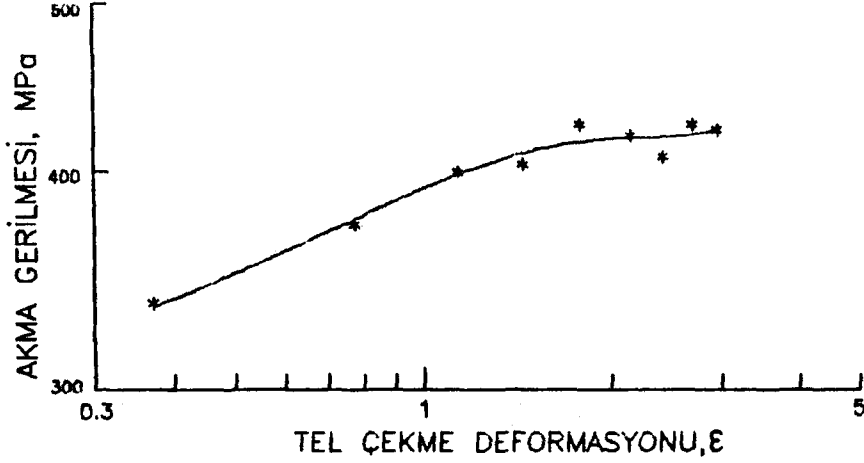
ŞEKİL 7.1. Bakır Tellerin Vickers Sertliğinin Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.

Çekme Deneyi Sonuçları

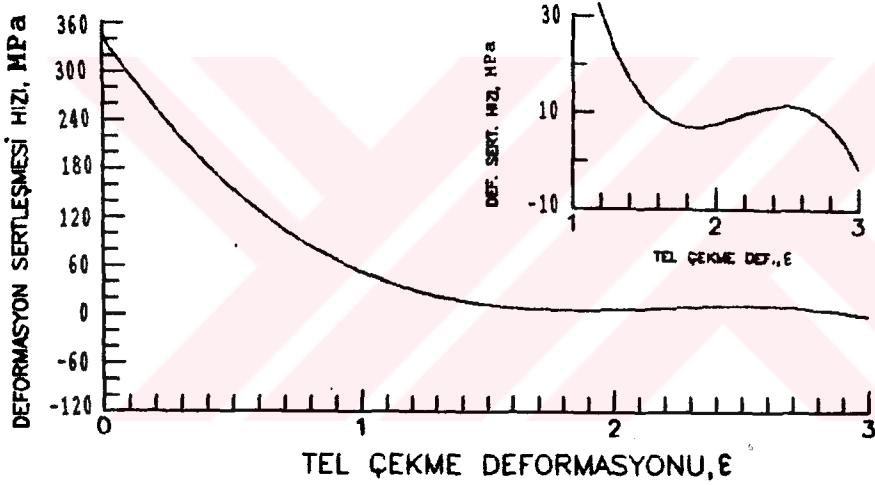
Çekme deneyi ile belirlenen mekanik özelliklerden akma gerilmesinin tel çekme deformasyonu ile değişimini gösteren akma diyagramı (flow curve) Şekil 7.2'de görülmektedir. Bu diyagramın soğuk işlem için uygulanan en genel denklemlerden biri olan $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ şeklindeki Holloman denklemine uygunluğunun tesbiti için $\text{Log} \sigma - \text{Log} \epsilon$ diyagramı (Şekil 7.3) ve $d\sigma/d\epsilon - \epsilon$ diyagramı (Şekil 7.4) çizilmiştir.



ŞEKİL 7.2. Bakır Tellerin Akma Diyagramı.



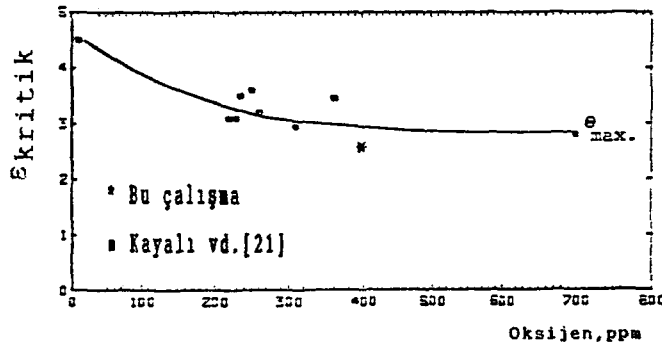
ŞEKİL 7.3. Deformasyon Sertleşmesi Üssünün Tesbiti İçin Çizilen Diyagram.



ŞEKİL 7.4. Deformasyon Sertleşmesi Hızının Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.

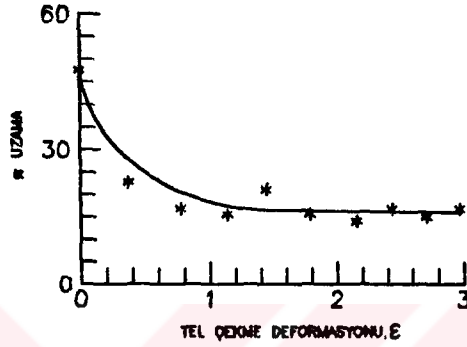
Şekil 7.3'den de görülebileceği gibi deformasyon sertleşmesi üssü, incelenen tel çekme deformasyonu bölgesinde farklı iki değerde bulunmuştur. $\epsilon \approx 2$ tel çekme deformasyonuna kadar $n_1 = 0.16$ iken $\epsilon > 2$ için bu değer $n_2 = 0.04$ değerine düşmektedir. Bu da söz konusu tel çekme deformasyonu bölgesinde akma diyagramının Holloman bağıntısı ile karakterize edilemeyeceğini göstermektedir.

Deformasyon sertleşmesi hızının ($\theta = d\sigma/d\varepsilon$) tel çekme deformasyonuna göre değişimini gösteren Şekil 7.4 incelendiğinde deformasyon sertleşmesi hızının önce hızla azaldığı ve $\varepsilon \approx 1.8$ değerinden sonra çok az değiştiği görülmektedir. Yüksek deformasyon oranlarındaki ($\varepsilon > 1.8$) deformasyon sertleşmesi hızının değişimi detaylı olarak incelendiğinde $\varepsilon \approx 1.8$ 'de bir minimum ve $\varepsilon \approx 2.5$ 'da bir maksimum yaptığı görülmektedir. Böyle bir değişim literatürdeki bir çalışmada da [21] görülmüş ve θ 'nın maksimuma ulaştığı deformasyon oranının soğuk tel çekme işlemi sırasındaki dinamik toparlanma ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmada, aynı zamanda deformasyon sertleşmesi hızının (θ) maksimuma ulaştığı noktaların bakır telin oksijen içeriğine göre değişimini gösteren Şekil 7.5'den dinamik toparlanmanın başladığı θ_{max} 'ın bakırdaki artan oksijen miktarı ile azaldığı da tesbit edilmiştir. Bizim çalışmadan elde ettiğimiz Şekil 7.4'den belirlenen θ_{max} da, incelenen telin oksijen miktarına göre işaretlendiğinde iki çalışma arasında bir uyum olduğu gözlenmektedir. Ayrıca deformasyon sertleşmesi hızının minimum olduğu deformasyon oranı ise $\text{Log}\sigma\text{-Log}\varepsilon$ grafiğinde eğimin değiştiği deformasyon oranıyla aynıdır.



ŞEKİL 7.5. Deformasyon Sertleşmesi Hızının Maksimuma Ulaştığı Tel Çekme Deformasyon Oranının Bakırın Oksijen Miktarı ile Değişimi.

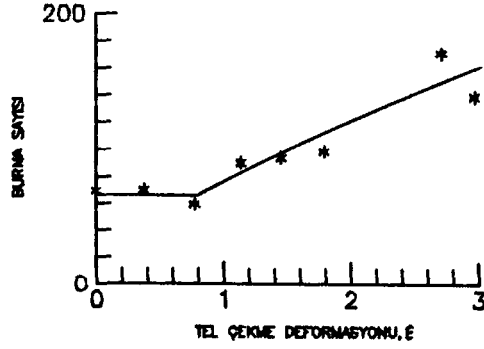
% uzamanın tel çekme deformasyonu ile değişimini gösteren Şekil 7.6'da, artan tel çekme deformasyonu ile sünekliğin azaldığı görülmektedir. Buna göre tel çekme deformasyonu 3'e kadar arttıkça deformasyon sertleşmesinden dolayı % uzamada % 65'lik bir düşme olmaktadır. Bu konuda yapılan diğer çalışmalarda da [11,21] benzer değişim görülmektedir.



ŞEKİL 7.6. Bakır Tellerin % Uzamasının Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.

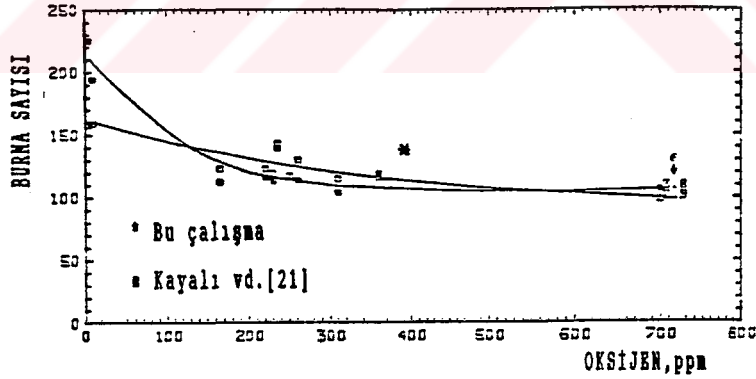
Burma Deneyi Sonuçları

Kırılana kadarki burma sayısının tel çekme deformasyonu ile değişimi Şekil 7.7'de görülmektedir. Burma sayısı 0.8'lik tel çekme deformasyonuna kadar yaklaşık olarak sabit iken, daha sonra artmaktadır. Burma sayısındaki bu artışın sebebi, ilgili DIN standardında [22] tel çapına göre belirlenen numune boyunun $D \geq 5$ mm için $L=50.D$ 'den $1 \text{ mm} \leq D < 5 \text{ mm}$ için $\epsilon=0.8$ değerinden sonra $L=100.D$ boyutuna artması ile ilgili olabilir.



ŞEKİL 7.7. Kırılana Kadarki Burma Sayısının Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.

Bakır telin oksijen içeriği ile sabit bir tel çekme deformasyonundaki kırılana kadarki burma sayısının değişiminin verildiği Şekil 7.8'de, bu çalışmanın burma deneyi sonucu da gösterilmiştir. Elde edilen sonucun daha önceki çalışma [21] ile uyumlu olduğu görülmektedir.



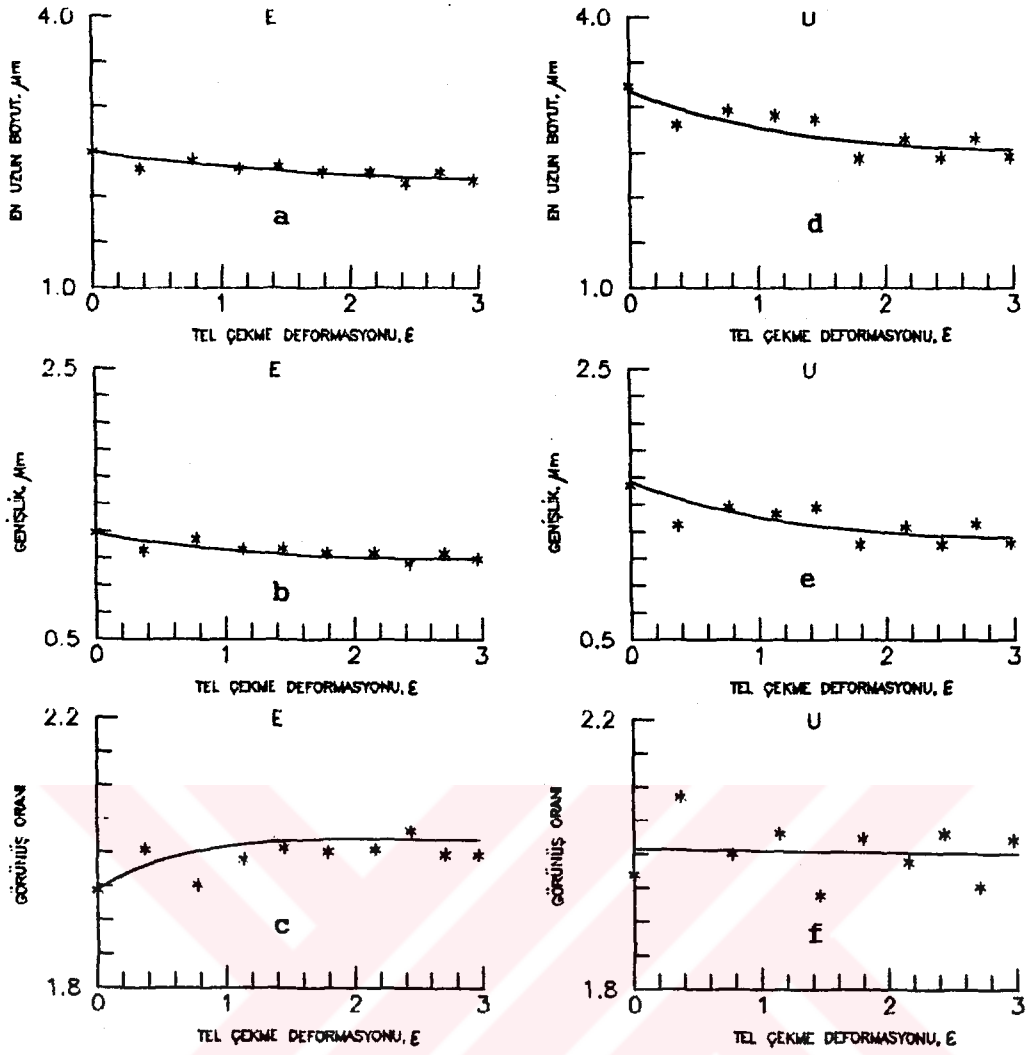
ŞEKİL 7.8. Kırılana Kadarki Burma Sayısının Oksijen Miktarı ile Değişimi.

Görüntü Analizi Sonuçları

Tellerin enine kesitte yapılan görüntü analizlerinde artan tel çekme deformasyonu ile bakır oksit inklüzyonlarının küçüldüğü gözlenmiştir. Genelde elips şeklinde olan bakır oksit inklüzyonlarının yapılan tel çekme sırasında en uzun boyutunun (Şekil 7.9.a) ve genişliğinin (Şekil 7.9.b) azaldığı tesbit edilmiştir. Inklüzyonların en uzun boyutunun genişliğe oranı olarak tanımlanan görünüş oranı ise ≈ 1.4 'e kadar artan tel çekme deformasyonu ile çok az artmaktadır (Şekil 7.9.c). Daha büyük tel çekme deformasyonlarında ise bu oranın pek değişmediği tesbit edilmiştir.

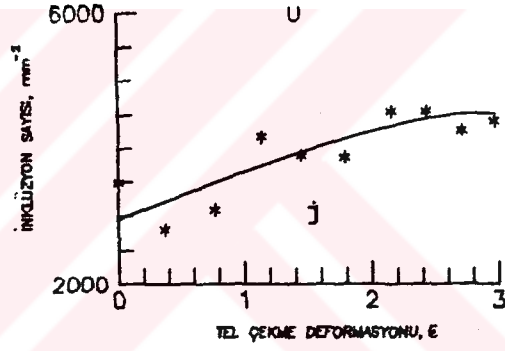
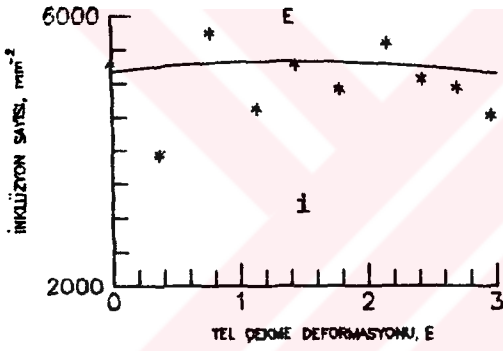
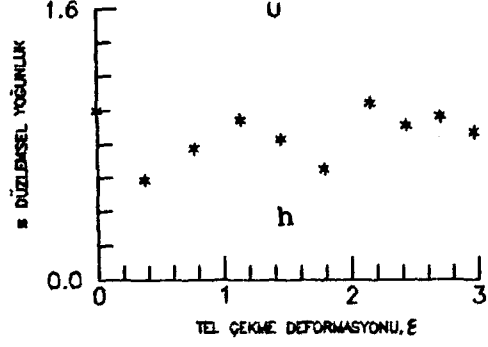
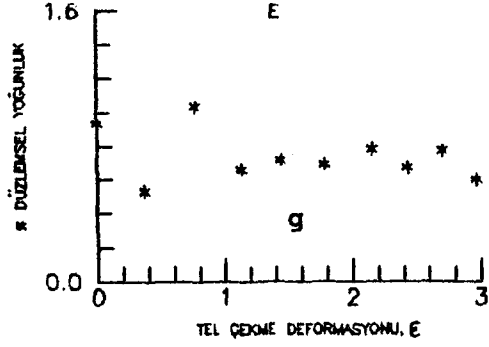
Uzunlamasına kesitte yapılan görüntü analizlerinde de inklüzyonların yine genelde elips şeklinde olduğu ve artan tel çekme deformasyonu ile küçüldüğü tesbit edilmiştir. Tel çekme sırasında inklüzyonların en uzun boyutu (Şekil 7.9.d) ve genişliği (Şekil 7.9.e) azalmaktadır. Inklüzyonların görünüş oranı ise (Şekil 7.9.f) tel çekme deformasyonu ile bariz bir değişim göstermemektedir. Bu sonuç Kayalı ve diğerlerinin [21] artan tel çekme deformasyonu ile inklüzyonların görünüş oranının değişmediğini belirten çalışması ile de uyum içindedir.

Enine ve uzunlamasına kesitte inklüzyonların düzlemsel yoğunluğu ortalama % 1 mertebesinde-dir. Enine kesitte düzlemsel yoğunluk % 0.7 ile % 1.1 arasındaki değerlerde bulunurken (Şekil 7.9.g), uzunlamasına kesitte % 1 ile % 1.3 arasındaki değerlerde bulunmuştur (Şekil 7.9.h).



ŞEKİL 7.9. Görüntü Analizi Sonuçları.

- Enine Kesitte inklüzyonların En Uzun Boyutunun Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- Enine Kesitte inklüzyonların Genişliğinin Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- Enine Kesitte inklüzyonların Görünüş Oranının Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- Uzunlamasına Kesitte inklüzyonların En Uzun Boyutunun Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- Uzunlamasına Kesitte inklüzyonların Genişliğinin Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- Uzunlamasına Kesitte inklüzyonların Görünüş Oranının Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.



- g. Enine Kesitte inklüzyonların % Düzlemsel Yoğunluğunun Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- h. Uzunlamasına Kesitte inklüzyonların % Düzlemsel Yoğunluğunun Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- i. Enine Kesitte Birim Alana Düşen Inklüzyon Sayısının Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.
- j. Uzunlamasına Kesitte Birim Alana Düşen inklüzyon Sayısının Tel Çekme Deformasyonu ile Değişimi.

E:Enine kesit

U:Uzunlamasına kesit

Birim alana (mm^2) düşen ortalama inklüzyon sayısı; enine kesitte bariz bir değişim göstermemesine rağmen (Şekil 7.9.i), uzunlamasına kesitte artan tel çekme deformasyonu ile artma eğilimi göstermektedir (Şekil 7.9.j). Ortalama inklüzyon sayısının uzunlamasına kesitteki $\approx \% 45$ 'lik artışı ise inklüzyonların tel çekme sırasında kırılarak, küçüldüğünü göstermektedir. Bu sonuç Smets ve Mortier'in [20] sonuçlarıyla uyum göstermektedir. Bu araştırmacılar da $\varepsilon \approx 1.4$ 'e kadar artan tel çekme deformasyonu ile inklüzyon sayısının uzunlamasına kesitte arttığını ve daha sonra sabit kaldığını belirtmektedirler.

Bakır tellerin görüntü analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 7.2'de toplu olarak görülmektedir.

Tablo 7.2. Bakır Tellerin Görüntü Analizi Sonuçları.

Enine kesit:

Tel Çek. Def. (ε)	En Uzun Boyut (μm)	Genişlik (μm)	Görünüş Oranı	Ort. İnk. Sayısı (mm ⁻²)	Düzlemsel yoğunluk (%)
0.00	2.50±0.97	1.29±0.67	1.94±0.82	5274±696	0.93±0.22
0.37	2.32±0.81	1.16±0.57	2.00±0.69	3938±732	0.53±0.12
0.77	2.41±0.82	1.23±0.62	1.95±0.72	5739±630	1.03±0.14
1.14	2.32±0.79	1.17±0.58	1.99±0.69	4624±701	0.66±0.13
1.45	2.35±0.89	1.17±0.58	2.01±0.73	5274±573	0.72±0.15
1.79	2.28±0.76	1.14±0.56	2.00±0.66	4910±538	0.69±0.08
2.16	2.28±0.79	1.14±0.56	2.00±0.67	5598±490	0.78±0.12
2.44	2.15±0.45	1.06±0.49	2.03±0.47	5050±649	0.67±0.12
2.71	2.27±0.72	1.14±0.55	2.00±0.64	4933±716	0.77±0.16
2.97	2.18±0.66	1.09±0.51	2.00±0.59	4522±659	0.60±0.14

Uzunlamasına kesit:

0.00	3.23±1.64	1.64±0.91	1.97±1.27	3506±921	1.00±0.39
0.37	2.81±1.27	1.35±0.67	2.09±0.97	2799±790	0.59±0.17
0.77	2.96±1.51	1.48±0.79	2.00±1.15	3092±1560	0.77±0.49
1.14	2.91±1.49	1.43±0.74	2.03±1.11	4172±1064	0.94±0.29
1.45	2.88±1.26	1.48±0.77	1.94±1.02	3904±816	0.83±0.20
1.79	2.43±0.88	1.20±0.58	2.02±0.73	3870±847	0.65±0.21
2.16	2.65±1.14	1.33±0.69	1.99±0.91	4546±922	1.04±0.27
2.44	2.44±0.93	1.20±0.58	2.03±0.75	4547±978	0.91±0.23
2.71	2.65±1.08	1.36±0.71	1.95±0.89	4270±858	0.96±0.23
2.97	2.45±0.91	1.21±0.59	2.02±0.75	4404±883	0.87±0.20

BÖLÜM 8. GENEL SONUÇLAR

1. Bu çalışmada tel çekme sırasındaki deformasyon davranışı incelenen bakır tellerin akma diyagramı Holloman denklemi ile karakterize edilememektedir. Zira incelenen tel çekme deformasyonu bölgesinde farklı deformasyon sertleşmesi üssü değerleri bulunmaktadır.
2. Deformasyon sertleşmesi hızı (θ) artan tel çekme deformasyonu ile $\varepsilon \approx 1.8$ değerinde bir minimum ve $\varepsilon \approx 2.5$ değerinde bir maksimum yapmaktadır. θ 'nın maksimuma ulaştığı deformasyon oranı, soğuk tel çekme sırasında meydana gelen dinamik toparlanma olayı ile ilgilidir. Deformasyon sertleşmesi hızının minimum olduğu deformasyon oranı ise $\text{Log}\sigma\text{-Log}\varepsilon$ grafiğinde eğimin değiştiği deformasyon oranına karşı gelmektedir.
3. Artan tel çekme deformasyonu ile bakır oksit inklüzyonlarının en uzun boyutları ve genişlikleri hem enine hem de uzunlamasına kesitte azalmakta, birim alana düşen ortalama sayıları ise uzunlamasına kesitte artmaktadır. Bu sonuç, bakır oksit inklüzyonlarının tel çekme işlemi sırasında kırılarak küçüldüğünü ve sayılarının arttığını belirtmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] KAYALI, E.S., ENSARI, C., "Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları", İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fak. Ofset Atölyesi, İstanbul, 1986.
- [2] DIETER, G.E., "Mechanical Metallurgy, SI Metric Edition", McGraw Hill Book Co., Singapore, 1988.
- [3] ASHBY, M.F., JONES, D.R.H., "Engineering Materials 1", Pergamon Press, Oxford, 1988.
- [4] CAIRNS, J.H., CLOUGH, J., DEWEY, M.A.P., NUTTING, J., "The Structure and Mechanical Properties of Heavily Deformed Copper", Journal of The Institute of The Metals, 1971, 99, 93-97.
- [5] VANDER VOORT, G.F., "Metallography", McGraw Hill Book Co. Inc., London, 1984.
- [6] TEKİN, E., "Demir Alaşımlarının Uygulamalı Optik Metalografisi", SEGEM, Ankara, 1982.
- [7] VANDER VOORT, G.F., "Image Analysis", in Metals Handbook (Materials Characterization), 9th Ed., Vol 10, ASM, 1985, 309-322.
- [8] TEKİN, E., "Teknolojik Açıdan Temiz Çelik Üretimi, Pota Metabilimi ve Ötesi", Metalurji, 1988, 58, 15-34.
- [9] BRICK, R.M., PENSE, A.W., GORDON, R.B., "Structure and Properties of Engineering Materials, ISE", 4th Ed., McGraw Hill Kogakusha, Ltd, Tokyo, 1977, 166-169.
- [10] Metals Handbook (Metallography, Structures and Phase Diagrams), 8th Ed., Vol 8, ASM, 1973, 295.
- [11] KAYALI, E.S., "Farklı Yöntemlerle Üretilen Bakır Çubukların Tel Çekme İşleminde Deformasyon Davranışlarının Karşılaştırılması", 5. Metalurji Kongresi, Ankara, 1988, 99-110.

- [12] KAYALI, E.S., UYAR, M., SAYED, M.E., "Influence of The State of Material Dependable on Different Production Processes Upon The Cold Drawing and Recrystallization Properties of Copper Wire Rod", Final Report of The Research Project DFG Fu-48/46-3, Institute of Mechanical Metallurgy, TU Clausthal, 1988.
- [13] CHIA, E.H., ADAMS, R.D., "The SCR Continuous Copper System: From Melt to Wire", Journal of Metals, Feb.1981, 68-74.
- [14] CHIA, E.H., JACKSON, P.M., "Demerit Grading System: A Description of Quality Tests for Copper Rod", Wire Journal, Dec.1978, 1-5.
- [15] JACKSON, P.M., "Test Procedures for Copper Supply Rod", Nonferrous Wire Handbook (Ed. TASSI, O.J.), The Wire Association International Inc., 1981, Chapter 7.
- [16] MALIN, A.S., HATHERLY, M., Metals Science, 1979, 13, 463-472.
- [17] HATHERLY, M., MALIN, A.S., Metals Technology, 1979, 6, 308-319.
- [18] STAKER, M.R., HOLT, D.L., Acta Metallurgica, 1972, 20, 569-579.
- [19] OPIE, W.R., TAUBENBLAT, P.W., HSU, Y.T., "A Fundamental Comparison of The Mechanical Behaviour of Oxygen-Free and Tough Pitch Coppers", in Proceedings of an International Conference, Copper and Its Alloys, The Institute of Metals, Amsterdam, Sept.1970, 106-110.
- [20] SMETS, J., MORTIER, R., "The Influence of Oxygen During Hot Rolling and Drawing of Continuous Cast Rod", in Proceedings of 53rd Annual Conference, Wire Association International, Atlanta, GA, Nov.1983, 266-281.

- [21] KAYALI, E.S., SAYED, M.E., FUNKE, P., "Deformation Behaviour During Drawing of Copper Rods Produced Using Various Processes", Materials Science and Technology, Sept.1990, 872-883.
- [22] Materialprüfnormen für Metallische Werkstoffe 1, DIN Taschenbuch, Beuth Verlag GMBH, Berlin, 1975, 19, 190-197.



ÖZGEÇMİŞ

Mustafa M. ARIKAN 1966 yılında Bursa'da doğmuştur. Lise eğitimini 1983 yılında İzmit Endüstri Meslek Lisesi Elektronik bölümünde tamamladıktan sonra aynı yıl Yıldız Üniversitesi Kocaeli Meslek Yüksek Okulu Elektronik Bölümünü kazanarak bu okula bir yıl devam etmiş, 1984 yılında ise İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği bölümünü kazanmış; 1988 yılında bu bölümden Metalurji Mühendisi ünvanıyla mezun olmuştur. Yine aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme programında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Mart 1990'dan itibaren İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Metalurji Mühendisliği bölümü Malzeme Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi