T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

MBM 305
MİKROYAPI KARAKTERİZASYONU
DERS NOTLARI

KAYSERİ
EYLÜL 2020

HAZIRLAYAN: Dr. Öğr. Üyesi Esen DAĞAŞAN BULUCU

İçindekiler

1. BÖLÜM 3
GENEL BİLGİLER 3
Malzeme Mühendisi: 3
Atom Altı Yapı: 3
Atomik Yapı: 3
Mikroyapı: 3
Makro Yapı: 3
Metalografi: 3
Mikroskop: 3
2. BÖLÜM 4
OPTİK MİKROSKOPİ (IŞIK MİKROSKOPİSİ) 4
2.1. Işık Mikroskobu 4
2.2. Optik Mikroskop İçin Numune Hazırlama 9
2.2.1 Kesme: 10
2.2.2. Kalıplama: 11
2.2.3. Zımparalama ve Parlatma: 13
2.2.3.1. Zımparalama ve Parlatma İşlemlerinde Kullanılan Araç Gereçler 13
2.2.4. Dağlama: 17
2.3. Optik Mikroskobun Çalışma Prensibi 20
2.4. Mikroskobik İnceleme Yöntemleri 20
2.4.1. Karanlık Saha Aydınlatması 21
2.4.2. Faz-Kontrast 21
2.4.3. Polarize Işık 21
2.5. Optik Mikroskop ile Mikroyapı Analizi 21
Saf Metallerin ve Tek Fazlı Sistemlerin Yapısı 22
Ötektik Sistemlerde Katılaşma Yapısı 22
Demir-Karbon Sistemlerinin Mikro Yapısı 23
Dökme Demirler ve Dökme Demir Mikroyapıları 31
Çeliklerde Isıl İşlem Sonrası Mikroyapılar 35
3. BÖLÜM 36
ELEKTRON MİKROSKOPİSİ 36
3.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) 36
Kaynakça 53

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

Bu bölümde bu ders boyunca sıklıkla kullanacağımız terimler ve bu dersin genel olarak Malzeme Mühendisliği içerisindeki yeri açıklanacaktır.

Malzeme Bilimi: Malzemelerin yapıları ile özellikleri arasındaki ilişkinin ortaya konulması ile ilgilenir.
Malzeme Mühendisi: Yapı-özellik ilişkisine dayanarak istenilen bir dizi özelliği kazandırmak üzere malzeme yapısının tasarlanması ve istenilen özelliğe uygun malzemenin seçilmesinde görev yapan mühendislik dalıdır.
Yapı: Bir malzemenin içerisinde bulunan bileşenlerin oluşturduğu düzenle ilgilidir.
Atom Altı Yapı: her bir atomun elektronları ve elektronların çekirdekleri ile etkileşimlerini kapsar.
Atomik Yapı: Malzeme içerisindeki atomların ya da moleküllerin oluşturduğu düzeni ifade eder.
Mikroyapı: Çok sayıda atomun bir araya gelmesiyle oluşan yapılar ancak mikroskop yardımıyla yakından gözlenebildiği için mikroyapı olarak adlandırılırlar. En basit ifadeyle malzemenin iç yapısıdır.
Makro Yapı: Çıplak gözle görülebilen yapısal öğelerdir.
Metalografi: Metal ve alaşımlarının iç yapısını inceleyen, iç yapı ile malzeme özellikleri arasındaki ilişkiyi kuran bilim dalıdır.
Mikroskop: Çeşitli merceklerin kullanılması ve bu merceklerin düzenlenmesi ile cisimlerin görüntülerinin büyütülmesine imkan sağlayan cihazlardır. Mikroskop, cisimlerin görüntülerinin büyütülmesini sağlarken aynı zamanda büyüyen görüntünün netliğini veya çözünürlüğünü de artırmalıdır. Bu nedenle "büyütme" ve "çözünürlük" eş zamanlı olarak değerlendirmesi gereken iki kavramdır. *(Bkz. Bölüm 2)*

Mikroskoplar optik mikroskop ve elektron mikroskobu olmak üzere ikiye ayrılırlar. Optik mikroskoplar maksimum 2000 kat büyütme ve 100 Â civarında bir çözünürlük sağlarken elektron mikroskopları ise 20 bin kat büyütme ve 10 Â civarında çözünürlük sağlayabilirler.

Malzemelerin bütün fiziksel, kimyasal, elektronik ve mekanik özellikleri, bileşimlerinin yanı sıra iç yapısıyla da yakından ilişkilidir. Bu nedenle üretimde kalite kontrolü, yeni malzemelerim geliştirilmesi, dayanıklılık ve hasar tespiti gibi önemli konularda malzemelerin iç yapısının araştırılması gerekmektedir.

2. BÖLÜM

OPTİK MİKROSKOPİ (IŞIK MİKROSKOPİSİ)

2.1. Işık Mikroskobu

En yaygın kullanılan ve en basit yapıya sahip olan mikroskop çeşididir. Işık mikroskopları elektromanyetik spektrumun görünür veya görünüre yakın kısmını ışık kaynağı olarak kullanan mikroskoplardır. Optik mikroskopi yönteminin tarihi diğer karakterizasyon yöntemlerinden daha eskiye dayanır. Bu yöntem, basit olarak bir numunenin 0.2 µm kadar çözünürlüğe sahip beyaz ışık altında görüntülenmesidir. Ancak optik mikroskop altında görüntü alabilmek için numunelerin çeşitli hazırlık aşamalarından geçirilmesi gerekmektedir.

Temel olarak bir ışık mikroskobu insan gözünün geliştirilmiş halidir. İnsan gözünün ayırt etme sınırı olan 0.1 mm'nin altındaki yapıların doğrudan görülebilmesine imkan verecek şekilde küçük görüntüleri büyütür.

Şekil 1'de bir optik mikroskobun temel parçaları verilmiştir.

Şekil 1. Optik Mikroskobun Temel Parçaları [1]

Optik mikroskoplar birbirleri ile bağlantılı başlıca 3 ana optik sistem içerirler:

- Objektif
- Oküler
- Aydınlatma Sistemleri (Işık Kaynağı)

<u>a. Objektif:</u>

[1] https://www.canlibilimi.com/

Farklı büyütme kapasitelerine sahip merceklerden meydana gelir. Objektifler optik mikroskobun numuneye en yakın parçası olup, genellikle ana eksen etrafında dönen ve revolver adı verilen bir parça üzerine montajlanmıştır. Böylece revolver döndürülerek farklı büyütmelerde görüntü almak mümkün hale gelir.

Objektifler, başlıca 4 özellik ile karakterize edilirler.

i. Büyütme Oranı: Objektifler okülerin yardımı olmadan da belirli oranda büyütme yaparlar. Buna "ön büyütme" denir ve ön büyütme oranı objektifin üzerinde yazan X harfi ile birlikte belirtilir (Şekil 2). Benzer şekilde oküler de bir "ön büyütme"ye sahiptir. Objektif ve okülerin bir araya getirdiği sistemdeki toplam büyütme (mikroskobun toplam büyütmesi) oranı sadece ön büyütme değerlerine bağlı olmayıp aynı zamanda oküler ve objektifin mikroskop tüpü içerisinde birbirlerine uzaklıkları ile de doğrudan ilgilidir.

Büyütme miktarı belli olan objektif ve oküler sistemi belirli bir tüp uzunluğunda kullanıldığında mikroskobun toplam büyütmesi her iki optik sistemin ön büyütmelerinin çarpımına eşittir.

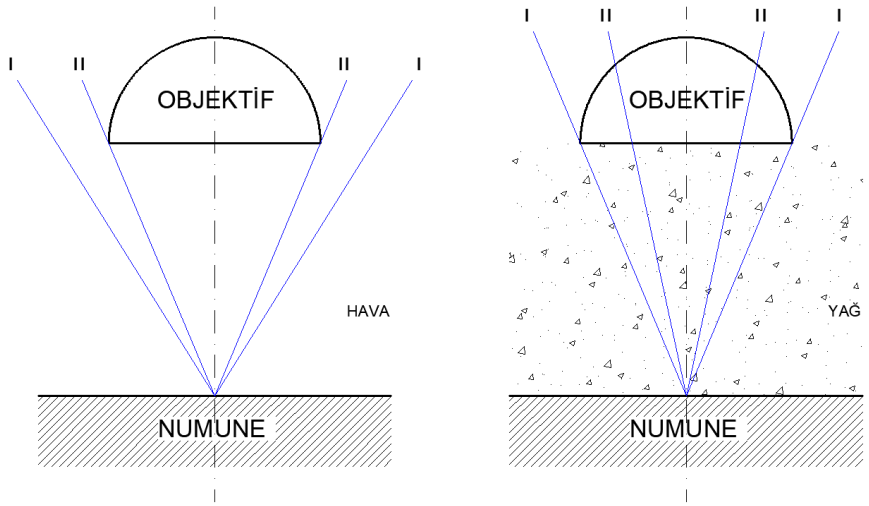
Şekil 2. Optik Mikroskoba ait Bir Objektif [2]

ii. Sayısal (Numerik) Açıklık: Bir objektifin ışık toplama yeteneğini ifade eder. Objektifin ince detayları ayırt edebilmesi esas olarak objektife giren ışığın miktarı ile ilgilidir. Dolayısıyla numerik açıklık büyüdükçe objektifin ayırt etme yeteneği de artar. Objektifin ön merceği ile numune yüzeyi arasındaki ortamın kırılma indisi de objektifin sayısal açıklığına etki etmektedir.

$NA = \mu \times \sin \Theta$

μ: Numune ile objektif arasındaki ortamın kırılma indisi
Θ: Objektifin tepe açısının yarısı

[2] http://www.elektroteknikmedikal.com



Şekil 3. Kuru ve Yağlı Objektiflerdeki Sayısal Açıklık [3]

Örnek Soru: Tepe açısı 60 derece olan bir objektif hava ve yağ gibi iki farklı ortamda kullanıldığında numerik açıklık nasıl değişir? (μ_{hava}=1,0; $\mu_{yağ}$=1,5)

2Θ=60 (Tepe Açısı)
Θ= 30° ((Tepe Açısının Yarısı)

$NA_{hava} = \mu_{hava} \times \sin \Theta$
$NA_{hava} = 1 \times \sin 30°$
$NA_{hava} = 0{,}5$

$NA_{yağ} = \mu_{yağ} \times \sin \Theta$
$NA_{yağ} = 1{,}5 \times \sin \Theta$
$NA_{yağ} = 0{,}75$

$$\mathbf{NA_{yağ} > NA_{hava}}$$

<u>iii. Ayırt Etme Gücü ve Ayırt Etme Sınırı (AEG ve AES):</u> Numune üzerinde birbirine en yakın iki noktanın net olarak gözlenebilmesinin ölçüsüdür. Objektifin birbirine yakın detayları fark ettirebilme yeteneğinin ölçüsüdür. Objektifin numerik açıklığına ve kullanılan ışığın dalga boyuna bağlıdır.

$$AEG=\frac{2NA}{\lambda}$$

NA: Nümerik Açıklık
λ: Kullanılan ışığın dalga boyu (nm)

Bir optik mikroskop için ayırt etme gücünden (AEG) daha sık kullanılan bir ifade ise ayırt etme sınırıdır,

$$AES=\frac{1}{AEG}=\frac{\lambda}{2NA}$$ denklemi ile ifade edilir.

Örnek Soru: Numerik açıklığı 1.0 ve ön büyütme oranı 100X olan bir objektif dalga boyu λ=0.00053 mm olan yeşil ışık ile kullanılırsa AES ne olur?

[3] Metalografi Bilimi, Prof. Dr. Serdar SALMAN, Dr. H. Özkan GÜLSOY.

$$\textbf{AES}=\frac{1}{AEG}=\frac{\lambda}{2NA}=\frac{5,3}{2}.10^{-4}= 2,65.\ 10^{-4}\ \text{mm}$$

(Bu demektir ki; mikroskopla görüntülenen bir nesne üzerindeki iki noktanın arasındaki mesafe 0.000265 mm ve daha fazla ise net görüntüler elde edilebilir. Ancak aynı nesne üzerinde 0.000265 mm'den daha dar aralıktaki noktalar bu objektifle birbirinden net şekilde ayırt edilemez.)

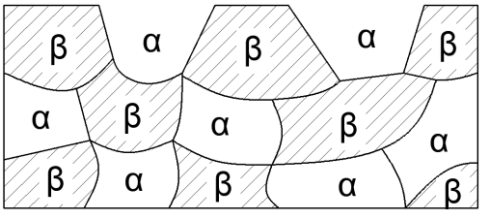
Örnek Soru: İnsan gözünün ayırt edebilme sınırının 0.11 mm olduğu bilinmektedir. Buna göre önceki örnekte verilen objektifin ayırt edebildiği 0.000265 mm aralıklı noktaları gözün ayırt edebilmesi için mikroskobun toplam büyütmesi, okülerin büyütmesi ne olmalıdır?

0,000265 x K = 0,11
K = 415 (Görüntü toplam 415 kat büyütülmelidir.)

Mikroskobun Toplam Büyütmesi= Objektifin Ön Büyütmesi x Okülerin Ön Büyütmesi = 415 olmalıdır.
100 x Okülerin Ön Büyütmesi = 415
Okülerin Ön Büyütmesi ≥ 4 (Kullanılacak oküler en az 5X olmalıdır.)

Mikroskobik incelemelerin temel amacı numunedeki ayrıntıların ayırt edilebilmesidir. Bu nedenle bir objektifin göreceli olarak daha önemli olan özelliği toplam büyütme oranı değil ayırt edebilme gücüdür. Objektiften dolayı numerik açıklığın sabit olduğu düşünülürse değişkenler numunenin bulunduğu ortamın kırılma indisi ve kullanılan ışığın dalga boyudur. Laboratuvar ortamlarında yeşil ışıkla (λ=5000 Â) birlikte yağ (μ=1,3-1,5) kullanıldığında objektifin ayırt etme gücü teorik olarak 0.2 μm'a kadar çıkabilir.

<u>iv. Derinliğine Ayırt Etme Gücü (DAEG):</u> Optik mikroskopla görüntüleme için numune hazırlanırken dağlama işlemi numune yüzeylerinde farklı yüksekliklerde bölgeler oluşmasına neden olur.



Şekil 4. İki Fazlı bir Numune için Derinliğine Ayırt Etme Gücü [4]

Derinliğine Ayırt Etme Gücü, yüzeydeki farklı yüksekliklere sahip bölgelerin görüntü netliği kaybedilmeden birlikte görüntülenebilmesidir. Örneğin şekil 4'teki mikroyapıda objektif α fazını görmek için ayarlandığında β fazı da aynı netlikte görülebilmelidir.

[4] Metalografi, Prof. Dr. Emel GEÇKİNLİ.

Derinliğine Ayırt Etme Gücü, numune yüzeyindeki en yüksek ve en alçak bölgelerin birbirlerine dik uzaklıkları ve $\frac{1}{NA^2}$ değeriyle orantılıdır. Yani NA değeri düşük olan bir objektifin derinliğine ayırt etme gücü daha fazladır.

Optik mikroskoplarda 4 çeşit objektif kullanılır:

Akromatik Objektifler
Apokromatik Objektifler
Yarı Apokromatik Objektifler
Özel Objektifler

A. Akromatik Objektifler: En yaygın kullanılan objektif türleridirler. Optik hatalardan nispeten daha az etkilendikleri için sıklıkla tercih edilirler. En önemli dezavantajları görüntü alanının ortasında iyi görüntü verirken kenarlarında net görüntü verememeleridir.

B. Apokromatik Objektifler: Optik hataları çok iyi tolere edebildiklerinden en ideal objektife türüdür ve maliyetleri yüksektir. Akromatik objektiflere kıyasla numerik açıklık değerleri daha büyük ve ön büyütme oranları daha yüksektir.

C. Yarıapokromatik Objektifler: Fluoritler olarak da bilinirler. Optik kalite ve genel objektif performansı olarak akromatik objektiflere benzerler. Yüksek performans için dengeleyici okülerler ile birlikte kullanırlar.

D. Özel Objektifler: Optik hataların ortadan kaldırılması amacıyla özel olarak dizayn edilmiş objektiflerdir.

<u>b. Oküler:</u>

Objektif tarafından oluşturulan ilk görüntüyü genişleten ve sanal görüntü olarak görülebilir hale getiren veya ilk görüntüyü gerçek görüntü olarak tespit eden optik elemanlardır. Aynı zamanda objektif kusurlarının kısmen düzeltilmesine de yardımcı olurlar. Okülerler objektiflere göre daha küçük büyütme oranlarına (5X, 10X gibi) sahiptirler. Dört farklı tipte oküler vardır. Bunlar;

A. Negatif (İç bükey/ıraksak mercekli) Okülerler
B. Pozitif (Dış bükey/Yakınsak mercekli) Okülerler
C. Dengeleyici Okülerler
D. Amlifikatör (Fotografik) Okülerler

<u>c. Aydınlatma Sistemleri (Işık Kaynakları)</u>

Nesnelerin görüntülenmesi ışık demetleri sayesinde olur. Optik mikroskopta ışık kaynağı olmaksızın görüntü elde edilemez. Kullanılan ışık kaynağına bağlı olarak görüntü kalitesi değişir. Işık mikroskoplarında kullanılan başlıca ışık kaynakları şunlardır:

1. Tungsten Filamanlı Lambalar: Genellikle düşük voltaj ve yüksek dayanım sergileyen lambalardır. Homojen aydınlatma sağladıkları için mikroskoplarda sıklıkla tercih edilirler. Tek renk ışık sağlarlar. Farklı renkte ışık elde edebilmek için filtrelerle birlikte kullanılabilirler.

2. Karbon Ark Lambaları: Yüksek siddette ışık sağlayan lambalardır. Faz analizleri (kontrast oluşturma), polarize ışık mikroskopları ve karanlık saha çalışmaları için elverişlidir.

3. Ultraviyole Lambalar: Bu tarz lambalarda kadmiyum kıvılcımları kullanılır ve böylece beyaz ışıkla elde edilenden yaklaşık 2.5 kat daha yüksek ayırt etme gücü sağlanabilir. Ultraviyole radyasyon cam tarafından uzun süre tutulduğu için quartz mercekler tercih edilir. Bu nedenle ultraviyole lambaların maliyeti yüksektir ve metalografik amaçlı kullanımları sınırlıdır.

4. Zenon Lambalar: Işık şiddetleri yüksektir. Kararlıdırlar. Maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle kullanımları sınırlıdır.

5. Zirkonyum Ark Lambalar: Işık şiddetleri yüksektir, ancak maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle kullanımları sınırlıdır.

2.2. Optik Mikroskop İçin Numune Hazırlama

Numune Seçimi: İncelenecek malzemeden numune alınırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta numune hakkında bir fikre varmamızı sağlayacak parça veya parçaların yapısını yansıtabilmesidir. Metalografik inceleme hangi amaçla gerçekleştirilecekse numune seçimi de o amaca uygun olarak yapılmalıdır. Genel amaçlı metalografik incelemelerde numune alınan bölge malzemenin bütünündeki yapıyı özetleyen bir bölgeden seçilmelidir.

Çatlak veya kırılma bölgeleri incelenirken ise amaç olayın nedenini ve kaynağını bulmaktır. Bu amaçla numunenin nereden alınacağı tespit edilirken çatlamanın/kırılmanın başladığı noktadan, hasarın oluştuğu noktadan ve parçanın hasara uğramamış kısmından numune alınmalıdır. Genel amaçlı metalografik incelemeler için ise tamamen amaca yönelik numune seçimi yapılmalıdır.

Numune seçiminde dikkat edilmesi gereken ikinci önemli husus ise alınan numunenin büyüklüğüdür. Metalografik numunelerin büyüklüğünün tespitinde en önemli kriter ise alınan numunenin mikroskop tablası üzerine rahatça oturabilmesi ve objektif altında kolaylıkla hareket ettirilebilmesidir. Bu açıdan genellikle numune kesit alanının 25-30 mm^2'yi, çapının ise 25 mm'yi geçmemesi gerekmektedir.

Metalografik incelemelerde seçilen numunenin bir anlam ifade edebilmesi için bu numunenin gerek fiziksel gerekse kimyasal bileşim açısından incelemek istediğimiz asıl malzemeyi tam olarak temsil etmesi gerekir. Doğruya en yakın incelemeyi yapabilmek için belirli bir bölgeden enine veya boyuna numune/numuneler alınabilir.

Enine Numune Alınması Gereken Durumlar

Genel mikroyapı incelemeleri,
Karbürizasyon derinliği,
Dekarbürizasyon derinliği,
Korozyon derinliği,
Oksidasyon derinliği,
Kaplama kalınlığının tespiti,
Yüzey hatalarının tespiti,
Gözenek dağılımı vb.

Boyuna Numune Alınması Gereken Durumlar

Genel mikroyapı incelemeleri,
Işıl işlem görmüş yapıların analizi,
Plastik deformasyona uğramış yapıların analizi vb.

İstenilen amaca uygun numune seçildikten sonra optik mikrokopla inceleme öncesi numune bazı aşamalardan geçirilmelidir;

1. Kesme
2. Kalıplama
3. Parlatma
4. Dağlama

2.2.1 Kesme:

Numunenin alınacağı bölge tespit edildikten sonra uygun bir kesici araç ile numune kesilerek ana malzemeden ayrılır. Bu kesici araç; torna tezgahı, testere, kesici seramik taşlar veya oksi asetilen alevi gibi araçlardan herhangi birisi olabilir. Hatta gerek duyulması halinde bu yöntemlerin birkaçı da birlikte kullanılabilir. Kesme için uygun yöntemi seçerken önemli olan nokta numunenin yapısında en az değişimi sağlayacak yöntemi seçmektir. Bu yöntemlerden her biri kestikleri yüzeyden belirli bir derinliğe kadar malzemenin iç yapısını değiştirebilir ve böylece sonuçları etkileyebilirler.

Örneğin oksi asetilenle kesilen yüzeydeki metal sıvı faza geçebilir ve sonra tekrar katılaşabilir. Dolayısıyla numunenin yapısı tamamen değişeceği için inceleme doğru sonuç vermeyecektir. Testere gibi araçların kullanımında ise malzeme yüzeyde az da olsa soğuk deformasyona uğrayacağı için yine iç yapıda değişime neden olabilir. Testere, torna tezgahı, kesici seramik taşla kesme gibi yöntemler ise aynı zamanda numune alınacak malzemeyi de ısıttıklarından soğuk deformasyon ile birlikte ısının da etkisiyle iç yapıda değişime neden olabilirler. Oksi asetilen aleviyle kesme dışındaki yöntemlerde kesme hızı kontrol edilerek veya kesme işlemi esnasında su ile soğutma yapılarak numune yapısını değiştirebilecek etkenler ortadan kaldırılmalıdır. Yüzeydeki plastik deformasyon sorunu yüzeylerin kademeli şekilde zımparalanması ile ortadan kaldırılabilir.

Günümüzde metalografi laboratuarlarında genellikle su sirkülasyonlu abraziv diskli kesme makineleri kullanmaktadır (Şekil 5). Bu tip kesme makineleri döner diskli olup farklı çap ve özelliklerde kesici disklerden faydalanılır. Bu döner disklerin yüksek devirlerde döndürülmesi ile kesme işlemi gerçekleştirilir. Numune üzerinde ısınmaya engel olmak için numune kesme işlemi esnasında sürekli olarak şu-yağ karışımı ile soğutulur.

Şekil 5. Su Sirkülasyonlu Abraziv Diskli Kesme Makinesi ve Kesme Diskleri [5]

Kesme işlemi yapılırken numune üzerinde oluşan plastik deformasyon ve sürtünmenin numune yapısını bozmaması önemlidir. Bu nedenle abraziv kesme makineleri ve kesme işlemi için aşındırıcı diskler geliştirilmiştir. Kesme diskleri Al_2O_3, SiC, cBN ve elmas gibi sert seramik aşındırıcıların uygun bir bağlayıcı ile bir araya getirilerek preslenmesi ile elde edilir. Bu disklerden her biri farklı tipte malzemelerin kesimi için uygundur.

Al_2O_3: Çelik, Alüminyum, Ni Alaşımları
SiC: Bakır ve alaşımları
cBN: Çok sert demir esaslı malzemeler
Elmas: Ultra sert (>1000 HV) malzemeler

Abraziv diskli kesme testerelerinde soğutucu olarak korozyona yol açmayacak yağ-su karışımlar kullanılır. Soğutucu sıvı hem sürtünme nedeniyle oluşan ısıyı azaltır hem de kesme esnasında kopan parçacıkları yüzeyden uzaklaştırır.

2.2.2. Kalıplama:

Malzemeden uygun yöntemle kesilip ayrılan metalografik numuneler elle tutulamayacak kadar küçükse ve/veya düz bir zeminde dengede duramayacak bir şekle sahipse bu durumda bu tip numunelerin kalıplanması gerekir.

[5] https://www.als.com.tr

Numunelerin kalıplanma nedenleri;

- Numunenin küçük olması,
- Düzgün şekle sahip olmaması,
- Sonraki aşama olan parlatma işleminin standart başlıklı otomatik parlatma makineleri ile gerçekleştirilecek olması,
- Özellikle yumuşak metaller için zımparalama aşamasını kolaylaştırmasıdır.

Metalografik inceleme amaçlı kalıplama sıcak ve soğuk olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilebilir.

Sıcak Kalıplama: Sıcaklık ve basıncın etkisiyle gerçekleştirilir. Bu amaçla özel olarak imal edilmiş preslerden faydalanılır (Şekil 6.). Numuneyi kalıplamak için kullanılan malzemeler genellikle polimer tozlarıdır. Polimer seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta dağlayıcı reaktiften etkilenmemesidir. Bu amaçla en sık tercih edilen polimerler bakalit, lusit ve tenittir. Sıcak kalıplama makineleri ile yaklaşık 5 dakika içerisinde standart çapta (1 inç=25.4 mm) bir numune elde edilebilir.

Şekil 6. Otomatik Sıcak Presleme (Kalıplama) Makinesi. [6]

Soğuk Kalıplama: Sıcak kalıplama yöntemi kalay, kurşun vb. ergime noktası düşük metallere uygulanamaz bu nedenle soğuk kalıplama yöntemi geliştirilmiştir.
Soğuk kalıplama için üç farklı polimer kullanılabilir:

- Polyester (Saydam)
- Epoksi (Yarı Saydam)
- Akrilik (Opak)

[6] http://www.bulutmak.com/

Her üç malzeme de iki bileşenden oluşur: reçine ve sertleştirici. Bu iki bileşen belirli oranlarda karıştırılarak kalıba dökülür. Karışım oda sıcaklığında egzotermik polimerizasyona uğrayarak zamanla katılaşır. Katılaşma süresi bileşenlerin oranına bağlı olarak 20 dakika ile 24 saat arasında değişebilir.

Gerekli durumlarda numuneler kalıplama işlemi öncesinde de zımpara yardımıyla çapaklardan temizlenmelidir.

2.2.3. Zımparalama ve Parlatma:

Numuneler kesildikten ve kalıba alındıktan sonra mikroskobik inceleme için patlatılmalıdır. Parlatma işlemi birden fazla kademeyi içerir. Her kademede bir önceki kademede kullanılan aşındırıcılardan daha ince taneli bir aşındırıcı kullanılır. Böylece her kademenin numune üzerinde oluşturduğu deformasyon izleri en aza indirilebilir.

Kaba zımparalama olarak bilinen ilk zımparalama aşamaları sonrasında yüzey pürüzlülüğü yaklaşık olarak 10-100 μm seviyesine indirilir. Son zımparalama kademesinden sonra ise bu değer 1 μm'nun altına indirilebilir. Zımparalama aşamaları sonrasında yüzeyler parlatma işlemine tabi tutulur ve numune yüzeyleri dağlama aşaması öncesinde son parlaklığa ulaşır.

2.2.3.1. Zımparalama ve Parlatma İşlemlerinde Kullanılan Araç Gereçler

Zımparalar: Sert seramik (genellikle SiC) parçacıklarının bir kumaş ya da kâğıt üzerine yapıştırılması ile elde edilen aşındırıcılardır.

Zımparaların sınıflandırılması şu şekilde yapılabilir:

Tablo 1. Zımparaların Sınıflandırılması

Zımpara Numarası	Tane Boyutu (μm)
80	210-177
150	105-88
180	88-74
240	53-45
320	37-31
400	31-27
600	22-18
800	15-11

Görüldüğü gibi zımpara kağıtlarında kâğıt numarası arttıkça tane boyutu küçülür.

Aşındırıcı ve Çuhalar: Parlatma kademesinde genellikle Al_2O_3, Cr_2O_3, MgO, Fe_2O_3 ve elmas tozu gibi aşındırıcılar kullanılır. Elmas tozu genellikle sprey veya macun şeklinde diğer aşındırıcılar ise saf su ile hazırlanmış süspansiyonlar şeklinde kullanılırlar. Patlatılan numune eğer sudan etkileniyorsa bu durumda ezilen, glikol veya gliserin gibi kimyasallardan faydalanılır.

Zımparalama ve parlatma işlemleri tek ya da birden fazla döner diske sahip cihazlar ile gerçekleştirilir. Bu diskler üzerine sabitlenen zımparalar veya çuhalar yardımıyla işlem gerçekleştirilir. Kullanılan diskler pirinç, bronz veya alüminyum alaşımlarından üretilirler. Cihazın dönme hızı 400-500 d/d arasında değişir. Kaba zımparalama kademesinde genellikle yüksek devir sayıları, nihai (ince) zımparalama kademesinde ise düşük devir sayıları tercih edilmelidir.

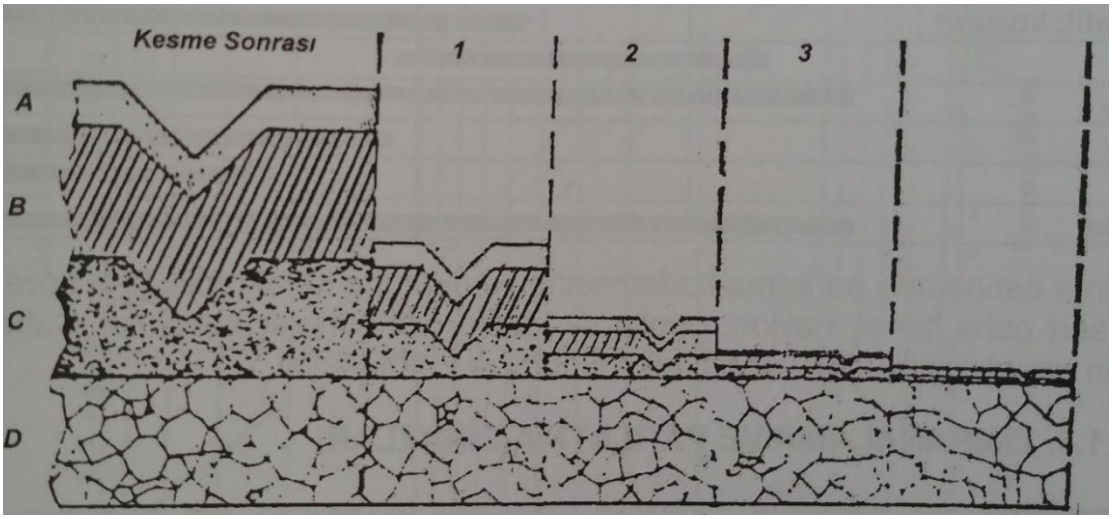
Parlatma aşamasında; parlatma kademesine ve numune özelliklerine bağlı olarak çadır bezi, sert çuha, flanel, naylon veya kadife gibi dokusu sık, homojen kumaşlar tercih edilir.

Parlatma Yöntemleri

a. Mekanik Zımparalama ve Parlatma
b. Elektrolitik Parlatma
c. Kimyasal Parlatma

a. Mekanik Zımparalama ve Parlatma

Kesme işlemi sonrasında numune yüzeylerinde deformasyon olur. Bu deformasyon, zımparalama ve parlatma basamakları sonrası en aza indirilir.



Şekil 7. Kesme İşlemi Sonrasında Yüzeylerin Şematik Görünüşü [7]

Zımparalama ve parlatma aşamasının amacı deformasyona uğramış tabakayı ortadan kaldırmak ve numune yüzeyine parlak bir görünüş kazandırmaktır. En sık kullanılan mekanik parlatma tekniği 4 temel adımdan oluşur.

i. Kaba Zımparalama Kademesi:

Genellikle kesme sonrasında, kalıplama aşamasından önce yapılır. Amaç, kesme izlerini, keskin köşe ve kenarları yok etmektir. Öncelikle taşlama işlemi yapıldıktan sonra 60, 80,

[7] Metalografi, Prof. Dr. Emel GEÇKİNLİ.

120 ve 150 numaralı zımpara kağıtlarıyla devam edilir. İşlem esnasında numunenin ısınmasına engel olmak için su ile soğutma yapılır.

ii. İnce Zımparalama Kademesi:

Amaç, kaba zımparalama aşamasında oluşan derin çiziklerin ortadan kaldırılmasıdır. Bu kademede 180, 240, 320, 400, 500, 600 ve 800 numaralı zımpara kağıtları kullanılır. Gerekli durumlarda 1000, 1250 hatta 2500 numaralı zımpara kağıtlarıyla devam edilebilir. İstisnai durumlar dışında bu aşamada da su ile soğutma yapılır.

Zımparalama kademeleri uygulanırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Numuneye baskı uygulanırken basınç ve uygulama noktası doğru seçilmelidir. Ayrıca numunenin bütün yüzeyinin homojen temasını sağlamak için, numune düz tutulmalıdır. Numune yüzeyi sık sık kontrol edilmelidir.

iii. Kaba Parlatma Kademesi:

İdeal parlaklıkta bir yüzey elde edebilmek için en önemli kademedir. Bu aşamada zımpara yerine aşındırıcılar ve çuha kullanılır. Çuha olarak genellikle çadır bezi gibi tüysüz kumaşlar tercih edilir.
Sıklıkla tercih edilen aşındırıcılar

α-Al_2O_3 (15-0.3 μm)
γ- Al_2O_3 (0.05 μm) sırasıyla kullanılır.

Başarılı bir parlatma işlemi için numune, parlatma çuhası üzerinde diskin dönme yönüne ters, merkezden çevreye doğru hareket ettirilmeli ve uzun süreli parlatmalardan kaçınılmalıdır.

iv. İnce Parlatma Kademesi:

Kaba parlatma sonucunda yapıda halen mevcut olan plastik deformasyon bölgeleri bu aşamada tamamen ortadan kaldırılır. Kaba parlatmadaki işlemler bu aşamada da aynı şekilde gerçekleştirilir ancak kullanılan gereçler farklılık gösterir. Bu aşamada kullanılan çuhalar daha ince ve kısa tüylüdür.

Aşındırıcı solüsyon olarak ise demir ve bakır alaşımları için Al_2O_3, Al ve Mg alaşımları için ise seryum oksit kullanılır. Bunların dışında elmas çamuru, Cr_2O_3 ve MgO gibi aşındırıcılar kullanılır.

İnce parlatma sonrasında, numune yüzeyi dağlanmadan önce alkol ve kuru hava ile temizlenip kurutulur. Numune yüzeyinde parmak izi, leke ve çizik kalmamalıdır.

Otomatik Parlatma: Elle yapılan mekanik parlatma işleminin zorluklarından dolayı geliştirilmiştir. Çok sayıda numunenin aynı anda başlatılmasını sağlar (Şekil 8).

Şekil 8. Otomatik Numune Parlatma Makinesi. [8]

b. Elektrolitik Parlatma:

Parlatma işlemi için aşındırıcılar yerine elektrolitik hücreler kullanılır. Elektrolitik parlatma en iyi sonuç alınan yöntemlerden birisidir ve uygulanması oldukça basittir. Numune anod durumundadır. Elektrolit sıvısı parlatılacak numune ve metal iyonlarının çözünebileceği iletken bir çözeltidir. Uygun elektrolit seçimi malzemenin kimyasal bileşimine bağlıdır.

Avantajları

- Mekanik parlatmaya kıyasla daha düzgün yüzeyler elde edilebilir
- Çok sayıda numunenin kısa sürede parlatılmasına imkan verir
- Yumuşak alaşımlar için mekanik parlatmaya kıyasla daha uygundur
- Elektron mikroskopisi ile incelenecek numuneler için daha uygundur.

Dezavantajları

- Kullanılan kimyasalların çoğu sağlığa zararlıdır
- Küçük numunelere uygun değildir
- Çatlak, boşluk, kalıntı ve çökelti gibi bozukluklar elektroliz esnasında farklılaşabilir.

Elektrolitik parlatma yönteminde etkin olan mekanizma analitik çözünmedir. Numune yüzeyindeki pürüzler çözünme ile ortadan kaldırılırken çıkıntılar arasındaki çukurlar anodik çözünmeden korunurlar. Numune anod durumunda olduğu için pozitif yüklü iyonlar numune yüzeyini terk ederek katoda giderler. Numunenin bu şekilde çözünmesi esnasında yüzeyin hemen üzerinde metal iyonlarının meydana getirdiği bir film tabakası oluşur. Bu film tabakasının elektrik direnci elektrolitin elektrik direncinden daha

[8] https://www.als.com.tr

yüksektir ve farklı bileşime sahiptir. Yüzeydeki çıkıntılı kısımlarda film tabakası incedir, tabakanın metal konsantrasyonu yüksektir ve elektrik direnci düşüktür. Bu nedenle hücreye potansiyel fark uygulandığında pürüzlü kısımlardaki akım yoğunluğu çukur kısımlara göre daha fazla olacaktır. Eğer yeterli potansiyel fark uygulanmışsa çıkıntılı kısımlar çukur kısımlara oranla daha hızlı elektrolize uğrar. Bu durum yüzeydeki pürüzler yok olup, yüzey dümdüz oluncaya kadar devam eder.

c. Kimyasal Parlatma:

Bakır, Çinko, Kadmiyum ve pirinc gibi yumuşak metallerin ve alaşımların parlatılmasında kullanılır. Metal numunelerin özel bir çözeltiye batırılarak yüzeylerinin parlatılması işlemidir. Uygulama esnasında çözelti sürekli olarak karıştırılır ve böylece yüzeyde bir metal film tabakası oluşturulur.

Avantajları

- Parlatma düzeneği basit ve ekonomiktir
- Parlatma süresi kısadır
- Karmaşık şekilli parçalar için uygulanabilir
- Mekanik ve elektrolitik parlatmanın zor olduğu Mg, Pb ve Zn gibi metaller bu yöntemle kolaylıkla parlatılabilir.

Dezavantajları

- Çok sayıda numune için uygun değildir
- Keskin kenar ve köşeler daha hızlı çözünmeye uğrar

Yöntem, özellikle büyük boyutlu parçaların parlatılması için uygundur.

Yıkama: Yıkama işlemi metalografik çalışmalarda başarılı sonuçlar almak için gerekli bir aşamadır. Numuneler özellikle dağlama aşamasından önce yıkanmalıdır. Ayrıca numuneler her zımparalama ve parlatma kademesinden sonra da bir üst aşamaya geçmeden önce mutlaka yıkanarak yüzeye yapışmış partiküller ve lekeler uzaklaştırılmalıdır. En iyi sonuç ultrasonik yıkama ile alınır. Yıkama işleminden sonra numuneler, alkol, benzen veya düşük kaynama sıcaklığına sahip sıvılarla hızlı bir şekilde silinmeli ve kurutulmalıdır.

2.2.4. Dağlama:

Parlatılmış ve henüz dağlanmamış yüzeylerden istisnai durumlar dışında görüntü almak mümkün değildir. Parlatma sonrasında numune yüzeyi oldukça düzgün ve parlaktır. Bu nedenle yüzeye düşen ışık demetleri eşit şekilde, geldikleri açıyla geri yansıdıkları için numuneden görüntü alınması mümkün olmaz. Bu duruma engel olmak için optik mikroskopta inceleme öncesi son aşama olarak numunenin dağlanması gerekir.

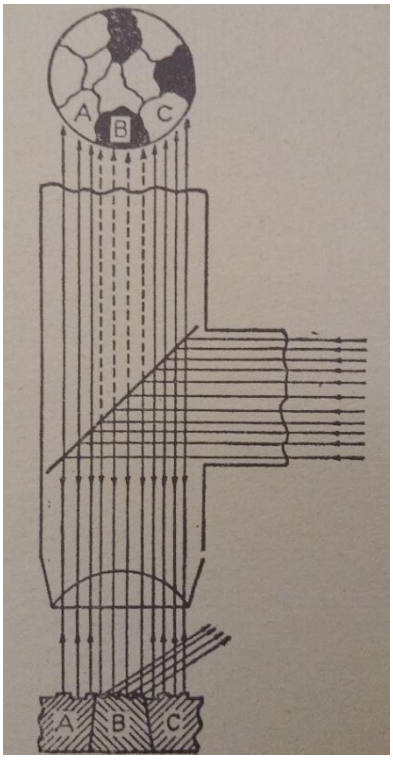
Dağlama işlemi uygulanış şekline göre fiziksel ve kimyasal dağlama olmak üzere ikiye ayrılır.
Fiziksel Dağlama: Numune yüzeyine belirli bir enerji uygulanarak (Örneğin ısı veya yüksek gerilim vb.) yüzeyden atom tabakları uzaklaştırılır.

Kimyasal Dağlama: Numunenin uygun kimyasallarla reaksiyona girmesi sağlanır ve böylece numune yüzeyinde kontrast oluşturulur.

Bunun dışında dağlama uygulama amacına bağlı olarak da iki başlık altında değerlendirilir. Büyük yapılardaki kaba katılaşma yapıları, deformasyon izleri ve kaynakla birleştirilmiş yapıların görüntüsünü çıkarmak için uygulanan dağlama işlemi ***MAKRODAĞLAMA***; tane dağılımı, faz analizi ve dağılımı gibi iç yapıya ait görüntüleri elde etmek için uygulanan dağlama işlemi ise ***MİKRODAĞLAMA*** olarak adlandırılır.

Başarılı bir dağlama işlemi için malzemeye uygun olarak hazırlanan dağlama reaktifinin yüzeyden iç kısımlara doğru etki etmesi gerekmektedir. Çok fazlı yapılardaki farklı gazlar ve tek fazlı yapılardaki farklı yönelime sahip taneler dağlama reaktifine farklı tepki verir ve reaktif etkisiyle farklı oranlarda çözünür. Bu nedenle dağlama mekanizması tek ve çok fazlı yapılarda farklı şekilde ilerler.

Çok fazlı sistemlerde numune reaktif ile temas ettirildiğinde farklı fazlar arasında bir potansiyel fark oluşur. Yüksek potansiyele sahip olan faz anodik özellik gösterir ve dağlama esnasında çözünmeye başlar. Düşük potansiyele sahip olan faz katod gibi davrandığı için dağlama esnasında çözünmez (Şekil 9.).

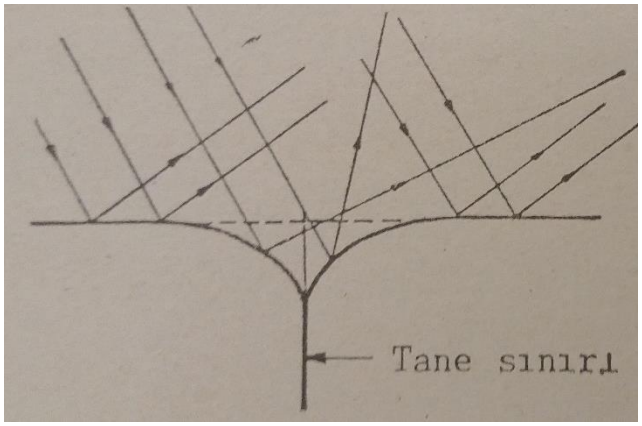


Şekil 9. Çok Fazlı Yapılarda Dağlama Mekanizması. [9]

[9] Metalografi, Prof. Dr. Emel GEÇKİNLİ.

Tek fazlı yapıların dağlanma mekanizması ise çok fazlı yapıların dağlanma mekanizmasından farklıdır. Tek faza sahip sistemlerde potansiyel farkın çok daha düşük olması nedeniyle dağlama işlemi güçlükle gerçekleştirilir. Dağlama sonucunda malzemenin her bir taneciği numune yüzeyine göre konumuna bağlı olarak çözünmeye uğrar. Sonuç olarak, yapıya mikroskop altında bakıldığında aynı yönelimli taneler benzer parlaklıkta, farklı yönelimli taneler ise farklı parlaklıkta görünürler. Bu olaya yönlenmiş tane parlaklığı denir. Tane sınırları diğer bölgelere göre daha yüksek enerjiye sahiptirler ve dağlama sonucu çözünerek çukurlar meydana getirirler. Bunun sonucunda yüksek enerjili tane sınırları mikroskop altında karanlık (koyu renkli) görünürler.

Dağlama işleminin süresi kritik bir parametredir. Eğer bu süre gereğinden uzun tutulursa görüntü alınamaz, numunenin tekrar son parlatma işlemine tabi tutulması gerekir.



Şekil 10. Tek Fazlı Yapılarda Dağlama Mekanizması. [10]

Dağlama işleminden başarılı bir sonuç almak için;

- Malzemeye uygun dağlama reaktifi seçilmeli,
- Uygulama süresi doğru ayarlanmalı,
- Uygulama sıcaklığı doğru ayarlanmalı,
- Doğru uygulama yöntemi seçilmeli,
- Numune yüzeyi temiz ve lekesiz olmalıdır.

Uygulama Yöntemi: Dağlayıcı reaktif, numune yüzeyine daldırma, pamukla silme veya elektrolitik dağlama gibi farklı yöntemlerle uygulanabilir.

Dağlama Süresi: Yapıda gözlenmek istenen ayrıntıların ortaya çıkması için uygun süre boyunca dağlama yapmak önemlidir. Dağlama süresi numunenin ve seçilen reaktifin durumuna göre birkaç saniyeden yarım saate kadar değişebilir. Bu süre ayrıca, görüntünün hangi büyütme oranında alınacağına göre de değişir. Küçük büyütmelerde detayları ortaya çıkarabilmek için ihtiyaç duyulan dağlama süresi yüksek büyütme oranlarına göre daha fazladır. Küçük büyütmeler için hazırlanmış bir numune yüksek büyütmeler için aşırı dağlanmış olabilir.

[10] Metalografi, Prof. Dr. Emel GEÇKİNLİ.

Dağlama işleminin gerçekleşip gerçekleşmediği yüzeyin parlaklığından da takip edilebilir. Parlak yüzey dağlayıcı etkisiyle matlaşır.

Makro Dağlama

Özellikle metal ve alaşımlarındaki heterojenlikleri tespit etmek için yapılır.

- Tane boyutlarındaki farklılaşma
- Deformasyon akış izleri
- Kolonsal yapı
- Dentritik yapı
- Segregasyon, kalıntı
- Karbür ve ferrit bantlaşması
- Mikrosegregasyon
- Karbürizasyon ve dekarbürizasyon kalınlıkları
- Porozite (gözeneklilik)

Çatlak vb. yapıların tespitinde makro dağlama gerekir. Ayrıca kaynakla birleştirilmiş yapılarda kaynak bölgesinin analizi için de kullanılır. Kaynak derinliği, kaynak bölgesinde çatlak olup olmadığı, ısının etkisi altındaki bölgenin varlığı gibi hususların tespiti açısından önemlidir.

Makro dağlama işlemi için parlatma kademelerine gerek yoktur. Genellikle numune kaba bir zımpara ile patlatılır. Makro dağlamada kullanılan reaktifler genellikle çok güçlü olduğundan numune yüzeyinde zımparalama işlemi nedeniyle hasar gören bölgeyi tamamen ortadan kaldırabilir. Makro dağlamada reaktif hazırlanırken HCl, H_2SO_4 veya HNO_3 gibi kuvvetli asitler kullanılır.

2.3. Optik Mikroskobun Çalışma Prensibi

Işık kaynağından alınan ışık demetleri mikroskop içerisindeki yansıtıcı aynalar tarafından numune hazırlama aşamalarından geçirilerek hazırlanmış numune yüzeyine düşürülür. Numune yüzeyinden farklı açılarla yansıyan ışık demetleri objektif ve okülerden geçerek görüntü olarak görülebilir hale gelir.

Parlatma aşamasından sonra, mükemmel şekilde parlatılmış yüzeylerden görüntü alınması güçtür. Çünkü yüzeye çarpan ışık demetleri aynı açıyla yansıyacağından görüntü tek fazdaki renklerden oluşur. Dağlanmış yüzeylerde ise farklı fazlar dağlamadan farklı etkilendiği için farklı ayrıntı ve konumlara göre yansımalar farklı açıyla gerçekleşir. Böylece görüntü anlam kazanır.

2.4. Mikroskobik İnceleme Yöntemleri

Malzemeler genellikle farklı büyütmelerde ve aydınlık saha aydınlatması ile incelenirler. Bu yöntemde ışık demetleri objektiften geçerek numune üzerine düşerler. Ancak bazı

durumlarda yüksek büyütme oranlarında bile aydınlık saha aydınlatması yeterli gelmeyebilir. Böyle durumlar için farklı optik yöntemlerle faz kontrastı oluşturulabilir.

Malzeme biliminde bu amaçla beş farklı yöntem kullanılabilir;

- Karanlık saha aydınlatması
- Faz Kontrast
- Polarize Işık
- Interference
- Renk Ayrımı

2.4.1. Karanlık Saha Aydınlatması

Bu yöntemle görüntü alabilmek için ışık demetleri objektiften geçmeden aynalar yardımıyla doğrudan numunenin üzerine düşürülürler. Yöntem aydınlık saha aydınlatmasının tam tersidir. Aydınlık saha aydınlatmasında mikroyapıdaki aydınlık bölgeler aydınlık, karanlık bölgeler ise karanlık olarak gözlenirken karanlık saha aydınlatmasında karanlık bölgeler aydınlık, aydınlık bölgeler karanlık görünür.

2.4.2. Faz-Kontrast

İncelenen numunelerin yüzeyindeki pürüzler ışık kaynağının altında faz farkına neden olur. Faz kontrast metodu bu farkı gözle görülebilecek bir farka dönüştürür. Bu amaçla ışık kaynağının önüne disk şeklide faz geçirme halkaları konulur. Halkaların konumuna bağlı olarak halkadan geçen ışık geciktirilir. Böylece yüzeydeki çukur bölgeler daha karanlık, yüksek bölgeler ise daha aydınlık görünürler. Özellikle tane sınırları, ikizlenme gibi mikroskobik yapılar bu yöntemle rahatlıkla gözlenebilir.

2.4.3. Polarize Işık

Bir optik mikroskoba polarize ışık verebilen bir düzeneğin eklenmesiyle oluşur. Polarize ışık yoğunlaştırıcı merceğin önüne bir polarizör ve görme merceğinin ve mikroskobun içerisine de bir analizör eklenmesiyle elde edilir. Birçok malzeme optik özellikleri açısından anizotropik olduğu için polarize ışıktan faydalanarak rahatlıkla görüntü alınabilir.

2.5. Optik Mikroskop ile Mikroyapı Analizi

Malzemelerin yapısı, bileşimlerine bağlı olarak çeşitli fazlardan oluşmaktadır. Bu fazlar her malzemenin faz diyagramında belirtilir. Ancak, mikroyapıda bazen istenmeyen fazlara da rastlamak mümkündür. Bir malzemenin mikroyapısındaki fazların morfolojisi ve dağılımı iki faktöre bağlıdır:

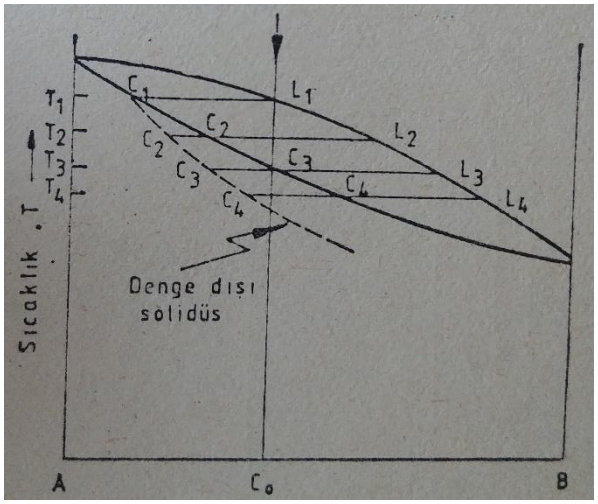
I. Katılaşma koşulları (Yavaş soğuma/Hızlı Soğuma)
II. Malzemenin geçirdiği işlemler.

Saf Metallerin ve Tek Fazlı Sistemlerin Yapısı

Saf metallerin ve tek fazlı sistemlerin katılaşması genellikle dentrit oluşumu şeklindedir. Ancak taneler soğuma hızına bağlı olarak ince, kolon şeklinde veya eş eksenli vb. şekiller alabilirler (Şekil 11.).

Şekil 11. İnce, Kolon Şeklinde ve Eş Eksenli Taneler.

Şekil 12'de <u>*birbiri içerisinde tamamen çözünen*</u> ikili sistemlerin katılaşma grafiği verilmiştir. Bu sistemin katılaşması esnasında oluşan ilk çekirdek A açısından zengindir. Soğuma hızı artırılırsa B atomları yeterli miktarda difüzyon sağlayamaz ve denge dışı katılaşma gerçekleşir. Bunun sonucunda ilk katı eriyiğin büyümesi esnasında merkezden dış yüzeye doğru bir bileşim gradyanı oluşur. Bu bileşim gradyanı dağlama sayesinde mikroskop altında görüntülenebilir. Bu olaya ***mikrosegregasyon*** adı verilir.

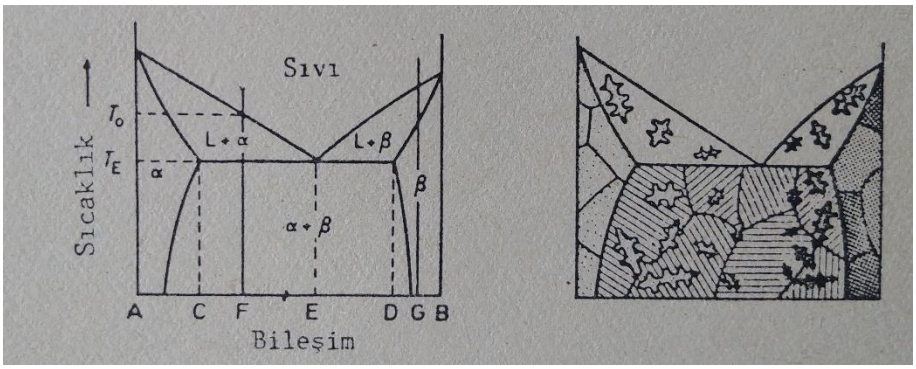


Şekil 12. Birbiri İçerisinde Tamamen Çözünen İkili Sistemlerin Katılaşma Grafiği. [11]

Ötektik Sistemlerde Katılaşma Yapısı

Şekil 13'te <u>*birbiri içerisinde kısmen çözünen*</u> ikili bir ötektik sisteme ait faz diyagramı ve bu sistemdeki mevcut mikroyapılar verilmiştir. Bu tip sistemler temel olarak A bileşeni açısından zengin α, ve B bileşeni açısından zengin β fazlarından oluşmaktadır.

[11] Metalografi, Prof. Dr. Emel GEÇKİNLİ.



Şekil 13. Birbiri İçerisinde Kısmen Çözünen İkili Bir Ötektik Sisteme Ait Faz Diyagramı. [12]

Ötektik çizginin altındaki (ötektik altı- AE arasındaki bölge) alaşımlar, sıvı fazdan itibaren yavaş soğurken likidüsün eğrisinin alında sıvı faz içerisinde α fazı çekirdeklenir ve genellikle dentritik şekilde büyür. Bu α fazı ilk olarak oluştuğu için primer α olarak adlandırılır. Soğumaya devam ederken, sıcaklık ötektik sıcaklığın (T_E) altına düştüğünde ise geriye kalan sıvı faz α ve β fazlarından oluşan ötektik yapıda katılaşır. Bu esnada oluşan α ve β fazları ise sonradan oluştukları için sekonder α ve sekonder β fazları olarak adlandırılırlar.

Ötektik üstü alaşımlarda ise (EB arasındaki bölge), öncelikle β fazı primer olarak şekillenir ve ötektik sıcaklığa gelindiğinde yine sekonder α ve β fazları ötektik yapıda oluşur.

Birbiri içerisinde çözünmeyen A-B gibi ikili sistemlerde ise katı eriyik fazı bulunmadığından, yapıda ötektik yapının yanı sıra A veya B doğrudan doğruya yer alır.

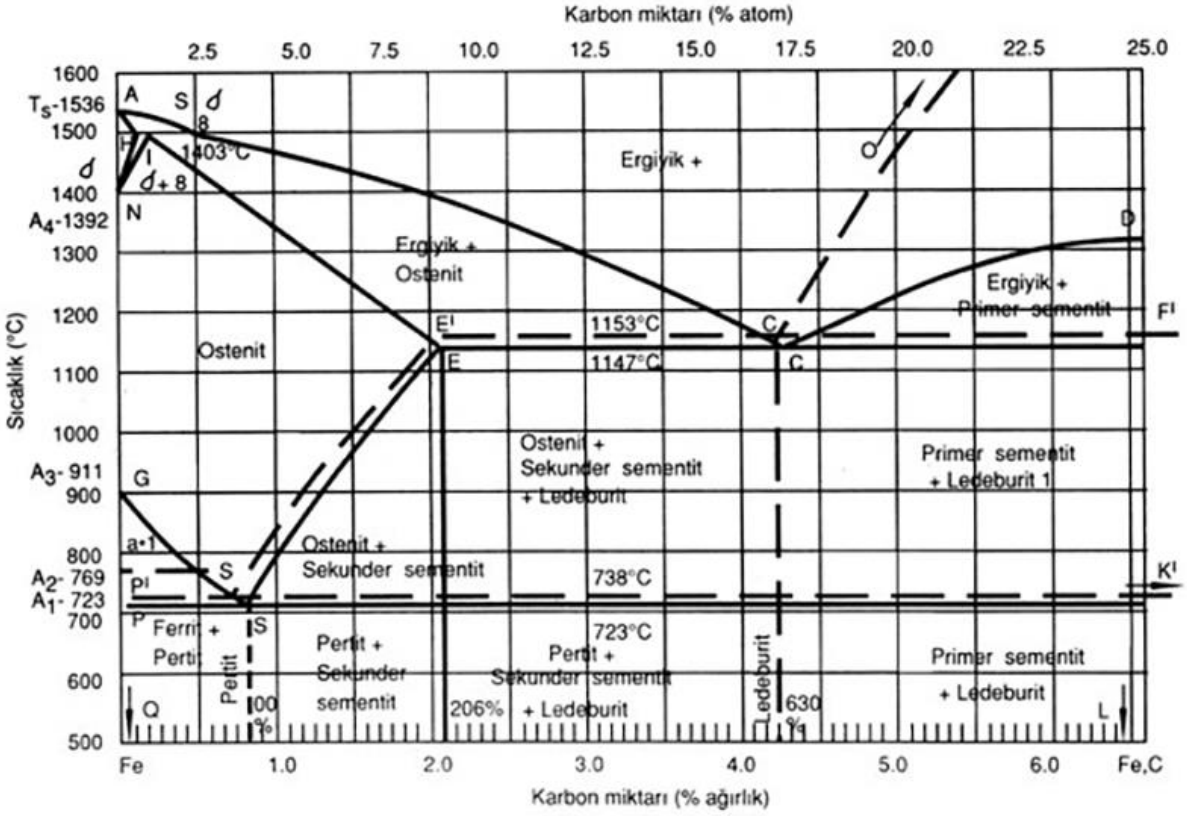
Demir-Karbon Sistemlerinin Mikro Yapısı

İkili alaşım sistemlerinin en önemlisi demir-karbon sistemidir. Demir-Karbon alaşımları çelik ve dökme demir olarak ikiye ayrılır ve en geniş kullanıma sahip mühendislik malzemeleridir. Yüksek fırından elde edilen ham demirin kalıplara dökülerek katılaşmasından elde edilen yarı mamule pik adı verilir. Elde edilen pikin bir kısmı çelik üretiminde diğer kısmı ise dökme demir üretiminde kullanılır.

Demir-Karbon faz diyagramları karbonun demirle metaller arası bileşik oluşturmasına veya karbonun yapıda grafit halinde serbest şekilde bulunmasına $Fe\text{-}Fe_3C$ ve Fe-C faz diyagramları olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 14).

$Fe\text{-}Fe_3C$ (Sementit) Faz Diyagramı: Bir demir-karbon alaşımı hızlı soğutulursa, karbon kristalleşecek zaman bulamaz ve sementit adı verilen demir-karbon bileşiği oluşur. Sementit içeren bir alaşım, yüksek sıcaklıkta yeterince bekletilirse sementitin ayrışması sonucu grafitleşme görülür. $Fe\text{-}Fe_3C$ diyagramı yarı-kararlı (kararsız denge) hali göstermektedir.

[12] Metalografi, Prof. Dr. Emel GEÇKİNLİ.



Şekil 14. Demir-Karbon Faz Diyagramları.

Fe-C (Grafit) Faz Diyagramı: Bir demir-karbon alaşımı katılaşma esnasında yavaş soğutulursa sementit fazı oluşmaz, grafit taneleri meydana gelir. Fe-C sistemi kararlı denge durumunu göstermektedir.

Bu iki diyagram arasında sementitin yerini grafitin alması ve dönüşüm sıcaklık eğrilerinin ötelenmesi dışında temel reaksiyonlar açısından bir fark yoktur.

Fe-Fe_3C (Sementit) Faz Diyagramında Oluşan Başlıca Fazlar

α-Ferrit: Ferrit fazı karbonun ara yer katı çözeltisi olup HMK yapıya sahiptir. 727 °C'de maksimum % 0,022 oranında karbon çözünür. 0 °C'de bu oran % 0,005'e kadar düşmektedir. Karbon ferrit içerisinde çok az miktarda çözünmesine rağmen mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Ferrit, 768 °C'nin altında magnetik özelliğe sahiptir.

γ-Ostenit: YMK yapıdadır. Karbonun ara yer katı çözeltisidir. Karbonun ostenit içerisindeki katı çözünürlüğü ferrite oranla daha yüksektir. 1148 °C'de % 2,11 oranında karbon çözünürken, 727 °C'de bu oran % 0,77'ye düşmektedir. Ostenit fazı magnetik özellik göstermez.

Fe_3C (Sementit): Karbonun demirle oluşturduğu metaller arası bileşiktir. Bu bileşik % 6,67 oranında karbon ve % 93,3 oranında demir içermektedir. Sert, gevrek ve kırılgan bir yapıya sahiptir.

δ-Ferrit: α-ferrite benzer şekilde katı bir çökelti olup oluşum sıcaklığı α-ferritten farklıdır. Bu faz, nispeten daha yüksek sıcaklıklarda kararlıdır. HMK kristal yapısına sahiptir.

Fe-Fe_3C (Sementit) Faz Diyagramında Meydana Gelen Başlıca Dönüşümler

Peritektik Reaksiyon: Katılaşma sürecinde bir arada bulunan bir sıvı bir katı fazın sabit sıcaklıkta başka bir katı faza dönüşmesine denir.

$$S + K1 \rightarrow K2$$

Fe-Fe_3C diyagramında 1495 °C'de sıvı çelik, δ-Ferritle birleşerek peritektik reaksiyon ile ostenit fazına dönüşür.

Sıvı Çelik + δ-Ferrit → γ-Ostenit

(% 0,53 C) (% 0,09C) (% 0,17)

Ötektik Reaksiyon: Katılaşma sürecinde bir sıvı fazın aynı anda iki ayrı katı faza dönüşmesidir.

$$S \rightarrow K1 + K2$$

Fe-Fe_3C faz diyagramında 1148 °C'de sıvı dökme demir, ostenit ve sementite dönüşür.

Sıvı Faz → γ-Ostenit + Fe_3C

(% 4,3 C) (% 2,11 C) (% 6,67)

** Fe-Fe_3C faz diyagramında % 2,11 - % 4,30 C arasında kalan bölgeye ötektik altı bölge, % 4,30 - % 6,67 C arasında kalan bölgeye ötektik üstü bölge adı verilir.

** Ötektik yapı genellikle iki fazlı olup bu iki fazın birbirine paralel olduğu karakteristik lamelli bir morfolojiye sahiptir. Lameller arasındaki mesafe soğuma hızına bağlı olup soğuma hızı arttıkça lameller arası mesafe azalır.

Ötektoid Reaksiyon: Katılaşma sürecinde bir katı fazın aynı anda iki ayrı katı faza dönüşmesidir.

$$K1 \rightarrow K2 + K3$$

Fe-Fe_3C faz diyagramında 727 °C'de ostenit, α ferrit ve sementite dönüşür.

Ostenit → α ferrit + Fe_3C
(% 0,77 C) (% 0,02 C) (% 6,67)

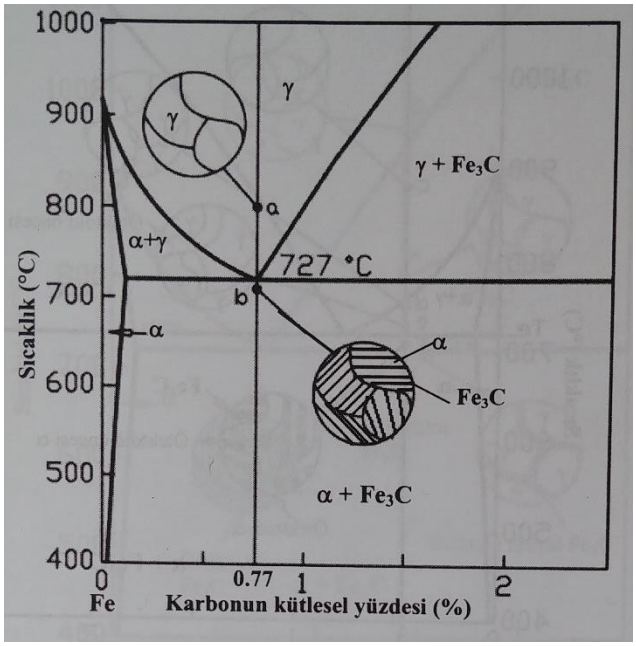
Peritektoid Reaksiyon: İki katı faz sabit sıcaklıkta üçüncü bir katı faza dönüşür. Fe-Fe_3C faz diyagramında peritektoid dönüşüme rastlanmaz.

$$K1 + K2 \rightarrow K3$$

Fe-Fe_3C (Sementit) Faz Diyagramında Mikroyapı Oluşumu

<u>i. Ötektoid Bileşime Sahip Alaşımsız Karbonlu Çelik:</u>

% 0,77 C içeren çelik ötektoid çelik olarak adlandırılır. Söz konusu çelik 800 °C'ye kadar ısıtılıldığında yapı tamamen ostenit fazıdır (a noktası). Bu mikroyapı 727 °C'nin (ötektoid dönüşüm sıcaklığının) kadar değişmeden kalır. Sıcaklık, 727 °C'nin altına iner inmez ostenit fazı ötektoid dönüşümle iki ayrı katı faza dönüşür. Bu fazlar α-Ferrit ve sementittir (b noktası). Bu yapının mikroskop altında görünüşü inciyi andırdığı için bu yapı ***perlit*** adını almaktadır. 727 °C'den 0 °C'ye kadar perlitik yapı değişmeden kalır.

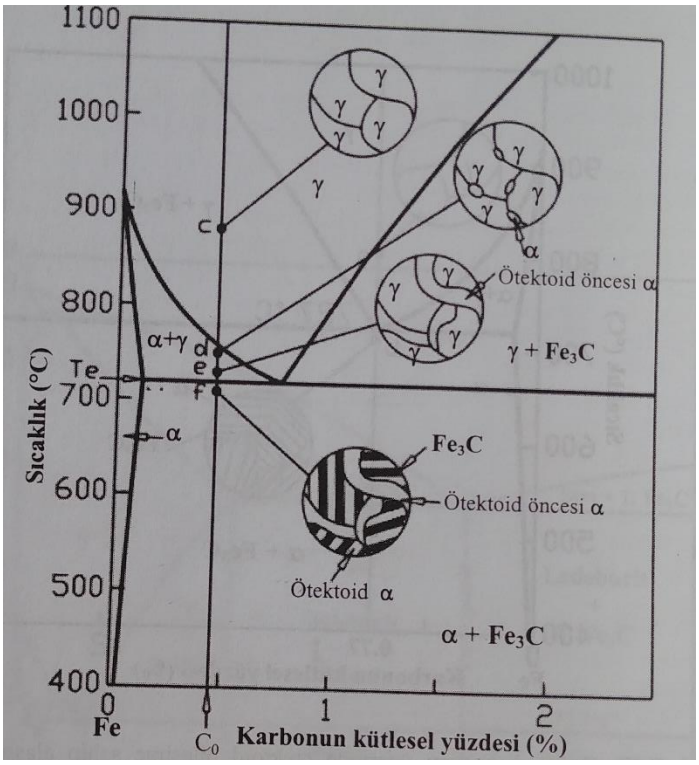


Şekil 15. Ötektoid Çeliğe Ait Mikroyapıların Şematik Olarak Gösterimi.[13]

[13] Malzeme Biliminin Temelleri, Doç.Dr. Hüseyin UZUN, Prof.Dr. Fehim FINDIK, Prof.Dr. Serdar SALMAN.

ii. Ötektoid-Altı Bileşime Sahip Alaşımsız Karbonlu Çelik:

% 0,022-% 0,77 C içeren çeliklere ötektoid altı çelik adı verilir. Bu aralıkta herhangi bir C_0 bileşimine sahip olan ötektoid altı çelik 890 °C'ye kadar ısıtılıldığında yapı tamamen ostenit fazıdır (c noktası). Çelik, bu sıcaklıktan itibaren 750 °C'ye kadar yavaşça soğutulduğunda ostenit tane sınırlarında ötektoid öncesi α katı fazı çekirdeklenmeye başlar (d noktası). Çelik, 727 °C'nin hemen üzerindeki e noktasına kadar yavaşça soğutulduğu zaman ötektoid öncesi α fazı büyür, ostenit fazı küçülür. Sıcaklık 727 °C'nin altına iner inmez ostenit fazı ötektoid dönüşümle perlite dönüşür. Ötektoid öncesi α fazı ise yapıda değişmeden kalır. Sonuç olarak, 727 °C'nin altına kadar yavaşça soğutulmuş ötektoid altı alaşımsız çeliğin mikroyapısında ötektoid öncesi α ve perlit (ötektoid α + Fe_3C) bulunur (f noktası). Bu yapı oda sıcaklığına kadar değişmeden kalır.

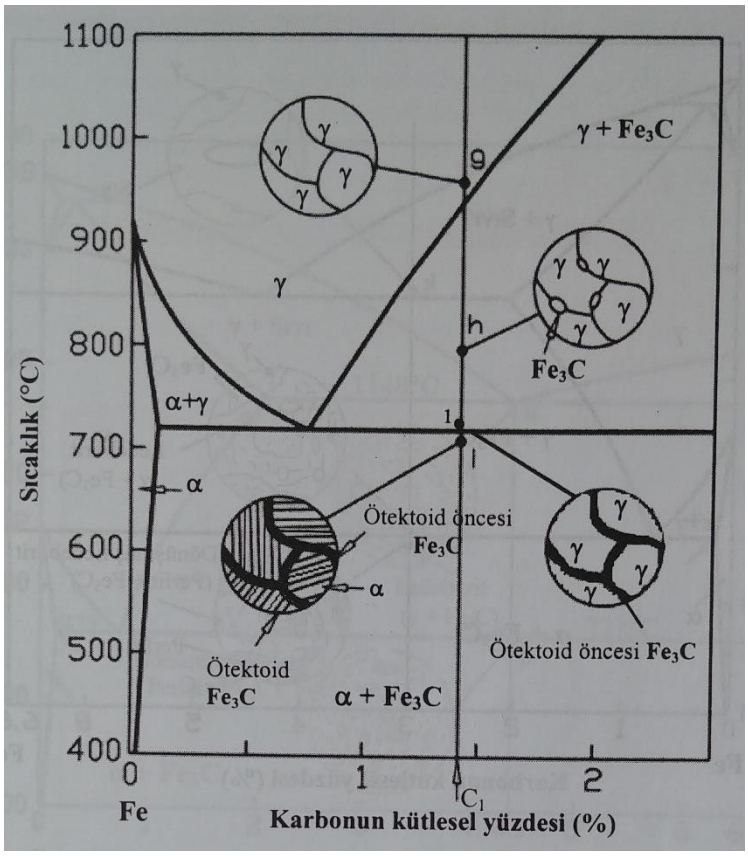


Şekil 16. Ötektoid Altı Çeliğe Ait Mikroyapıların Şematik Olarak Gösterimi.[14]

[14] Malzeme Biliminin Temelleri, Doç.Dr. Hüseyin UZUN, Prof.Dr. Fehim FINDIK, Prof.Dr. Serdar SALMAN.

iii. Ötektoid-Üstü Bileşime Sahip Alaşımsız Karbonlu Çelik:

% 0,77 - % 2,11 C içeren çeliklere ötektoid üstü çelik adı verilir. Bu aralıkta herhangi bir C_1 bileşimine sahip olan ötektoid üstü çelik 950 °C'ye kadar ısıtılıldığında yapı tamamen ostenit fazından oluşur (g noktası). Bu çelik, 950 °C'den itibaren yavaşça 800 °C'ye kadar soğutulduğunda ostenit tane sınırlarında Fe_3C çekirdeklenmeye başlar (h noktası). Çelik, 727 °C'nin hemen üzerindeki ı noktasına kadar yavaşça soğutulduğu zaman ostenit tane sınırlarında ötektoid öncesi Fe_3C fazı büyür. Sıcaklık 727 °C'nin altına iner inmez ostenit fazı ötektoid dönüşümle perlite dönüşür (i noktası). Böylece i noktasındaki mikro yapı ötektoid öncesi Fe_3C ile perlit (α+ Fe_3C) yapısından oluşur. Yapı, oda sıcaklığına kadar değişmeden kalır.

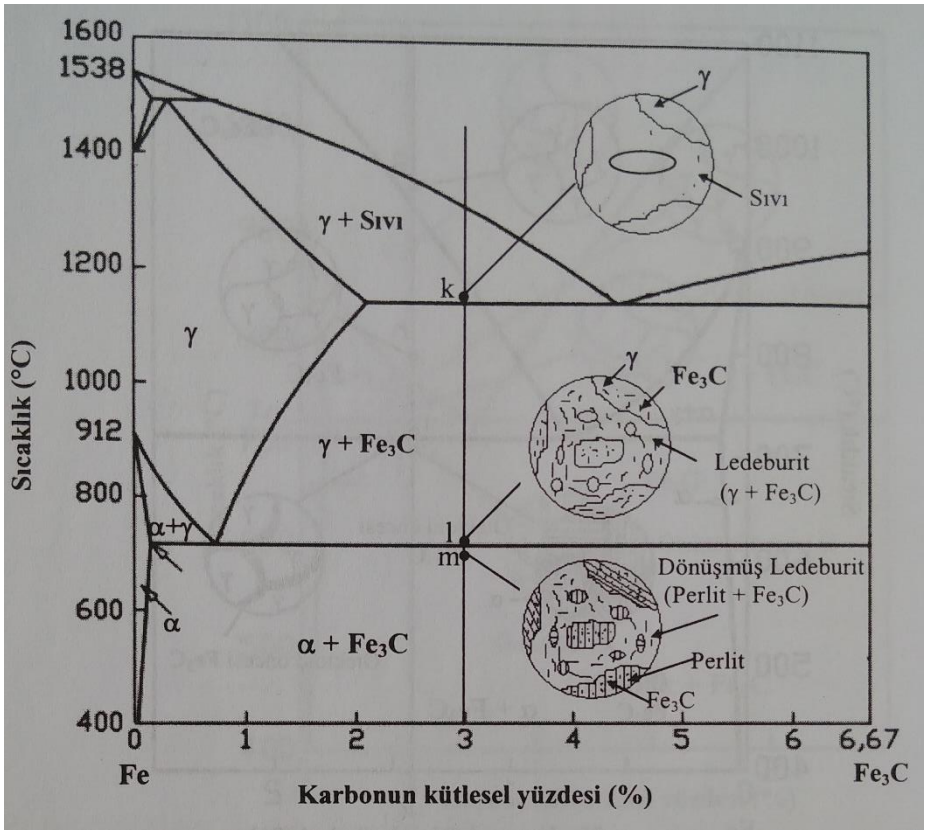


Şekil 17. Ötektoid-Üstü Çeliğe Ait Mikroyapıların Şematik Olarak Gösterimi.[15]

[15] Malzeme Biliminin Temelleri, Doç.Dr. Hüseyin UZUN, Prof.Dr. Fehim FINDIK, Prof.Dr. Serdar SALMAN.

iv. Ötektik Altı Bileşime Sahip Dökme Demir

Sıvı haldeki ötektik altı dökme demir yavaş soğutulurken sıcaklık likküdüs eğrisinin altına düşer düşmez, sıvı faz içerisinde ostenit taneleri çekirdeklenmeye başlar. Sıcaklık azaldıkça ostenit miktarı artar (k noktası). Soğuma devam ederken sıcaklık 1148 °C'nin altına düşer düşmez sıvı eriyik ötektik dönüşümle ostenit ve sementit fazlarına dönüşür. Bu yapıya ledeburit adı verilir. Yani, bu noktada mikroyapı ostenit + ledeburitten oluşmaktadır. Bu mikroyapı 727 °C'nin hemen üzerindeki l noktasına kadar aynı kalır. Sıcaklık 727 °C'nin altına iner inmez (ötektoid dönüşüm) ostenit perlite, ledeburit ise dönüşmüş ledeburite dönüşür (m noktası).

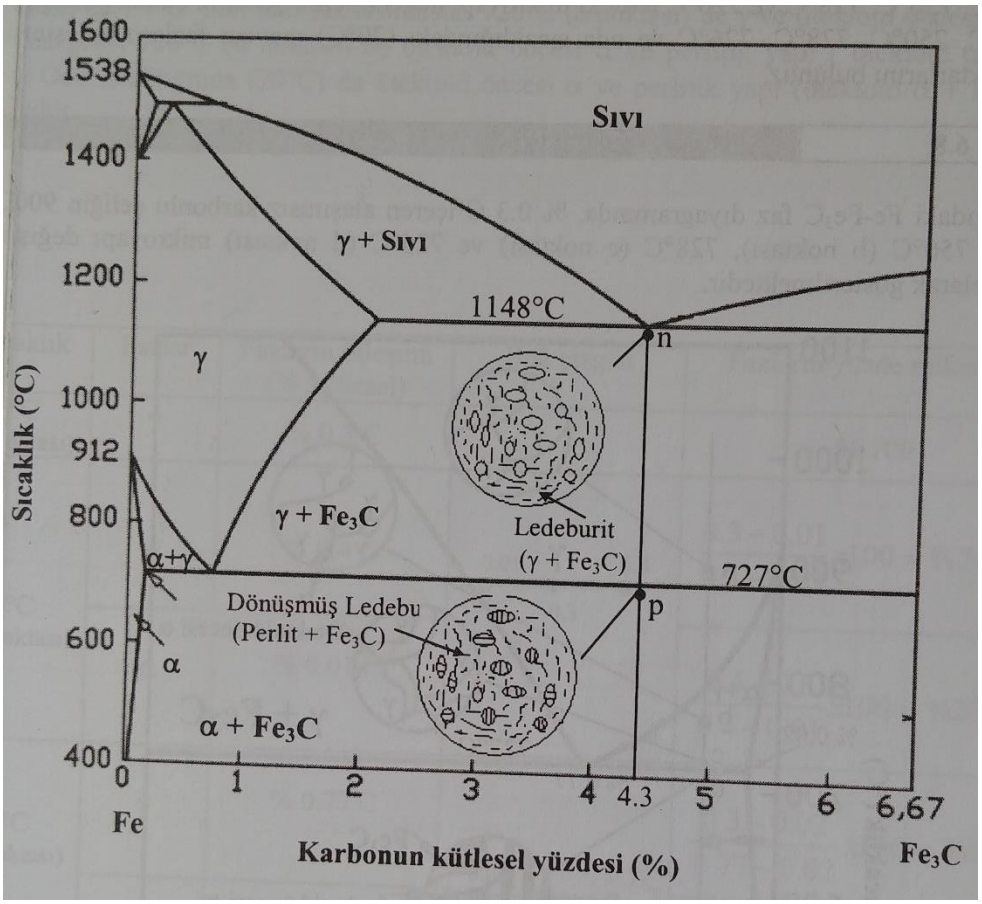


Şekil 18. Ötektik Altı Dökme Demire Ait Mikroyapıların Şematik Olarak Gösterimi.[16]

[16] Malzeme Biliminin Temelleri, Doç.Dr. Hüseyin UZUN, Prof.Dr. Fehim FINDIK, Prof.Dr. Serdar SALMAN.

v. Ötektik Dökme Demir

% 4,3 karbon içeren ötektik dökme demir sıvı halden yavaşça soğutulursa sıcaklık 1148 °C' nin altına düşer düşmez ötektik reaksiyon sonucu sıvı faz ostenit ve sementit fazlarına (ledeburit) dönüşür (n noktası). Sıcaklık 727 °C'nin altına indiğinde ise (ötektoid dönüşüm) ledeburit, dönüşmüş ledeburite (perlit+Fe_3C) dönüşür (p noktası).



Şekil 19. Ötektik Dökme Demire Ait Mikroyapıların Şematik Olarak Gösterimi.[17]

[17] Malzeme Biliminin Temelleri, Doç.Dr. Hüseyin UZUN, Prof.Dr. Fehim FINDIK, Prof.Dr. Serdar SALMAN.

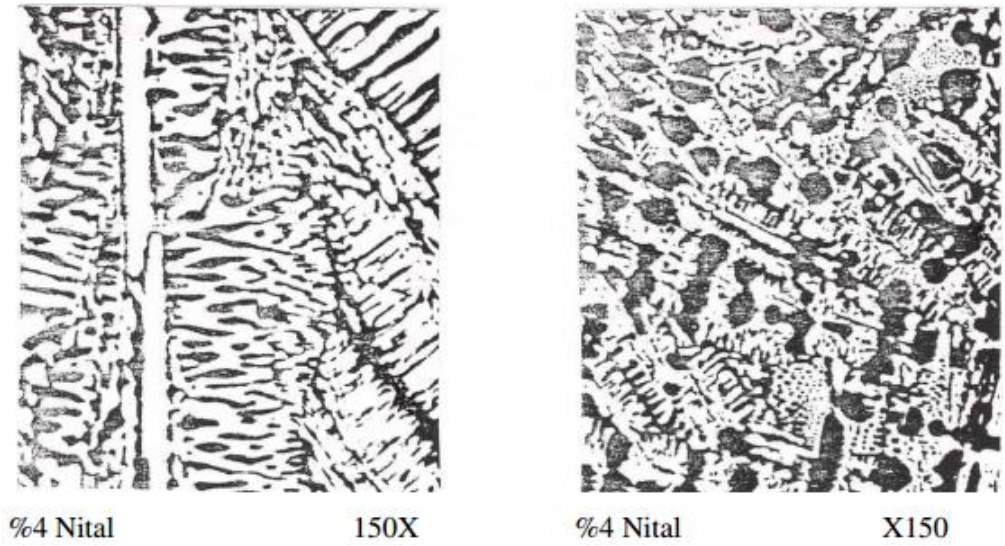
Dökme Demirler ve Dökme Demir Mikroyapıları

%2' den daha fazla karbon, %1-3 arasında silisyum, bunlara ek olarak fosfor ve kükürt içeren demir alaşımlarına dökme demir denir. Dökme demirlerde daima serbest karbon veya demir-karbür bulunur, bu durum bu alaşımların istendiği gibi sıcak işlenebilirlik özelliklerini yitirmesine yol açar. Bu nedenle bu tür alaşımlar döküm işlemiyle şekillendirilir.

Dökme demirlerin mekanik özelliklerinde, grafit parçalarını saran ana fazın yapısı da etkilidir. Matris (ana yapı) temel olarak çeliktir. Bu çelik yapı ferrit, perlit, östenit veya martenzit olabilir. Dökümlerdeki ana faz ve karbonun bulunduğu biçim, kimyasal kompozisyona, soğuma hızına ve gördüğü ısıl işleme göre değişir. Dökme demirlerin dört ana grubu gri dökme demir, temper dökme demir, küresel dökme demir ve beyaz dökme demirdir.

Beyaz Dökme Demir

Kır dökme demir olarak da adlandırılır. Döküm sonrasında kalıp içerisine dökülen demirin hızlı soğutulması sonucunda, karbonun yapının içinde kalması halinde oluşur. Soğuma hızı gri dökme demirde olduğu gibi karbonun grafit yaprakları şeklinde çökelmesine izin vermez; karbon, demir, krom veya molibdenle birleşerek karbür oluşturur. Oluşan demir karbür (Fe_3C-sementit), sert ve kırılgandır; mekanik zorlanmalarda beyaz dökme demir genellikle bu sementit parçacıklarından kırılır. Kırılma yüzeyine bakıldığında açık renkli görülür, bu nedenle bunlara beyaz dökme demir adı verilmiştir (Şekil 20).

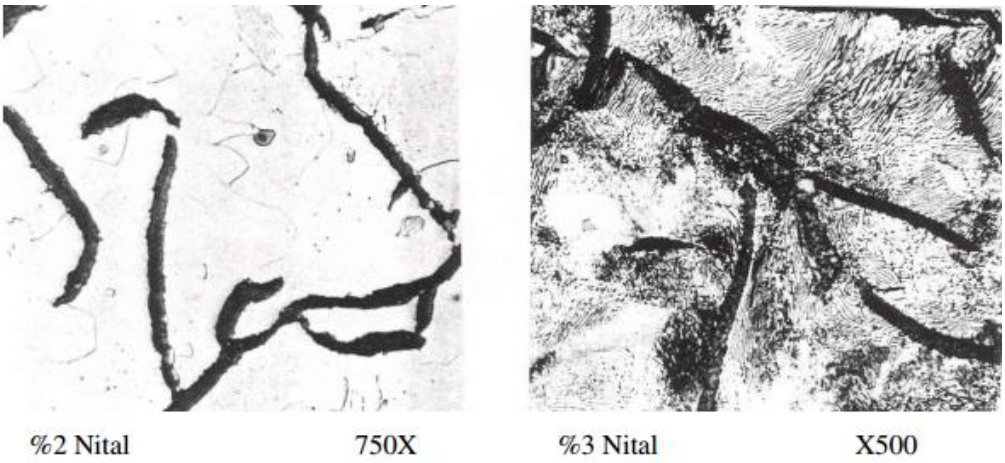


Şekil 20. Beyaz Dökme Demirlerin Mikroyapısı. [18]

[18] www.oerlikon.com.tr

Gri Dökme Demir

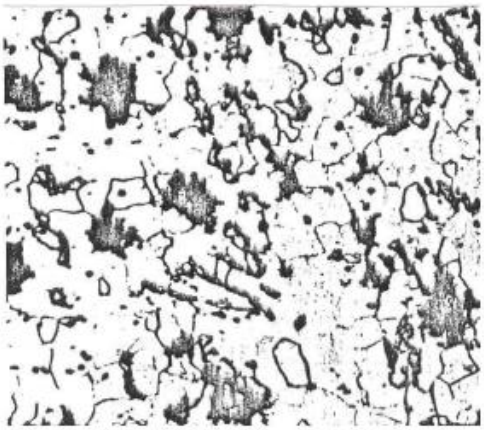
Serbest karbonların grafit yaprakları şekilde bulunduğu demir-karbon-silisyum alaşımlarına gri dökme demir denir ve kalıba dökülen ergimiş demirin yavaş soğumasıyla elde edilir. Döküm soğurken malzeme içindeki karbon, grafit yaprakları şeklinde çökelir. Bu dökme demirlere gri denmesinin nedeni; kırılma yüzeylerindeki gri görünümdür (Şekil 21). Gri dökme demirde yapıda bileşke halde bulunan karbon % 0.8' den daha düşüktür, kalan karbon grafit yaprakları şeklindedir.



Şekil 21. Gri Dökme Demirlerin Mikroyapısı. [19]

Temper Dökme Demir

Temper dökme demir uygun kompozisyona sahip beyaz dökme demirlerin ısıl işleme tabi tutulmasıyla elde edilir.



Şekil 22. Temper Dökme Demirlerin Mikroyapısı. [20]

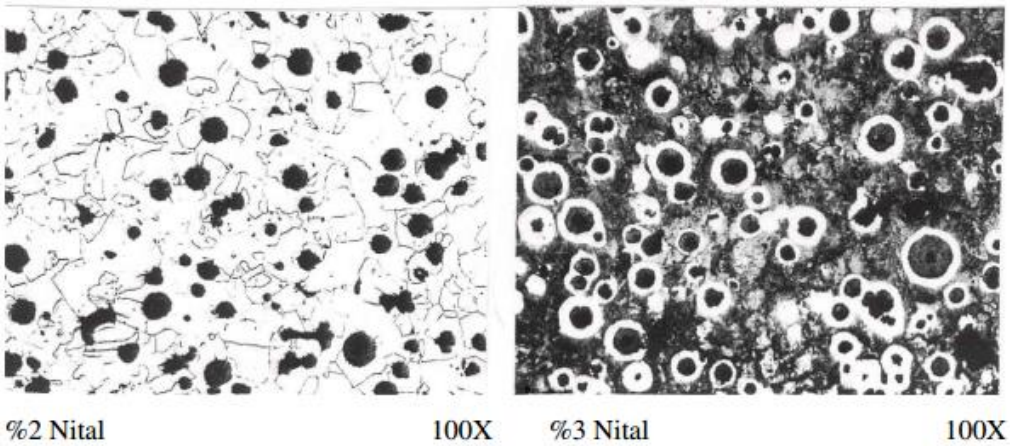
Beyaz dökme demir elde edildikten sonra kontrollü atmosferde fırında 900-950ºC ısıtılır ve bu sıcaklıkta belirli bir süre (ortalama 1 gün) tutulur. Bu işlem malzeme içinde çözünen

[19] www.oerlikon.com.tr
[20] www.oerlikon.com.tr

karbonun östenit faz içerisinde düzgün yüzeyli olmayan küresel grafit taneleri şeklinde çökelmesini sağlar ve toplam 6 gün sürer. Bu sıcaklıktan yavaş soğuma ile oluşan karbon fazına temper karbon denir. Bu dökme demirlerde oluşan ana yapı ferrittir. Perlitik veya martenzitik yapıyı, alaşım elementleri katmak veya hızlı (havada veya suda) soğutmak yoluyla elde etmek mümkündü. Temper dökme demirlerin mikroyapısı Şekil 22'de verilmiştir.

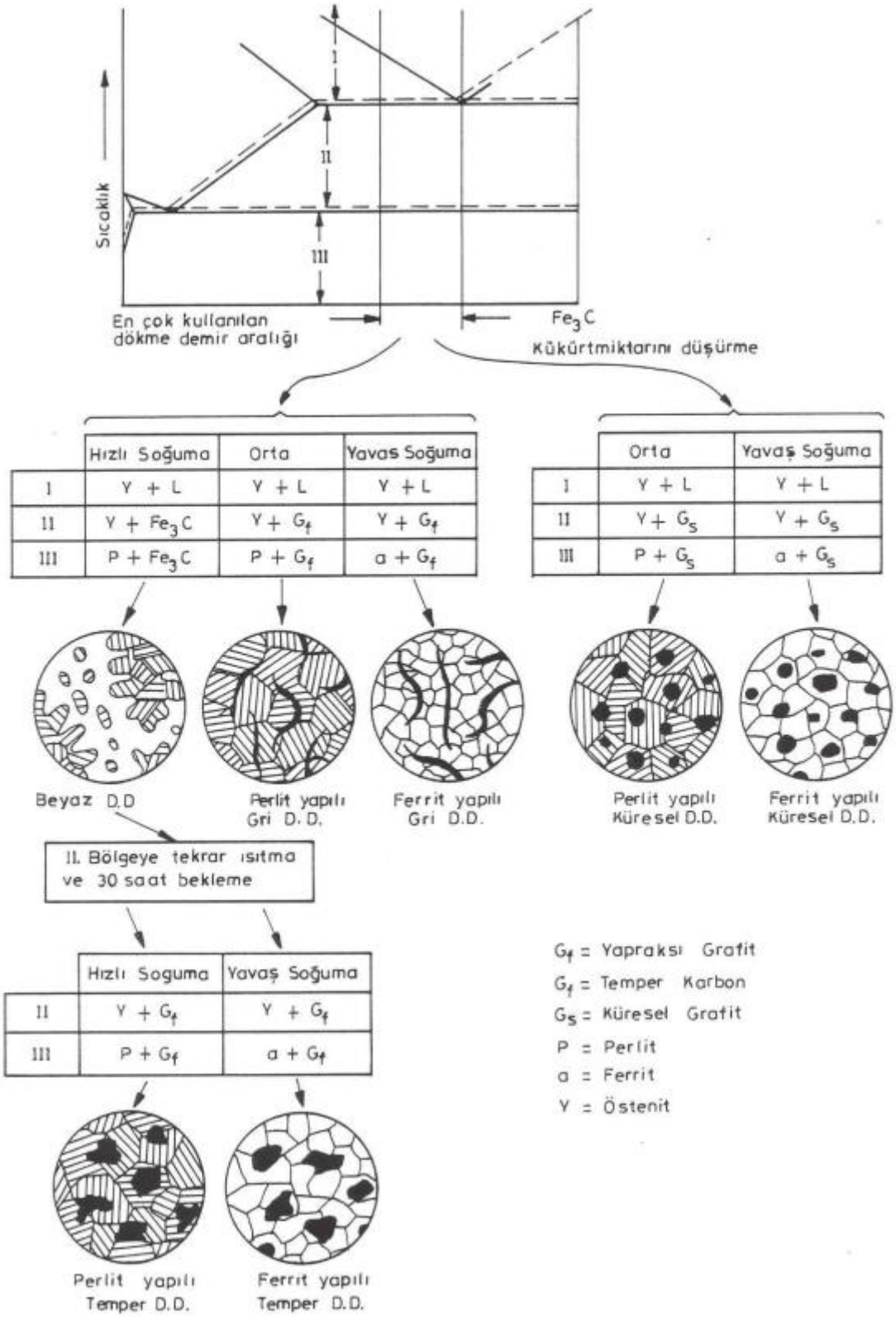
Küresel Dökme Demir

Küresel dökme demir kimyasal kompozisyonu gri dökme demirle aynıdır. Ancak mukavemet ve süneklik değerleri çeliklere benzer, üretim şekilleri gri dökme demirden farklıdır. Gri dökme demirlerde grafit yapraklarının şekli çatlak oluşturma özelliğinden dolayı gri dökme demirin mukavemetini, tokluğunu ve sünekliğini düşüren ana etkendir. Grafitin yapraksı değil de küresel şekle sahip olması daha yüksek mukavemet ve süneklik sağlar (Şekil 23). Böylece dökme çeliklerin mukavemet ve süneklik özellikleriyle, dökme demirlerin düşük maliyet, aşınma direnci ve üzerlerine uygulanan kuvvetleri emme karakteristikleri birleşir.



Şekil 23. Küresel Dökme Demirlerin Mikroyapısı. [21]

[21] www.oerlikon.com.tr



Şekil 24. Dökme Demir Mikroyapılarının Şematik Görünüşü. [22]

[22] www.oerlikon.com.tr

Çeliklerde Isıl İşlem Sonrası Mikroyapılar

Bütün ısıl işlemlerin amacı malzeme özelliklerini istenilen şekilde değiştirmektir. Isıl işlemler beş temel grupta değerlendirilebilir.

A. Tavlama

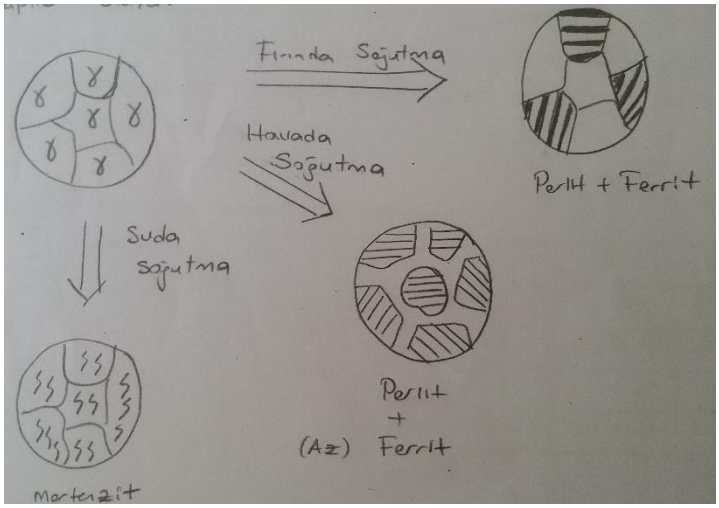
Malzemenin solidüs eğrisinin altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilmesi ve sonrasında soğutulması esasına dayanan ısıl işlemlerdir. Tavlama ısıl işlemleri;

- Normalizasyon
- Kaba tane tavlaması
- Yumuşatma tavlaması
- Gerilme giderme tavlaması
- Homojenizasyon (difüzyon) tavlaması olarak gruplara ayrılabilir.

B. Sertleştirme

Özellikle takım çeliklerinin mümkün olan en yüksek sertlik değerine ve aşınma direncine sahip olması için uygulanan ısıl işlemlerdir.

<u>ÖNEMLİ NOT:</u> Yavaş soğutma sonucu ostenit perlite dönüşür. Eğer soğutma hızı artırılırsa atomlar difüzyon için yeterli zamanı bulamayacakları için farklı mikroyapılar oluşur (Şekil 25).



Şekil 25. Çeliklerde Farklı Soğuma Hızlarında Ortaya Çıkan Mikroyapılar.

C. Islah Etme
D. Yüzey Sertleştirme
E. Çökelme Sertleşmesi

3. BÖLÜM

ELEKTRON MİKROSKOPİSİ

Elektron mikroskopları, görüntüleme için elektron demetlerini kullanan ve ışık mikroskobu ile görüntülenemeyen daha küçük objelerin görüntülenebilmesine imkân sağlayan mikroskoplardır. Malzemelerin iç yapılarının detaylı görüntülenebilmesinin yanında virüslerin de dahil olduğu pek çok yapı veya mikroorganizmanın incelenmesine olanak sağlar.

Elektron mikroskopları, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) olmak üzere ikiye ayrılır.

3.1. SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

Taramalı elektron mikroskopu yüksek çözünürlüklü görüntü oluşturmak için vakum ortamında oluşturulan ve yine vakum ortamında elektromagnetik lenslerle inceltilen elektron demeti ile malzemeden görüntü alınmasını sağlayan cihazdır.

Tablo 2. Optik Mikroskop ile Elektron Mikroskoplarının Karşılaştırılması.

Mikroskop Türü	Büyütme	Alan Derinliği	Çözünürlük
Optik	1400 X	0,5 mm	0,2 µm
Elektron	1 000 000 X	30 mm	1 nm

Temel olarak; mikroskopta oluşturulan görüntü, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışımalar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulur. Bunlar ikincil elektron yansımalı (secondary electron image) geri yansımaya uğramış elektronlar (backscattered electrons), karakteristik x ışınları, Auger elektronları, vs.

Avantajları;

- Yüksek çözünürlük *(AES)*
- Yüksek çözme derinliği *(DAEG)*
- Yüksek büyütme oranı

Dezavantajları;

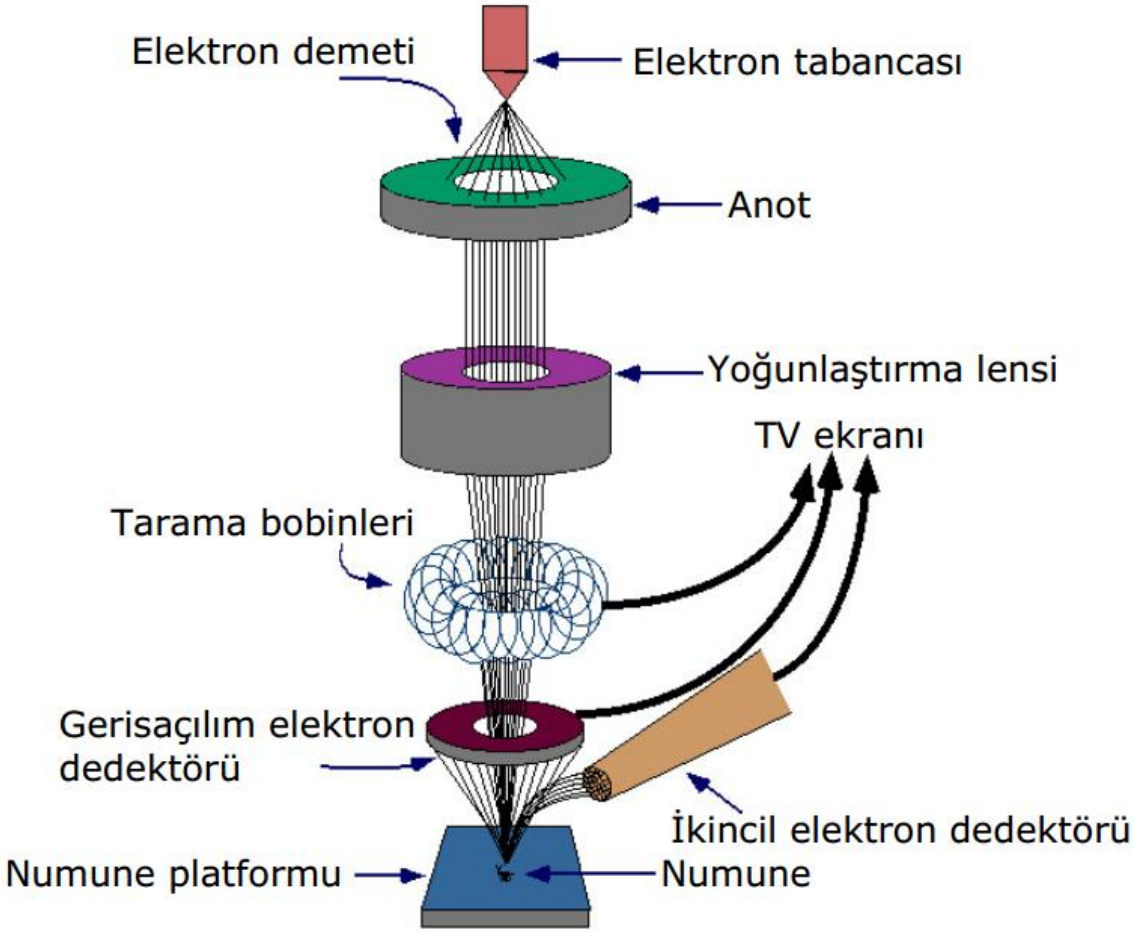
- Vakum oluşturma gerekliliği
- İletken numune zorunluluğu
- Yüksek bakım masrafları
- Pahalı ekipman ve görüntü alma

Kullanım Alanı;

- Topografi
- Morfoloji
- Tanecik şekli, boyutu, vs.

- Bileşim
- Kristalografik Bilgi

3.1.1. SEM Donanımı



Şekil 26. Taramalı Elektron Mikroskobunun Şematik Gösterimi.

- Vakum Sistemi
- Elektron Tabancası
- Elektromagnetik Mercekler
- Apertürler
- Numune Haznesi

a. Vakum Sistemi

Elektron mikroskopları;

- Yüksek enerjili elektronların elektron mikroskobu içerisinde yer alabilecek artık gazlar nedeniyle saçılım yapması,
- Elektron tabancalarının çalışması sırasında hem termal hem kimyasal kararlılığı olması,

- Numune üzerinde elektron demeti kaynaklı kontaminasyonu engelleme ihtiyacı gibi nedenlerden dolayı vakum altında çalışırlar.

Tungsten filamanlar için elektronların saçılım yapmasının önüne sağlanan 10^{-5} Torr değerindeki vakum ile geçilebilir. Ancak elektron tabancasının kararlılığı en kritik nedendir. Isıtılmış bir filaman (W için 2800 K) anında bozunmaya başlar ve bunun en temel nedeni oksidasyondur. LaB_6 filamanlar ya da FEG filamanlar daha düşük sıcaklıklarda çalışmalarına rağmen daha yüksek vakum altında çalışırlar. (LaB_6 için 10^{-7} Torr, FEG için 10^{-10} Torr). Ayrıca yeterince vakum uygulanmazsa yüzeyde biriken kirlilikler elektron tabancasının haznesinde birikerek performansını etkiler.

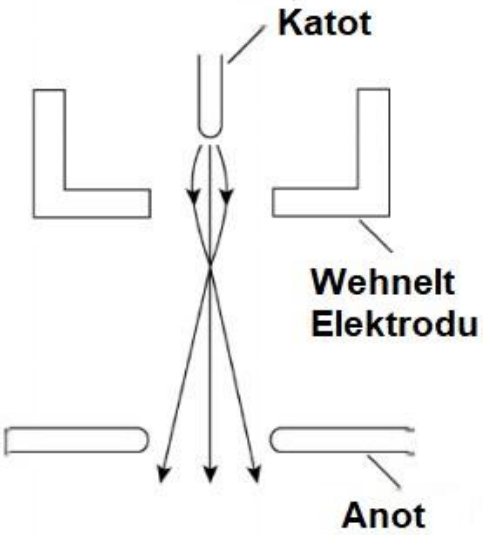
Sistemdeki basınç elektron tabancasının çalışmasına engel olmayacak kadar düşük olmalıdır.

Taramalı elektron mikroskobunda, adında da anlaşılabileceği üzere bir ışın demeti numune yüzeyini tarayarak bilgi toplar. Cihazda yer alan mercekler bu ışın demetinin özelliklerini kontrol etmek için kullanılır. Büyütme ise optik lensin katkıları ile değil, görüntüleme ekranının alanının numune üzerinde taranan alana oranı şeklinde ifade edilir.

b. Elektron Tabancaları

Elektron tabancaları numune üzerine yoğunlaştıracak elektronları üreten kaynaklardır ve temel olarak 3 parçadan oluşurlar:

- Katot veya Elektron Kaynağı
- Wehnelt Elektrodu
- Anot



Şekil 27. Elektron Tabancası Parçalarının Şematik Gösterimi.

Katot yüzeyinden salınan elektron elektrik alan ile anota doğru hızlandırılır. Anot ve katot arasındaki Wehnelt elektrotu, elektron demetinin yol boyunca ilerlerken demet akımının düşmesi kaynaklı voltaj salınımlarını stabilize etmek katota göre birkaç yüz voltluk negatif potansiyel uygular.

Filament, elektrik akımı verilerek ısıtılır. Bu sayede yeterli enerjiye sahip elektronlar filamentin ucunda birikerek bir elektron bulutu oluştururlar. Eğer filamente verilen akım kaldırılısa bu elektronlar filament tarafından tekrar absorbe edilirler.

Eğer filamentin yanına bir pozitif yüklü bir plaka (Anot) yerleştirilirse, elektronlar bu anotun çekim etkisi altında kalırlar. Bu durumda da elektronlar anot tarafından absorbe edilirler. Eğer anotla elektron bulutu arasına negatif yüklü bir plaka (katod) yerleştirilirse anoda doğru yönlenen elektronlardan dikey doğrultuda bir ışınım elde edilir.

Temel olarak üç tür elektron tabancası vardır:

- Tungsten Filaman } Termiyonik Salınımlı Tabancalar
- Lantanyum Hegzaborur (LaB_6) } Termiyonik Salınımlı Tabancalar
- Alan Salınımlı (Field Emission) Tabancalar

En fazla kullanılan elektron tabancası türü termiyonik salınımlı tabancalardır. Tunsten filaman elektrik akımıyla 2800 K sıcaklığa kadar ısıtılır. Aşırı ısınmış yüzey elektronları, yüzey enerjisi bariyerini geçebilecek kadar kinetik enerji dolayısıyla filaman yüzeyinden yayınırlar. Ayrılan elektronlar filaman ve anot arasındaki yüksek elektrik potansiyeliyle numuneye doğru hızlandırılırlar. Elektron demetinin şiddeti filaman sıcaklığı ve hızlandırma voltajına bağlıdır.

Lantanyum hegzaborür filamanlar modern mikroskoplarda sıklıkla kullanılırlar. Lantanyum hegzaborür filamandaki elektronlar, yüzeyden kaçmak için daha az kinetik enerjiye ihtiyaç duyarlar. Buradaki elektronların yüzey iş fonksiyonu 2 eV iken, tungstende 6.5 eV'tur. Dolayısıyla, daha düşük katot sıcaklığı demektir. LaB_6 filaman, daha yüksek elektron demeti şiddeti üretecek ve tungsten filamandan daha uzun ömürlü olacaktır. Ancak, tungsten filamandan daha yüksek vakum gereklidir.

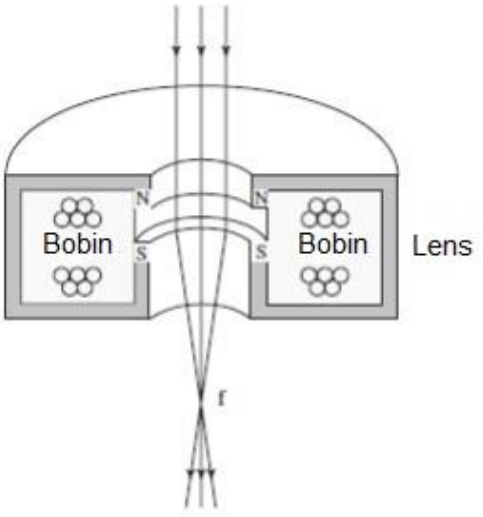
Alan salınımlı elektron tabancaları elektronların yüzey potansiyel enerjisi aşmak için termal enerjiye ihtiyaç duymazlar. Metal yüzeyine uygulanan çok yüksek elektrik alanıyla elektronlar yüzeyden koparılır. Termiyonik etki yerine, tunnelleme etkisiyle yüzey bariyeri boyunca iletim bandında metal elektronları oluşturulur.

c. Elektromagnetik Mercekler

Optik mikroskoplarda cam lensler kullanılırken, elektron mikroskoplarında elektromagnetik lensler kullanılır.

N ve S kutupları ile bir açıklıktan oluşan bu lens sisteminde oluşturulan güçlü magnetik alan ile elektronlar kontrol edilir. Magnetik alanın elektrik akımını değiştirerek kolaylıkla

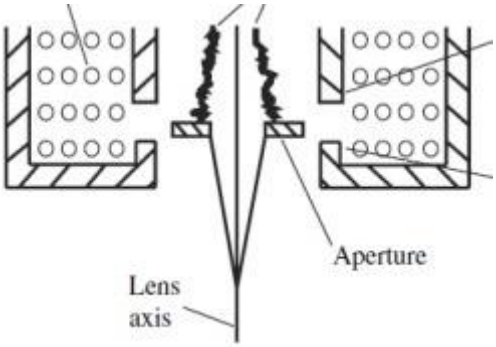
kontrol edilebilmesi sayesinde, bir elektromagnetik lensin büyütme gücü lensten geçen akımı değiştirerek kontrol edilebilir.



Şekil 28. Elektromagnetik Lens.

d. Apertür

Elektron mikroskoplarında 'aperture' lensin içerisine yerleştirilmiş dairesel bir metal bloğudur. Bu açıdan optik mikroskopa benzerlik gösterir. Temel görevi saçılmaları sınırlamak ve/veya saçılan/saçılmayan elektron demetlerinin seçilmesini sağlamaktır.



Şekil 29. Apertüre.

e. Numune Haznesi

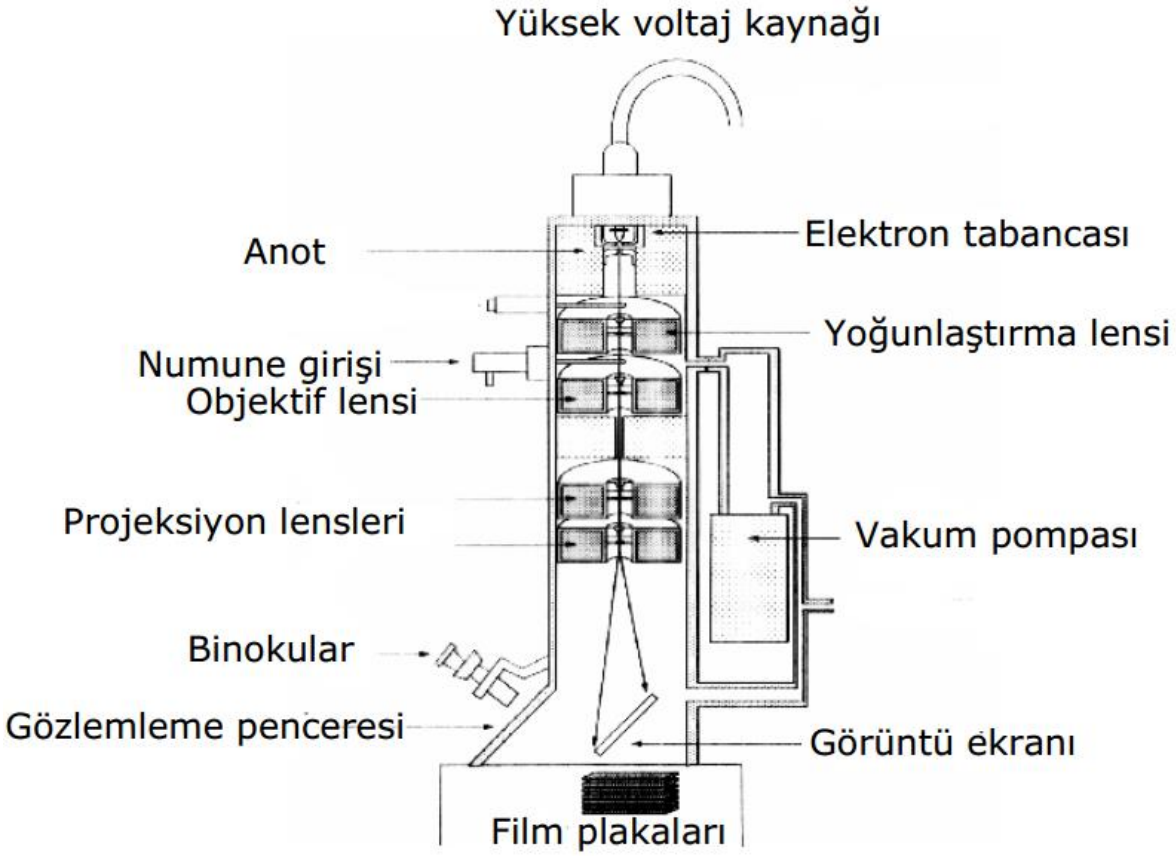
Numunenin görüntüleme için yerleştirildiği alandır.

3.2. TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu)

Elektron tabancasından elde edilen elektronlar 100-200 kV değerinde bir hızlandırma voltajı ile numuneye yönlendirilirler. Elektronların yönlendirilmesi elektromagnetik

lensler kullanılarak gerçekleştirilir. Numuneden geçebilen elektronlar gözlem ekranının üzerinde düşer ve görüntü elde edilir.

TEM; SEM'e göre daha yüksek büyütme oranı (~ 1 MX) ve daha yüksek çözünürlük (~ 1 Â) sağlar. Bu nedenle özellikle malzeme bilimi ve biyoloji gibi alanlarda sıklıkla kullanılır.



Şekil 30. Geçirimli Elektron Mikroskobunun Şematik Gösterimi.

3.2.1. TEM Donanımı

- Elektron Tabancası
- Elektromagnetik Mercekler
- Numune Haznesi

a. Elektron Tabancaları

Elektron mikroskoplarında, elektron demetleri elektron tabancalı yardımıyla üretilir. Elektron demetinin enerjisi oluşan elektron demetinin hareketinin dalga boyunu etkiler. Dalga boyu da ayırt etme gücünü (çözünürlüğü) etkilediğinden hızlandırma voltajı elde edilecek ayrım gücünü etkileyen en önemli faktördür.

TEM'de en sık kullanılan elektron tabancaları; Tungsten, LaB_6 ve FEG'dir.

Tablo 3. TEM'de Hızlandırma Voltajının Çözünürlüğe Etkisi.

Hızlandırma Voltajı (kV)	Elektron Hareketi Dalga Boyu (nm)	TEM Çözünürlüğü (nm)
40	0,00601	0,56
100	0,00370	0,35
500	0,00142	0,13

b. Elektromagnetik Mercekler

Orta kısmı boydan boya delinmiş silindirik yumuşak bir metalin etrafına bakır sarılması ile elde edilen malzemelerdir. Bobinden akım geçirildiğinde bir elektrik alan oluşur. Bobindeki akımın değişmesi elektrik alanı ve dolayısıyla da lensin odak uzaklığını değiştirir. Akımın artırılmasıyla lensin odak uzaklığı azalır.

c. Numune Haznesi

TEM'de numune yüzeyinden yansıyan değil numune içerisinden geçebilen elektronlar görüntü oluşturur. Bu nedenle TEM vasıtasıyla incelenecek numunelerin belirli özellikleri sağlaması gerekmektedir:

i. Numune, elektronların geçmesine izin verecek kadar ince olmalıdır,
ii. 3 mm'den daha ince olan numuneler kaybolmaması için bakır meshler içerisine yerleştirilirler.

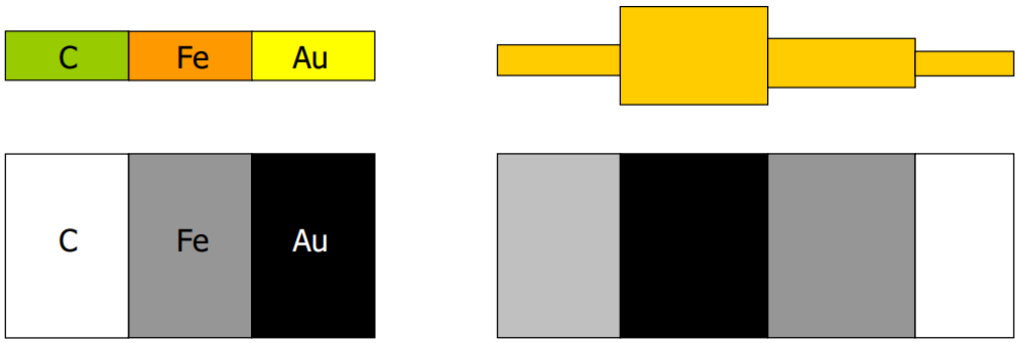
3.2.3. TEM'in Çalışma Prensibi

Elektronlar, tabancadan çıktıktan sonra iki yoğunlaştırıcı lensten geçer. Bu lensler, elektronları numune üzerine odaklar. Elektronlar, objektif lensin odak noktasının hemen üzerinde bulunan ince numuneden geçerler. Daha sonra kırınım deseni oluşturmak için objektif lensten geçtikten sonra bir araya gelirler ve görüntü oluşumu için kolon boyunca birlikte ilerlerler.

TEM üç modülde çalışmaktadır:

- Aydınlık Alan
- Karanlık Alan
- Yüksek Çözünürlüklü Elektron Mikroskopisi (HREM)

i. Aydınlık Alan: TEM'de normal moddur. Koyu tonlu bölgeler numuneden daha az sayıda elektronun geçtiği bölgelerdir. Bir bölgeden daha az sayıda elektronun geçmesi o bölgenin daha yoğun (büyük atom numarası) veya daha kalın olduğunu gösterir.



Şekil 31. Aydınlık Alan Görüntülemede Atom Numarasının ve Numune Kalınlığının Etkisi.

ii. Karanlık Alan: Aydınlık alan görüntülemesinde koyu çizgiler şeklinde görünen dislokasyonlar, dislokasyon merkezlerinden saçılan elektronların şiddeti karanlık alan modunda yakalandığı için karanlık alan görüntüsünde aydınlık çizgiler şeklinde görünür.

3.3. TEM ve SEM'in Kıyaslanması

TEM	SEM
1000 KX Büyütme	100 KX Büyütme
Numune hazırlamak zaman alıcı	Numune hazırlamak kolay
Numune iletken veya yalıtkan olabilir	Numune iletken olmak zorunda
Yüzey topoğrafyası incelenemez	Yüzey topoğrafyası incelenebilir
Kristalografik bilgi elde edilebilir	Kristalografik bilgi elde edilemez
İşletmesi maliyetli ve uzmanlık gerektirir	İşletmesi nispeten daha kolay ve uygun maliyetli

4. BÖLÜM

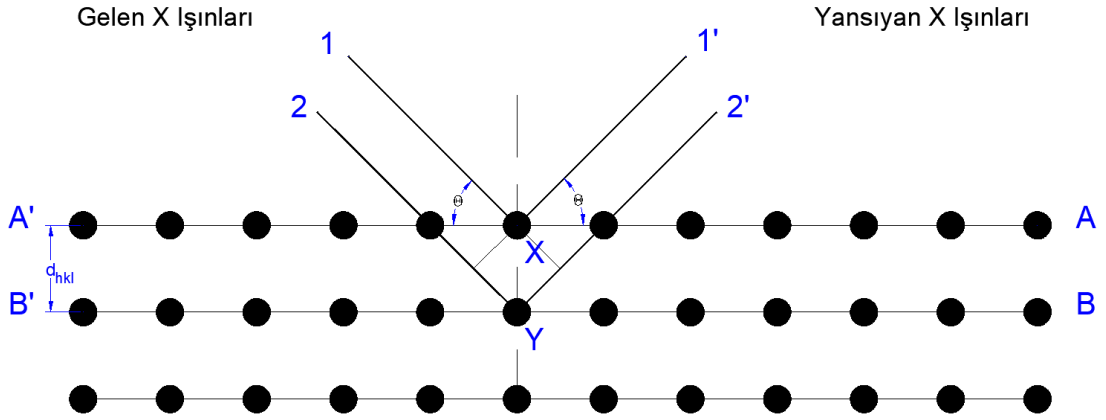
X-IŞINLARI KIRINIMI (X-RD) YÖNTEMİ İLE KRİSTAL YAPILARIN BELİRLENMESİ

X-Işınları, kısa dalga boyuna sahip yüksek enerjili bir ışıma biçimidir. Dalga boyları, katılardaki atomlararası mesafeler ile aynı seviyededir.

X-Işınları analizi bir metalin;

- Kristal yapısını
- Kristal parametrelerini
- Düzlemlerarası mesafesini belirlemek için kullanılır. Ayrıca bilinmeyen bir malzemeye X-Işınları analizi uygulanarak hangi malzeme olduğu da tespit edilebilir.

X-Işınları analizinde dalga boyu bilinen (λ) X-Işınları kristal yapılı malzemeye çarptığı zaman, bu X-Işınları kristal düzlemlerinde bulunan atomlar tarafından belirli bir açıda yansıtılırlar.



Şekil 32. X-Işınları Kırınımı Yönteminin Şematik Gösterimi.

Şekil 32'de görüldüğü gibi A-A' ve B-B' olarak adlandırılan ve birbirine paralel ve aynı Miller indislerine sahip kristal düzlemleri arasındaki mesafeyi d_{hkl} olarak adlandıralım. Burada; h, k ve l harfleri düzlemin Miller indislerini ifade eder. Bilinen dalga boyuna sahip X-Işınları kristal düzlemindeki atomlara Θ açısı ile çarpar ve yine düzlemle Θ açısı yaparak yansır. Yani Şekil 32'ye göre (1) ve (2) numaralı X-Işınları sırasıyla X ve Y atomlarına çarparak (1') ve (2') numaralı ışınlar olarak yansır.
Gönderilen X-Işınları Bragg Kanunu olarak bilinen eşitliğe göre yansır.

$$\lambda = 2\, d_{hkl} \sin \Theta$$

λ: Kullanılan X-Işını Dalga Boyu (Â)
d_{hkl} : Kristal Düzlemleri Arasındaki Mesafe (Â)
Θ: X-Işını Yansıma Açısı

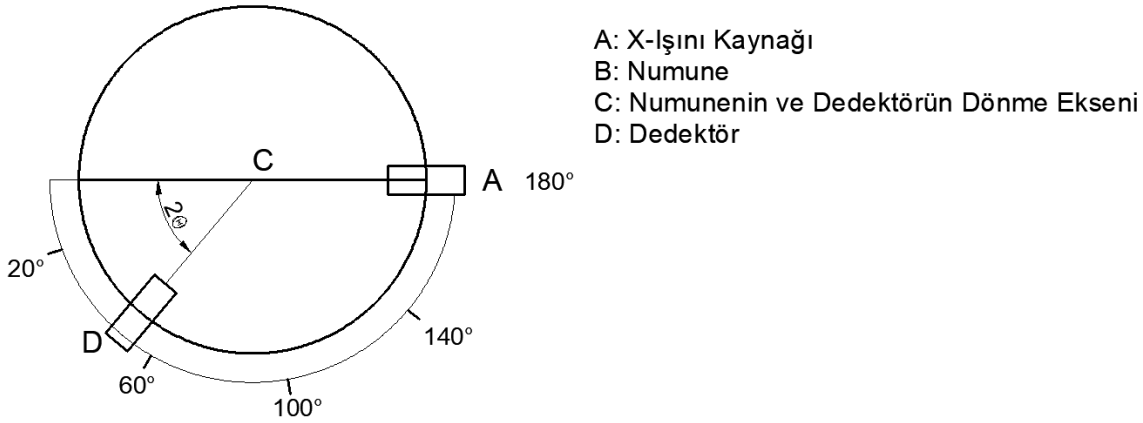
Kübik yapıya sahip metallerde kristal düzlemleri arasındaki mesafe ayrıca;

$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$ ifadesi ile de hesaplanabilir.

a: Kafes Parametresi

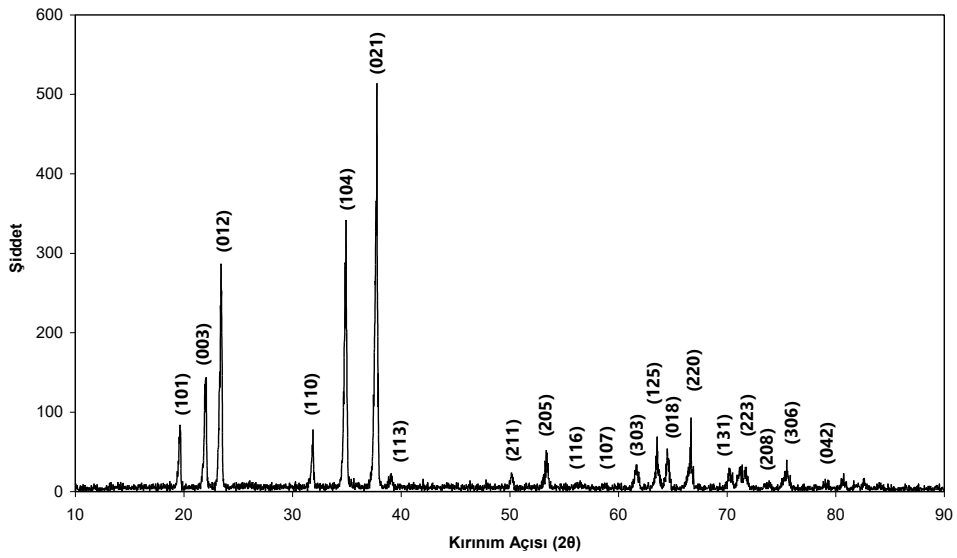
En yaygın olarak kullanılan X-Işını analizi tekniğinde, kristal yapıya sahip toz halindeki parçacıkların sıkıştırılmasıyla hazırlanan numuneye, dalga boyu bilinen X-Işınları çarptırılır. Bu şekilde parçacıklar gelişi güzel dağıldıkları için mümkün olan bütün kristal düzlemlerinden X-Işını yansıması meydana gelecektir. Böylece kristal yapılı parçacıklar için bir X-Işını yansıma şablonu oluşturulabilir.

Numunelerden elde edilen X-Işını yansımasının hangi yansıma aralıklarında olduğunu belirlemek için X-Işını Difraktometresi kullanılır (Şekil 33).



Şekil 33. X-Işınları Kırınımı Yönteminin Şematik Gösterimi.

Difraktometre içerisine yerleştirilen numuneye A noktasından X-Işınları gönderilir. Gönderilen X-Işınları numune içerisindeki kristal düzlemlerindeki atomlara çarpar ve yansır. Yansıyan X-Işınları hareket halindeki dedektör tarafından 2Θ açılarında kaydedilirler. Böylece o numuneye ait bir X-Işınları difraksiyonu elde edilir. Bu şablon üzerinde görülen her bir pik (tepe noktası) bir kristal düzlemini ifade eder (Şekil 34).



Şekil 34. Örnek Bir X-RD Deseni.

Örnek Soru: Demirin kafes parametresinin 2,866 Â ve X-Işınları difraksiyon yöntemiyle analiz edilmesi için kullanılan ışığın dalga boyunun 1,542 Â olduğu bilindiğine göre (a) demirin (211) düzlemine ait düzlemler arası mesafeyi, (b) yansıma açısını hesaplayınız.

a=2,866 Â
λ=1,542 Â
h=2, k=1, l=1

(a) $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} = \frac{2,866}{\sqrt{2^2+1^2+1^2}} = 1,170$ Â

(b) Bragg Kanunu ile;

$\lambda = 2\, d_{hkl} \operatorname{Sin} \Theta \rightarrow \sin\theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}}$

$\operatorname{Sin} \Theta = \frac{1,542}{2(1,170)} = 0,659 \rightarrow \Theta = 41,22\ °$

$2\Theta = 82,44\ °$

Örnek Soru: Demir atomunun (220) düzlemleri için (a) Düzlemler arası mesafeyi, (b) yansıma açısını hesaplayınız. (X-Işını analizinde λ = 0,1790 nm olan monokromatik ışığın kullanıldığını kabul ediniz.)

a=2,866 Â = 0,286 nm
λ= 0,1790 nm
h=2, k=2, l=0

(a) $d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} = \frac{0,286}{\sqrt{2^2+2^2+0^2}} = 0,1013\ nm$

(b) $sin\,\theta = \frac{\lambda}{2d_{hkl}} = \frac{0{,}1790}{2(0.1013)} = 0{,}884$

Θ = 62,13 °
2Θ = 124,26 °

5. BÖLÜM

HASARA UĞRAMIŞ (KIRILMIŞ) YÜZEYLERİN MİKROYAPISAL ANALİZİ

Mühendislik malzemelerinde hasarın oluşması, başta can kaybı olmak üzere, ekonomik kayıplara neden olması ve bir ürün ya da bir işin tamamlanmasına engel olduğu için, neredeyse hiçbir zaman istenmez. Hasara yol açan etkenler ve malzeme davranışı bilinse bile, alınan önlemler sayesinde hasarların oluşmayacağı güvence verilemez.

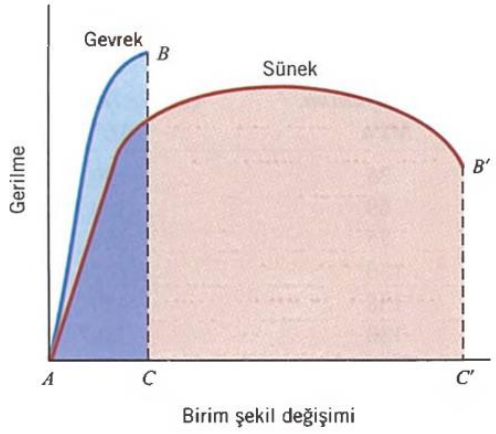
Başlıca hasar nedenleri;

- Hatalı tasarım/Hatalı malzeme seçimi
- İmalat ve kullanım hataları olarak ifade edilebilir.

5.1. Kırılma

Malzemenin ergime sıcaklığına göre düşük sıcaklıklarda, cismin sabit veya zamanla yavaş bir şekilde değişen (statik) bir gerilmenin etkisiyle iki veya daha fazla parçaya ayrılmasına kırılma adı verilir. Statik gerilmelere ek olarak kırılma, çevrimsel gerilmelerin etkisinde (yorulma) veya yüksek sıcaklıkta zamana bağlı olarak (sürünme) da gerçekleşebilir. Malzemede kırılmaya neden olan uygulanan gerilmenin türü çekme, basma, kayma veya burulma olabilir.

Mühendislik malzemelerinde sünek ve gevrek olmak üzere iki kırılma şekli söz konusudur ve bu iki kırılma türünün birbirlerinden farkı malzemenin uğrayabileceği plastik deformasyonun miktarıdır. Sünek malzemeler, kırılma öncesi yüksek miktarda enerji absorbe ederek önemli oranda plastik deformasyona uğrar. Gevrek kırılmada ise genellikle çok az plastik deformasyon oluşarak veya hiç plastik deformasyon oluşmadan düşük miktarda enerji absorbe edilir (Şekil 35).



Şekil 35. Kopana dek yüklenmiş gevrek ve sünek metallere ait çekme gerilmesi-birim şekil değişimi eğrilerinin şematik gösterimi. [23]

[23] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.

“Sünek” ve “gevrek” kavramları göreceli terimler olup kırılmanın hangi şekilde gerçekleştiğine bağlıdır. Süneklik sayısal olarak, çekme deneyinden elde edilen yüzde uzama ve yüzde kesit daralması değerleriyle ifade edilir.

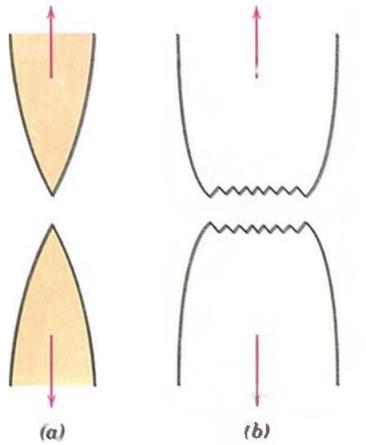
Kırılma olayı, gerilmenin etkisinde çatlak oluşumu ve ilerlemesi olmak üzere iki aşamada gerçekleşir. Gerçekleşen kırılmanın türü ise çatlak ilerleme mekanizmasına bağlıdır. İlerleyen bir çatlağın çevresinde büyük miktarda plastik deformasyon oluşması, sünek kırılmayı işaret eder. İlave olarak, çatlak boyundaki büyüme nispeten düşük hızlarda gerçekleşir. Bu tür çatlaklar genelde ***kararlı çatlak*** olarak nitelendirilir. Diğer bir ifadeyle, malzemeye uygulanan gerilme arttırılmadığı sürece, çatlak ilerlemesi görülmez. Dahası, kırık yüzeylerinde çoğunlukla fark edilebilir nitelikte yoğun bir deformasyonun (kıvrılma veya yırtılma) varlığı dikkat çeker. Diğer taraftan, gevrek kırılmada ise çatlak çok hızlı bir şekilde, önemsiz miktarda plastik deformasyon göstererek ilerler. Bu tür çatlaklar, ***kararsız çatlak*** olarak anılır ve çatlak bir kez ilerlemeye başladığında, gerilmenin büyüklüğü arttırılmaksızın kendiliğinden ilerlemeye devam eder. Kararsız çatlak bir kez ilerlemeye başladığında gerilmenin büyüklüğü artırılmaksızın kendiliğinden ilerlemeye devam eder.

Mühendislik uygulamalarında sünek kırılma gevrek kırılmaya göre tercih edilir. Bunun nedeni;

- Gevrek kırılmanın aniden ve herhangi bir uyarıcı belirti göstermeden oluşan bir hasar olup çatlağın kendi kendine ve hızlı bir şekilde ilerlemesi sonucunda meydana gelmesi,
- Sünek malzemeler genelde daha yüksek tokluğa sahip olduklarından, sünek kırılmayı başlatmak için daha fazla şekil değişimi enerjisine ihtiyaç duyulmasıdır.

5.1.1. Sünek Kırılma

Sünek kırılma yüzeyleri gerek makro, gerekse mikro seviyede kendine özgü belirgin özelliklere sahiptir (Şekil 36.)

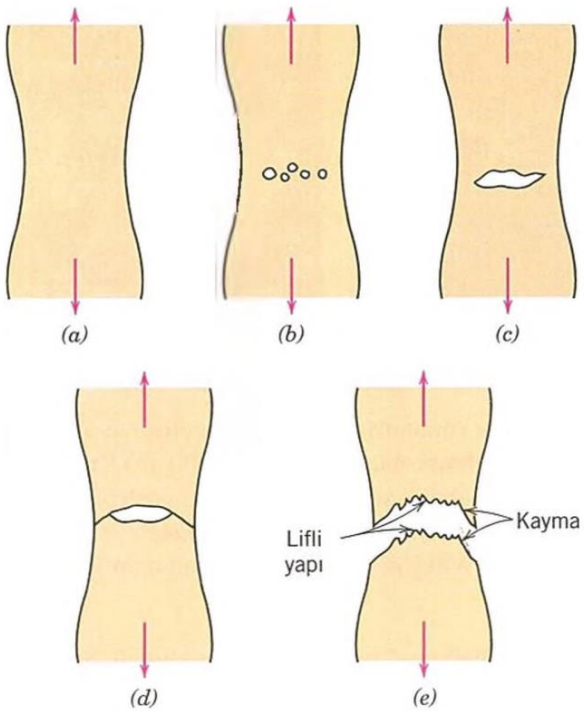


Şekil 36. (a) Yüksek Derecede, (b) Kısmi Boyun Oluşumu Sonrası Sünek Kırılma. [24]

[24] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.

Yüksek derecede sünek kırılmada boyun oluşumu kopma noktasına kadar devam eder. Bu tür kırılma saf altın ve kurşun gibi aşırı yumuşak metallerde oda sıcaklığında ya da diğer metal, polimer ve organik olmayan camlarda yüksek sıcaklıkta görülür. Son derece sünek olan, neredeyse % 100 kesit daralması meydana gelen bu malzemelerde, boyun verme bölgesindeki incelme numune kopana kadar devam eder.

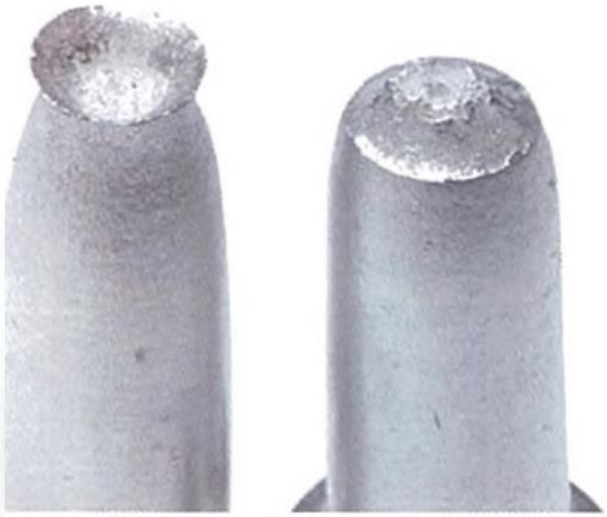
Sünek malzemelerde en sık rastlanan kopma sonrası yan görünüş ise Şekil 36.b'de verilmiştir. Kırılma numunenin bir miktar boyun vermesinin ardından ve genel olarak birkaç aşamada gerçekleşir (Şekil 37).



Şekil 37. Çanak-Koni Kırılmanın Oluşum Aşamaları. [25]

İlk olarak Şekil 37.b'de gösterildiği gibi, boyun oluşumu sonrası, numunenin kesitinde, iç kısmında mikro boşluklar meydana gelir. Sonra, ilerleyen deformasyonla birlikte bu mikro boşluklar büyür, bir araya gelerek elips şeklinde bir çatlak meydana getirir. Burada çatlağın uzun ekseni gerilme doğrultusuna diktir. Çatlak bu mikro boşlukların birleşmesiyle, Şekil 37.c'de görüldüğü gibi kendi uzun eksenine paralel doğrultuda sürekli büyümeye devam eder. Son olarak, çekme ekseniyle yaklaşık 45° açı yapan kayma deformasyonuyla, boyun bölgesinin çevresinde (Şekil 37.d), hızlı çatlak ilerlemesini takiben, parçanın ikiye ayrılmasıyla kırılma gerçekleşir)45° açılı bu düzlem üzerinde kayma gerilmesi maksimumdur). Kırık eş parçalarından birisi çanak, diğeri koniye benzediğinden, tipik olarak bu şekle sahip kırılmaya ***çanak-koni kırılması*** denmiştir. Bu şekilde kırılmış parçada, Şekil 8.3a'da görüldüğü gibi, kırık yüzeyinin merkez kısmı, plastik deformasyonun işaret ettiği şekilde düzgün olmayıp, lifli görünüme sahiptir (Şekil 38).

[25] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.



Şekil 38. Çekme Etkisi Altındaki Al'a ait Kırılma Yüzeyi.

5.1.2. Gevrek Kırılma

Gevrek kırılma, kayda değer miktarda plastik deformasyon olmaksızın, hızlı çatlak ilerlemesi ile oluşur. Çatlak hareketinin yönü uygulanan çekme gerilmesi doğrultusuyla yaklaşık 90 derecelik bir açı yapar diktir ve hasar sonucu düz bir kırılma yüzeyi oluşur (Şekil 39).

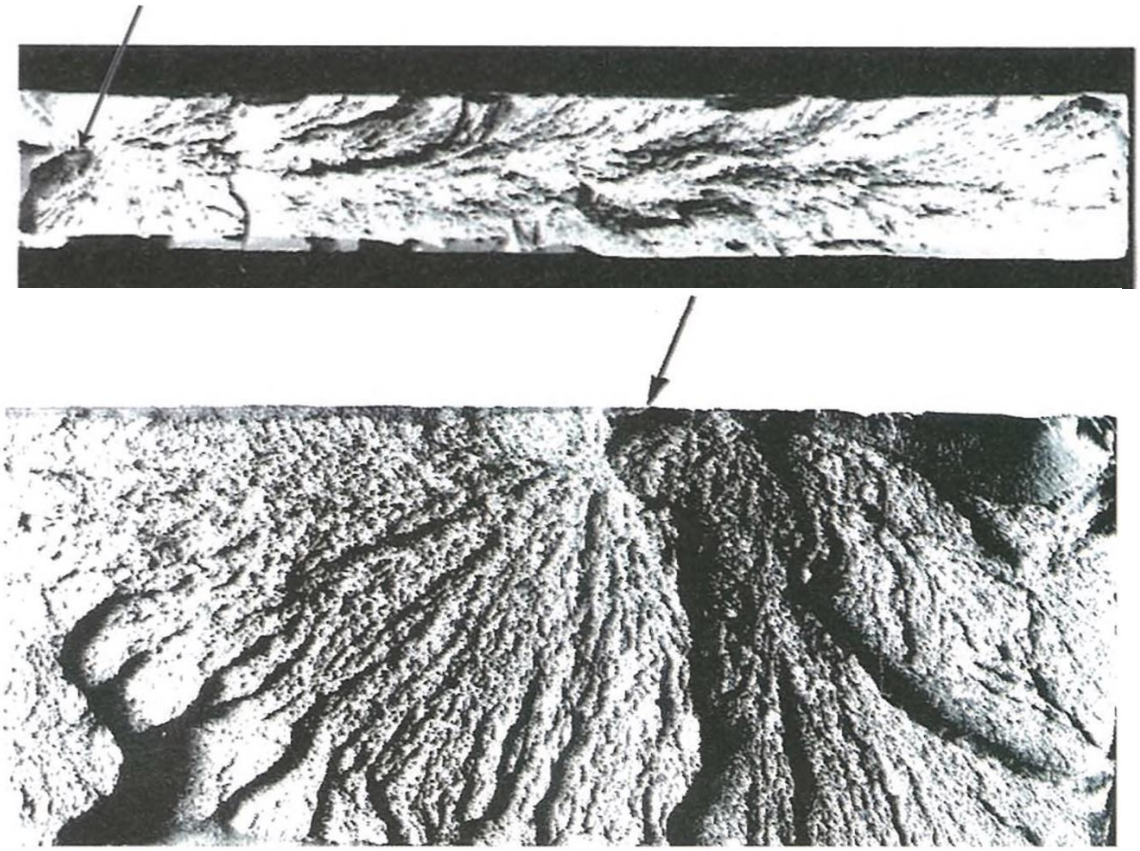
Şekil 39. Gevrek Kırılma. [26]

Gevrek olarak kırılan malzemelerin kırık yüzeyleri kendine özgü belirgin bir görünüme sahiptir ve yoğun plastik deformasyona ait belirtiler içermez (Şekil 40).

[26] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.

Şekil 40. Çekme Etkisi Altındaki Gevrek Çeliğe ait Kırılma Yüzeyi.

Bazı çeliklerde, çatlağın bulunduğu kesitin merkezine yakın kısımda, Şekil 41.a'daki gibi, V şeklinde bir dizi "chevron" işaretleri oluşur ve bunlar geriye doğru çatlak başlangıç noktasını işaret ederler. Diğer bir gevrek kırılma yüzeyinde, Şekil 41.b'de görüleceği üzere, fan şekline benzer bir görüntü oluşturan, çatlak orijininden yayılan çizgi veya bantlar meydana gelir.

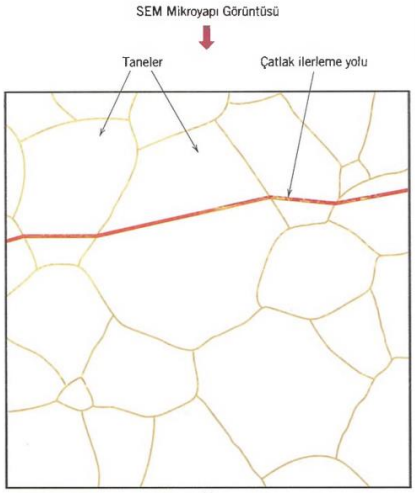


Şekil 41. (a) "Chevron" İzlerini Gösteren Bir Fotoğraf, (b) Radyal Yönde Fan Kanatçıklarını Andıran İzlerin Bulunduğu Gevrek Kırılma Yüzeyine ait Bir Fotoğraf. [27]

[27] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.

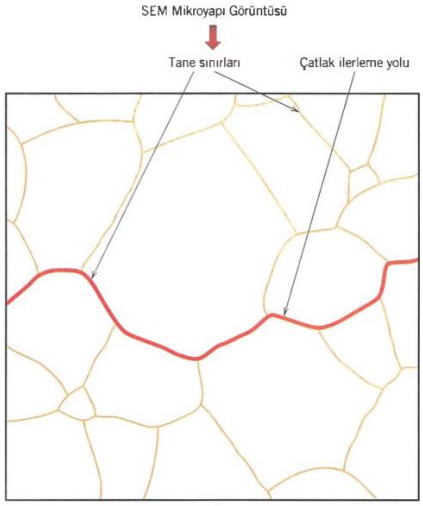
Genelde bu kırık yüzey izlerinin ikisi de çıplak gözle fark edilebilecek büyüklüktedir. Diğer taraftan, çok sert ve ince taneli malzemelerin kırık yüzeyinde fark edilebilir büyüklükte izler oluşmayabilir. Seramik camlar gibi amorf malzemelerde oluşan gevrek kırılma, geride nispeten parlak ve düzgün bir yüzey bırakır.

Kristal yapılı gevrek malzemelerin birçoğunda çatlak ilerlemesi, ayrılma adı verilen, belirli kristal düzlemler boyunca atomlararası bağların peş peşe ve tekrarlanarak kopmasıyla oluşur (Şekil 42). Çatlak taneleri keserek ilerlediğinden, bu tür kırılmaya ***tane içi kırılma*** adı verilmiştir. Makro ölçekte, ayrılma düzlemleri taneden taneye değiştiğinden kırık yüzeyi taneli veya kesik görünümlü bir topografyaya sahiptir.



Şekil 42. Tane İçi Kırılma. [28]

Bazı alaşımlarda ise çatlak ilerlemesi Şekil 43'te gösterildiği gibi, tane sınırları boyunca gerçekleşir, buna ***taneler arası kırılma*** adı verilmiştir. Genelde bu tür kırılma, tane sınırlarının dayanımını azaltıcı veya gevrekleştirici etkiye sahip işlemler sonrası görülür.



Şekil 43. Taneler Arası Kırılma. [29]

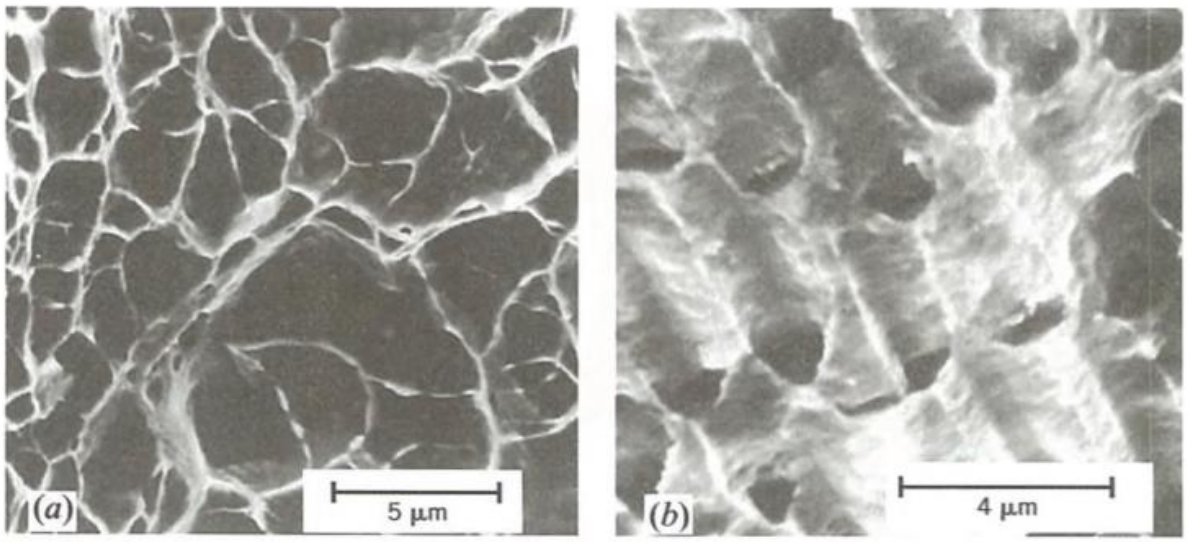
[28] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.

[29] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.

5.2. Kırılma Yüzeyi İncelemeleri

Kırılma mekanizmasına ilişkin çok daha detaylı bilgiler, genelde elektron mikroskobunun kullanıldığı mikroskobik incelemelerden elde edilir. Bu tür incelemeler ***fraktografik çalışma*** olarak adlandırılır. Kırık yüzeyi incelemelerinde, optik mikroskoba göre çok daha iyi çözünürlüğe sahip olan ve farklı derinliklerdeki yüzey ayrıntılarının belirlenmesinde yine optik mikroskoba göre çok daha iyi olan, tarama elektron mikroskobu tercih edilir. Bu özellikler kırık yüzeyinin topografyasının ortaya çıkarılması için gereklidir.

Elektron mikroskobunda çanak-koni kırık yüzeyinin lifli merkez kısmı yüksek büyütmelerde incelendiğinde, bu bölgenin Şekil 44'teki gibi, çok sayıda küresel boşluklardan oluştuğu görülür. Bu yapı, tek eksenli çekme zorlaması ile oluşan kırılma yüzeyine özgü bir özelliktir. Her bir boşluk ya da çukurcuk, daha önce oluşmuş ve sonra kırılma ile ayrılmış bir mikro boşluğun yarısıdır. Bu boşluklar çanak-koni kırılmada 45° açılı kayma bölgeleri üzerinde de oluşur. Ancak Şekil 44.b 'de görüldüğü gibi, bunlar bir doğrultuda uzamıştır ve C-tipindedir. Bu parabolik şekilli boşlukların varlığı, kayma hasarını işaret eder. Ayrıca, kırık yüzeyinde diğer mikro ölçekteki özelliklere ait belirtilerin de rastlanması mümkündür. Şekil 44.a ve Şekil 44.b 'deki kırık yüzeyi fotoğraflarında görüldüğü gibi, kırılma analizleri, kırılmanın türü, gerilme durumu ve çatlak başlangıç noktası hakkında önemli bilgiler sağlar.



Şekil 44. (a) Tek eksenli çekme zorlanması etkisi altında oluşmuş sünek kırılmaya özgü küresel çukurcukları gösteren elektron mikroskobu görüntüsü X3300. (b) Kayma zorlanması etkisi altında oluşmuş sünek kırılmaya özgü parabolik şekilli çukurcuklan gösteren elektron mikroskobu görüntüsü. [30]

[30] Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.

Kaynakça

1. Metalografi, Prof. Dr. Emel GEÇKİNLİ.
2. Metalografi Bilimi, Prof. Dr. Serdar SALMAN, Dr. H. Özkan GÜLSOY.
3. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.
4. Malzeme Biliminin Temelleri, Doç.Dr. Hüseyin UZUN, Prof.Dr. Fehim FINDIK, Prof.Dr. Serdar SALMAN.
5. https://www.als.com.tr/
6. https://www.struers.com/
7. http://www.bulutmak.com/
8. https://www.zeiss.com.tr
9. https://www.canlibilimi.com/
10. http://www.elektroteknikmedikal.com
11. www.oerlikon.com.tr