

END205 MALZEME DERSİ

Ders İeriği:

- 1) Malzemeye Giriş (Malzeme Türleri, Yapı-Özellik-İşlem İlişkisi)
- 2) Atomik Yapı (Atom Yapısı, Kristal Yapı, Moleküler Yapı)
- 3) Atomik Dizilme (Kristal Yapılar)
- 4) Kristal Yapı Kusurları
- 5) Mekanik Testler ve Özellikleri (Sertlik, Çekme, Eğme, Yotulma, Burulma, Çentik-Darbe)
- 6) Faz Diyagramları (Fe-C Denge Diyagramı)

Başarı Değerlendirme:

%60 Arasınava (2 adet) + %40 Yarıyıl Sonu Sınavı

Devam Durumu:

%70 Devam Zorunluluğu uygulanacaktır.

Ders Notlarına Erişim:

Ders hakkındaki duyurular ve ders notları Google classroom uygulaması üzerinden paylaşılacaktır. Google classroom uygulamasını Android veya iOS işletim sistemi üzerinden telefonunuza indirebilirsiniz. Google classroom uygulamasına giriş yaptıktan sonra sınıf kodunu girerek derse katılmalısınız.

1. MALZEMEYE GİRİŞ

1.1. Malzeme Türleri

Malzemeler; metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere dört grupta incelenecektir.

a) Metaller: Alüminyum, çinko, demir ve nikel gibi metaller ile diğer elementlerle oluşturduğu çelik (Fe-C), pirinç (Cu-Zn), bronz (Cu-Sn) gibi alaşımlardır. Genel olarak iyi elektrik ve ısı iletkenliğine, nispeten yüksek dayanım, şekillendirilebilirlik ve darbe direncine sahiptir. Korozyon dayanımı düşüktür ve kristal yapıdadır.

b) Seramikler: Genellikle metallerle metal olmayan elementlerin oluşturduğu alümina (Al_2O_3), SiO_2 , SiC gibi inorganik kimyasal bileşikler ile bu tür bileşiklerin oluşturduğu cam ve porselen gibi malzemelerdir. Seramiklerin çekme dayanımı düşük, basma dayanımı yüksektir. Gevrek karakteristikte olmaları sebebiyle kırılma toklukları zayıftır. Ergime sıcaklıkları yüksektir. Isıya dayanıklı olduklarından, refrakter malzeme olarak kullanılabilirler. Ayrıca kimyasal olarak kararlıdır.

c) Polimerler: Polimerler genelde petrol türevlerinden elde edilirler. Yapılarında daha çok C, H, O, N elementleri bulunur. Bu gruba giren mer'lerin birleşerek polimer adı verilen uzun bir zincir oluşturması ve bu zincirlerin birbirine zayıf bağlar ve çapraz güçlü bağlar ile birleşmesi sonucu oluşmaktadır. Polimerler, düşük elektrik ve ısı iletkenliği ile düşük dayanıma sahiptirler. Yüksek sıcaklıklarda kullanılmaya uygun değildirler. Bazı polimerler (termoplastikler) mükemmel süneklik, şekillendirilebilirlik ve darbe dayanımına sahipken; diğer polimerler ise zıt özelliklere sahiptirler. Polimerler hafiftirler ve genellikle korozyon dirençleri mükemmeldir ve elektriksel olarak yalıtıcıdır.

d) Kompozit Malzemeler: Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemedan üretilir ve bir malzemedan elde edilemeyen özellikleri sağlar. Beton, kontraplak ve cam fiberler kompozitin tipik sıcaklığa dayanıklı malzemeler üretilebilir. Bu malzemelerin elde edilmesi mümkün olmasaydı, sert ve darbe dayanımı yüksek kesici takımlar üretilemezdi.

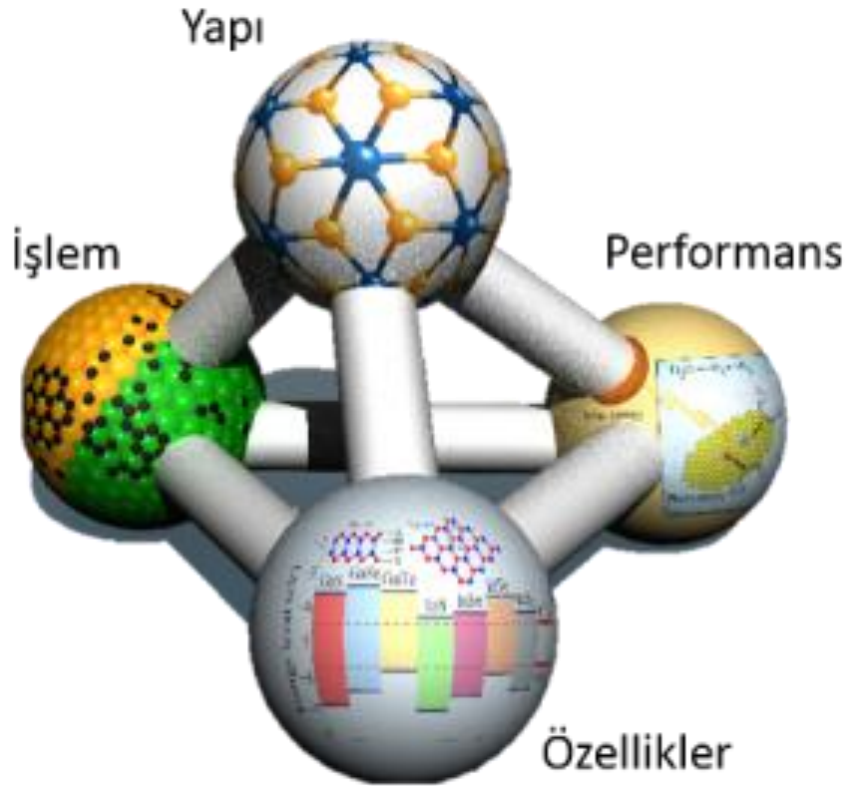
1.2. Yapı-Özellik-İşlem İlişkisi

Malzeme mühendisleri, malzemenin içyapısı, malzeme işlemleri ve malzemenin son özellikleri arasındaki karmaşık ilişkiyi inceler.

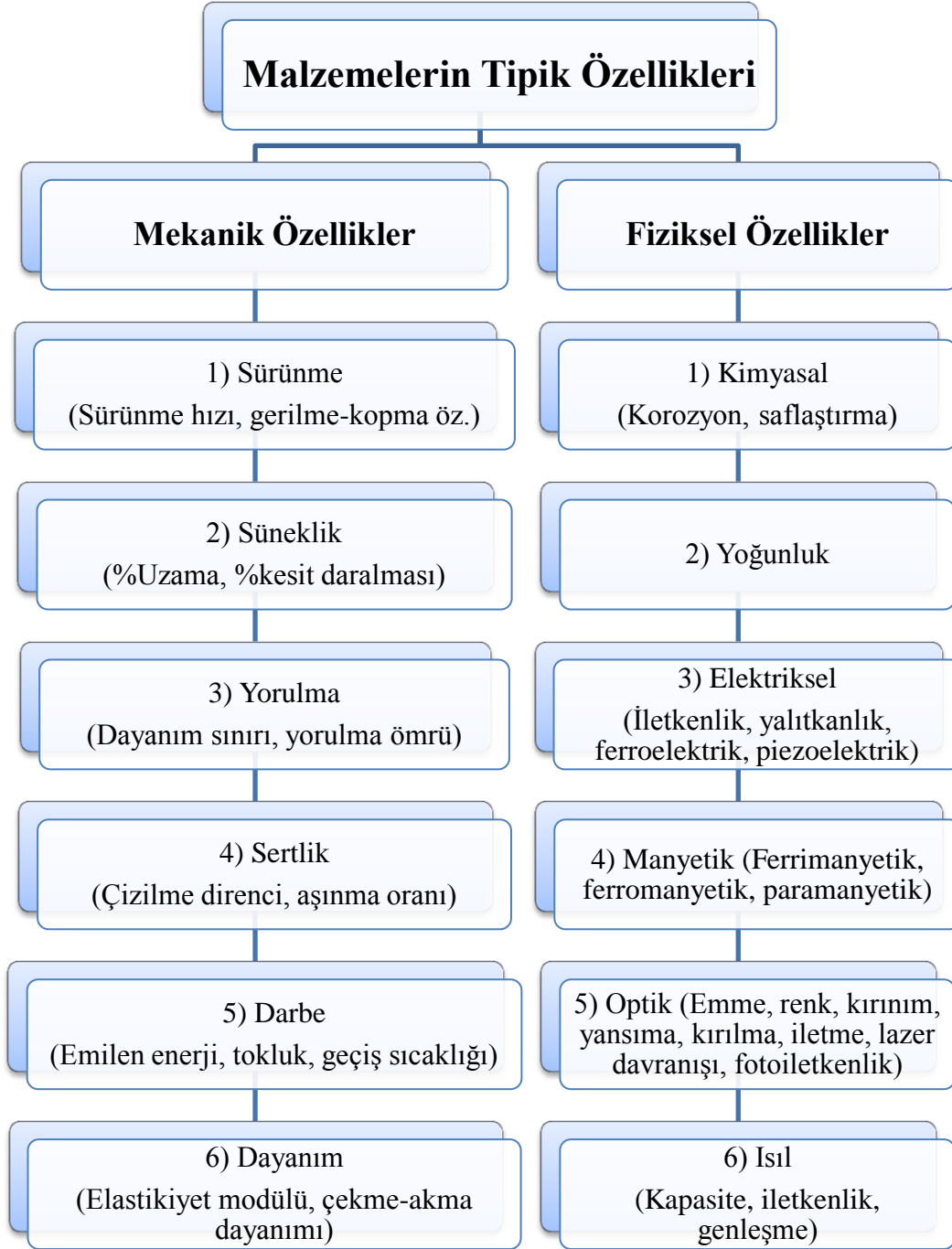
a) Özellikler:

Mekanik özellikler, uygulanan yük veya gerilmeye karşı malzemenin nasıl davrandığını gösterirler. Yaygın olarak bilinen mekanik özellikler dayanım, süneklik ve malzemenin bükülmezliğidir. Buna karşın malzemenin ani yük (darbe), devamlı değişen bir yük (yorulma) ve yüksek sıcaklıktaki yük altında (sürünme) veya aşınma şartlarında nasıl davranacağı da önemlidir.

Fiziksel özellikler; elektrik, manyetik, termal, elastik ve kimyasal davranışları içerir. Kompozisyondaki çok küçük bir değişiklik bile yarı iletken metal ve seramiklerin elektrik iletkenliklerinde çok büyük değişiklikler yapılabilir.



Şekil 1. Yapı-İşlem-Özellik İlişkisi



Şekil 2. Malzemelerin Tipik Özellikleri

b) Yapı:

Malzemenin yapısı farklı düzeylerde düşünülebilir. Bunların hepsi son ürünün davranışlarını doğrudan etkiler. En küçük düzeyde malzemeyi meydana getiren bireysel atomların yapısı söz konusudur. Atom çekirdeğini kuşatan elektronların dizilimi elektrik, manyetik, ısıl ve optik davranışları ile korozyon direncini de önemli ölçüde etkileyebilir. Elektron dizilimi, atomların birbirine nasıl bağlanacaklarını etkilediği gibi metal, seramik veya polimer gibi malzemelerin tipinin belirlenmesine yardım eder.

Bir sonraki düzeyde, uzayda atomların dizilmesi dikkate alınır. Metaller, pek çok seramik ve bazı polimerler kristal yapıya (çok düzenli bir atomik dizilmeye) sahiptir. Kristal yapı; süneklik, dayanım ve darbe direnci gibi metallerin mekanik özelliklerini etkiler.

Pek çok metalde, seramikler ve nadiren polimerlerde tane yapısı bulunmaktadır. Taneler arasında atomik dizilme yönlenmeleri değiştirir ve bu da özellikleri etkilemektedir. Tanelerin büyüklüğü ve şekli, bu düzeyde anahtar rol oynamaktadır.

Son olarak, pek çok malzemede her biri kendine özgü özellik ve atom dizilmesine sahip birden fazla faz bulunmaktadır. Ana malzeme içerisinde bu fazların tipi, büyüklüğü, dağılımı ve miktarının kontrolü özelliklerin kontrol edilmesine ilave imkan sağlar.

Yapı-özellik-işlem ilişkisine; yükleme, sıcaklık, atmosfer, korozyon ve radyasyon etkir.

c) İşlem:

Malzeme işlemleri, başlangıçta şekilsiz olan malzemeden arzu edilen şekle sahip parça üretmek için uygulanır. Metaller, sıvı metal bir kalıba doldurularak (döküm), ayrı metal birleştirilerek (kaynak, sert lehimleme, yapıştırıcı bağlama), yüksek basınç kullanmak suretiyle (dövme, çekme, ekstrüzyon, haddeleme, eğme) katı metal kullanışlı şekle biçimlendirilerek, çok küçük metal tozları katı bir kütle olarak sıkıştırılarak (toz metalürjisi) veya fazlalık malzeme yüzeyden uzaklaştırılarak (talaş kaldırma) işlenebilirler.

Benzer bir şekilde seramik malzemeler de sıvı durumda iken; döküm, biçimlendirme, ekstrüzyon veya sıkıştırma gibi işlemler kullanılarak ve yüksek sıcaklıkta ısıl işlemle sıvı itilerek ve yapıyı oluşturan ayrı elemanlar bir araya getirilerek bağlanmaları suretiyle şekillendirilebilirler.

Polimerler, yumuşak plastik kalıplara enjekte edilerek (döküm) çekerek ve biçimlendirilerek üretilir. Malzemeler yapıda arzu edilen değişiklikleri sağlamak için genellikle ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda ısıl işlem görürler.

Bir malzemeye uygulanan işlem, malzemenin yapısını etkilemektedir. Bakır çubuk, plastik biçimlendirme yerine döküm yoluyla bakır çubuğun yapısı farklıdır. Tanelerin şekil, boyut ve oryantasyonları farklı olabilir.

2. ATOMİK YAPI

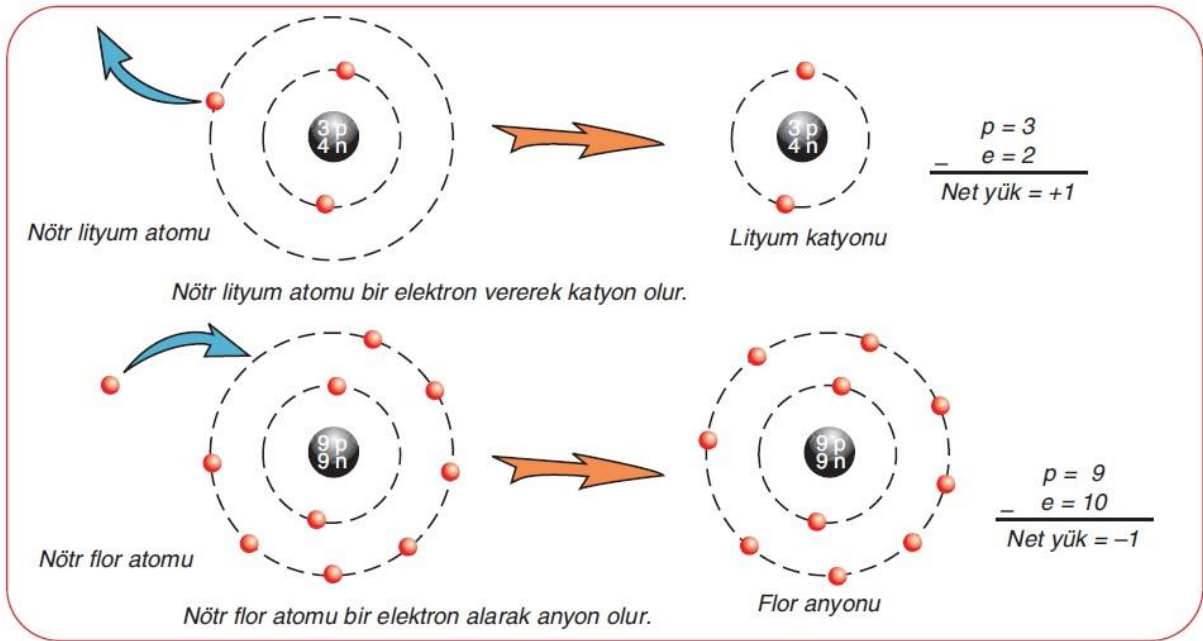
Malzemelerin yapısı; atomik yapı, atomik dizilme, mikro yapı ve makro yapı olmak üzere dört düzeyde ayrılabilir.

Atomik yapı, atomların bir arada tutulmasını sağlayan bağlanma şeklini etkilemektedir. Bu etki malzemelerin metallere, seramiklere ve polimerlere şeklinde sınıflandırılmasını etkilemektedir.

2.1. Atom Yapısı

Bohr atom modeline göre, bir atom merkezinde 10^{-11} mm çapında bir çekirdek ve bu çekirdeği çepeçevre kuşatan elektronlardan oluşur. Atom yaklaşık 10^{-7} mm'lik bir çapa sahiptir.

Atomun çekirdeği, pozitif yüklü (+) proton ve yüksüz (nötr) nötron parçacıklarından oluşur. Çekirdek etrafında dönen elektronlar ise negatif (-) yüklü olup, elektriksel yükü protona eşit değerdedir. Elektronlar ile protonlar sadece zıt yüklere sahiptirler. Yani elektronun elektrik yükü -1.6×10^{-19} Coulomb, protonun elektrik yükü ise $+1.6 \times 10^{-19}$ Coloumb'dur.



Şekil 3. Lityum ve Flor Atomunun Şematik Gösterimi

İzotop atom: Proton sayıları eşit nötron sayıları farklı olan atomlardır. İzotop atomların kimyasal özellikleri aynıdır. Çünkü elementlerin kimyasal özellikleri o elementin atom numarası dolayısıyla elektron sayıları ile belirlenir. Fakat izotop atomların fiziksel özellikleri birbirinden farklıdır.

Atom numarası: Her atomun çekirdeğindeki protonların sayısına veya elektronların sayısına eşittir.

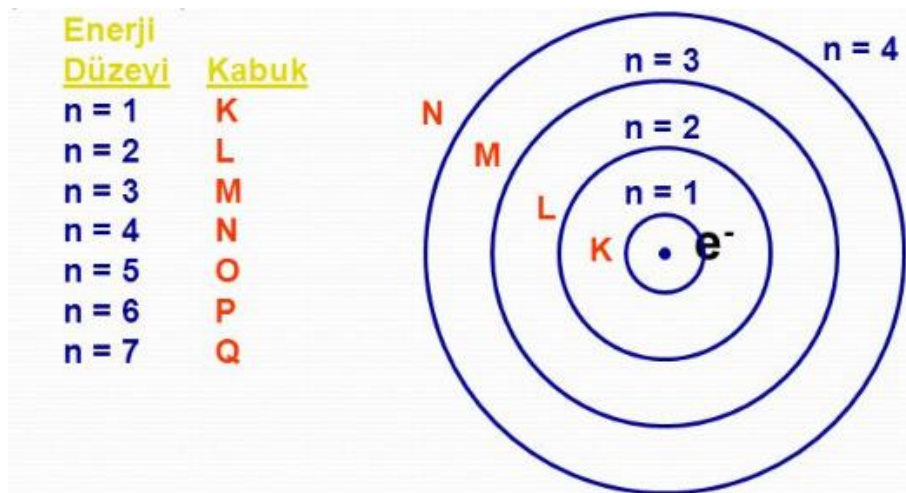
Atom kütlesi: Atomun çekirdeğini oluşturan proton ve nötron sayıları toplamına eşittir. Bir mol elementte Avogadro sayısı kadar atom bulunur. Avogadro sayısı 6.02×10^{23} atom/mol olup, bir mol içindeki atom veya moleküllerin sayısını ifade eder. Örneğin bakır atomunun kütlesi 63.54 g/mol'dür. Yani 6.02×10^{23} adet bakır atomu, 63.54 g'dır. O zaman bir bakır atomunun ağırlığı $(63.54/6.02 \times 10^{23}) = 10.55 \times 10^{-23}$ g'dır.

2.2. Atomun Elektronik Yapısı

Elektronlar, atom içinde farklı enerji seviyelerine sahiptir. Her elektron belli bir enerjiye sahiptir ve bir atomda aynı enerji seviyesine sahip ikiden fazla elektron bulunmaz.

Kuantum sayıları: Her elektronun ait olduğu enerji seviyeleri “dört kuantum” sayısı ile belirlenir. Muhtemel enerji seviyeleri sayısı ilk üç kuantum sayısı ile belirlenir. Ana kuantum sayısı n ile gösterilir (1, 2, 3,...). Bunlar elektronların ait olduğu kuantum kabuğunu işaret eder.

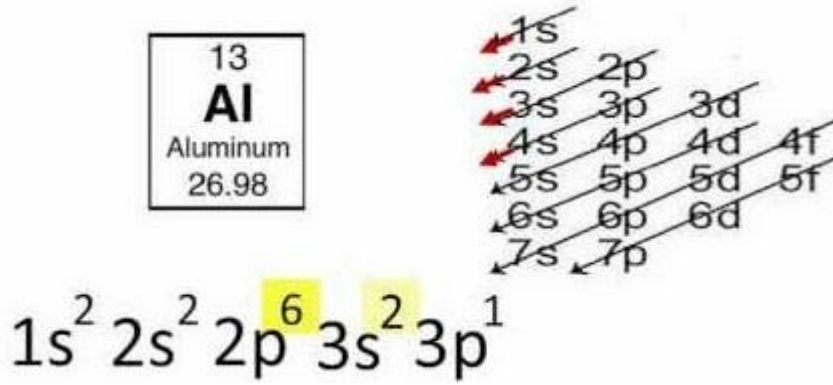
Birincil Kuantum Sayısı (n): Elektronun ana enerji seviyesini gösterir ve elektron bulutu şeklinde olduğu kabul edilir. Aynı zamanda ana kabuk olarak da adlandırılır. $n=1,2,3,4,5,6,7$



Şekil 4. Bohr Atom Modelinde Kuantum Sayıları

Her bir ana kabukta belirli sayıda elektron bulunabilir. K kabukta 2 elektron, L kabukta 8 elektron, M kabukta toplam 18 elektron, N kabukta toplam 32 elektron, O kabukta 50 elektron bulunabilir.

İkincil kuantum sayısı (l): Atom çekirdeği etrafındaki elektronların bulunduğu her bir ana kabuk, bir elektron bulutu şeklindedir. Bu kabuk içerisinde farklı enerji seviyelerine sahip ve elektronların hareket ettiği yörüngeler vardır. Bu yörüngeler ikincil kuantum sayısı (l) olarak ifade edilirler. İkincil kuantum sayısının değerine bağlı olup (n-1) ile bulunur. Genellikle karışıklığa sebep olmamak için, ikincil kuantum sayıları s, p, d, f harfleri ile gösterilirler.



Şekil 5. Alüminyum Elementinin Kuantum Sayılarıyla Gösterimi

l=0 yerine “s” harfi kullanılır.

l=1 yerine “p” harfi kullanılır.

l=2 yerine “d” harfi kullanılır.

l=3 yerine “f” harfi kullanılır.

$$=1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 \dots$$

Valans (Değerlik): Bir atomun valansı, atomun diğer bir elementle kimyasal birleşme yeteneği ile ilişkilidir ve genellikle kombine edilmiş sp seviyesinin en dışındaki elektron sayısı ile belirlenir.

Atomik kararlılık: Bir atom sıfır valansa sahip ise elektronlar kimyasal reaksiyona girmez ve element asaldır.

Elektronegatiflik: Elektronegatiflik bir atomun elektron alma eğilimini tarif eder.

Periyodik tabloda, elementler atom numaralarına göre belirli bir düzende sıralanmışlardır. Atomların en dış kabuğundaki valans elektronlarının sayısına göre, periyodik tabloda sekiz grup oluşturulmuştur. Her dikey sütundaki elementler benzer kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Periyodik tabloda elementlerin soldan sağa doğru sıralandıkları yatay sütunlar ise, metal, ametal, geçiş metalleri ve metal dışı malzemeleri göstermektedir.

Periyodik Cetvel Elementlerin

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Design Copyright © 1997 Michael DeWitt, <http://www.chem.com>, <http://www.chem.com/products>

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 112-118 are the Latin equivalents of those numbers.

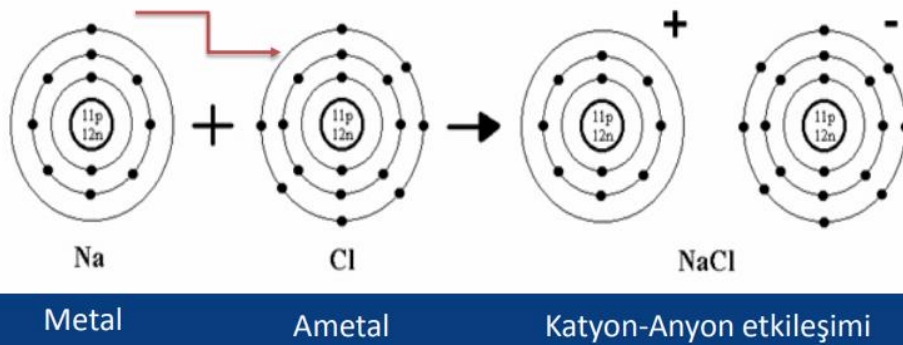
Şekil 6. Periyodik Tablo ve Elementler

Etrafımızda gördüğümüz katı ve sıvı gibi maddelerin oluşabilmesi için atomları bir arada tutan çekme kuvvetlerinin olması gerekir. Bu çekme kuvvetlerine Coulomb çekme kuvvetleri adı verilir. Coulomb çekme kuvvetleri sayesinde atomları bir arada tutan atomlar arası bağlar meydana gelir. Malzemelerin yoğunluğu, elektriksel iletkenliği, ısıl genişmesi, mekanik özellikleri, korozyon davranışları, optik özellikleri, atomlar arası bağ türleri ve atomlar arası mesafeye bağlı olarak değişir.

2.3. Atomik Bağ

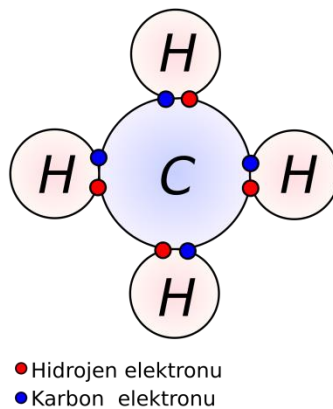
Atomların birbirine bağlandığı dört mekanizma vardır. Dört mekanizmanın üçünde bağlanma, atomlar kendi dış s ve p seviyelerini doldurduklarında sağlanır.

- a) **Metalik Bağ:** Metal atomları arasında oluşan bağdır. Son yörüngelerinde tamamlanmamış elektronlar bulunur. Bu elektronlar bir elektron bulutu olarak kabul edilmezler. Bu valans elektronları ile çekirdekteki pozitif yük arasında bir elektrostatik çekim gücü oluşur. Böylece metalik bağ meydana gelir.
- b) **İyonik Bağ:** Atomlar arası elektron alışverişi ile oluşur. Katı cisimlerde iyonik bağ iki ayrı cins atom arasında valans elektron bu bağı meydana getirir. Pozitif veya negatif yüklü atomlara iyon denir. Bu iyonlar zıt yüklü olduğu için birbirini çekerler.



Şekil 7. NaCl Bileşiğinde İyonik Bağ Oluşumu

- c) **Kovalent Bağ:** Üç veya daha fazla bağımsız elektrona sahip olan elementlerin yapılarında bu elektronların ortaklaşa kullandıkları bağdır. Valans elektronların 8'e tamamlanması ile dengeli hale geçerler. Kovalent bağ ile bağlanmış maddelerde elektrik iletkenliği düşüktür. Ortaklaşa kullanılan elektron sayısı ne kadar fazla ise bağ o kadar güçlüdür.



Şekil 8. CH₄ Bileşiği için Kovalent Bağ Oluşumu

d) Van Der Waals Bağları: Asal gazların ve diğer gazların (CH_4 , C_2H_2) meydana getirdikleri moleküllerin birbirini bağlayabilmeleri için valans elektronları yoktur. Bu tip molekülleri birbirlerini çok zayıf elektriksel güçle çekerler. Bu zayıf elektriksel gücü de moleküllerdeki pozitif ve negatif yüklerin birbirlerini çekmesiyle oluşur.

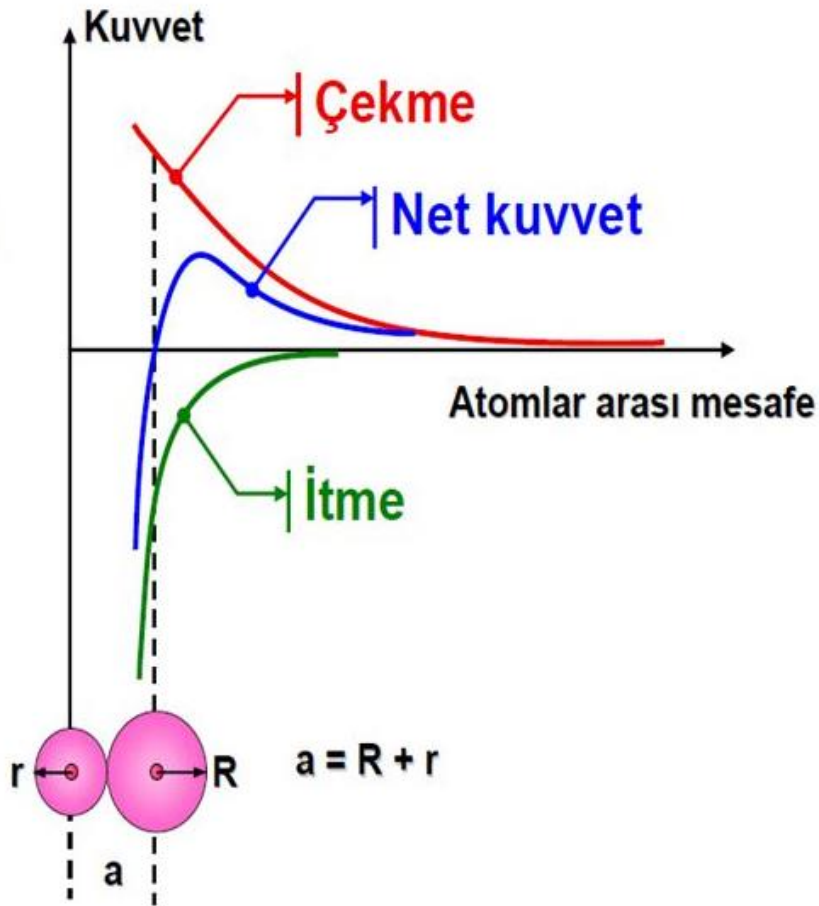
Atomları bir arada tutan Coulomb çekme kuvvetlerinin gücüne göre, kuvvetli ve zayıf bağlar olmak üzere iki grup atomsal bağ vardır. İyonik, kovalent ve metalik bağlar kuvvetli bağlar sınıfına girer. İyonik bağ için gerekli bağ enerjisi 150-370 kcal/mol iken, kovalent bağ için 125-300 kcal/mol ve metalik bağ için 25-200 kcal/mol'dür. Seramik ve metal atomları kuvvetli bağlarla bağlıdır. Bağ enerjileri kuvvetli bağların onda biri kadar olan Van der Waals bağı (1-10 kcal/mol) zayıf bağ olarak adlandırılır. Zayıf bağlar hemen hemen bütün maddelerde bulunur.

Tablo 1. Çeşitli Malzemelere ait Bağ Enerji Değerleri

Bağ Türü	Malzeme	Bağ Enerjisi (kcal/mol)
İyonik Bağ	NaCl	153
	MgO	239
Kovalent Bağ	Si	108
	C (elmas)	170
Metalik Bağ	Al	77
	Fe	97
	W	203
Van der Waals Bağı	Ar	1.8
	Cl_2	7.4
Hidrojen Bağı	H_2O	12.2

Elementler, atomların dış kabuklarındaki valans elektron sayısına bağlı olarak ya bu elektronları vererek ya da dış kabuğuna başka bir element atomundan elektron alarak, kararlı hale geçme eğilimindedirler. Elektron almış olan atom negatif (-) iyon, elektron vermiş atom ise pozitif (+) iyon haline geçerler. Pozitif iyon katyon, negatif iyon anyon adı verilir. Negatif iyon ile pozitif iyon arasındaki Coulomb çekme kuvveti, bir iyonik bağ oluşturur. Bu bağ bir metal atomunun (Na, Mg gibi) metal olmayan (Cl, O, gibi) bir atoma elektron vermesi ile gerçekleşir.

Atomlar arası mesafe: Bir malzemenin yapısını atomlar arası mesafe ve atomların diziliş biçimleri belirler. Atomlar arasındaki denge mesafesi atomlar veya iyonlar arasındaki itme ve çekme kuvvetleri etkisi ile meydana gelir. Atomlar arası mesafeyi açıklarken, zıt işaretli iki iyon ele alınacaktır. İki iyon arasında meydana gelen çekme kuvveti sayesinde iyonlar arası mesafe azalır. Ne zamanki iyonlar birbirine temas ettiğinde, iyonların eksi yüklü elektronları arasında da bir itme kuvveti meydana gelerek iyonlar arası mesafenin daha da azalmasını önler. Atomlar arası toplam kuvvet (F_T), çekme kuvvetinin (F_C) ve itme kuvvetinin (F_I) toplamına eşittir ($F_T = F_C + F_I$). İyonlar arasındaki çekme ve itme kuvvetlerinin eşit olduğu noktada, toplam kuvvet sıfır olur ($F_T = F_C + F_I = 0$) ve iyonlar arası denge meydana gelir. Denge halindeki iki iyon arasındaki uzaklığa, atomlar arası denge mesafesi adı verilir. Atomlar arası denge mesafesi iki iyon yarıçaplarının toplamına eşit olacaktır.



Şekil 9. Atomlar arasındaki Mesafe ile İtme ve Çekme Kuvvetleri Arasındaki İlişki

Atomlar arası denge mesafesi, atomların veya iyonların yarıçaplarının toplanması ile hesaplanabilir. Atomlar arası bu mesafeyi bazı faktörler değiştirebilir. Sıcaklık, iyon çapı, komşu atomlarının sayısı ve kovalent bağda paylaşılan elektron sayısı atomlar arası mesafenin değişmesine sebep olan faktörlerdir.

a) Sıcaklık: Atomlar arası mesafe sıcaklık arttıkça büyümektedir.

b) İyon çapı: Bir atom valans elektronlarını verirse çapı küçülür. Eğer atom son yörüngesine elektron alırsa bu sefer çapı büyür. Atomlar arası mesafe ise iyon yarıçaplarının toplamına eşittir.

c) Komşu atomların sayısı: Metal atomları bir kristal kafesi oluşturacak şekilde düzenli olarak bir arada bulunurlar. Bir küp düşünürsek, küpün her bir köşesinde birer atom ve küpün tam ortasında da bir atom yerleşmişse bu kristal yapıya **hacim merkezli kübik sistem** adı verilir. Hacim merkezli kübik bir sistemde bir atoma en yakın komşu atomlarının sayısı sekizdir. Eğer küpün her bir köşesinde birer atom ve küp yüzey merkezlerinin her birisinde de birer atom yer alırsa, bu kristal yapıya **yüzey merkezli kübik sistem** denir. Bu sistemde ise bir atoma en yakın komşu atomlarının sayısı on ikidir. YMK sistemde komşu atomlar, HMK sistemdeki atomlara göre biraz daha uzaktırlar. Bundan dolayı YMK yapıya sahip atomların atomlar arası mesafesi daha fazladır. Örneğin HMK nötr demirde atomlar arası mesafe 1.241 Å iken; YMK nötr demirde biraz artarak 1.269 Å olmaktadır.

d) Kovalent bağda paylaşılan elektron sayısı: Kovalent bağ ,le bağlanan malzemelerde paylaşılan valans elektron sayısı arttıkça, atomlar arası denge mesafesi azalmaktadır. Çünkü ne kadar çok elektron paylaşılsa, atomlar birbirlerini daha kuvvetli çekeceklerdir. Dolayısıyla atomları birbirinden ayırt etmek için de daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulacaktır.

- Malzemelerin bazı özellikleri atomlar arası bağ türlerine bağlı olarak belirlenir. Burada sadece **ergime sıcaklığı**, **ısı genleşme** ve **elastisite modülü** ile atomlar arası mesafe ve bağ enerjisinin ilişkileri üzerinde durulacaktır.
- Malzemelerin **ergime sıcaklıkları**, bağ enerji çukuru ile ilişkisi vardır. Mutlak sıfır sıcaklığında (OK) atomlar arası mesafe dengededir. Bu denge mesafesinde bağ enerjisi minimum seviyede olup bağ enerji çukurunun en alt noktasını gösterir. Sıcaklık arttıkça atomlar arası mesafe de büyür. Bir malzemeye ait bağ enerji çukuru ne kadar derinse o kadar fazla enerjiye ihtiyaç vardır. Dolayısıyla malzemenin ergime sıcaklığı da o oranda yüksek olur.

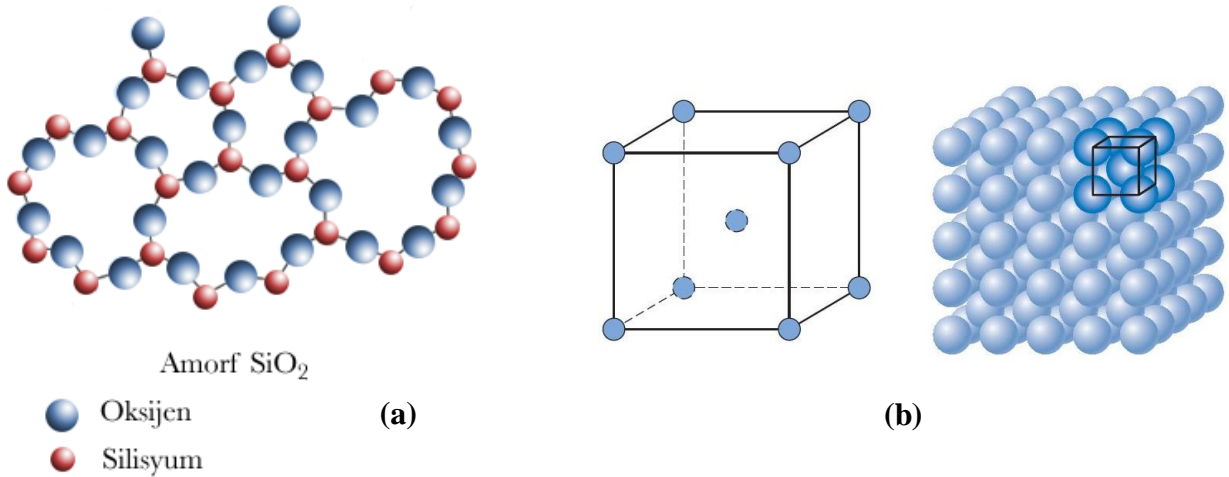
- Malzemelerin **ısı genleşme** özelliği, ergime sıcaklığı ile ters orantılıdır. Ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerin ısı genleşmeleri daha düşüktür. Yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerde, sıcaklık arttıkça atomlar arası mesafe daha yavaş büyür. Dolayısıyla bu malzemelerin ısı genleşmeleri düşüktür diyebiliriz. Ergime sıcaklığı düşük malzemelerde ise, atomlar arası mesafe daha hızlı büyüdüğü için ısı genleşmeleri daha yüksektir.
- Atomlar arası toplam kuvvet eğrisinin sıfır olduğu noktadaki eğimi, malzemenin **elastisite modülünü** verir. Toplam kuvvet eğrisi ile bağ enerjisi arasında da bir ilişki söz konusudur. Bağ enerji çukurunun derinliği arttıkça, eğrinin eğimi de o oranda artmaktadır. Dolayısıyla malzemenin elastisite modülü de artacaktır.

3. ATOMİK DİZİLME

a) **Amorf Yapı:** Bu tür yapıda atomlar, uzayda belli bir geometrik düzene göre yer almazlar. Yapı içerisinde atomlar, gelişigüzel (rastgele) dizilmişlerdir. Amorf yapıları cisimler, plastik deformasyona uygun değildir. Gazlar ve camlar buna örnek olarak gösterilebilir.

b) **Moleküler Yapı:** Kuvvetli bağlarla bağlanmış atomlardan oluşan moleküller, birbirleri ile zayıf bağlarla bağlanarak bir arada bulunuyorlarsa bu tür yapılara da moleküler yapı denir. Su (H_2O), karbon dioksit (CO_2), O_2 , N_2 ve birçok polimer malzemeler moleküler yapıya sahiptirler.

c) **Kristal Yapı:** Cisimlerin çoğunda bunları meydana getiren atomlar belli bir sisteme göre yer alırlar. Atomların belirli bir sisteme göre dizilmesiyle kristal yapı meydana gelir. Molekülleri tek bir atomdan meydana gelmiş metaller kristal yapıdadır. Mühendislik malzemelerinin çoğunda atom dizilimi üç boyutlu tekrarlanan bir düzen gösterir. Böyle yapıya **kristal yapı** denir. Atomların arasında belli bir mesafe bırakarak belli bir şekilde meydana gelmesiyle birim hücre oluşur. **Birim hücre**, kristal yapının tekrarlanan en küçük hacimsel birimidir.



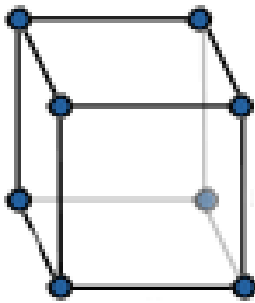
Şekil 10. Amorf (a), Kristal (b) ve Moleküler Yapı (c)

Kristal kafesi içerisinde atomların bulunduğu yerlere kafes noktaları adı verilir. Atomlar birim hücrenin köşelerinde, merkezinde her bir yüzeyinde veya yüzey kenarlarında bulunabilir. Dolayısıyla atomların buldukları bu yerler kafes noktaları olarak adlandırılır.

Kafes parametrelerinin farklı kombinasyonları sonucu ortaya çıkan ve farklı geometrik şekillere sahip kristal sistemleri mevcuttur. Kübik, hegzagonal, tetragonal, rombohedral, ortorombik, monoklinik ve triklinik olmak üzere yedi adet kristal sistemi tespit edilmiştir. Bu yedi kristal sisteminden bazılarının farklı kristal kafesi tipleri olması nedeniyle, metallerde karşılaşılan toplam 14 adet farklı kristal kafesi vardır. Kübik kristal sisteminde basit kübik yüzey merkezli kübik, hacim merkezli kübik olmak üzere üç farklı tipi vardır. Tetragonal kristal sistemin basit tetragonal ve hacim merkezli tetragonal olmak üzere iki farklı tipi mevcuttur. Ortorombik kristal sistemin basit ortorombik, hacim merkezli ortorombik, taban merkezli ortorombik ve yüzey merkezli ortorombik olmak üzere dört farklı tipi vardır. Monoklinik kristal sistemin basit monoklinik ve taban merkezli monoklinik olmak üzere iki farklı tipi vardır.

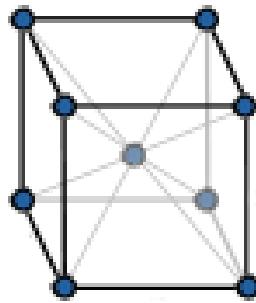
On dört adet kristal kafesi olmasına rağmen metalik malzemelerde en fazla gözüken kübik ve hegzagonal sıkı paket kristal kafesleridir. Bu nedenle iki kafes sisteminin geometrik yapısı, kafes parametreleri incelenecek ve birim hücrenin bulundurabileceği atom sayıları hesaplanacaktır.

Örneğin alüminyum, demir (α), bakır, kurşun, molibden gibi çoğu metaller kübik yapıya sahiptirler. Çinko, kobalt ve titanyum (α) ise hegzagonal kristal yapıya sahip metallerdir.



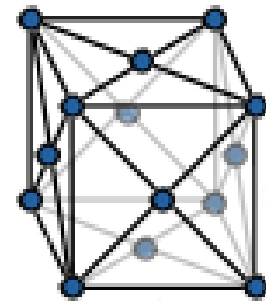
Basit kübik

Toplam atom sayısı: 8



Hacim merkezli kübik

Toplam atom sayısı: 9



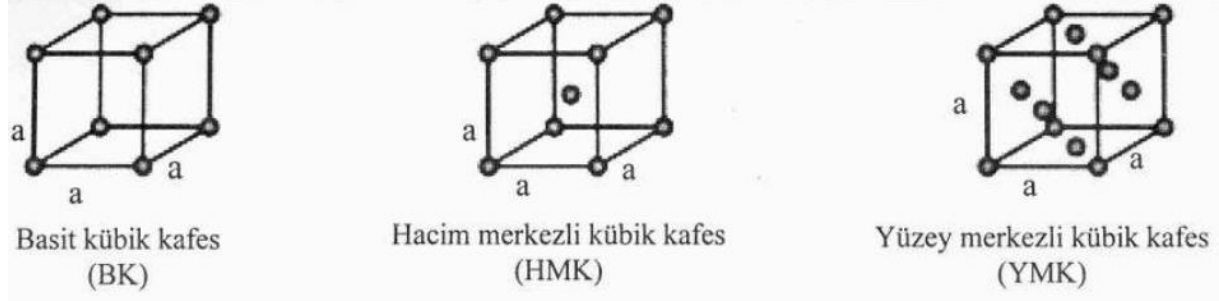
Yüzey merkezli kübik

Toplam atom sayısı: 14

Şekil 11. Kübik (Tetragonal) Kafes Sistemleri

Tetragonal Kafes Sistemleri:

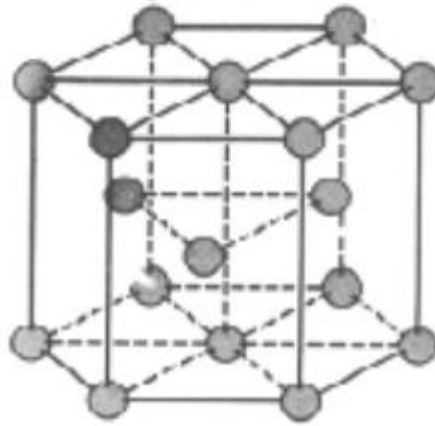
Kare tabanlı kafes sistemleridir. Kayma düzleminin ortasında da atom bulunabilir. Hacim merkezlidir. 20 °C sıcaklığın üzerinde kalay (Sn) böyle bir yapı sergiler. Kayma düzleminin sayısı fazla olduğu için deformasyona uygun değildir.



Şekil 12. Basit Kübik, Hacim Merkezli ve Yüzey Merkezli Kübik

Hegzagonal Kafes Sistemleri:

Alt ve üst düzlemleri altıgen olan hegzagonal bir dizilimdir. Sıkı paket hegzagonal kristal yapıya sahip elementler berilyum (Be), kadmiyum (Cd), zirkonyum (Zr) elementidir.



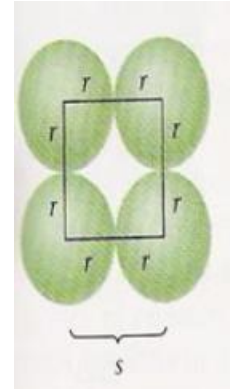
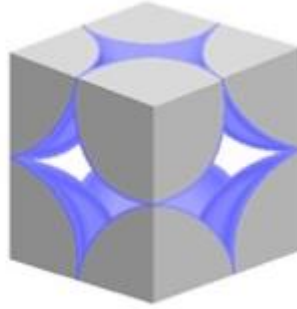
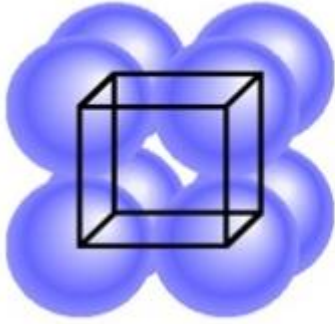
Şekil 13. Sıkı Paket Hegzagonal Kristal

Atomik Dolgu Faktörü:

Atomik dolgu faktörü (ADF), kristal kafes yapısındaki doluluk oranını gösterir ve birim hücredeki atomların toplam hacminin bir hücrenin hacmine bölünmesiyle elde edilir.

$$ADF = \frac{\text{Birim hücredeki atomların toplam hacmi}}{\text{Birim hücrenin hacmi}}$$

a) Basit Kübik Kafes Yapısı



Şekil 14. Basit Kübik Kafes Yapısı

r: atom yarıçapı

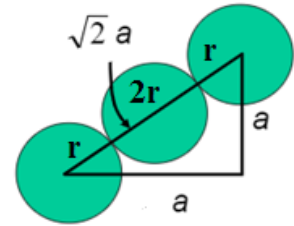
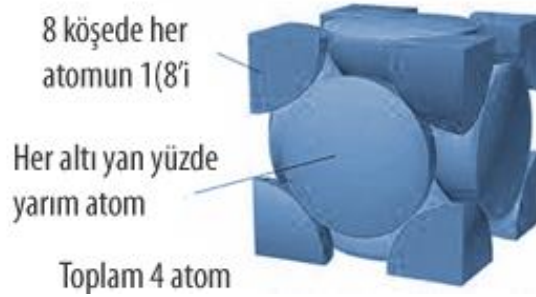
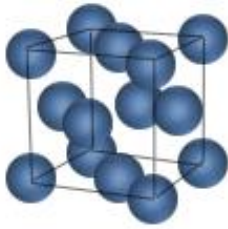
a: kafes parametresi

1 Å = 10^{-10} m = 10^{-8} cm

Atom sayısı = $1/8 \times 8 = 1$

$$ADF = \frac{1 \text{ atom} \times \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{a^3} = \frac{4\pi r^3}{3 \cdot 8r^3} = 0.52 \text{ (%52 dolu, %48 boş)}$$

b) Yüzey Merkezli Kübik



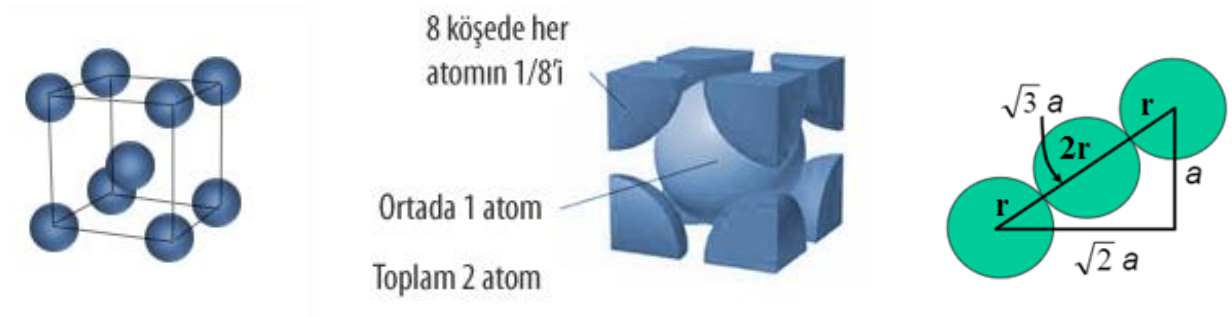
Şekil 15. Yüzey Merkezli Kübik Kafes Yapısı

Atom sayısı = $1/8 \times 8 + 1/2 \times 6 = 4$

$$4r = \sqrt{2}a$$

$$ADF = \frac{4 \text{ atom} \times \left(\frac{4}{3}\pi r^3\right)}{a^3} = \frac{4 \times \frac{4\pi r^3}{3}}{(2\sqrt{2}r)^3} = 0.74 \text{ (%74 dolu, %26 boş)}$$

c) **Hacim Merkezli Kübik:**



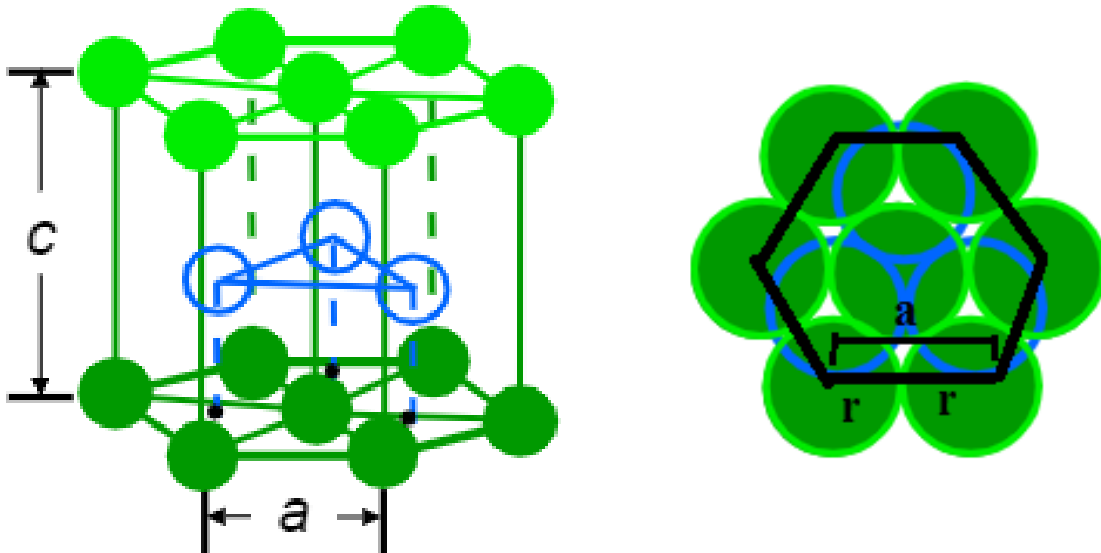
Şekil 15. Hacim Merkezli Kübik Kafes Yapısı

$$\text{Atom sayısı} = 1/8 \times 8 + 1 = 2$$

$$4r = \sqrt{3}a$$

$$\text{ADF} = \frac{2 \text{ atom} \times (4/3\pi r^3)}{a^3} = \frac{2 \times \frac{4\pi r^3}{3}}{64r^3/3\sqrt{3}} = 0.68 \text{ (\%68 dolu, \%32 boş)}$$

d) **Sıkı Paket Hegzagonal Kafes Yapısı**



Şekil 16. Sıkı Paket Hegzagonal Kafes Yapısı

$$2r = a$$

$$\text{Bir atomun hacmi: } V_{at} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{a}{2}\right)^3 = \frac{\pi a^3}{6}$$

$$\text{Atom sayısı} = \frac{1}{6} \times 6 + \frac{1}{6} \times 6 + \frac{1}{2} \times 2 + 3 = 6 \text{ atom}$$

$$\text{Toplam atom hacmi} = 6 \times \frac{\pi a^3}{6} = \pi a^3$$

Tabandaki tek bir üçgenin alanı (A):

$$A = \frac{1}{2} bc \cdot \sin \alpha$$

$$A = \frac{1}{2} a^2 \sin 60 = \frac{a^2 \sqrt{3}}{4}$$

Toplam taban alanı (A_t):

$$A_t = 6 \times \frac{a^2 \sqrt{3}}{4}$$

Altıgenin hacmi (V_t):

$$V_t = \frac{6a^2 \sqrt{3}}{4} \cdot c$$

$$ADF = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3}{\frac{6a^2 \sqrt{3}}{4} \cdot c} = \frac{2\pi a}{3\sqrt{3} c}$$

Metaller için c/a

$$\text{Mg} = 1.62$$

$$\text{Zn} = 1.86$$

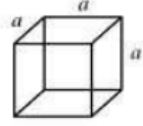
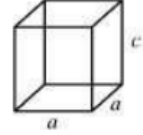
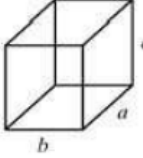
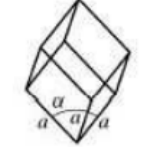
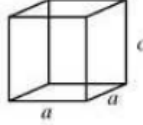
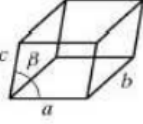
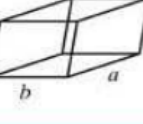
$$\text{Cd} = 1.89$$

$$\text{Ti} = 1.58$$

a/c tablosundan alınırsa (Mg=1.62)

$$\frac{2\pi a}{3\sqrt{3} c} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \frac{1}{1.62} = 0.74$$

Bir uzay kafesi, birim hücredeki atomların yerleri belirtilerek tanımlanabilir. Birim hücrenin boyutu ve biçimi, birim hücrenin bir köşesinden çıkan üç kafes vektörü a, b ve c ile tanımlanır. Burada a, b ve c eksenel uzunlukları ve eksenler arasındaki açı α , β ve γ açıları birim hücrenin kafes sabitleridir.

Sistem	Eksen uzunlukları ve açıları	Birim hücre geometrisi
Cubic	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Tetragonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Orthorhombic	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Rhombohedral	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Hexagonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
Monoclinic	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
Triclinic	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

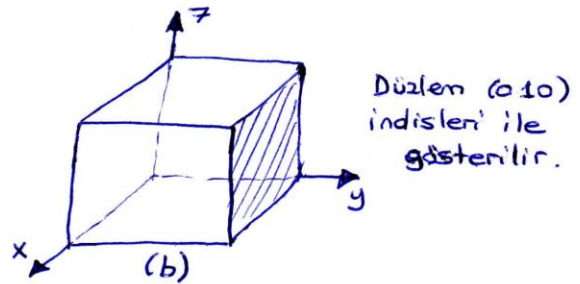
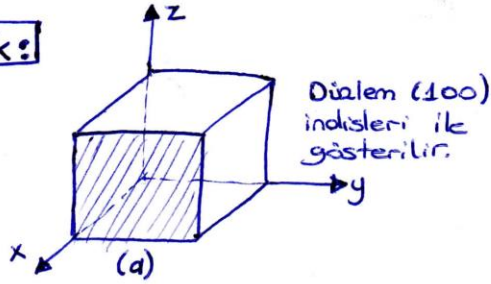
Kübik Hacim Merkezli Yapılar: Küp şeklinde kafes yapısıdır. Kayma olayı atomların yoğun olarak bulunukları yerde gerçekleşir. 9 atomlu kafes yapısına sahiptir. İyi şekil verilir. Bu tür kafes sistemlerine molibden, volfram, sodyum, potasyum, krom, vanadyum gibi malzemeler örnek olarak gösterilebilir. Plastik deformasyon kayma düzleminde meydana gelir. Bu tür deformasyon yine atomların yoğun olduğu yerlerde olur.

Kübik Yüzey Merkezli Düzlemler ve Yönler

Kübik Yapıda Düzlemler

Atomların dizildikleri düzlemlere atom düzlemleri denir. Kübik yapıda düzlemler miller indisleri (h k l) yardımı ile gösterilir. Birim hücrenin bir köşesi koordinat sisteminin orijinali olarak alınır ve herhangi bir düzlem bunların eksenlerle kesiştiği noktalara ait koordinatların tersi olarak belirlenir. Bu koordinata paralel olan bir düzlem o eksenı sonsuzda keser.

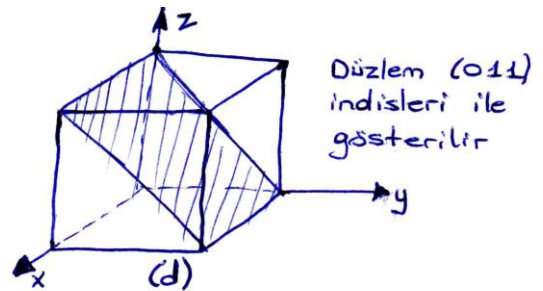
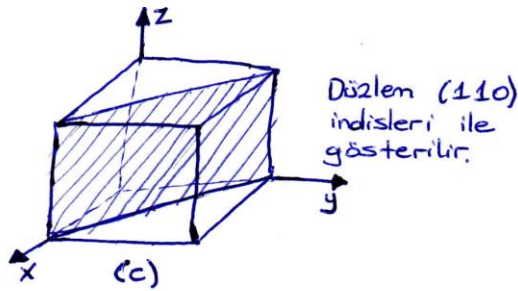
Örnek:



Şekildeki kristal düzlemlere ait miller indislerini belirleyiniz.

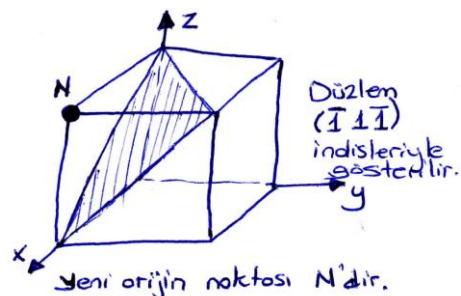
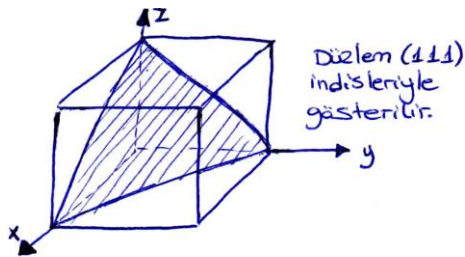
Eksenlerle kesişme noktaları $\frac{x}{1}$ $\frac{y}{\infty}$ $\frac{z}{\infty}$
 Kesişme nokta. ait koord. tersi $1/1$ $1/\infty$ $1/\infty$
 Miller indisleri 1 0 0

$\frac{x}{\infty}$ $\frac{y}{1}$ $\frac{z}{\infty}$
 $1/\infty$ $1/1$ $1/\infty$
 0 1 0



Eksenlerle kesişme noktaları $\frac{x}{1}$ $\frac{y}{1}$ $\frac{z}{\infty}$
 Kesişme nokta. ait koord. tersi $1/1$ $1/1$ $1/\infty$
 Miller indisleri 1 1 0

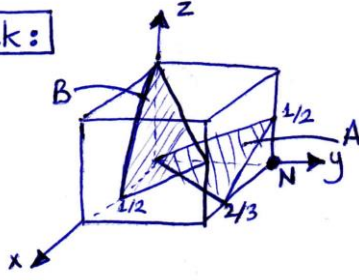
$\frac{x}{\infty}$ $\frac{y}{1}$ $\frac{z}{1}$
 $1/\infty$ $1/1$ $1/1$
 0 1 1



Eksenlerle kesişme nokt. $\frac{x}{1}$ $\frac{y}{1}$ $\frac{z}{1}$
 Kesişme nok. ait koord. tersi $1/1$ $1/1$ $1/1$
 Miller indisleri 1 1 1

$\frac{x}{-1}$ $\frac{y}{1}$ $\frac{z}{-1}$
 $-1/1$ $1/1$ $-1/1$
 -1 1 -1

Örnek:



Orjin N. nokt. taşınır.
→ A düzlemi

x	y	z
2/3	-1	1/2
1/(2/3)	1/-1	1/(1/2)
3/2	-1	2

(3 2 4)

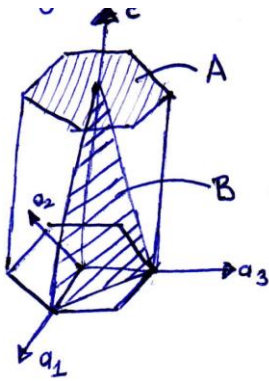
20

B düzlemi

x	y	z
1/2	1/2	1
1/(1/2)	1/(1/2)	1/1
2	2	1

(2 2 1)

Hegzagonal Yapıda Düzlemler



A düzlemi

a1	a2	a3	c
∞	∞	∞	1
1/∞	1/∞	1/∞	1/1
0	0	0	1

(0 0 0 1)

B düzlemi

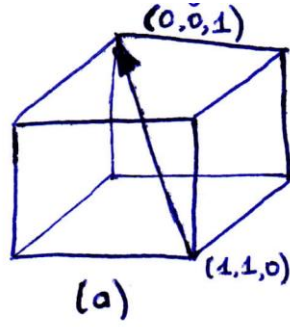
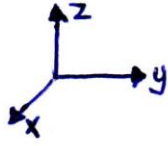
a1	a2	a3	c
1	∞	1	1
1/1	1/∞	1/1	1/1
1	0	1	1

(1 0 1 1)

Kübik Yapıda Yönler (Doğrultular)

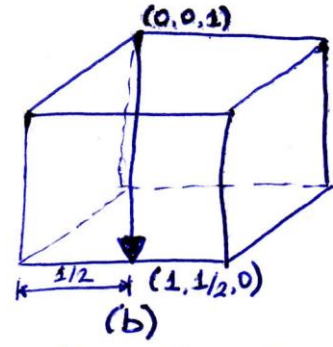
Doğrultular koordinat sisteminin orijin noktasından geçen vektörler ile gösterilir. Doğrultuyu belirlemek için orijinden çizilen vektörün eksenler üzerindeki bileşenleri, yani uç noktasının koordinatları bulunur. Koordinatların kesirli olması durumunda ise bunlar en küçük payda ile çarpılarak orantılı en küçük sayılara çevrilir. Orijin noktasından geçmeyen doğrultulara ait indislerin belirlenmesi için orijin noktasından bu doğrultuya paralel bir vektör çizilir ve bu vektörün uç noktasından koordinatlar bulunarak doğrultunun indisleri belirlenir. Doğrultular [uvw] indisleriyle gösterilir.

Örnek:



(a)

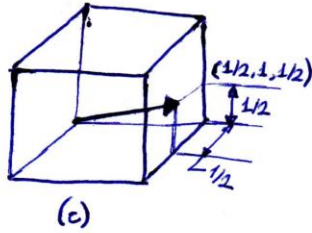
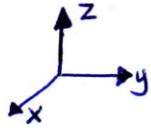
$$\begin{array}{l} \text{Koordinatlar} \\ \text{Miller indisi} \end{array} \begin{array}{ccc} \frac{x}{-1} & \frac{y}{-1} & \frac{z}{1} \\ -1 & -1 & 1 \end{array} \\ \left[\bar{1} \bar{1} 1 \right]$$



(b)

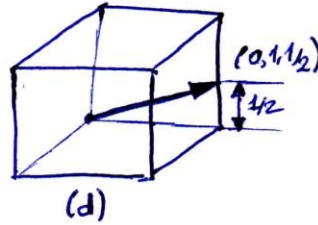
$$\begin{array}{l} \text{Koordinatlar} \\ \text{Miller indisi} \end{array} \begin{array}{ccc} \frac{x}{1} & \frac{y}{1/2} & \frac{z}{-1} \\ 1 & 1/2 & -1 \end{array} \\ \left[2 \ 1 \ \bar{2} \right]$$

Örnek:



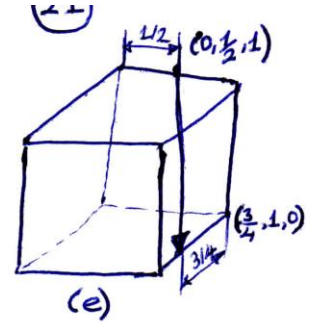
(c)

$$\begin{array}{l} \text{Koordinatlar} \\ \text{Miller indisi} \end{array} \begin{array}{ccc} \frac{x}{1/2} & \frac{y}{1} & \frac{z}{1/2} \\ 1 & 2 & 1 \end{array} \\ \left[1 \ 2 \ 1 \right]$$



(d)

$$\begin{array}{l} \text{Koordinatlar} \\ \text{Miller indisi} \end{array} \begin{array}{ccc} \frac{x}{0} & \frac{y}{1} & \frac{z}{1/2} \\ 0 & 2 & 1 \end{array} \\ \left[0 \ 2 \ 1 \right]$$



(e)

$$\begin{array}{l} \text{Koordinatlar} \\ \text{Miller indisi} \end{array} \begin{array}{ccc} \frac{x}{3/4} & \frac{y}{1/2} & \frac{z}{-1} \\ 3 & 2 & -4 \end{array} \\ \left[3 \ 2 \ \bar{4} \right]$$

Doğrultular ve Miller İndisleri hakkında	Düzlemler ve Miller İndisleri hakkında
<ol style="list-style-type: none">1) Bir doğrultu ve onun negatifi benzer değildir. Onlar aynı hatta fakat zıt doğrultuları temsil ederler.2) Bir doğrultu ve onun katları aynıdır.3) Doğrultuları belli grupları eşittir. Belirlemiş olduğumuz koordinat sistemi nedeniyle bunlar öncelikle belirli indislere sahiptir. Doğrultu gruplarını göstermek için $\langle \rangle$ kullanılır.	<ol style="list-style-type: none">1) Düzlemler ve negatifi eşittir.2) Düzlemler ve katları benzer değildir.3) Eşdeğer düzlem grupları $\{ \}$ ile gösterilir.4) Kübik sistemlerde bir düzlem ile aynı indislere sahip doğrultular, o düzleme diktir.

Birim Hücrenin Yoğunluğu

Bir metalin birim hücresinde sert küre atom modeli ve atom yarıçapları kullanılarak metallerin hacimsel yoğunluğu aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\text{Hacimsel yoğunluk } (d) = \frac{\text{Birim hücre kütlesi}}{\text{Birim hücre hacmi}}$$

Örnek: Bakırın YMK kristal yapısında atom yarıçapı 0.1278 nm'dir. Bakırın kütlesi 63.54 g/mol olduğuna göre hücresel yoğunluğu bulunuz.

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}} = \frac{4 \times 0.1278}{\sqrt{2}} = 0.3615$$

Her bir bakır atomunun kütlesi;

$$(63.54 \text{ g/mol}) / (6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol})$$

YMK birim hücrede birim hücre başına 4 atom bulunmaktadır. Bu durumda YMK birim hücrede bakır atomunun kütlesi;

$$m = \frac{(4 \text{ atom}) \times (63.54 \text{ g/mol})}{6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}} = 4.22 \times 10^{-22} \text{ g}$$

Bakırın yoğunluğu;

$$d = \frac{m}{V} = \frac{4.22 \times 10^{-22}}{4.724 \times 10^{-23}} = 8.936 \text{ g/cm}^3$$

Örnek: 0.31648 nm'lik kafes sabitine sahip olan HMK kristal yapısındaki tungstenin yoğunluğunu hesaplayınız. Tungstenin atom ağırlığı 183.84 g/mol.

HMK yapıda birim hücrede;

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}} = \frac{4 \times 0.31648}{\sqrt{3}} = 0.73 \text{ nm}$$

HMK birim hücrede tungsten atomunun kütlesi;

$$m = \frac{(2 \text{ atom}) \times (183.84 \text{ g/mol})}{6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}} = 6.107 \times 10^{-22} \text{ g}$$

Tungstenin yoğunluğu;

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{6.107 \times 10^{-22} \text{ g}}{(0.73 \times 10^{-7})^3 \text{ cm}^3} = 19.26 \text{ g/cm}^3$$

Örnek: Boyutları (2 cm x 2 cm x 5 cm) ve ağırlığı 178 g olan YMK yapıya sahip bakır plakanın yoğunluğunu ve birim hücrenin kafes parametresini belirleyiniz. (Bakırın atom ağırlığı 63.54 g/mol, $N=6.02 \times 10^{23}$ atom/mol, 1 Angstrom = 10^{-8} cm)

$$d = \frac{m}{V} = \frac{178 \text{ g}}{(2 \times 2 \times 5)} = 8.9 \text{ g/cm}^3$$

$$d = \frac{nxM}{VxN} \rightarrow 8.9 \text{ g/cm}^3 = \frac{4 \text{ atom} \times 63.54 \text{ g/mol}}{a^3 \times 6.02 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}$$

$$a = 3.62 \times 10^{-8} \text{ cm} = 3.62 \text{ \AA}$$

Örnek: Kübik sistemde kristalleşen ve yoğunluğu 7.19 g/cm^3 , kafes parametresi 2.8844 \AA olan kromun kristal yapısını belirleyiniz ve atom yarıçapını bulunuz. ($M_{\text{cr}}=51.96 \text{ g/mol}$, $N=6.02 \times 10^{23}$ atom/mol)

$$d = \frac{nxM}{VxN} \rightarrow 7.19 = \frac{nx51.996}{(2.8844 \times 10^{-8})^3 \times 6.02 \times 10^{23}}$$

$$n \cong 2 \text{ atom}$$

Birim hücrede 2 atom bulunduğundan HMK yapıdadır.

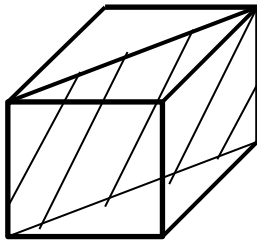
Bu durumda;

$$r = \frac{a\sqrt{3}}{4} = \frac{2.8844 \times 10^{-8} \sqrt{3}}{4} = 1.249 \text{ \AA}$$

Düzlemsel Yoğunluğun Hesaplanması

$$\text{Düzlemsel atom yoğunluğu} = \frac{\text{Düzlemdeki atom sayısı}}{\text{Düzlemin alanı}}$$

Örnek: HMK yapısındaki α -Demirin (110) düzlemindeki düzlemsel atom yoğunluğunu bulunuz. Demirin kafes parametresi (a) 0.278 nm 'dir.



Köşelerde 4 adet çeyrek

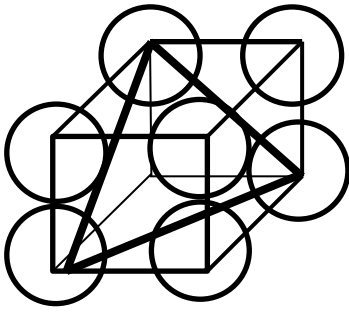
Ortada 1 adet tam olmak üzere

Düzlem üzerinde 2 atom vardır.

$$d_{\text{düzlemsel}} = \frac{2 \text{ atom}}{ax\sqrt{2}a} = \frac{2}{\sqrt{2}a^2} = \frac{\sqrt{2}}{(0.278)^2 \times 10^{-12} \text{ mm}^2} = 18.3 \times 10^{12} \text{ atom/mm}^2$$

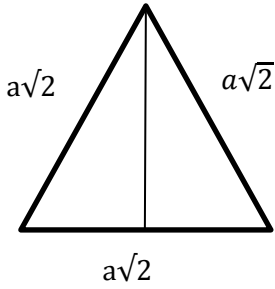
Örnek: Bir YMK birim hücrede (111) düzlemi için düzlemsel yoğunluğu hesaplayınız.

Gümüşün kafes parametresi (a) 0.408 nm'dir.



$$\text{Atom sayısı} = \frac{1}{6} \times 3 + 3 \times \frac{1}{2} = 2 \text{ atom}$$

$$d_{\text{düzlemsel}} = \frac{2 \text{ atom}}{\frac{a^2 \sqrt{3}}{2}} = \frac{4}{\sqrt{3}(0.408)^2} = 13.87 \times 10^{12} \text{ atom/mm}^2$$



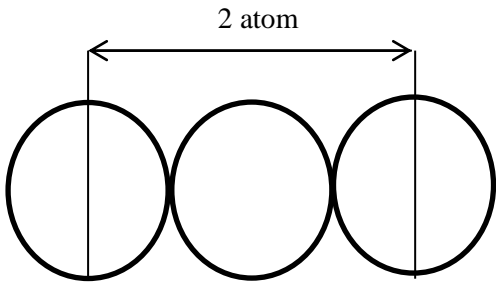
$$h = \frac{a\sqrt{2}\sqrt{3}}{2} = \frac{a\sqrt{6}}{2}$$

$$\text{Alan} = \frac{a \cdot h}{6} = \frac{a\sqrt{2}a\sqrt{6}}{4} = \frac{a^2\sqrt{3}}{2} \text{ atom/mm}^2$$

Doğrusal Yoğunluğun Hesaplanması

$$\text{Doğrusal atom yoğunluğu} = \frac{\text{Doğru üzerindeki atom sayısı}}{\text{Doğrusal uzunluk}}$$

Örnek: YMK kristal yapısına sahip bakırın kafes sabiti 0.361 nm'dir. Bakır kristal kafesinde [110] doğrultusunda doğrusal atom yoğunluğunu atom/mm cinsinden bulunuz. A=0.361 nm



$$d_{\text{doğrultu}} = \frac{2 \text{ atom}}{\sqrt{2}(0.361 \text{ nm})} = 3.92 \times 10^6 \text{ atom/mm}$$

4. KRİSTAL YAPI KUSURLARI

Gerçekte kusursuz kristal yapılar yoktur. Kristallerin içinde değişik boyutta yabancı atomlar bulunabilir, kafesteki bazı köşeler boş olabilir. Tüm bu etkenler ve oluşan sınır bölgeleri kütlenin düzenli yapısını bozar ve kusurlu hale getirir. Bu kusurların biçimi, boyutu ve miktarı toplam kütleye göre çok az da olsa özellikleri büyük ölçüde etkiler. Metallerin plastik şekil değiştirmesi, mukavemeti ve iletkenlikleri büyük ölçüde kristal yapı kusurlarına bağlıdır.

Kristal kusurları;

- Noktasal kusurlar
- Çizgisel kusurlar
- Yüzeysel kusurlar

olmak üzere üç türe ayrılırlar. Kusur birkaç veya yer değiştirmiş atomdan oluşuyorsa noktasal kusur denir. Bunların mekanik özelliklere etkisi önemsizdir. Eğer kusur, kristalde boydan doya bir çizgi boyunca uzanıyorsa buna çizgisel kusur (dislokasyon) denir. Bu tür kusur özellikle metallerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Sonuncu kusur kristallerin yüzeyleri ve çok kristalli yapılarda kristal taneleri arasındaki tane sınırlarıdır.

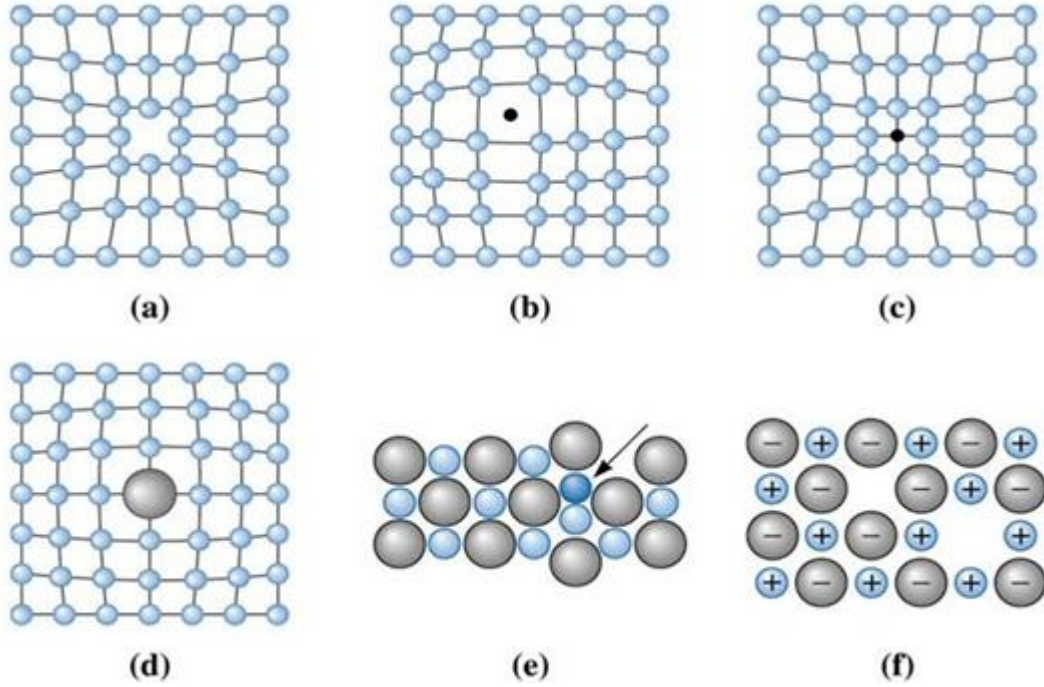
4.1. Nokta Kusurları

Nokta hataları, bir veya muhtemelen birkaç atomun oluşturduğu bölgesel kafes düzensizlikleridir. Bir boşluk normal kafes noktasından bir atom eksildiğinde oluşur. Kristal yapıda boşluklar katılma esnasında yüksek sıcaklıklarda veya radyasyon hasarının bir sonucu olarak oluşur.

Normal olmayan bir kafes noktasında, kafes yapı içerisine fazla bir atom yerleştirildiğinde bir **arayer hatası** oluşur. Bir atom farklı bir atomla yer değiştirdiğinde bir **yer alan hatası** meydana gelir.

Frenkel hatası, bir arayer boşluk çiftidir. Bir iyon, normal kafes noktasından bir arayer bölgesine atlayıp akasında bir boşluk bıraktığında oluşur. **Schottky hatası**, iyonik bağ ile bağlı malzemelerde bir boşluk çiftidir. Kristalde eşit yükü korumak için anyon ve katyonun her ikisi de kafesten çıkmak zorundadır.

Frenkel hatasında, boşluk ile arayer hatası aynı anda mevcuttur. Bu hata radyasyona maruz kalan malzemelerde görülür.

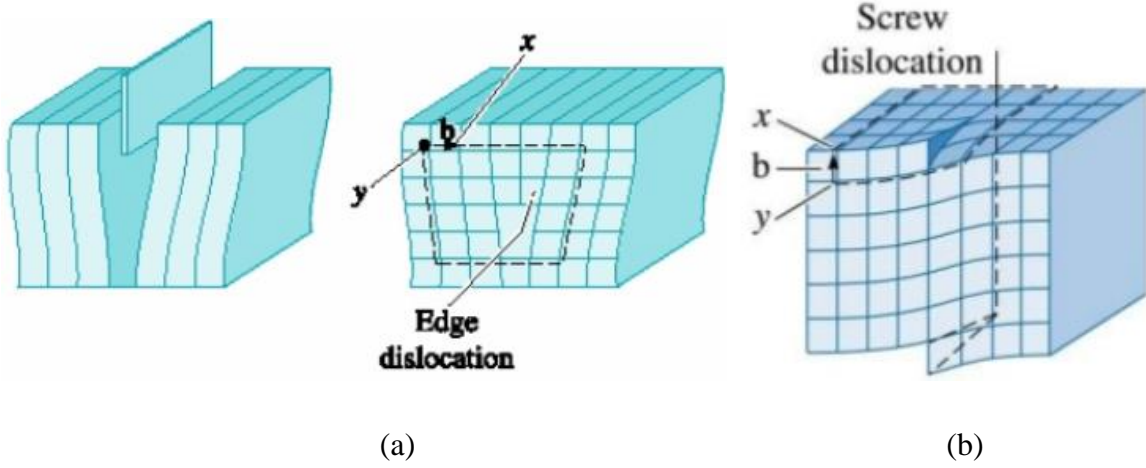


Şekil 17. Nokta hataları: (a) Boşluk, (b) Arayer Atomu, (c) Küçük Yeralan Atomu, (d) Büyük Yer Alan Atomu, (e) Frenkel Atomu, (f) Schottky Hatası

4.2. Çizgisel Kusurlar

Çizgisel kusurlar, kristallerde atomsal dizilişin bir çizgi boyunca bozulması sonucu oluşur. Atomlar denge konumundan ayrıldıklarından çizgi çevresinde artık gerilmeler doğar, dolayısıyla şekil değiştirme enerjisi depo edilir. Dislokasyonlar çoğunlukla katılma sürecinde oluşmakla beraber plastik şekil değiştirme sırasında sayıları artar.

Başlıca iki tür dislokasyonlar vardır: Kenar dislokasyonu ve vida dislokasyonudur. **Kenar dislokasyonu**, kristal yapıda kısmen eksik bir atom düzleminin kenarı olarak tanımlanır. Kristal içinde sona eren, ek bir yarım kafes düzleminin varlığı ile oluşan hatalardır. Kenar dislokasyonu, kristal içinde sona eren bu düzlemin kenarıdır. **Vida dislokasyonu**, kristalde bir düzlem boyunca kısmen kayma şeklinde öteleme sonucu meydana gelir. Vida dislokasyonları hareket sırasında, vida adımına benzer şekilde hareket ederler. Dislokasyon çizgisi dislokasyonun üst kısmında çekme gerilmeleri, alt kısmında ise basma gerilmeleri oluşturur ve kafes yapısı içerisinde bozulmuş bir bölge meydana getirir.



Şekil 18. Kenar (a) ve Vida (b) Dislokasyonu

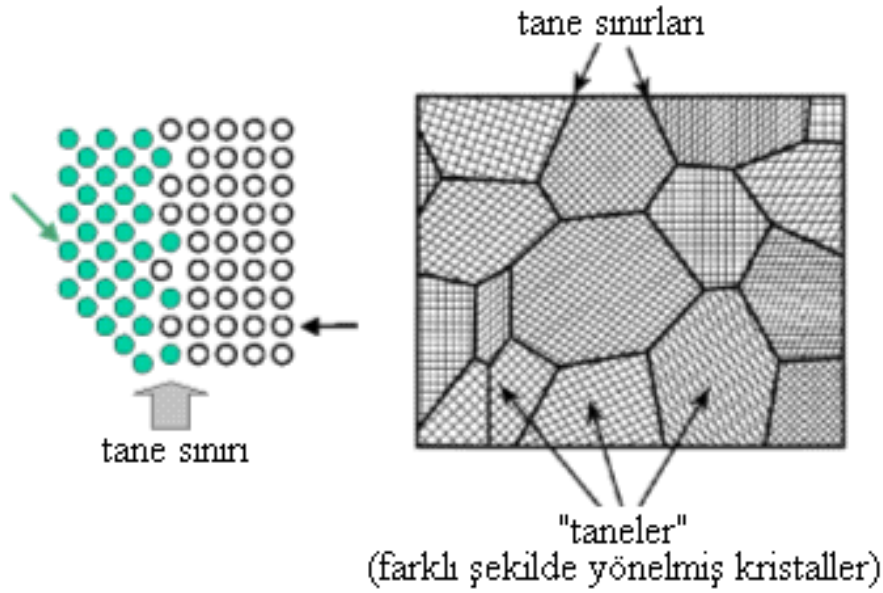
4.3. Düzlemsel Kusurlar

4.3.1. Yüzeyler ve Tane Sınırları

Bir kristal yapının yüzeyinde bulunan atomlar, iç kısımda bulunan atomlarla eşdeğer değildir. Yüzey atomlarının yalnız bir tarafında kusurları vardır. Bundan dolayı yüzey atomlarının enerjileri daha yüksek ve içeridekilere göre daha zayıf bağlıdırlar. Eğer bunların yüzeyine bir dizi atom eklenirse bir miktar enerji açığa çıkar. Yüzey atomlarının sahip oldukları enerji fazlalığı yüzey enerjisi olarak adlandırılır. Yüzey enerjilerinin varlığına bir kanıt, sıvı damlalarının küresel bir biçim alma eğilimidir.

Cisimler genellikle düşük enerjili, dolayısıyla daha kararlı yapı oluşturma eğilimi gösterirler. Küresel biçimdeki bir sıvı damlası, oval biçimdekine göre daha küçük yüzey/hacim oranına dolayısıyla daha küçük yüzeysel enerjiye sahip olurlar.

Kristal yapı malzemeler sıvı halden katılaşırlarken aynı anda birçok çekirdeği oluşturmaya başlar ve bunlar kütle doldürürler, sonuçta çok kristalli yapı elde edilir.

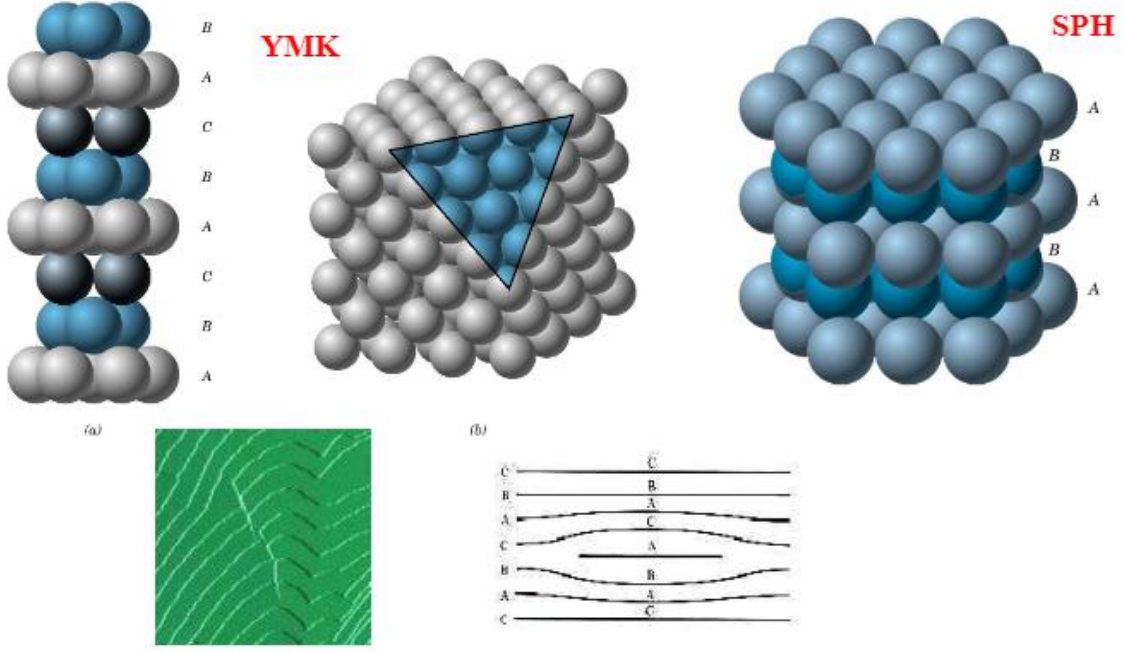


Şekil 19. Tane ve Tane Sınırları

Gerçekte tek kristalden oluşan bir yapı elde etmek oldukça güçtür. Çok kristalli bir malzemede kristal bireylerine **tane** denir. Tanelerdeki kristal doğrultular rastgele dağılmıştır. Kristaller büyürken sıvı içindeki atomlar sürekli olarak kristallere katılarak düzenli hale geçerler. Tanelerin biçimi ve büyüklüğü, komşuları tarafından sınırlanır. Birbirlerine değdikleri yerde tanelerin büyümesi durur. Kristal bireyleri kalan komşu tanelerle uyum sağlayamazlar, dolayısıyla rastgele düzensiz dağılmış durumda kalırlar. Taneler arasındaki bu düzensiz amorf bölgeye **tane sınırı** denir. Tane sınırlarının kalınlığı genellikle 2-5 atom çapı kadardır. Tane sınırlarının yapı ve enerji yönünden tanelerden farklı oluşu önemli sonuçlar doğurur. Tane sınırları kimyasal etkilere karşı daha duyarlıdır, atomsal yayılımın daha kolay olur ve korozyon daha hızlı ilerler. Taneler küçüldükçe tane sınırı alanı büyür ve engeller artar. Bunun sonucu plastik şekil değiştirme kısıtlanır, mukavemet artar.

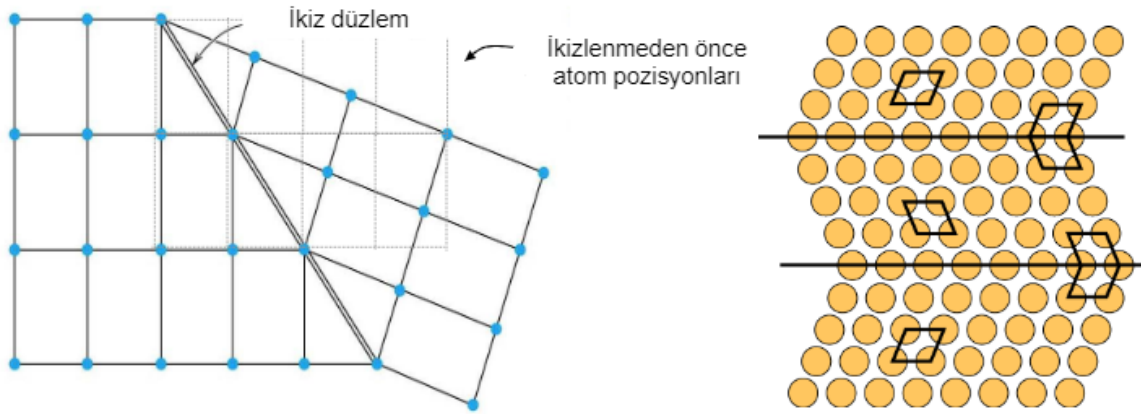
4.4. İstifleme Kusuru ve İkizlenme

İstiflenme kusuru, yüzey merkezli kübik (YMK) yapıli metallerde meydana gelir ve sıkı düzenli düzlemlerin diziliş sırasını değiştirir. Mükemmel bir YMK kafes yapısında normal olarak ABCABCABCABC düzeninde sıralanması gereken düzlemlerin herhangi bir nedenle ABCABABCABC düzeninde sıralandıklarını kabul edelim. Bu sıralanma düzeninde C düzleminin yerini A düzlemi yer almıştır. İstiflenme kusuru en yaygın deformasyon mekanizması olan kaymayı zorlaştırır. Özellikle ikiz teşekkülünde, faz dönüşümlerinde ve sürünmede önemlidir. Gerilme ve dislokasyon hareketleri oluşturur.



Şekil 20. İstiflenme Kusuru

İkiz sınırı, kristal kafes yapısındaki atom düzlemlerinin simetrik olarak farklı doğrultularda yönelmeleri sonucunda birbirinin ayna görüntüsü şeklinde oluşan iki bölge arasındaki bir düzlem olarak tanımlanabilir. İkiz sınırı boyunca etki eden bir kayma kuvveti, atomların yerini değiştirerek ikizlenmeye neden olur. İkizlenme, bazı metallerin plastik deformasyonu ya da ısıl işlemi sırasında meydana gelir. İkiz sınırları, plastik deformasyon mekanizmalarından en yaygın olan kaymayı zorlaştırarak metallerin mukavemetini artırır. İkiz sınırlarının hareketi, aynı zamanda metal malzemelerin plastik deformasyona uğramasına neden olur.



Şekil 21. İkizlenme Oluşumu

4.5. ASTM Tane Büyüklüğü Hesaplama

Test ve malzemeler için Amerikan Birliği (ASTM) tarafından, tane boyutunu belirlemek amacıyla tane büyüklüğü numarası geliştirilmiştir. Bir metalin mekanik özellikleri tane boyutuna bağlı olarak değişir. Yani ince taneli bir kristal yapısına sahip metalin mukavemeti, kaba taneli kristal yapısına sahip aynı metalden daha yüksektir. İnce tane demek, kristal yapısındaki tane sınırlarının çok daha fazla olması demektir. Her bir tane sınırı, dislokasyon hareketlerini engelleyen birer bariyer olarak düşünüldüğünde, ne kadar çok tane sınırı varsa o kadar çok dislokasyon birikmesi için engel var demektir. Dislokasyon birikmesi ne kadar fazla olursa, malzemenin mukavemeti de nispeten artmış olacaktır.

$$N=2^{G-1}$$

G: ASTM tane büyüklüğü numarası

N: 100 defa büyütmede (x100) 1 inç² (645 mm²)'ye düşen tane sayısı

Tablo 1. ASTM Tane Büyüklüğü Numaraları

Tane Büyüklüğü Numarası (G)	x100 büyütmede 1 inç ² 'deki tane sayısı (N)
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32
7	64
8	128
9	256
10	512

NOT: Tane büyüklüğü numarası arttıkça tane boyutu küçülmektedir. Mikroskopta tam çıkmayanlar yarım tane olarak alınır.

Örnek: (5 cmx10 cm) ebatlarında 250 büyütmede elde edilen yapının ASTM tane büyüklüğü numarası nedir?

$$\text{Alan}=7.75 \text{ inç}^2$$

$$7.75/250 \text{ inç}^2 \quad 17$$

$$9+1/2 \times 16=17$$

$$1/100 \text{ inç}^2 \quad N$$

$$N=2^{n-1}=13.71 \rightarrow n \approx 5$$

5. ATOMSAL YAYINIM (DİFÜZYON)

Malzeme içerisindeki atomlar, buldukları konumdan başka bir konuma enerji verilerek geçirilmesi olayına **atomsal yayılım** veya **difüzyon** adı verilir. Aslında difüzyon, malzeme içerisindeki atomların hareket etmesi olayıdır. Yeterli bir sıcaklık varsa, atomlar veya moleküller sıvı ve katılarda rahatlıkla hareket edebilirler.

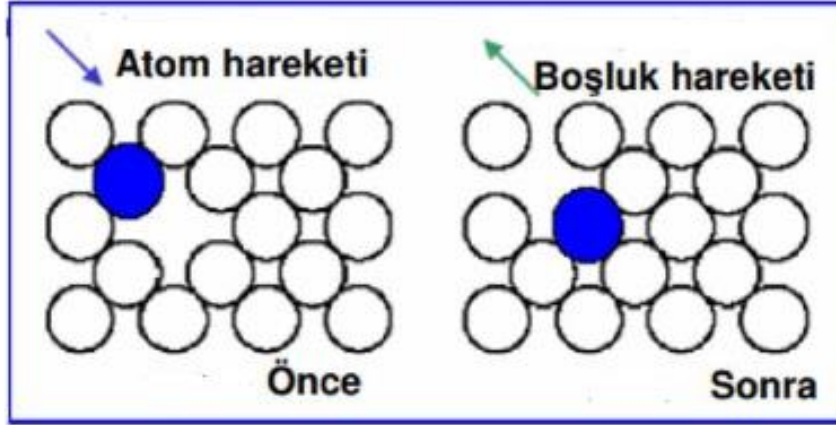
Malzemelerin üretilmesinde, birleştirilmesinde ve özelliklerinin değiştirilmesinde difüzyon olayı oldukça önemlidir. Metallerde uygulanan çeşitli ısı işlemleri, seramiklerin veya farklı özelliklerdeki malzemelerin birleştirilmesi, çelik yüzeyine karbon veya azot emdirilmesi gibi pek çok endüstriyel uygulama, atomların hareketleri yani difüzyon olayı ile ilişkilidir.

Difüzyon işlemi uygulanan bir malzemenin kimyasal bileşimi, mikroyapısı ve özellikleri değişmektedir. Malzemelerdeki bu değişiklikleri anlayabilmek ve gerektiğinde kontrol edebilmek için difüzyon mekanizmalarını, hangi etkenlere bağlı olarak atomların hareket ettiklerini iyice kavramak gerekir.

Difüzyon, farklı atomlar içeren malzemeler arasında meydana geldiği gibi, saf malzemelerde de oluşur. Farklı atomlar içeren alaşımlarında **boşluk difüzyonu** ve **arayer difüzyonu** olmak üzere başlıca iki önemli difüzyon mekanizması görülür. Ayrıca çok nadirde olsa **halka difüzyon mekanizmasına** da rastlanır. Saf katı malzemelerde ise **kendi kendine difüzyon mekanizması** etkindir.

Saf katı bir malzeme atomları, kendi kafes pozisyonlarından başka bir kafes pozisyonuna hareket etmeleri olayına **kendi kendine difüzyon** adı verilir. Örneğin, radyoaktif olmayan saf nikel üzerine radyoaktif olan nikel izotopunu (Ni^{59}) temas ettiği zaman, radyoaktif nikel atomları saf nikel içerisine doğru hareket etmeye başlar.

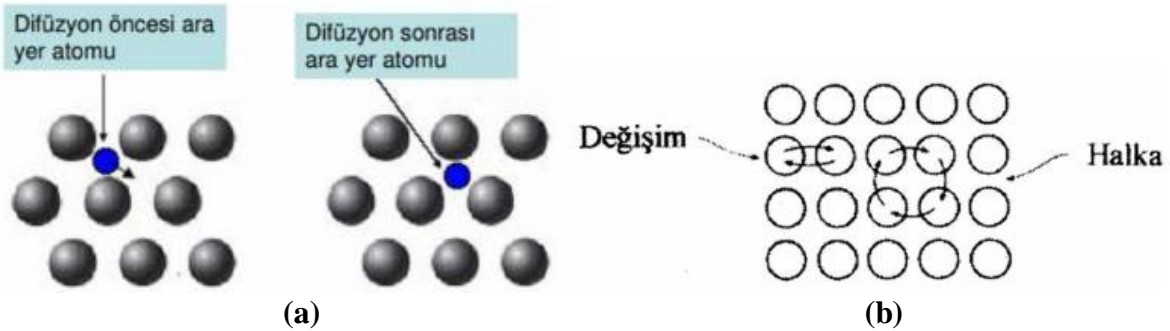
Boşluk difüzyonu: Eğer kristal kafes içerisinde bir atom boşluğu varsa, komşu atomlardan bir tanesi kendi yerini terk ederek bu boşluğu doldurur. Hareket eden atomun kendi yeri ise boş kalır. Atomların bu şekildeki hareketine **boşluk difüzyonu** denir. Kristal kafesi içerisinde ne kadar atom boşluğu varsa, boşluk difüzyonu o kadar çok etkilidir. Metaller yüksek sıcaklıklara çıktıkça zamanla, atom boşlukları artmaktadır. Dolayısıyla metallerin yüksek sıcaklıklardaki difüzyonunda, bu mekanizma oldukça önemli rol oynar.



Şekil 22. Boşluk Difüzyonunun Şematik Görünümü

Arayer difüzyonu: Kristal kafesi içerisinde mevcut olan küçük çaplı bir arayer atomunun, kafes ana atomları arasından geçmesi sonucu meydana gelen atom hareketine **arayer difüzyon mekanizması** denir. Hidrojen, karbon, azot ve oksijen gibi arayer boşluklarına girebilecek kadar küçük atomlar, bazı metaller içerisinde arayer difüzyon mekanizması ile hareket ederler. Örneğin, karbon HMK kafes yapısına sahip demir içerisinde arayer difüzyon mekanizması ile hareket eder. Arayer difüzyon mekanizması, boşluk difüzyon mekanizmasından daha hızlıdır. Çünkü arayer atom yarıçapları çok küçük olduğu için çok daha hızlı hareket edebilirler.

Halka difüzyon mekanizması: Metallerde en yaygın olarak boşluk ve arayer difüzyon mekanizmaları görüldüğü halde, nadiren de olsa karşılaşılan diğer bir difüzyon mekanizması ise halka difüzyonudur. Birbirlerine değerek halka şeklinde bulunan atomlar, aynı yönde beraberce hareket ederek birbirlerinin yerini alırlar. Atomların bu şekildeki hareketlerine **halka difüzyon mekanizması** denir.



Şekil 23. Arayer (a) ve Halka Difüzyonu (b)

Aktivasyon enerjisi: Difüzyon olayında atomlar buldukları konumdan başka bir konuma geçebilmeleri için ilave bir enerjiye ihtiyaç duyarlar atomun difüzyonu için gerekli bu enerjiye **aktivasyon enerjisi** adı verilir. Atomların hareket edebilmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisi adı verilir. Atomların hareket edebilmesi için gerekli olan aktivasyon enerjisi metallerin ısıtılması ile sağlanabilir.

Aşağıdaki tabloda bazı metallere ait aktivasyon enerji değerleri verilmiştir. Tablodan düşük aktivasyon enerjisine sahip hidrojen, çok daha kolay bir şekilde demirin kristal kafesi içerisinde difüzyon olabilir.

Tablo 2. Bazı Metallere ait Aktivasyon Enerji Değerleri

Difüzyon Mekanizması ve Metal Çiftler	Aktivasyon Enerjisi (cal/mol)
HMK demir içerisinde C atomunun arayer difüzyonu	20900
HMK demir içerisinde N atomunun arayer difüzyonu	18300
HMK demir içerisinde H atomunun arayer difüzyonu	3600
Bakır içerisinde Ni atomunun boşluk difüzyonu	57900
Bakır içerisinde Zn atomunun boşluk difüzyonu	43900
MgO içerisinde O atomunun boşluk difüzyonu	82100

Difüzyon olayında bir taraftan diğer tarafa doğru geçen atomların sayısı oldukça önemlidir. Birim zamanda birim alandan geçen atom sayısına, atomsal yayılım akışı adı verilir. **Atomal yayılım akışının (J)**, genel matematiksel ifadesi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$J = \frac{N}{At}$$

Bu eşitlikte J atomal yayılım akışı (atom/m²s), N belirli bir zaman aralığında geçen atom sayısı (atom), A atomların geçtiği alan (m²) ve t atomların A alanı içerisinde geçen süresidir (s).

Kararlı Hal Difüzyonu

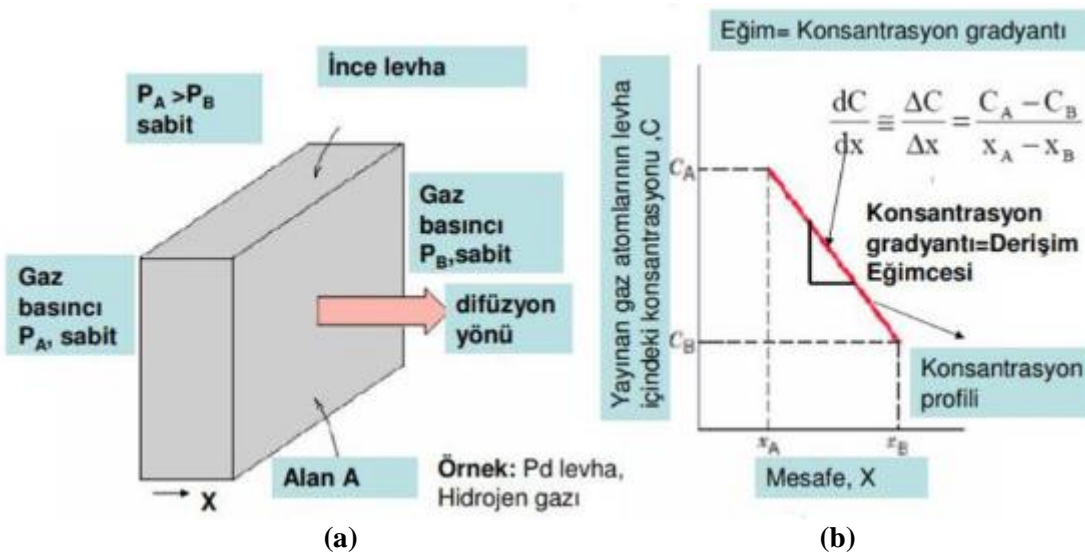
Eğer atomsal yayınım akışı, zamana bağlı olarak değişmiyorsa kararlı hal difüzyonu söz konusudur. Difüzyon konsantrasyonu, her iki kenarında sabit olan ve x kenar uzunluğuna sahip bir plaka içerisinde atomların geçtiğini düşünelim. Belirli bir zaman sonra, levhanın x_A kenarındaki difüzyon konsantrasyonunun C_B seviyesinde olduğunu varsayalım. Diyagramda (C_A, x_A) ve (C_B, x_B) ile ifade edilebilecek iki koordinat noktasını birleştirirsek, doğrusal bir eğri elde ederiz. Difüzyon zamanı arttıkça, bu eğri doğrusal olarak değişecektir. Bu çeşit bir difüzyon olayına **kararlı hal difüzyonu** denir.

Difüzyon olayı için **Birinci Fick Kanunu** olarak bilinen kararlı hal difüzyonunda atomsal yayınım akışı (J);

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Bu eşitlikte, J atomsal yayınım akışı ($\text{kg/m}^2\text{s}$), D difüzyon katsayısı (m^2/s), dC/dx ise konsantrasyon gradyanıdır.

Formülde eksi işaretinin kullanılmasının sebebi, difüzyon yönünün yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru olmasından dolayıdır. Yani aşağıya doğru eksi konsantrasyon gradyanı bulunmasındandır.



Şekil 24. Kararlı hal difüzyonu: (a) İnce bir plakada meydana gelen atomsal yayınım, (b) İnce metal plakadaki doğrusal konsantrasyon gradyanı

Kararlı hal difüzyonuna örnek olarak hidrojen gazının temizlenmesini verebiliriz. Bu temizleme işleminde, ince bir paladyum levhasının bir kenarına oksijen, azot ve su buharı ile karışık hidrojen gazı sabit ve daha düşük basınca sahip paladyum levhasının diğer kenarına doğru atomsal yayılım yaparak, diğer gazlardan temizlenmiş olur.

Kararlı hal difüzyonu bazı faktörlere bağlı olarak değişir. Bunlar;

- a) Ergime sıcaklığı düşük malzemelerde atomlar kolayca yayılır.
- b) Atomik dolgu faktörü düşük ortamlarda daha az enerjiyle atom yayılımını gerçekleştirir.
- c) Kafes içerisindeki küçük yarıçaplı atomlar daha kolay yayılırlar.
- d) Tane sınırlarında atom yayılımını daha kolaydır.

Birinci Fick Kanunundaki eşitlikte bulunan difüzyon katsayısını, sıcaklığa bağlı olarak şu şekilde ifade edebiliriz.

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

Bu eşitlikte, D difüzyon katsayısı (m²/s), D₀ difüzyon sabiti (m²/s), Q aktivasyon enerjisi (J/mol), R gaz sabiti (8.314 J/mol^oK) ve T mutlak sıcaklıktır (°K).

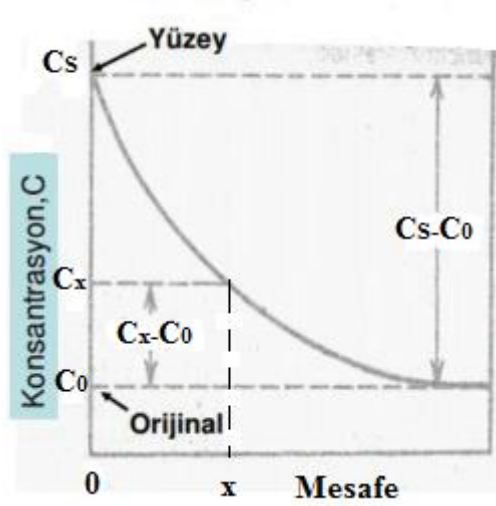
Kararsız Hal Difüzyonu

Difüzyon olayı esnasında bir malzemenin herhangi bir noktasındaki çözünen atom konsantrasyonu (miktarı) zamana bağlı olarak değişiyorsa buna **kararsız hal difüzyonu** denir. Bu çeşit difüzyon olayı **İkinci Fick Kanunu** olarak bilinir.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \right)$$

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

Bu eşitlikte, D difüzyon katsayısı (m²/s), t difüzyon zamanı (s), x yüzeyden uzaklık (m), C_x difüzyon olacak elementin malzeme yüzeyinde x uzaklık yüzde miktarı (%), C₀ difüzyon öncesi malzeme yüzeyinden difüzyon olacak elementin yüzde miktarı (%), C_s katı malzeme yüzeyine temas eden atmosfer içerisinde difüzyon olacak elementin maksimum yüzde miktarı (%), erf(x/(2(Dt)^{1/2}) Gaussian hata fonksiyonu olup bu fonksiyonun değeri x/(2(Dt)^{1/2}) ile çizelgelerde verilmektedir.



Şekil 25. Azot gazının demirdeki yayınımlını ifade eden bir kararsız hal difüzyonunun gösterimi

Difüzyon olayının kullanıldığı pek çok endüstriyel uygulama vardır. Metallerin kaplanması, karbürizasyon ve nitrürasyon işlemi, toz metalürjisinde sinterleme işlemi, difüzyon kaynağı, sert ve yumuşak lehimleme difüzyon olayının kullanıldığı endüstriyel uygulamalardan birkaçıdır.

Örnek: Katı haldeki gümüş metalinde gümüş atomlarının yayınıması 500 °C'de $1 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ ve 1000 °C'ye yükselmesi için gümüşün gümüşteki yayınımlı için aktivasyon enerjisini (J/mol) cinsinden hesaplayınız. ($R=8.314 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$)

$$T_2=1000^\circ\text{C}+273=1273^\circ\text{K}$$

$$T_1=500^\circ\text{C}+273=773^\circ\text{K}$$

$$\frac{D_{1000^\circ\text{C}}}{D_{500^\circ\text{C}}} = \exp \left\{ \frac{-Q}{R} (7.85 \times 10^{-4} - 12.94 \times 10^{-4}) \right\}$$

$$11.16=Qx(5.08 \times 10^{-4})/8.314$$

$$Q=183.000 \text{ kJ/mol}$$

Örnek: 927°C’de 1020 çeliğinden bir dişlinin sementasyonunu düşünün. Yüzeyin 0.5 mm altında karbon içeriğini %0.40 artırmak için gerekli zamanı dk cinsinden bulunuz. Yüzeyde karbon oranının %0.90 olduğunu varsayınız. (1020 çeliği %0.20’lik normal bir karbon içeriğine sahiptir.)

z	erf(z)
0.75	0.7112
0.80	0.7421

$$D_{927^{\circ}\text{C}}=1.28 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$$

C_s =Yüzeye gaz yayınmasından elementin yüzey konsantrasyonu (%)

C_0 =Katı haldeki elementin ilk üniform konsantrasyonu (%)

C_x =t zamanında yüzeyden x mesafesindeki elementin konsantrasyonu (%)

x yüzeyden mesafe (m), D yayınan elementin yayınması ve t zamandır (s).

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$\frac{0.90 - 0.40}{0.90 - 0.20} = \text{erf}\left(\frac{5.0 \times 10^{-4} \text{ m}}{2\sqrt{(1.28 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}) \cdot t}}\right)$$

$$0.7143 = \text{erf } Z \rightarrow Z = 69.88/(t^{1/2})$$

$$\frac{0.7143 - 0.7112}{0.7421 - 0.7112} = \frac{Z - 0.75}{0.80 - 0.75}$$

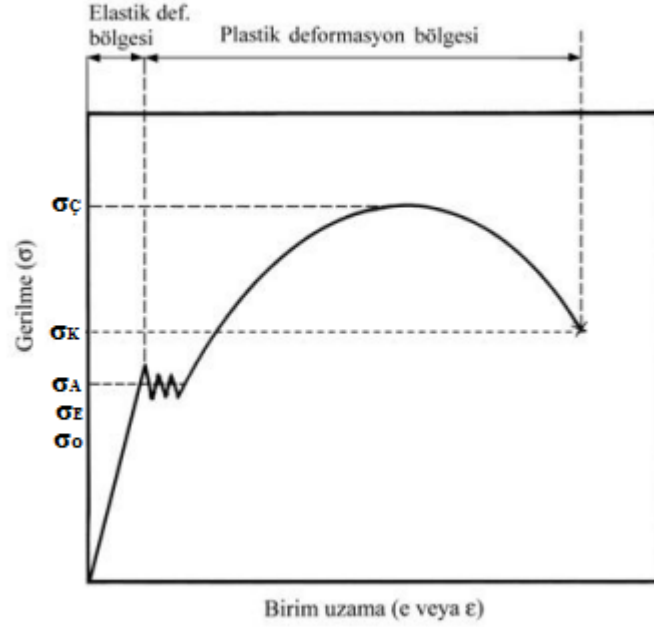
$$Z = 0.755 = 69.88/(t^{1/2})$$

$$t = 8567 \text{ s} = 143 \text{ dk}$$

6. MEKANİK TESTLER VE ÖZELLİKLERİ

6.1. Çekme Testi

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması ve malzeme seçimi amacıyla yapılır. Malzemenin statik ve yavaş uygulanan bir kuvvete karşı direnci ölçülür.



Şekil 26. Düşük Karbonlu Çeliğe Ait Çekme Diyagramı

Çekme deneyi sonucunda malzemenin orantı sınırı (σ_0), elastiklik sınırı (σ_E), akma sınırı (σ_A), ve çekme dayanımı (σ_C), gibi mukavemet değerleri ile kopma uzaması, kopma büzülmesi, tokluk ve süneklik değerleri belirlenir.

- Orantı sınırı (σ_0):** Gerilme-birim uzama diyagramından Hooke yasasının, yani $\sigma=E.\epsilon$ bağıntısının geçerli olduğu doğrusal kısmı sınırlayan gerilme değeridir. Bu bağıntıdaki orantı katsayısına elastisite modülü denir ve bu katsayı çekme diyagramının elastik kısmını oluşturan doğrunun eğimini gösterir. Bir malzemenin elastisite modülü ne kadar büyükse, elastik şekil değiştirmeye direnci de o kadar büyüktür.
- Elastiklik sınırı (σ_E):** Malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman plastik uzamanın görülmediği veya yalnız şekil değiştirmenin meydana geldiği en yüksek gerilme değeridir. Genellikle elastiklik sınırı, orantı sınırına eşit kabul edilir. Pratikte σ_E yerine %0.01 veya %0.005'lik plastik uzamaya karşı gelen gerilme ($\sigma_{0.01}$ veya $\sigma_{0.005}$) değerleri alınır.

- c) **Akma dayanımı (σ_A):** Uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına karşın, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünlük gösterdiği kısma karşı gelen gerilme değeridir. Bu değer, akma kuvvetinin (F_A) ilk kesit alanına bölünmesiyle ($\sigma_A=F_A/A_0$) bulunur. Düşük karbonlu yumuşak çelik gibi bazı malzemeler, deney koşullarına bağlı olarak belirgin akma sınırı gösterebilirler. Malzemelerin belirgin akma sınırı göstermemesi durumunda, genelde %0.2'lik plastik uzamaya ($\epsilon_{plastik}=0.002$) karşı gelen çekme gerilmesi, akma sınırı veya akma dayanımı olarak alınır.
- d) **Çekme dayanımı (σ_C):** Bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. $\sigma_C=F_C/A_0$ formülüyle belirlenir. A_0 malzemenin ilk kesit alanıdır.
- e) **Kopma dayanımı (σ_K):** Çekme deneyi esnasında, numune kesiti çekme artık karşılayamadığı anda kopma meydana gelir. Çekme diyagramı çiziminde kaydedilen bu son gerilme değerine, kopma dayanımı adı verilir.
- f) **Kopma uzaması (KU):** Çekme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek plastik yüzde uzama oranıdır.

$$KU (\%) = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100$$

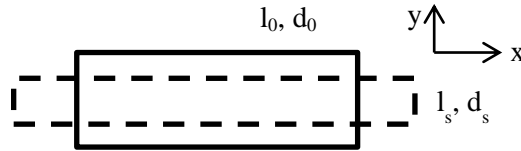
$$\Delta l = l_k - l_0$$

$$\epsilon_y = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0}$$

$$\vartheta = \frac{-\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

$$\epsilon = G.E \quad G = E/(2x(1+\vartheta))$$

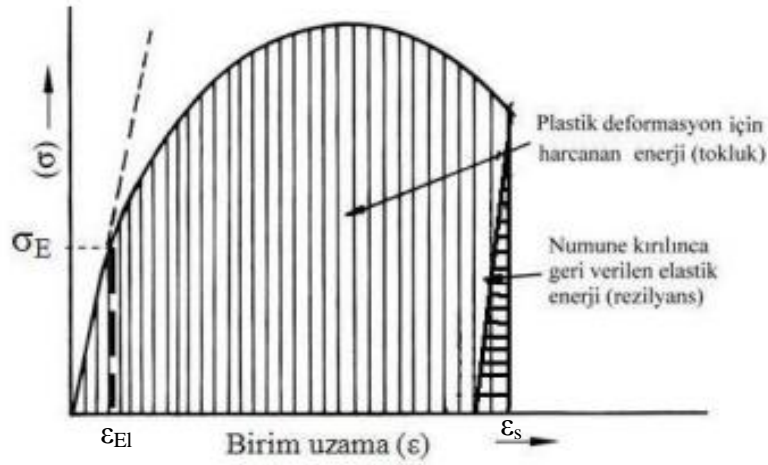


- g) **Kopma büzülmesi (KB):** Çekme numunesinin kesit alanında meydana gelen en büyük yüzde daralma veya büzülme oranıdır.

$$KB (\%) = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100$$

Burada A_0 ilk kesit alanı ve A_k kırılma anındaki kesit alanıdır.

- h) Rezilyans:** Malzemenin yalnız elastik şekil değiştirmesi için harcanan enerji veya elastik şekil değiştirmesi sırasında malzemenin depoladığı enerji demektir. Bu enerji gerilme (σ) birim uzama eğrisinin elastik kısmının altında kalan alan ($(\sigma_e \cdot \epsilon_{el})/2$) ile belirlenir ve numune kırılınca geri verilir.
- ı) Tokluk:** Malzemenin birim hacmi başına düşen plastik şekil değiştirme enerjisi olarak tanımlanır ve malzemenin kırılıncaya kadar enerji depolama veya soğurma yeteneğini gösterir. Tokluk genellikle σ - ϵ eğrisinin altında kalan alanın hesaplanması ile bulunur ($\int \sigma \cdot d\epsilon$).

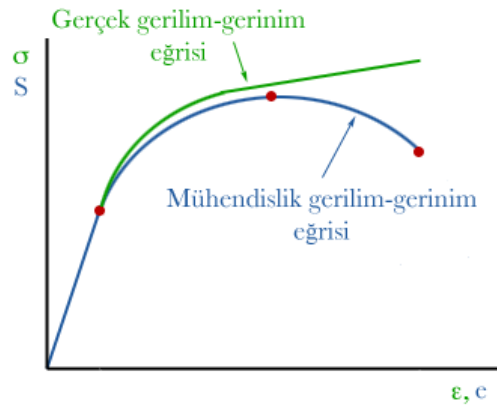


Şekil 27. Rezilyans ve Tokluk Arasındaki İlişki

$$Tokluk = \int_0^{\epsilon_s} \sigma \cdot d\epsilon$$

$$Rezilyans = \frac{\sigma_E \epsilon_{El}}{2}$$

Gerçek Gerilme ve Şekil Değiştirme:



Şekil 28. Gerçek ve Mühendislik Gerilim-Gerinim Eğrisi

Mühendislik gerilmesi;

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Mühendislik şekil değiştirmesi;

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad \rightarrow \quad \frac{l}{l_0} = \varepsilon + 1$$

Gerçek ve Mühendislik Gerilme ve Şekil Değiştirme İlişkisi;

$$V = V_0$$

$$A \cdot l = A_0 \cdot l_0$$

$$A = \frac{A_0}{l/l_0} = \frac{A_0}{\varepsilon + 1}$$

$$\sigma_g = \sigma \cdot (\varepsilon + 1)$$

$$\int d\varepsilon_g = \frac{dl}{l}$$

$$\varepsilon_g = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln l - \ln l_0 = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

$$\varepsilon_g = \ln(\varepsilon + 1)$$

Örnek: 12.5 mm çapındaki alüminyum alaşımı test çubuğu için

Yük (kN)	Mühendislik Gerilmesi (MPa)	Ölçü Boyu (mm)	Şekil Değişirme
0	0	50.00	0
4.5	36.6	50.02	0.0004
13.4	108.9	50.07	0.0014
22.3	181.3	50.13	0.0026
31.2	253.7	50.18	0.0036
33.4	271.5	50.75	0.0150
35.2	286.2	52.00	0.0400
35.7	290.2	53.00	0.0600
35.7 (maks.)	290.2	54.00	0.0800
33.8	274.8	55.13	0.1062

a) 4.5 kN'luk yükleme için σ ve ε değerlerini bulunuz.

$$\sigma = F/A_0 = (4.5 \times 10^3) / (\pi \times 0.0125^2 / 4) = 36.66 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = (50.02 - 50.00) / (50.00) = 0.0004$$

b) Maksimum yükleme için mühendislik gerilme-gerinim, gerçek gerilme-gerinim değerlerini bulunuz.

$$\sigma = F/A_0 = (35.7 \times 10^3) / (\pi \times 0.0125^2 \times 10^6 / 4) = 290 \text{ MPa}$$

$$\sigma_g = \sigma(\varepsilon + 1) = 290(1 + 0.06) = 307.4 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = (53 - 50) / (50) = 0.0006$$

$$\varepsilon_g = \ln l / l_0 = \ln 53 / 50 = 0.058$$

c) Kopmada mühendislik gerilme-gerinim, gerçek gerilme-gerinim değerlerini bulunuz.

$$\sigma = F/A_0 = (33.8 \times 10^3) / (\pi \times 0.0125^2 \times 10^6 / 4) = 275 \text{ MPa}$$

$$\sigma_g = \sigma(\varepsilon + 1) = 275(1 + 0.1062) = 304.205 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 = (55.13 - 50) / (50) = 0.1026$$

$$\varepsilon_g = \ln l / l_0 = \ln 55.13 / 50 = 0.097$$

d) 210 MPa gerilmenin uygulandığı 1.25 m boyundaki çubuğun son boyunu elastisite modülünü kullanarak bulunuz.

$$\sigma = 210 \text{ MPa} \rightarrow \varepsilon = 0.003$$

$$E = \sigma / \varepsilon = 210 / 0.003 = 67.666 \text{ MPa}$$

Hooke Kanunundan;

$$\varepsilon = \sigma / E = 210 \times 10^6 / 67.666 \times 10^9 = 0.003 = (l - l_0) / l_0$$

$$l = l_0 + \varepsilon \cdot l_0 = 1.25 + 0.003 \times 1.25 = 1.254 \text{ m}$$

e) $l=54.88$ mm son ölçü boyuna ve kopma yüzeyinde $d=9.87$ mm son çapa sahiptir. Bu alaşımın sünekliğini hesaplayınız.

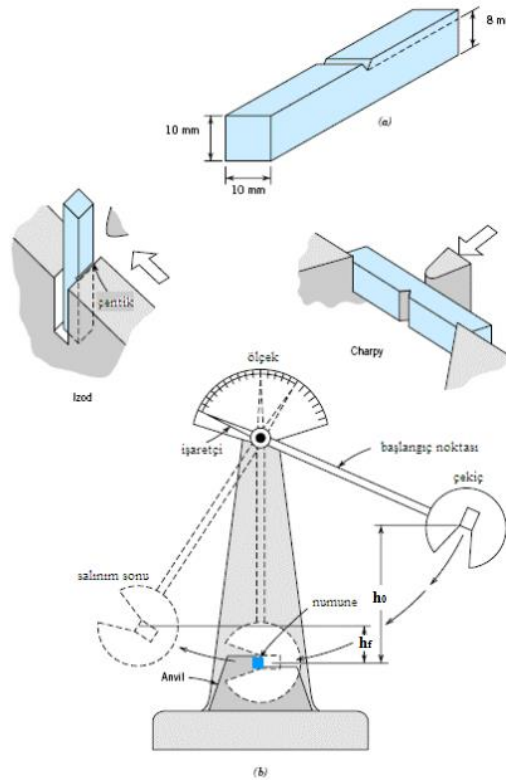
$$\% Uzama = (l - l_0)/l_0 \times 100 = (54.88 - 50)/(50) \times 100 = \%9.76$$

$$\% Kesit Daralması = (A_0 - A)/A_0 \times 100 = \frac{\left(\frac{\pi}{4} 12.5^2\right) - \left(\frac{\pi}{4} 9.87^2\right)}{\left(\frac{\pi}{4} 12.5^2\right)} \times 100 = \%37.5$$

6.2. Darbe Testi

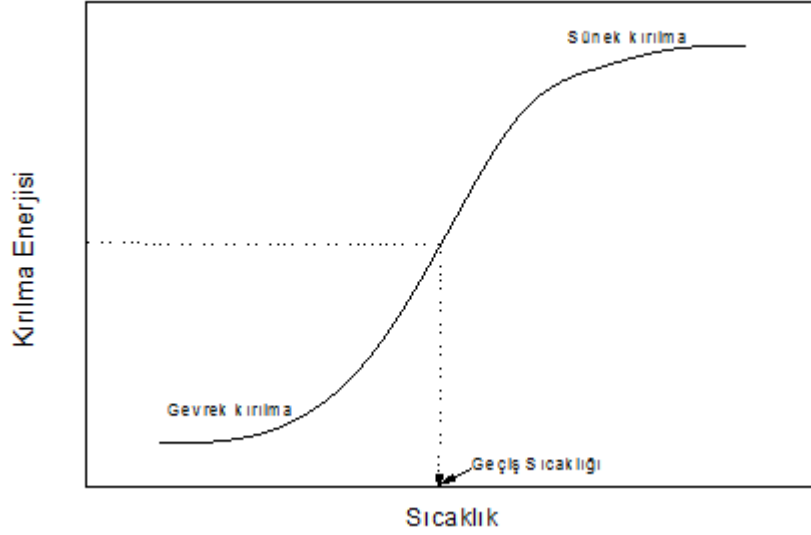
Ani darbelere karşı direnci iyi olan malzeme seçmek için malzemenin kopmaya karşı direnci darbe testiyle ölçülmelidir. Bu amaçla Charpy ve İzod darbe testleri geliştirilmiştir. Numuneler çentikli veya çentiksiz olabilir. V çentikli numuneler, malzemelerin çentiğin büyümesine karşı direncini iyi ölçer.

Testte h_0 yüksekliğinden bırakılan ağır sarkaç yarım yay şeklinde sallanarak numuneye çarparak kırar ve daha sonra en düşük h_f yüksekliğine erişir. Sarkacın başlangıç ve son yükseklikleri bilindiğinde potansiyel enerji farkı hesaplanabilir. Bu fark numunenin kırılması sırasında emilen darbe enerjisidir. Malzemelerin ani darbelere dayanımı tokluğuyla doğrudan ilişkilidir.



Şekil 29. Charpy ve İzod Darbe Test Düzenegi

Yüksek sıcaklıklarda malzemenin kopmasını sağlamak için büyük bir emilme (absorbsiyon) enerjisi gereklidir. Hâlbuki düşük sıcaklıklarda malzeme daha az enerji ile kopar. Yüksek sıcaklıklarda malzeme yoğun şekil değiştirmeli sünek bir davranış gösterir ve numune kopmadan önce gerilir. Düşük sıcaklıklarda, malzeme gevrektir ve kopma noktasında çok az şekil değişimi gözlenir. Geçiş sıcaklığı, malzemenin sünek kopmadan gevrek kopmaya geçiş sıcaklığıdır.



Şekil 30. Geçiş Sıcaklığının Belirlenmesi İçin Elde Edilen Sıcaklık-Kırılma Enerjisi Diyagramı

Kullanım sırasında ani darbeye maruz kalabilecek malzeme, malzemeyi kuşatan sıcaklığın altında bir geçiş sıcaklığına sahip olmalıdır. Malzemelerin hepsinde farklı geçiş sıcaklığı söz konusu değildir. HMK metaller belirgin geçiş sıcaklığına sahipken, YMK metaller belirgin geçiş sıcaklığına sahip değildir. YMK metaller sıcaklık düştükçe kademeli ve yavaşça azalan enerjili yüksek emme enerjisine sahiptir.

Kötü işçilik, imalat ve tasarımın neden olduğu çentikler, gerilimlerin yoğunlaşmasına neden olur ve malzemenin tokluğunu azaltır.

6.3. Sertlik Testi

Sertlik testinde sert bir nesne malzeme yüzeyine batırılmak istendiğinde malzemenin gösterdiği direnç ölçülür. Bunun için çeşitli sertlik testleri kullanılmaktadır.

Statik Yük Kullanılarak Yapılan Sertlik Ölçme Yöntemleri

- 1) Rockwell Sertlik Ölçme Metodu (Statik)
- 2) Brinell Sertlik Ölçme Metodu (Statik)
- 3) Vickers Sertlik Ölçme Metodu (Statik)

Dinamik Yük Kullanılarak Yapılan Sertlik Ölçme Yöntemleri

- 1) Shore Skleroscope (Dinamik)
- 2) Paldi Çekici (Dinamik)

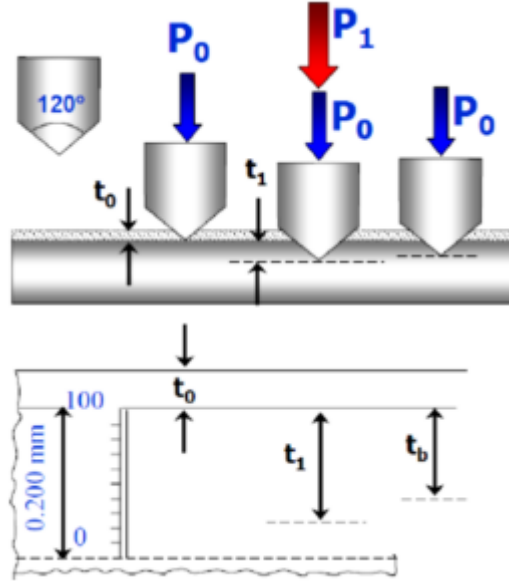
Mikro ve Nanosertlik Ölçme Yöntemleri

- 1) Mikrosertlik Ölçme Yöntemleri
- 2) Nanosertlik Ölçme Yöntemleri

a) Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemleri

Rockwell sertlik deneyi (RSD), yapılmasının çok kolay olması ve özel bir ustalık gerektirmemesinden dolayı metallerin sertlik ölçümünde en yaygın kullanılan metottur. Rockwell sertliği, batma derinliğine karşı gelen birimsiz bir sayıdır. Batıcı uç, konik uçlu veya bilye şeklindedir. Yumuşak malzemeler bilye batıcı uç ile ölçülür Çok sert malzemeler elmas konik uç ile ölçülür.

Bu yöntemde batma derinliği ölçüleceği için yüzey pürüzlülüğü sonuçları etkileyebilir. Bu sakıncayı gidermek için önce batıcı uç küçük bir yük (P_0 =ön yük) malzemeye daldırılarak alet sıfır düzeyine ayarlanır. Daha sonra toplam yüke tamamlanacak şekilde ana yük (P_1) uygulanır. Son olarak ana yük (P_1) kaldırılır (Şekil 4). Meydana gelen kalıcı izdeki derinlik artışı bulunarak mevcut göstergeden Rockwell sertlik değeri okunur.



Şekil 31. Rockwell Sertlik Ölçümünün Şematik Gösterimi

$$HRx = 130 - \frac{\Delta h}{0.002}$$

$$\Delta h = (130 - HRx) \times 0.002$$

$$\Delta h = (130 - 70) \times 0.002 = 0.12 \text{ m}$$

Birçok Rockwell ölçüm metodu vardır (Rockwell A, B, C, T, I, H, K...). Bunların içerisinde en çok Rockwell B ve Rockwell C'dir.

Rockwell B: Ana yük Rockwell B (HRB) için ana yük 100 kg, batıcı uç olarak 1/16" sertleştirilmiş çelik bilye kullanılır. Rockwell B'de sertlik skalası 130 eş parçaya bölünmüştür. Yumuşak çelik, bakır alaşımları, alüminyum alaşımları gibi malzemelerin sertliklerinin ölçümünde kullanılır.

Rockwell C: Rockwell C (HRC) sertlik ölçümü içinse ana yük 150 kg ve batıcı uç olarak elmas konik uç (tepe açısı 120°) kullanılır. Rockwell C'de ise 100 eş parçaya bölünmüştür. Sertlik değeri verilirken, setliği ölçülecek parça yüzeyinden en az 3 ölçüm alınmalıdır. Böylece malzemenin sertlik değeri bu üç ölçümün ortalaması alınarak ifade edilmelidir. Alınan ölçüm noktalarının arasındaki en az mesafe çıkan iz çapının üç katı olmalıdır.

Tablo 3. Rockwell Sertlik Skalaları

Sembolü	Batıcı Uç	Büyük Yük Kgf.	Tipik Kullanma Yerleri
B	1.6 mm (1/16 inç) bilya	100	Bakır alaşımları, yumuşak çelikler, alüminyum alaşımları, temper döküm vs.
C	Elmas konik uç	150	Çelik, sert dökme demirler, perlitik temper döküm, titan, derin olarak yüzeyi sertleştirilmiş çelik ve Rockwell B değeri 100'den daha fazla olan diğer malzeme
A	Elmas konik uç	60	Sert metaller, ince çelik ve yüzeyi ince tabaka halinde sertleştirilmiş çelik
D	Elmas konik uç	100	İnce çelik ve orta kalınlıkta yüzeyi sertleştirilmiş çelik ve temper döküm
E	3.2 mm (1/8 inç) bilya	100	Dökme demir, alüminyum ve magnezyum alaşımları, yumuşak ince sac metaller
F	1.6 mm (1/16 inç) bilya	60	Tavllanmış bakır alaşımları, yumuşak ince sac metaller
G	1.6 mm (1/16 inç) bilya	150	Fosforlu bronz berilliyumlu bakır temper dökümler

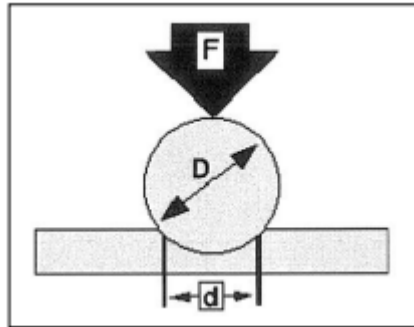
Rockwell sertlik değerinin bulunmasında kullanılan formüller;

$$\left. \begin{array}{l} RSD - A = \\ RSD - C = \\ RSD - D = \end{array} \right\} 100 - 500t \quad \text{ve} \quad \left. \begin{array}{l} RSD - B = \\ RSD - F = \\ RSD - G = \\ RSD - E = \end{array} \right\} 130 - 500t \quad \text{şeklindedir.}$$

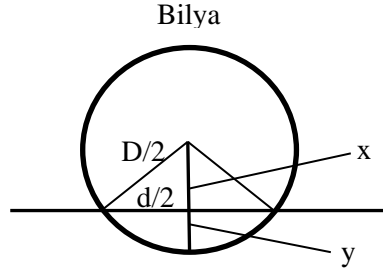
Burada t batıcı uçun batma derinliği (mm) dir.

b) Brinell Sertlik Ölçme Yöntemleri

$\phi 2.5$ mm, $\phi 5$ mm, $\phi 7.5$ mm, $\phi 10$ mm sertleştirilmiş çelik bilyalar, sertliği ölçülecek malzeme üzerine seçilen bir yük altında batırılır. Oluşan izin çapı ölçülerek sertlik değeri belirlenir.



Şekil 32. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi



Şekil 33. Brinel Sertlik Ölçümünde İzin Geometrik Şekli

Geometrik büyüklükler;

$$(D/2)^2 = x^2 + (d/2)^2$$

$$x = \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

$$y = \frac{D}{2} - \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2}$$

Kürenin Yüzey Alanı:

$$A = 4\pi r^2 = \pi d^2$$

$$\frac{D}{2} \text{ gömülürse} \quad \frac{\pi D^2}{2}$$

$$\frac{D}{2} - \frac{\sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad T_A$$

$$T_A = \frac{\pi D}{2} \left(\frac{D}{2} - \frac{D^2 - d^2}{2} \right)$$

$$BSD = \frac{F}{T_A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ kPa/mm}^2$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu bağıntıda yer alan F uygulanan yükü (kg), D bilye çapını (mm) ve d ise iz çapını (mm) gösterir. Standart deney koşullarında çapı 10 mm olan bilye kullanılır. Yük, malzemenin cinsine göre seçilir ve uygulama süresi 10-15 saniye arasında değişir. Ancak bazı durumlarda çapları 10 mm'den daha küçük olan (örneğin 1,25, 2,5 ve 5,0 mm) bilye biçimindeki uçlarda kullanılır. Malzemenin üzerine uygulanacak yük değeri sertliği ölçülecek malzemenin cinsine ve bilye çapına göre seçilmektedir. $d/D = 0,20 - 0,70$ oranı

sağlandığı durumlarda uygulanan yük değeri doğru kabul edilir. Deney yükünün saptanmasında $F=CD^2$ bağıntısı kullanılır. Burada F deney yükü, C malzeme cinsine göre değişen yükleme derecesidir.

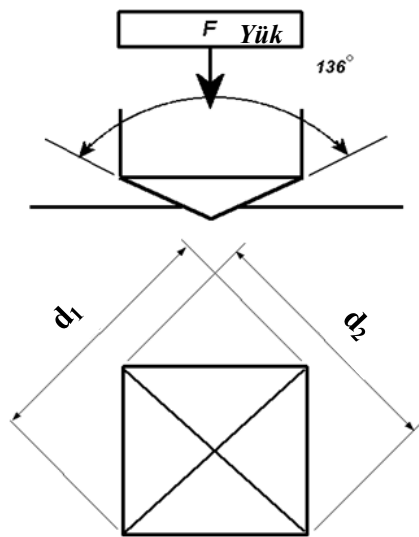
- Demir esaslı malzeme (Çelik, DD) (C=30)
- Cu ve Al alaşımlı malzeme (C=10)
- Yumuşak malzeme (C=5)

200BSD(HB) 5/250/30 şeklinde yapılan bir gösterimde D=5 mm küresel uç, F=250 kgf yük, 30 s tutularak yapılan ölçüm sonuç 200'dür. Metalik malzemelerde sertlik arttıkça çekme dayanımı da artar. Çeliklerin Brinell sertlik değeri ile çekme dayanımları arasındaki ilişki;

$$\sigma_{\text{ç}} (\text{kg/mm}^2) = 0.35 \times \text{BSD} (\text{kg/mm}^2)$$

c) Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Bu yöntemle yumuşak veya sert malzemelerin sertliği ölçülebilir. Çok ince tabakaların sertliği ölçülebilir. Bu yöntemde tepe açısı 135° olan kare tabanlı elmas piramit uç kullanılır. Bu uç, belli bir yük altında malzeme yüzeyine bastırılır. Yüzeyde kalan izin köşeleri ölçülür. Uygulanan yük, 1-120 kg arasında olabilir. Genel olarak 10-30 kgf yük uygulanır. Yükleme süresi 15 s. kadardır.



Şekil 34. Vickers Sertlik İzi

Vickers sertlik değeri;

$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2}$$

Bu eşitlikte, F uygulanan yük (daN), d ortalama iz çapı (mm) olup $d=(d_1+d_2)/2$ Őeklinindedir. 44.1 HV 0.2 Őeklindeki gösterimde ilk değer sertlik değerini, HV'den sonraki değer ise kgf veya daN cinsinden uygulanan yükü ifade etmektedir.

d) Mikro sertlik Deneyi

Mikro Vickers sertlik ölçüm yöntemi olarak da bilinir. Batıcı uç olarak iki tip uç vardır.

- 1) Vickers uç
- 2) Knoop uç

Çok küçük numunelerin ve ince sacların sertlikleri ve içyapıdaki tanelerin sertlikleri bu yöntemle ölçülebilir. Ayrıca karbürlenmiş, nitrürlenmiş ve boyanmış yüzeylerin ve yüzeydeki diğer tabakaların sertlikleri bu yöntemle ölçülebilir. 10 gf'dan 1 kgf'e kadar yükleme yapılabilir. Deneme ile izin görülebileceği en uygun yk seçilir.

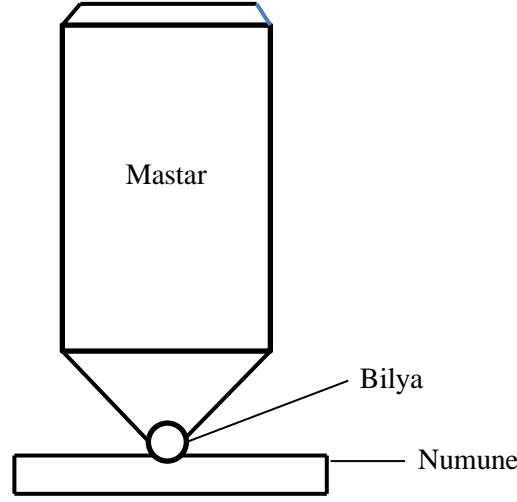
e) Shore Skleraskope

Sertlikten çok elastiklik ölçülür. Plastik ve kauçuk malzemelerde daha elverişlidir.

Yapılış Şekli: Numune zerine dik olarak tutulan cam bir boru içinden 20 pond'luk ucu yuvarlatılmış elmas takılı bir eki veya su verilmiş elik bilya 112 mm yükseklikten düşürülür. Çarpma sırasında malzemenin elastisite sınır büyüklüğüne göre çok küçük bir kalıcı iz olur. Enerjinin altta kalan kısmı çarpan bilyaya ya da uca geçer ve onu kinetik olarak sıçratır. Geriye sıçrayan bilya ulaştığı en yüksek noktada olur. Yükseklik 130 eşit parçaya ayrılmıştır. Numune sertleştikçe geri sıçrama yüksekliği artar. Sıçrama miktarı düşen cismin numuneye çarpmasından sonraki elastik enerji miktarıyla alakalı olup numunenin sertliğini ifade eder. Sertleştirilmiş ötektoid eliğin (%0.83 C içeren elik) Shore sertliği 100'dr.

f) Paldi Çekici

İstenilen büyüklükte parçanın sertliği ölçülebilir. Bir çeki vasıtasıyla yaklaşık 1000 kg'lık bir el çekici ile darbe uygulanır. Çekiyle vurulduğunda, bilya hem master hem de numune üzerinde iz bırakır. Master üzerinde bıraktığı izin çapı d_1 , numune üzerinde bıraktığı izin çapı d_2 olarak ölçülür. Formülde yerine yazılır.



Şekil 35. Paldi Çekicinin Uygulanışı

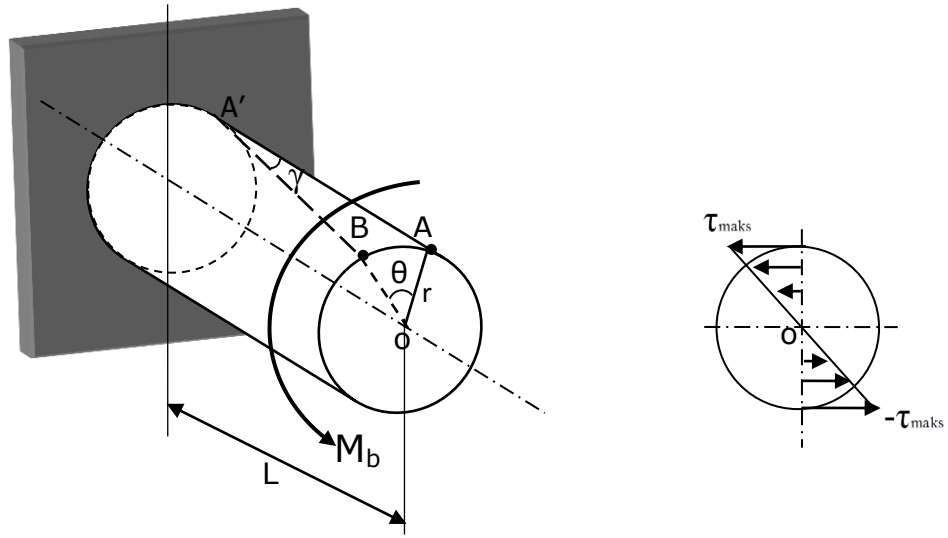
Paldi çekiciyle ölçülen sertlik değeri;

$$HP = HB \cdot \frac{D - \sqrt{D^2 - d_1^2}}{D - \sqrt{D^2 - d_2^2}}$$

şeklindedir. Bu eşitlikte, D bilya çapı (10 mm), d_1 master üzerindeki iz çapı (mm), d_2 numune üzerindeki iz çapı (mm), HB ise master sertliğidir.

6.4. Burulma Testi

Bir ucu ankastre L uzunluğunda r yarıçaplı bir çubukta, burulma momenti (M_b) etkisi ile, başlangıçta çubuk üzerindeki A noktası, B konumuna; A-A' lifi ise, A' noktası sabit olduğu için A'B şeklini alır. Bu durumda, A noktasının B noktasına hareketi sonucu, bu noktaların, çubuğun O merkezine göre konumları arasında taranan açı, burulma açısı (θ); A-A' lifi ve A'B lifi arasında oluşan açı, kayma açısı (γ) olarak ifade edilir. Çubuğun deformasyonu sırasında yüzeydeki liflerde eşit ve zıt yönde maksimum kayma gerilmeleri (τ_{maks}) oluşur. Kayma gerilmeleri, çubuk merkezine doğru gidildikçe azalır ve çubuk merkezinde sıfır değerini alır.



Şekil 36. Burulma Momentine Maruz Kalan Bir Çubuk

Kayma gerilmesi (τ), burulma momenti (M_b) ve burulma mukavemet momentinden (W_b) aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\tau = \frac{M_b}{W_b}$$

İçi dolu dairesel kesitlerde;

$$W_b = \frac{\pi d^3}{16}$$

Maksimum kayma gerilmesi (τ_{maks}), maksimum burulma momentinden (M_{maks}) hesaplanır:

$$\tau_{\text{maks}} = \frac{M_{\text{maks}}}{W_b}$$

Kayma açısı (γ); numune uzunluğu(L) ve numune yarıçapı($r=d/2$) bilindiğinde, burulma açısı (θ) radyan cinsinden aşağıdaki formüle yazılarak hesaplanılır.

$$\gamma = \frac{r}{L} \theta$$

Burulma açısı (θ);

$$\theta = \frac{M.L}{G.I_p}$$

şeklindedir. Burada $I_p = \pi d^4/64$ olarak alınabilir. Kayma modülü (G), elastik deformasyon bölgesinin lineer kısımda, kayma gerilmesi ve kayma açısından belirlenebilir.

$$G = \frac{\tau}{\gamma}$$

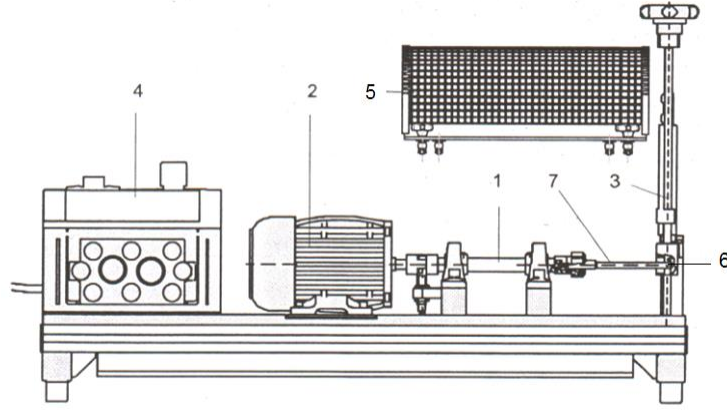
veya deney çubuğunun değerlerinden,

$$G = \frac{32.L.M}{\pi.\theta.d^4}$$

Burada, M, lineer elastik deformasyon aralığında tespit edilen burulma moment değerlerinden herhangi biri ve θ ise, buna karşılık gelen burulma açısı değeridir.

6.5. Yorulma Testi

Bir malzeme akma dayanımının altında tekrarlanan gerilmeye maruz bırakılır. Bu tekrarlı gerilme dönme, gerilme hatta bir titreşimin bir sonucu olabilir. Gerilme akma dayanımının altında olmakla beraber çok sayıda tekrarlanan gerilme uygulanmasından sonra metal kopabilir. Bu tarz kopma yorulma olarak adlandırılır.



Şekil 37. Yorulma Deney Düzenegi

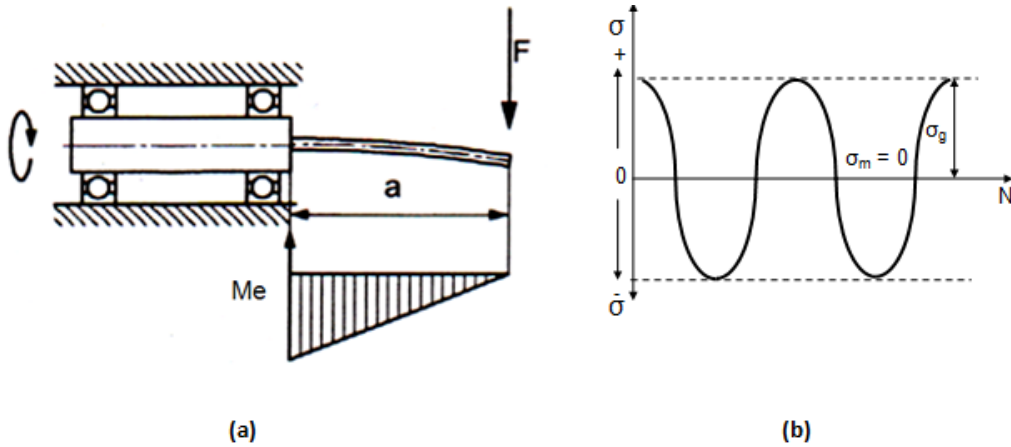
Yorulma ömrü: Bir malzemeye tekrarlı gerilme uygulandığında malzemenin ne kadar süreyle hizmet vereceğini bildirir.

Yorulma sınırı: Yorulma sınırı, tercih bir kriter olarak yorulma ile kopmanın asla olmadığı gerilmedir. Yorulma sınırında uygulanan gerilme (σ) ve devir sayısı (N) eğrisi paralel olur.

Yorulma dayanımı: Pek çok alüminyum alaşımı da içeren bazı malzemeler gerçek yorulma sınırına sahip değildir. Bu malzemeler için minimum yorulma ömrü belirlenebilir, bu durumda yorulma dayanımı, bu zaman periyodunda yorulmanın olmadığı yorulma dayanımının altındaki gerilmedir.

Yüzeydeki herhangi bir tasarım veya üretim hatası gerilmeleri yoğunlaştırır ve yorulma çatlaklarının oluşmasını teşvik eder.

Malzemenin sıcaklığı yükseldiğinde dayanım düşer ve yorulma ömrü sınırı azalır.



Şekil 38. Bir Ucundan F Kuvvetine Maruz Dönen Bir Çubukta Eğilme Momentinin Değişimi

Ortalama gerilme (σ_m);

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\ddot{u}} + \sigma_a}{2}$$

Gerilme genliği (σ_g);

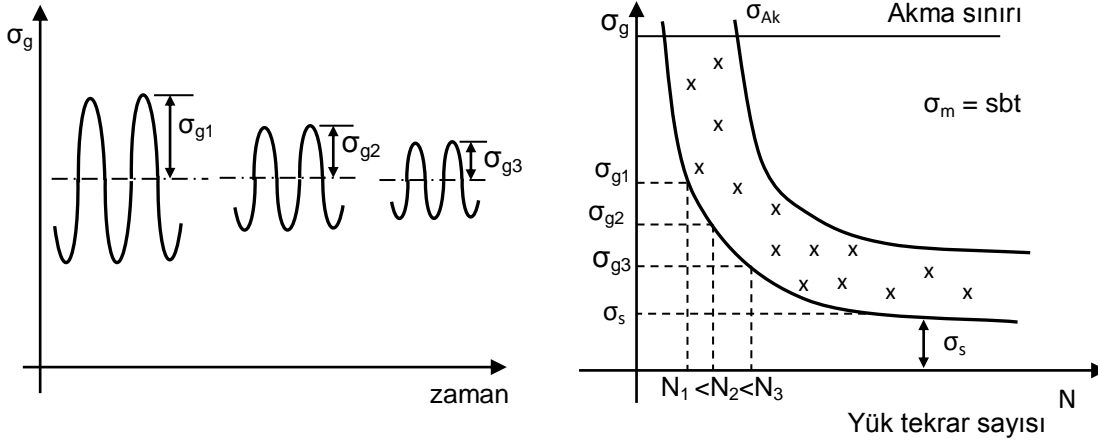
$$\sigma_g = \frac{\sigma_{\ddot{u}} - \sigma_a}{2}$$

Moment (Tork);

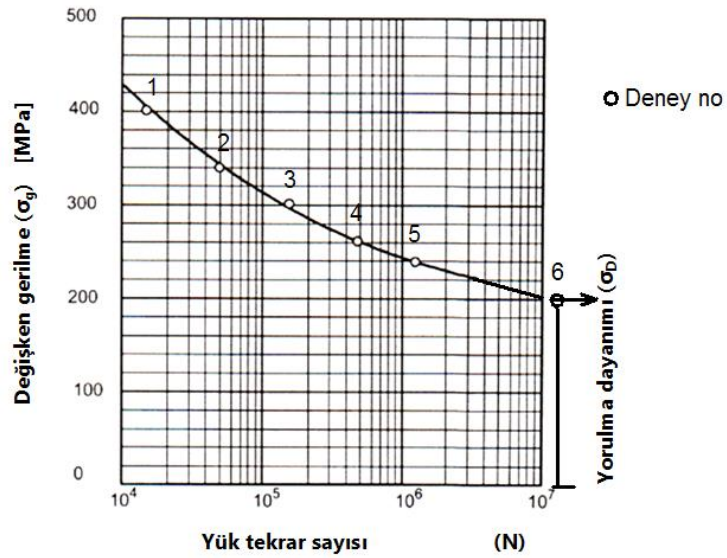
$$M = F \cdot a$$

Gerilme genliği (σ_g);

$$\sigma_g = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32 \cdot F \cdot a}{\pi d^3}$$



Şekil 39. Wöhler Eğrisinin Oluşumu



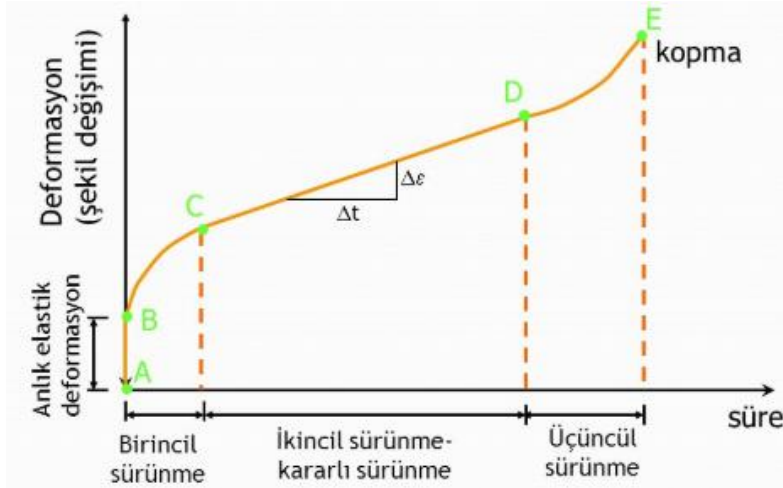
Şekil 40. C_k 35 Düşük Karbonlu Çelik Numune için Wöhler Eğrisi

6.6. Sürünme Testi

Malzemeye yüksek sıcaklıkta gerilme uygulanırsa, gerilme akma dayanımının altında olsa bile malzeme gerilebilir ve sonunda kopabilir. Yüksek sıcaklıktaki plastik şekil değiştirme **sürünme** olarak bilinir.

Malzemenin sürünme özelliklerini belirlemek için fırın içerisine yerleştirilen silindirik numuneye sabit gerilme uygulanır. Yüksek sıcaklıkta gerilme uygulanır uygulanmaz, malzemenin elastisite modülüne ve uygulanan gerilmeye bağlı olarak numune küçük bir miktar (ϵ_0) elastik olarak gerilir.

Yüksek sıcaklıklar metalde dislokasyonların tırmanmasını sağlar. Sürünme testi sırasında, gerinim veya uzama zamanın bir fonksiyonu olarak ölçülür ve sürünme eğrisi elde etmek için çizilir. Sürünmenin ilk aşamasında birçok dislokasyon engelden uzağa doğru tırmanır, kayar ve metalin şekillendirmesine katkıda bulunur. Sonunda dislokasyonların engellerden uzaklaştığı hız, diğer düzensizlikler tarafından dislokasyonları engelleme hızına eşitlenir. Bu ikinci ve düzenli aşama, sürünmeye neden olur. Sürünme eğrisinin düzenli kısmının eğimi sürünme hızını verir.



Şekil 41. Sürünme Testi için Deformasyon-Süre Eğrisi

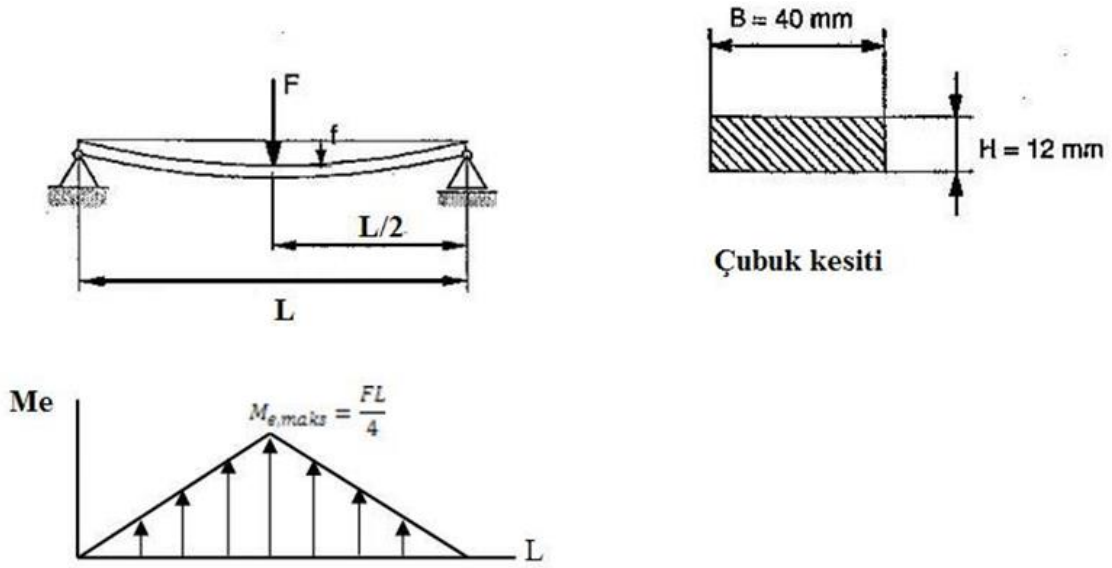
Sürünme hızı;

$$\text{Sürünme hızı} = \frac{\Delta \text{Gerilim}}{\Delta \text{Zaman}}$$

Sonunda üçüncü aşamada sürünme sırasında boyun verme başlar, gerilme artar ve numune kopma olana kadar artan bir hızda şekil değiştirir. Yüksek sıcaklık ve yüksek gerilme her ikisi de kopma zamanını kısaltır ve sürünme hızını yükseltir.

6.7. Eğme Testi

Eğilen çubuğa etkiyen yük ve elastik deformasyon arasındaki ilişkiyi gösterir.



Şekil 42. Eğilen çubuğa etki eden yük ve elastik deformasyon ilişkisi

Merkezden yüklü bir eğilme çubuğundaki sehim, F yükünün bir fonksiyonudur. Mesnetlerin aralığı L, kesit atalet momenti I ve elastisite modülü E alınırsa, sehim f aşağıdaki formül ile bulunur.

$$f = \frac{F.L^3}{48EI}$$

Düzlemsel atalet momenti I, B genişliğinde ve H yüksekliğine sahip dikdörtgen kesitli bir malzeme için aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$I = \frac{BH^3}{12}$$

Maksimum eğme gerilmesi ($\sigma_{e,maks}$), çubuğun merkezinde (ortasında) meydana gelir:

$$\sigma_{e,maks} = \frac{M_{e,maks}}{W_b}$$

$$M_{e,maks} = \frac{FL}{4} \quad \text{ve} \quad W_b = \frac{BH^2}{6} \quad \text{Bu } F'_{maks} \text{ verir.}$$

Bu durumda;

$$F_{maks} = \frac{2\sigma_{e,maks}.B.H^2}{3.L}$$

7. FAZ DİYAGRAMLARI

Faz: İç yapının atomsal boyutların üzerinde kimyasal ve yapısal olarak homojen ve özellikleri birbirinden farklı olan bölümlerinden her birine **faz** adı verilir. Faz kavramı sadece fiziksel durum (katı, sıvı veya gaz) ile eş anlamlı değildir. Örneğin metal alaşımlarında aynı anda birden fazla katı faz mevcut olabilir.

Bileşen: Bir alaşımını oluşturan kimyasal elementlere o alaşımın bileşenleri adı verilir. Faz içerisindeki bileşenlerin derişikliği genellikle ağırlık yüzdesi olarak verilir.

Saf metaller tek fazlıdır, iç yapıları çok taneli olsa bile, taneler farklı olmadığından ayrı faz sayılmaz. Çeliklerde karakteristik bir iç yapı olan perlit ise ferrit ve sementit fazlarının lamelli olarak düzenlenmesiyle oluşur.

Serbestlik Derecesi: Fazların sayısı sabit kalmak koşuluyla birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilecek durum büyüklüklerinin sayısıdır.

Gibbs Faz Kanunu: Dengede olan çok fazlı bir sistem için aşağıdaki gibi gösterilir.

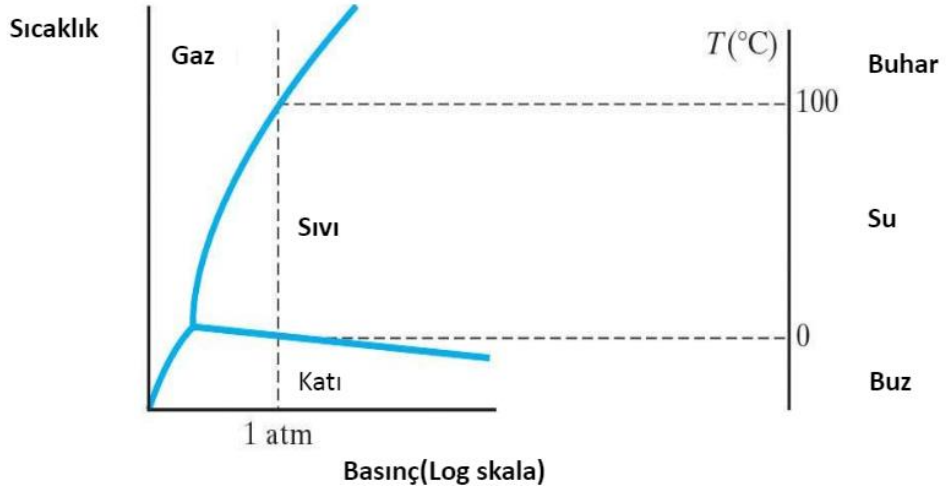
$$S=B-F+2$$

Bu eşitlikte, B bileşen sayısı, F faz sayısı ve S serbestlik derecesidir.

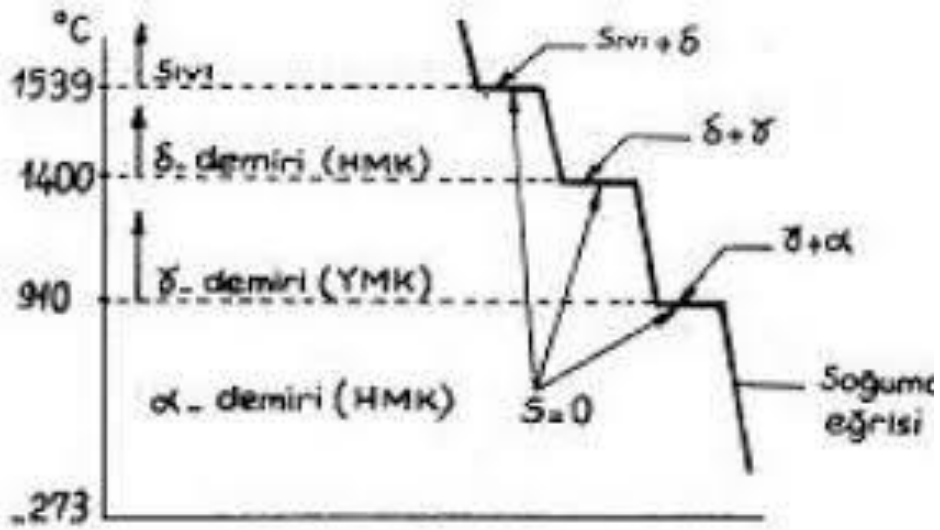
Teknikte genelde atmosfer basıncında çalışıldığından basıncın sabit olması durumunda Gibbs Faz Kanunu'ndan serbestlik derecesinin sayısı 1 azalır.

$$S=B-F+2$$

Fazların oluşumunda ve dönüşümünde ana etken enerji içeriğidir. Bu içeriği değiştiren üç ana etken; sıcaklık, basınç ve bileşimdir. Faz diyagramları yardımı ile belirli bir malzeme sisteminde sıcaklık ve bileşime bağlı olarak oluşacak fazların türleri, bileşimleri ve miktarları hatta iç yapıları da belirlenebilir.



Şekil 43. Saf Su için Faz Diyagramı

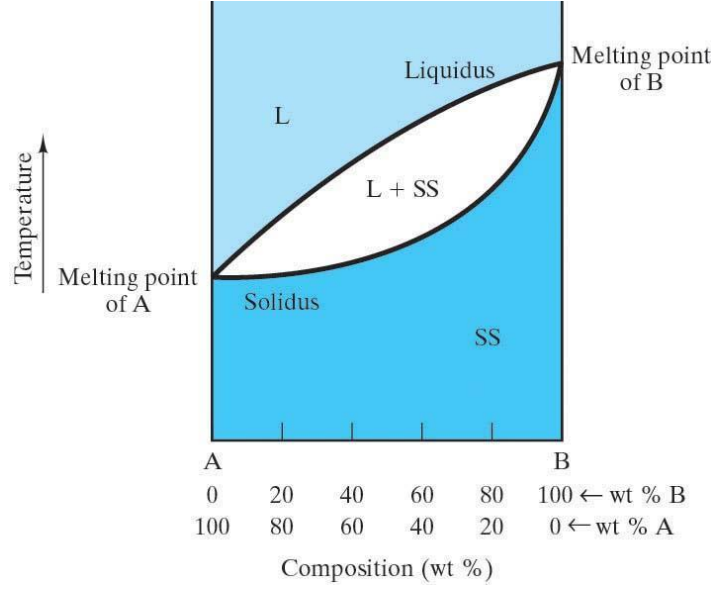


Şekil 44. Saf Demir için Faz Diyagramı

Faz diyagramları yardımıyla bir maddeye ait faz durumları, sıcaklık T , basınç P ve derişiklik C 'ye bağlı olarak belirlenebilir. Malzeme biliminde en yaygın olarak yararlanılan faz diyagramları sabit atmosfer basıncı için alaşımlara ait faz diyagramlarıdır. İki bileşenli olan faz diyagramlarında yatay eksenle bileşim (derişiklik), düşey eksenle ise sıcaklık bulunmaktadır.

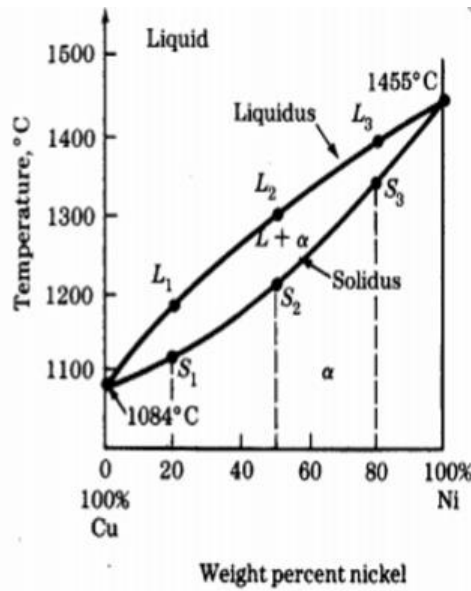
İkili Diyagramlara Örnekler

a) **Katı Durumda Tam Çözünürlük:** Diyagramda görüldüğü üzere A ve B bileşenleri sürekli olarak, yani her oranda tek fazlı bir yapı oluşturmaktadır. Yani düşük sıcaklıklarda her iki atom ortak bir kafes içinde birbiri içinde her oranda çözünmektedir. Buna tam çözünürlük denilir. Bunun dışında yüksek sıcaklıklarda sıvı fazı ve ayrıca katı ile sıvı fazların birlikte bulunduğu bir bölge vardır.



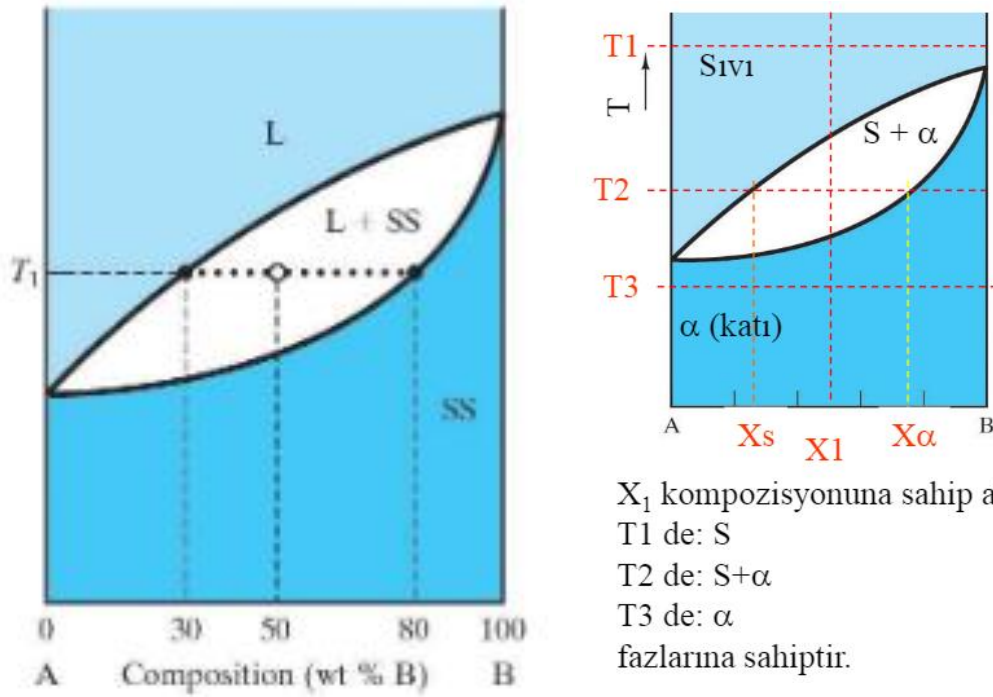
Şekil 45. Tam Çözünürlük Durumunda Faz Diyagramı

Tam çözünürlük alaşımlarda yaygın bir durum değildir. Tam çözünme durumuna verilebilecek bir örnek Cu ve Ni alaşımıdır.



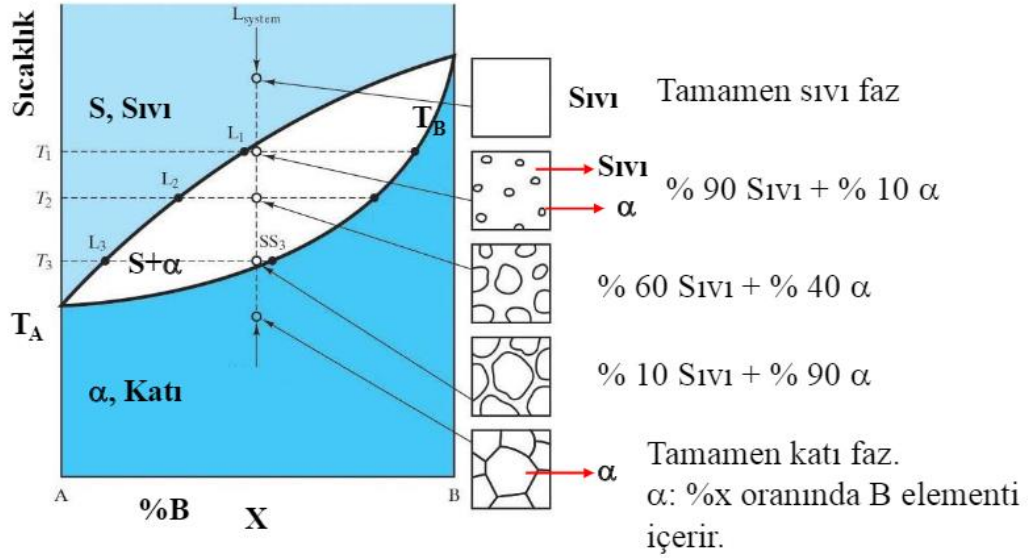
Şekil 46. Cu-Ni Faz Diyagramı

Faz diyagramları yardımıyla iki fazın birlikte bulunduğu bölgede belirli bir sıcaklıktaki fazların derişikliklerini bulmak mümkündür. Aşağıdaki diyagramda da verildiği gibi önce iki fazlı bölgede liküdüs ve solidüs eğrilerini kesecek şekilde bir doğru çizilir. Bu yatayın eğrileri kestiği noktalar yukarıda da görüldüğü gibi fazların bu sıcaklıktaki derişikliklerini verir (Bağ çizgisi kuralı).



Şekil 47. Tam Çözünürlük Durumunda Fazlar

Aşağıdaki diyagramda ise tam çözünürlük için belirli bir bileşimdeki sistemin sıvıdan itibaren soğurken iç yapısının oluşumu incelenmiştir. Atomların amorf düzende bulunduğu sıvı faz soğumaya başladığında sıvı içinde kristaller çekirdeklenmeye ve taneler oluşmaya başlar (KÇ1). Soğutulma işlemine devam edildiğinde ve solidüs eğrisine ulaşıldığı anda katılaşma tamamlanmış ve taneli bir yapı ortaya çıkmış olur.

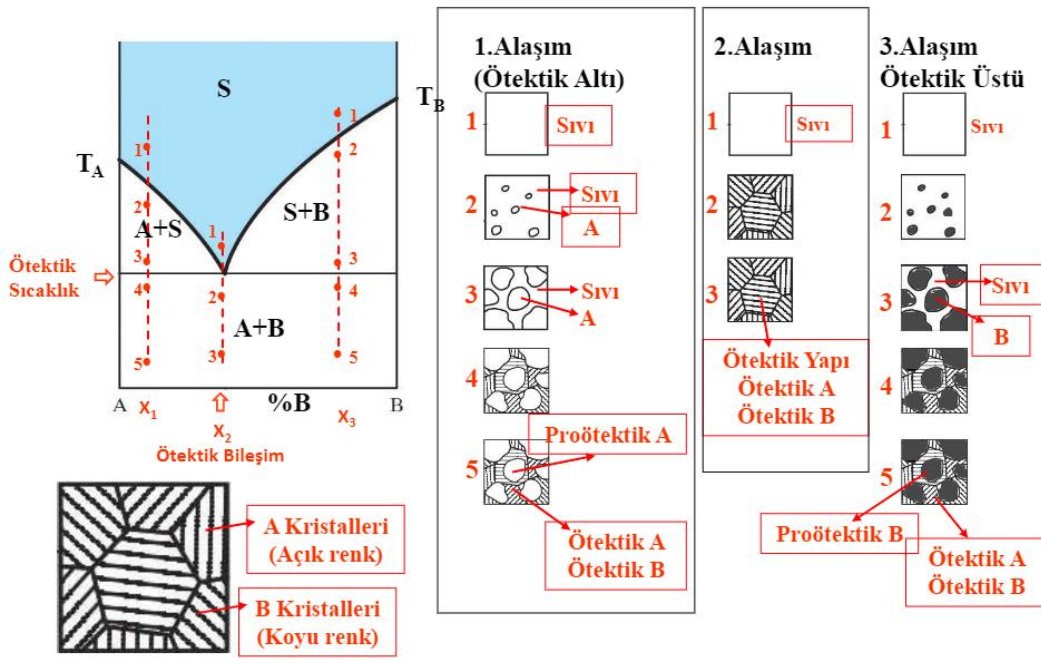


Şekil 48. Tam Çözünürlük Durumu

b) Çözünmezlik Durumunda Ötektik Reaksiyon

Aşağıdaki diyagram A ve B atomlarına ait kafeslerin diğer atomu kendi kafesine almadığı (tam çözünmezlik) durumunu göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda iç yapıda bu iki faz ayrı ayrı bulunmaktadır.

Diyagramda adımı veren **ötektik nokta**, soğuma sırasında sıvı fazın sabit sıcaklıkta iki katı faza dönüştüğü noktadır. Bu noktanın sıcaklığına **ötektik sıcaklık**, bu bileşimine de **ötektik bileşim** denir. Her iki fazın bir arada oluşması nedeniyle, ötektik iç yapılar ince taneli iç yapılardır ve fazlar sıkı istiflenmiş olarak yan yana bulunurlar.



Şekil 49. Hiç Çözünmemeye Durumunda Ötektik Reaksiyon

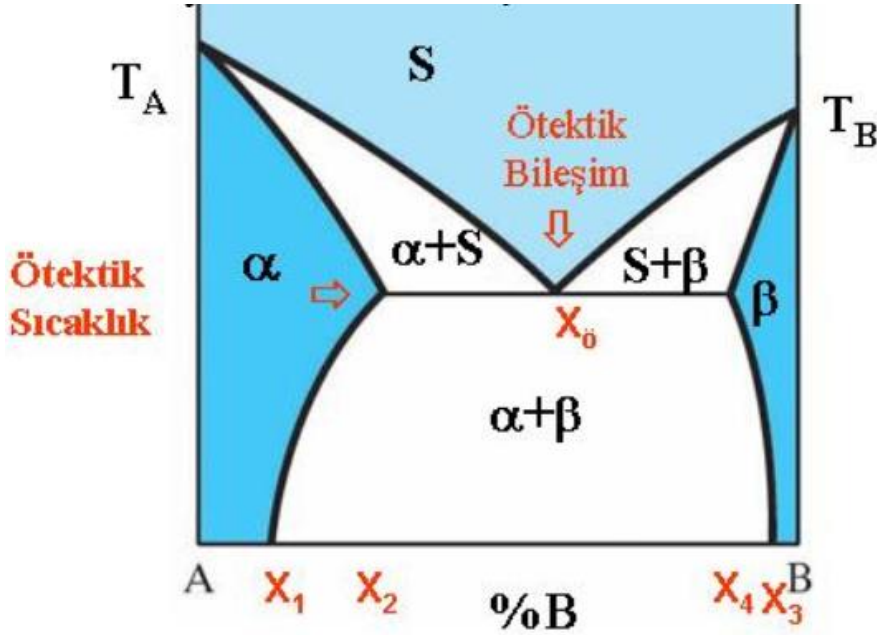
c) Sınırlı Çözünürlük Durumunda Ötektik Reaksiyon

Malzemelerde tam çözünmezlik durumuna değil, daha çok sınırlı çözünürlük durumuna rastlanır, yani her iki bileşen belirli oranlarda diğer elementi kafesi içinde çözebilir. Aşağıda sınırlı çözünürlük için bir ötektik diyagramın iç yapısı verilmiştir. Burada α -fazı, A atomunca zengin olup içinde belli bir miktar B atomu bulunan bir katı çözeltilidir. β fazı ise B atomunca zengin olup içinde belirli bir miktar A atomu çözünmüştür.

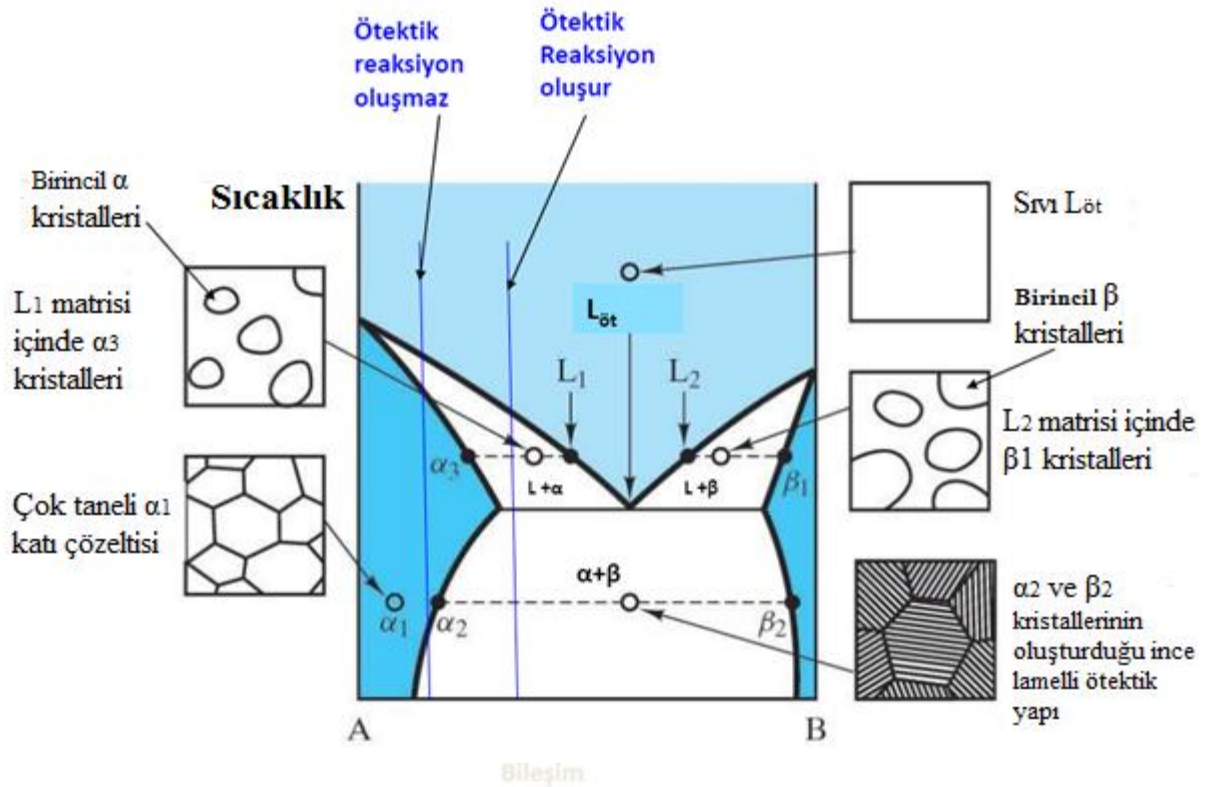
Diyagramda görüldüğü gibi ötektik bileşimde ve sıvı fazdan soğutulularak elde edilen iç yapı, tam çözünmezlik durumunda farklı değildir. Ancak bu noktanın sağına ya da soluna gittiğimizde sıvı içinde yukarıda da anlatıldığı gibi birincil kristalleşmeler olduğu görülür. Bazı bileşimlerde ötektik reaksiyon görülmeyebilir ve oda sıcaklığında doğrudan α -fazın bölgesine inildiğinde tek fazlı çok taneli bir katı çözeltili söz konusudur, aynı şey β fazı için de geçerlidir.

- Alaşım sistemlerinin çoğunda görülür.
- B elementi A'nın içerisinde sınırlı olarak çözünebilir.
- Oda sıcaklığında X_1 kadar, sıcaklık arttıkça (ötektik sıcaklıkta) X_2 kadar çözünebilir.
- Sıcaklıkla ısıl aktivasyon artar ve boşluk miktarı artar.
- Çözeltiye giremeyen yabancı atomlar kendilerinin çoğunlukta olduğu yeni atom düzeni (faz) oluştururlar.

- A'nın çoğunlukta olduğu katı çözelti α -fazını oluşturur, B'nin çoğunlukta olduğu katı çözelti β fazını oluşturur.
- Fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı olan iki katı faz α ve β aynı yapıda birarada bulunabilir



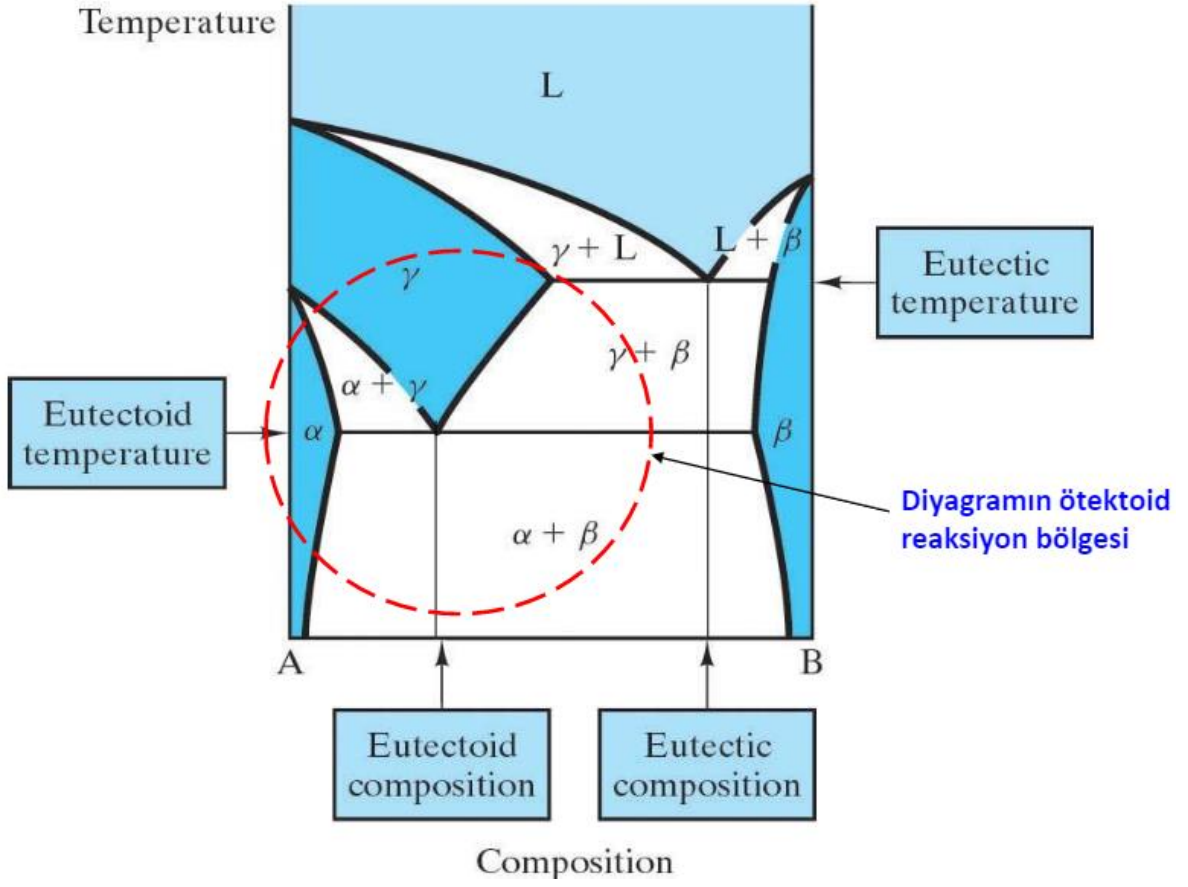
Şekil 50. Sınırlı Çözünme Durumunda Ötektik Reaksiyon



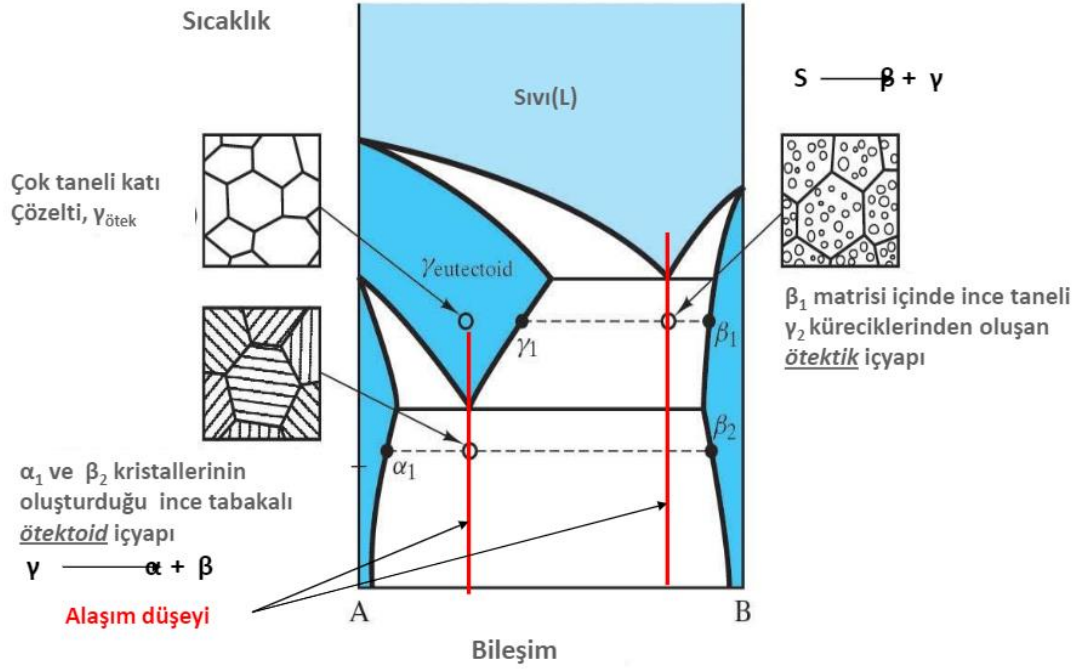
Şekil 51. Sınırlı Çözünme Durumunda Ötektik Reaksiyon Ait Fazlar

d) Ötektoid Reaksiyon

Ötektik reaksiyona benzer şekildedir. Burada bir katı çözeltili sabit sıcaklıkta iki farklı faza ayrılmaktadır (Ötektikte sıvı faz iki katı faza ayrışır).



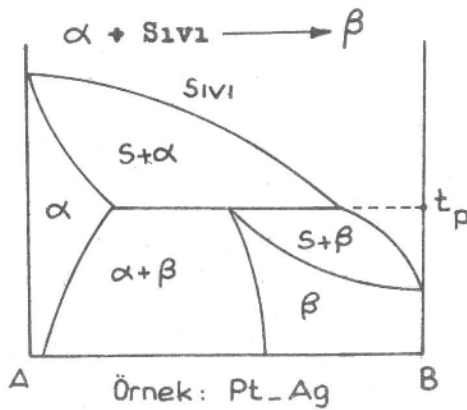
Şekil 52. Ötektoid Reaksiyon



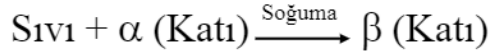
Şekil 53. Ötektoid Faz Dönüşümü Reaksiyonu

e) Peritektik Reaksiyon

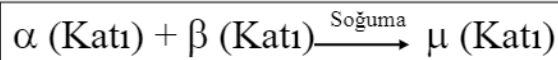
Kısmi çözünürlük gösteren alaşım sistemlerinde elementlerin ergime sıcaklıklarının çok farklı olması durumunda meydana gelen faz reaksiyonlarıdır. Sabit bir sıcaklıkta biri sıvı olan iki faz reaksiyona girerek yeni bir katı faz oluşturur.



Peritektik reaksiyon:



Peritektoid reaksiyon:



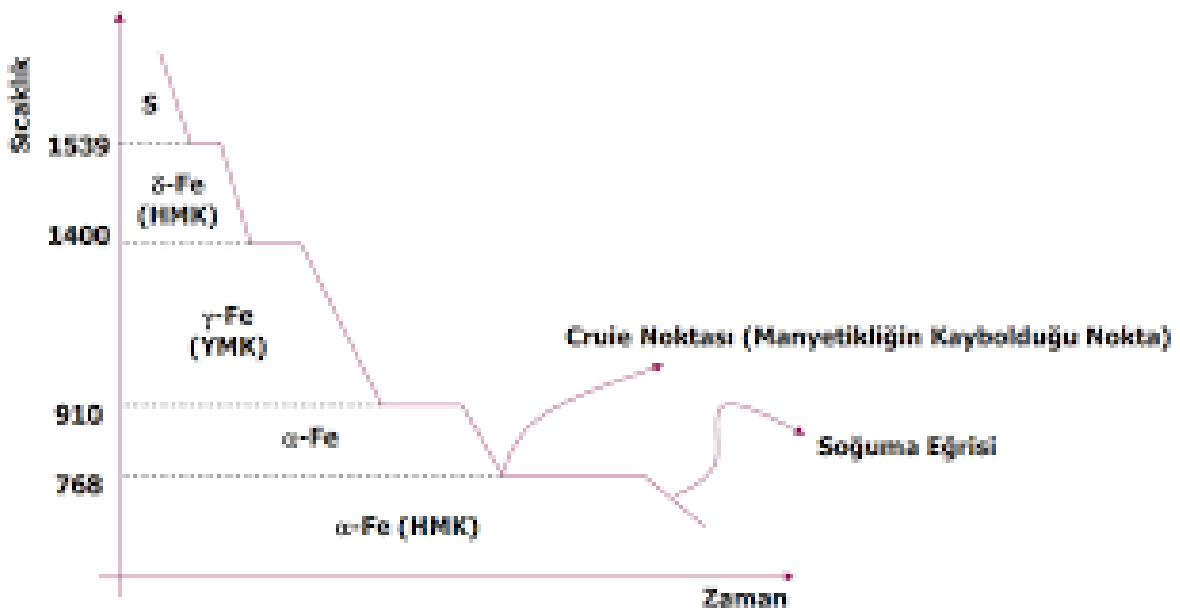
Şekil 54. Peritektik ve Peritektoid Faz Dönüşümü

f) Peritektoid Reaksiyon

Peritektoid reaksiyona benzer şekilde iki faz reaksiyona girerek yeni bir katı faz oluşturur (Peritektikte başlangıç fazlarından bir sıvıdır).

g) Allotropi

Bileşimi sabit kalan malzemenin sıcaklıkla birlikte kafes yapısının değişmesine allotropi denir.

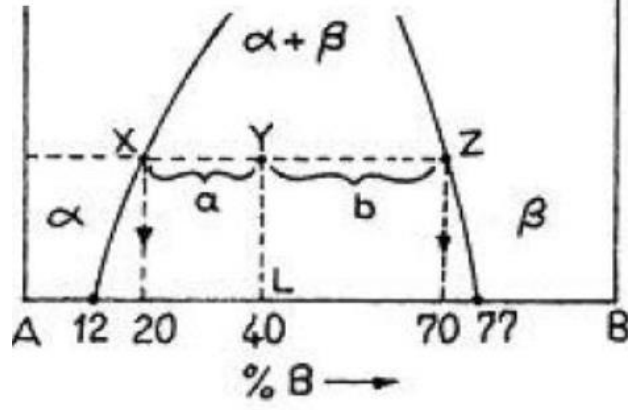


Şekil 55. Saf Demire Ait Faz Diyagramında Sıcaklıkla Kafes Yapısının Değişimi

Fazların Ağırlık Oranının Hesaplanması (Kaldıraç Kuralı)

Faz diyagramları yardımıyla herhangi bir bileşim ve sıcaklık için elde edilebilen bilgiler şunlardır:

- Hangi fazların bulunduğu
- Fazların bileşimleri ve
- Fazların ağırlıklarındır.



Şekil 56. Faz Ağırlık Oranının Hesaplanması

$$\% \alpha = \frac{b}{a+b} \times 100 = \frac{70 - 40}{70 - 20} \times 100 = 60$$

$$\% \beta = \frac{a}{a+b} \times 100 = \frac{40 - 20}{70 - 20} \times 100 = 40$$

Örneğin yukarıdaki diyagramda verilen sıcaklık ve bileşim (%40 B) için bağ çizgisi çizilirse, α ve β fazları bulunmaktadır. Bağ çizgisinin iki ucundan inilen düşeyler bu fazların bileşimlerini vermektedir (%20 ve %77). Bu fazların ağırlık yüzdeleri ise kaldıraç kuralı ile kolaylıkla hesaplanır.

Demir-Karbon Denge Diyagramı

Demir-karbon alaşımının içinde; maks. %2'ye kadar karbon %1 mangan %0,5 silisyum %0,05'den az kükürt ve fosfor varsa bu malzemeye **çelik** denir. Karbon (C) oranı %2'den fazla olan demir-karbon alaşımına **dökme demir** denir.

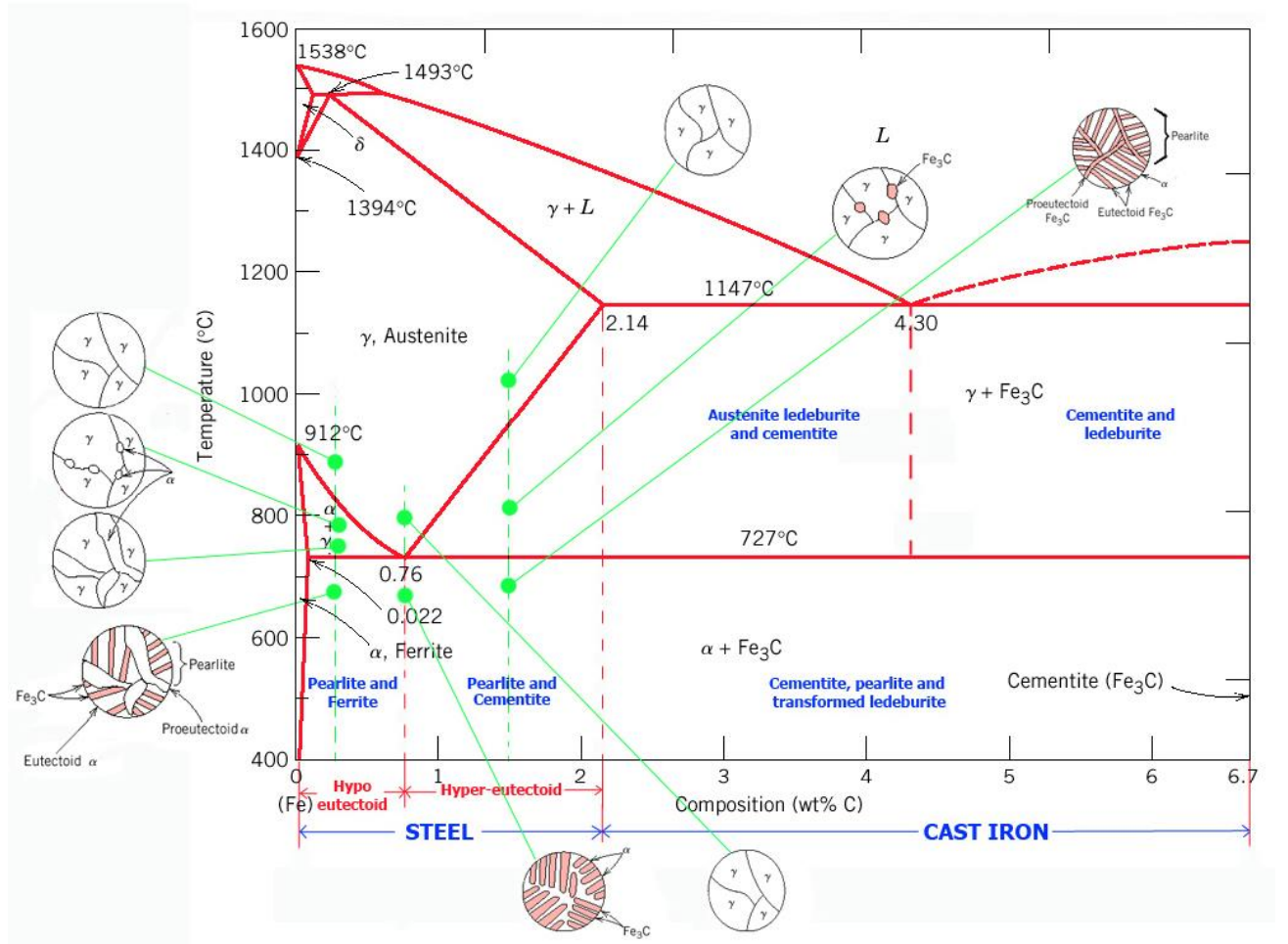
- Yatay eksen, erimiş demir içinde %C oranını,
- Düşey eksen, gittikçe artan sıcaklığı göstermektedir.
- Yatay ekseninde karbon en fazla %6,67'ye kadar olabilmektedir.
- Tam bu noktada iç yapı %100 sementit Fe_3C 'dir.
- %4.5 C'dan sonraki yapının teknolojik önemi yoktur.
- Düşey ekseninde de sıcaklık arttıkça, yatay ekseninde karbon oranı değiştikçe her bölgede içyapılar değişmektedir.

Üç önemli temel yapı mevcuttur. Bunlar; ferrit, östenit ve sementit yapılarıdır.

Ferrit (α) yapı: Bu yapı, α -demiri olarak bilinir. Kristal kafes yapısı HMK şeklindedir. C atomları Fe atomları arasında az miktarda yer alan atomlar olarak bulunur. Demir-karbon denge diyagramının en yumuşak yapısıdır. Tokluğu düşüktür, uzaması %40'a kadar varır.

Östenit (γ) yapı: Demirin yüzey merkezli kübik halidir. γ -demiri olarak bilinir. İç yapısı şekildeki gibidir. Tokluğu yüksektir. Sertliği 40 RC civarındadır. C'nun yapı içerisinde katı arayer atomu olarak çok miktarda bulunduğu yapıdır.

Sementit (Fe_3C) yapı: Demir karbid olarak bilinir. Maksimum %6,67 C ihtiva eder. Oldukça sert ve gevrek bir yapısı vardır. Çekme mukavemeti düşük ama basma mukavemeti yüksektir. Çeliğin sert olmasını sağlar.



Şekil 57. Demir-Karbon Denge Diyagramı

a) Peritektik Dönüşüm ($\delta + S \leftrightarrow \gamma$)

%0.18 C içeren alaşımsız çeliği 1492 °C sıcaklıkta bir sıvı ve katı fazdan bir katı faz oluşturduğu dönüşümdür.

b) Ötektik Dönüşüm ($S \leftrightarrow \gamma + Fe_3C$)

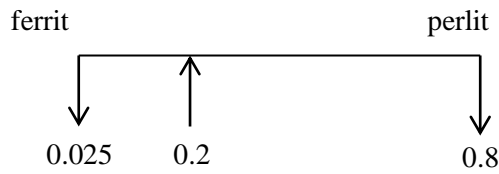
%4.3 C içeren çeliğin 1130 °C sıcaklıkta bir sıvı fazdan iki katı faz oluşturduğu dönüşümdür.

c) Ötektoid Dönüşüm ($\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$)

%0.8 C içeren çeliğin 723 °C sıcaklıkta bir katı fazdan iki katı faz oluşturduğu dönüşümdür.

- Perlit \rightarrow Ferrit + Fe_3C
- δ demiri katı olup HMK yapı
- γ demiri katı olup YMK yapı
- α demiri HMK yapıdadır.

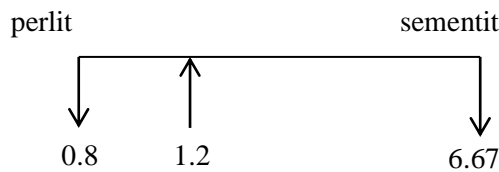
Örnek: %0.2 C içeren çeliğin oda sıcaklığında faz oranlarını bulunuz.



$$\% \text{ ferrit} = \frac{0.8 - 0.2}{0.8 - 0.025} \times 100 = \%77.42$$

$$\% \text{ perlit} = \frac{0.2 - 0.025}{0.8 - 0.025} \times 100 = \%22.58$$

Örnek: %1.2 C içeren çeliğin oda sıcaklığında faz oranlarını bulunuz.



$$\% \text{ sementit} = \frac{1.2 - 0.8}{6.67 - 0.8} \times 100 = \%6.78$$

$$\% \text{ perlit} = \frac{6.7 - 1.2}{6.7 - 0.8} \times 100 = \%93.22$$

Isıl İşlem

Isıl işlemlerin yapılma nedenleri;

- 1) Talaşlı işlenebilme özelliği iyileştirilebilir (yumuşatma, tane irileştirme tavlıyla)
- 2) Dayanım artırılıp azaltılabilir (sertleştirme, normalleştirme, yumuşatma tavlı)
- 3) Soğuk şekil vermenin etkisi yok edilebilir (rekristalizasyon, normalleştirme tavlı)
- 4) Mikro segregasyonlar ortadan kaldırılabilir (difüzyon tavlı)
- 5) Tane büyüklüğü değiştirilebilir (normalleştirme, rekristalizasyon, iri tane tavlı)
- 6) İç gerilmeler azaltılabilir (gerilme giderme)
- 7) Belirli iç yapılar elde edilebilir (normalleştirme, yumuşatma, sertleştirme)

Tavlama: Malzeme 550-650 °C'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta belli bir süre bekletilip yavaş soğutularak yapılır. Tavla asla 723 °C'nin üzerine çıkmaz.

Sementasyon: %0.2'den az karbon içeren çeliklere uygulanır. Bu işlemde temel amaç çelik yüzeyine C difüze ederek yüzeyin C miktarını yeterli düzeye çıkarıp ardından su verme işlemidir.

Martenzit yapı: Tavlama işleminden sonra çelikler yavaş ya da orta seviyedeki bir hızla soğutulduklarında östenit içerisindeki çözülmüş bulunan karbon atomları difüzyonla östenit yapıdan ayrılırlar. Bundan hemen sonra HMK kafes yapısı oluştururlar. Söz konusu östenit(γ)-ferrit (α) dönüşümü zamana bağlı bir çekirdekleşme ve büyüme olayı şeklinde meydana gelir. Soğuma hızı artırılıp belirli bir değerin üzerine çıkarıldığında karbon atomları difüzyon ile katı çözeltiden ayrılmak için yeterli zaman bulamazlar. Kafes yapısı HMK yapıya dönüşen ve hızlı soğuma sonucunda oluşan bu yapıya **martenzit** denir.