

İTÜ Makina Fakültesi

MAL 201- MALZEME BİLGİSİ

2007-2008 Bahar Ders Notları
Prof. Dr. Ahmet Aran

İÇİNDEKİLER

1. Giriş	1
2. Atomsal Bağ	6
3. Kristal Yapılar	10
4. Kristal Yapı Kusurları	17
5. Mekanik Özellikler	26
6. Faz Diyagramları	40
7. Dönüşümlerin Kinetiği ve Isıl İşlemler	48
8. Metaller ve Alaşımları	55
9. Polimerler	62
10. Seramik ve Camlar	68
11. Kompozitler	74
12. Ortam Etkileri	79
13. Elektriksel ve Manyetik Özellikler	85
14. İngilizce Malzeme Terimleri	95
Kaynaklar	105

Değişik kitaplardan derlenerek öğrenci katkılarıyla hazırlanmıştır.
İstanbul 2008

1. Giriş

Malzemeler, mühendislik ürün ve sistemlerinin imalinde kullanılan ve mekanik, fiziksel ve kimyasal olarak arzu edilen özelliklere sahip katılardır. Malzemeler insanlık tarihinde her zaman önemli bir rol oynamış ve tarih çağlarının bir çoğu o dönemde geliştirilen ve kullanılan malzemelere atfen verilmiştir (Cıvalı Taş Devri, Tunç Devri vs.). Bu nedenle tüm mühendislik programlarında öğrencilere bir malzeme bilgisi altyapısı kazandırılmaya çalışılması doğaldır.

Malzeme biliminin genel amacı, malzemelerin içyapısını tanıtmak, içyapılar ile özellikler arasında bağntılar araştırmak, bu şekilde geliştirilen temel ilkeler ve kavramlar ışığında uygulamada kullanılan malzeme türlerini sınıflandırarak özelliklerini incelemektir.

1.1. Malzeme Türleri

Malzemelerin sınıflandırması değişik şekillerde yapılabilir, ancak mühendisler açısında en uygun sınıflandırma aşağıdaki gibidir:

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozitler
- Yarı İletkenler

Metaller

Mühendislikte kullanılan malzemelerin önemli bir kısmı metaller ve bu metallerin alaşımlardır. Metallerin karakteristik özelliklerini aşağıdaki başlıklar altında toplamak mümkündür:

- Kristal yapıdadırlar.
- Dayanımları yüksektir.
- Kolay şekillendirilebilirler
- Toklukları yüksektir, yani kırılğan değildirler.

- Basma dayanımları, çekme dayanımlarına yaklaşık eşittir.
- Korozyon dayanımı genellikle düşüktür.
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenlikleri vardır.
- Şeffaf değildirler, ancak parlak görünüme sahiptirler.

Metaller büyük bir ailedir ve birçok mühendislik alaşımlarının esasını oluştururlar ve genellikle iki grup olarak ele alınırlar:

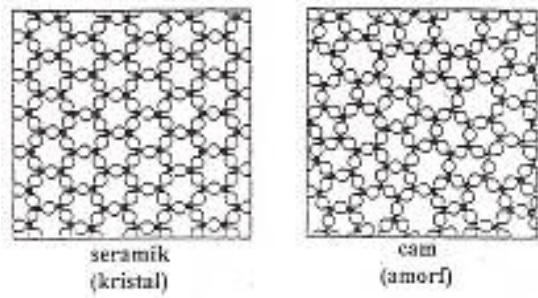
- Demir Esaslı Metal ve Alaşımları (dökme demir ve çelikler)
- Demir Dışı Metal ve Alaşımları (alüminyum, magnezyum, bakır, titanyum, nikel, çinko ve alaşımları ...)

Seramikler ve Camlar

Seramikler, metal + metal olmayan bir elementten (C, N, O veya S) oluşmaktadır. Örneğin, alüminyum bir metaldir ancak bunun oksidi olan Al_2O_3 seramiktir. Burada alüminyumun kolay şekillendirilebilir bir malzeme olmasına karşın, oksidi kırılğandır ve kolay şekillendirilemez. Seramik malzemeler alanında bu malzemelerin gevrekliklerinin giderilmesine ve kırılma tokluklarının artırılmasına yönelik çalışmalar yapılmakta ve kırılğan olmayan mühendislik seramiklerin geliştirilmesi alanında başarılı sonuçlar alınmaktadır.

Seramiklerin karakteristik özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Dayanımları yüksektir ancak gevrek malzemelerdir ve kırılma toklukları düşüktür.
- Erime sıcaklıkları yüksektir – ısıya dayanıklı refrakter malzeme olarak kullanılırlar (soba, ocak ve fırınlarda)
- Birçok ortamda kimyasal olarak kararlıdır.
- Çekme dayanımları düşük, basma dayanımları yüksektir.



SiO_2 , geniş ve karmaşık bir aile olan silikatlar grubundadır. Bu malzeme **amorf** yapıya sahip olabilir ve bu durumdaki malzemeye **cam** adı verilir. Cam ile seramik arasındaki temel fark, seramiklerin **kristal** yapıya sahip olmalarıdır. Bilindiği gibi malzemelerin yapıları, atomların bağ kuvvetleri yardımıyla bir araya gelerek uzayda dizilmeleri sonucu oluşur. Bu diziliş düzenli ise **kristal**, düzensiz ise **amorf** olarak adlandırılır.

Camların büyük çoğunluğu silikatlardan oluşmaktadır, ancak bileşimlerinde başka oksitler de bulunmaktadır. Örn: pencere camlarında %72 SiO_2 'nin yanı sıra başta Na_2O ve CaO olmak üzere diğer oksitler bulunmaktadır. Yani farklı bileşimlerde cam türleri vardır; örneğin pencere camı ile gözlük camı bileşimleri bakımından farklıdır.

Camların karakteristik özellikleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Dayanımları yüksektir, ancak gevrek ve kırılırlardır.
- Çekme dayanımları düşük, basma dayanımları yüksektir.
- Kimyasal tarafsızlık (inert) gibi önemli özellikleri vardır.
- Saydam türleri vardır.
- Seramiklerden farkı olarak yüksek sıcaklıkta yumuşatılarak veya eritilerek şekillendirilebilirler.

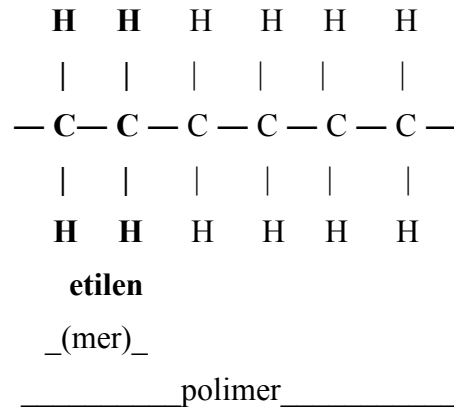
Bazı cam türleri şekillendirme işlemleri sonrası camsı durumdan kristal duruma geçirilebilirler. **Seramik cam** olarak adlandırılan bu malzemeye camsı durumda kolaylıkla biçim verildikten sonra, kristalleştirilerek seramiklerin üstün mekanik özellikleri kazandırılır.

Polimerler (Plastikler)

Günlük yaşamımızda ucuz ve kullanışlı birçok plastik malzeme (polimer) ile karşılaşırız. Polimerler genellikle petrol türevi ürünlerden elde edilen malzemelerdir. Yapılarında genelde C, H, O, N, S bulunur.

Bu gruba giren malzemelerin yapısı, **mer**lerin birleşerek uzun bir zincir oluşturması (**polimer**) ve bu uzun zincirler birbirlerine zayıf ikincil bağlar, veya güçlü çapraz bağlar ile birleşmesi ile oluşur.

Örneğin mer bir hidrokarbon molekülünü olabilir (C_2H_4 : etilen), bunları birleşmesi ile polimer ortaya çıkar (polietilen).



Polimer yapılarında bulunan elementler çok çeşitli değildir, birçok önemli polimer hidrojen ve karbon esaslıdır. Diğerleri oksijen (akrilikler), nitrojen (naylonlar), flor (fluoroplastikler) ve silisyum (silikonlar) içerirler.

Polimerlerin karakteristik özelliklerini aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Sünnek, hafif ve ucuz malzemelerdir.
- Yapılarındaki bağların karakteri nedeniyle dayanımları düşüktür.
- İkincil bağlar içeren türleri kolay şekillendirilebilirler, düşük sıcaklıkta yumuşarlar ve erirler
- Elektriksel olarak yalıtandırılar.

Bazı sınırlamalara rağmen polimer malzemeler yaygın olarak kullanılırlar. Son yıllarda bu malzemelerin dayanımlarının ve rijitliklerinin artırılmasına yönelik

önemli gelişmeler sağlandığından, mühendislik uygulamalarında kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Kompozitler (Karma Malzemeler)

Yukarıda verilen üç gruba giren, iki veya daha çok malzemenin makro düzeyde yan yana getirilmesi ile, bu malzemelerin üstün özelliklerini aynı malzemede toplayan veya yepyeni bir özellik ortaya çıkaran malzemeler oluşturulabilir ve bu malzemeler **kompozit** olarak adlandırılır. Aynı gruba giren iki malzeme, örneğin iki farklı metal de bir araya getirilerek kompozit oluşturulabilir, nitekim metal saçlar yüzeylerine başka bir metal tabaka giydirilerek (kaplanarak) korozyona karşı korunurlar.

Kompozit metal alaşımlarından farklıdır. Alaşımlama mikro düzeydedir; kompozitte ise farklı malzemeler birbiri içinde çözünmezler; tabaka, lif veya parçacık halinde birlikte bulunurlar.

Örnekler:

CTP (Cam Takviyeli Plastik): Plastik malzeme cam lifler ile takviye edilerek dayanım ve rijitlik kazandırılır (fiberglas).

Beton: içinde kum, çakıl taşları, çimento vs vardır.

Ahşap: doğal bir kompozittir.

Yarıiletkenler

Yarı iletken malzemeler ne iyi bir iletken, ne de tam bir yalıtkandır. Elektronikte kullanılan çok önemli malzemelerdir; çipler, işlemciler, transistörler gibi elemanların üretiminde kullanılır. Silisyum ve germanyum en yaygın kullanılan yarı iletkenlerdir

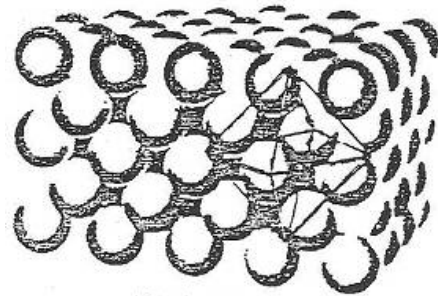
Atomsal bağlar bakımından yapılan sınıflandırmada bu malzemeler yukarıdaki dört gruba da girmez. Yarıiletkenlerde kimyasal bileşimin hassas kontrolü ile elektronik özellikler kontrol edilebilir. Bu malzemeler ve geliştirilen yeni teknolojiler sayesinde çok küçük boyutlarda elektronik devreler elde etmek mümkün olur.

1.2. Yapı Özellik İlişkileri

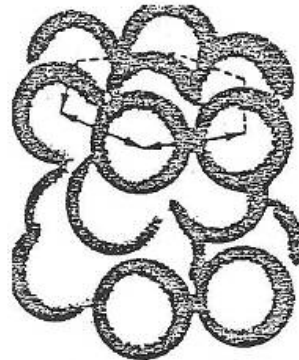
Değişik malzemelerin kendilerine has özellik ve davranışları ile bunlar arasındaki farkları anlamak için bu malzemelerin atomsal ölçekteki iç yapılarını tanımak çok önemlidir. Bu sayede her malzeme grubuna ait karakteristik özelliklerin, atomsal veya mikroskopik ölçekteki yapısal özellik ve mekanizmalardan kaynaklandığı görülecektir.

Örnek 1: Alüminyum sünek, magnezyum gevrek özellik gösterir.

İlerideki bölümlerde görüleceği gibi, metaller kalıcı şekil değiştirirken, malzemenin kristal kafesindeki belirli kristal düzlemleri belirli doğrultularda kayarlar. Bir kristalde bu tür kaymalara olanak tanıyan kayma sistemi sayısı arttıkça malzemenin şekil değiştirmesi kolaylaşır, yani sünekliği artar. Magnezyum kristalinde sadece 3 kayma sistemi var iken, bu sayı alüminyum için 12'dir. Yani alüminyum kafesi kalıcı şekil değişimlerinin gerçekleşmesi için 4 kat daha fazla seçeneğe sahiptir. Sonuç olarak alüminyum sünek özellik gösterirken, magnezyum gevrek bir malzemedir.



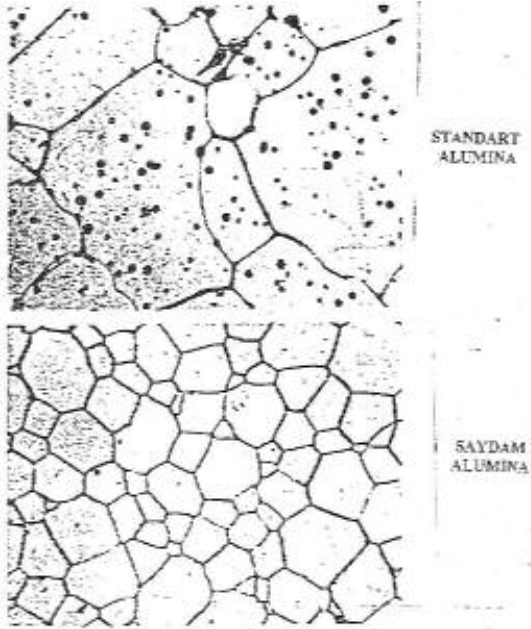
Alüminyum



Magnezyum

Örnek 2: Saydam seramikler

Seramikler genellikle kristal tozlarının, yüksek dayanımlı ve gözeneksiz ürünler elde etmek için yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilir; ancak buna rağmen önemli miktarda gözenek içerirler. Malzeme içinden geçen ışık demeti, bu gözeneklerde saçılacağından malzeme saydam değildir. Sadece % 0,3 gözeneklilik bulunması bile malzemeyi opak yapar. Uygun katkıları ile bu gözeneklerin giderilmesi mümkün olmuş ve saydama yakın seramikler elde edilmiştir. Böylelikle 1000° C'ye kadar çıkabilen sodyum lambalarının üretimi mümkün olmuştur.



1.3. Malzeme Seçimi

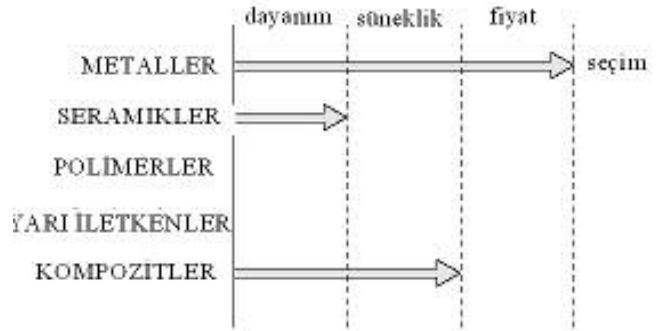
Mühendislik uygulamaları için on binlerce malzeme içinden en uygun seçimin yapılması gerekmektedir. Bu tür bir seçimde önce kullanılacak malzemenin hangi gruptan (metal, plastik, seramik v.s) olacağına karar verilmeli, daha sonra bu gruba giren malzemeler arasında en uygunu seçilmelidir. Bu seçim sırasında sistematik düşünmek çok önemlidir.

ÖRNEK

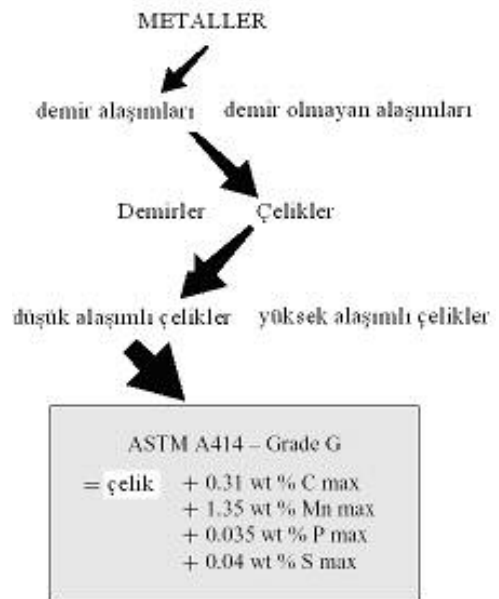
İçinde 14 MPa basıncında gaz bulunacak bir gaz tüpünü için malzeme seçelim.

Aradığımız 3 özellik vardır: Dayanım, süneklik ve fiyat.

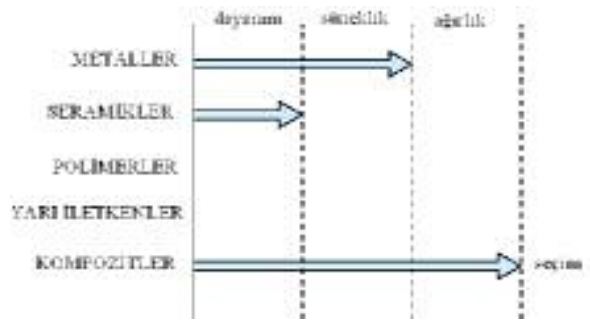
- Dayanım bakımından metaller, seramikler ve kompozitler seçilebilir.
- Ancak malzemenin kırılkan olmasını istemediğimizden seramik malzeme kullanamayız ve bu durumda 2 seçenek kalır..
- Fiyat açısından baktığımız zaman ise kompozitlerin yüksek fiyatından dolayı **metal** tercih edilir.



Hangi metal alaşımının kullanılacağı ise aşağıdaki şekilde belirlenir:



Aynı gaz tüpünü uçak-uzay sanayinde kullanmamız gerektiği zaman aradığımız özellikler dayanım, süneklik ve hafiflik olmaktadır. Dayanım ve süneklik bakımından tercih edilebilecek malzemeler yine metaller ve kompozitler olmaktadır. Ancak bu kullanım yerinde hafiflik önemli olduğu için tercihimiz daha hafif olan olan kompozitten yana olacaktır, çünkü metal seçilmesi halinde tüp daha ağır olacaktır.



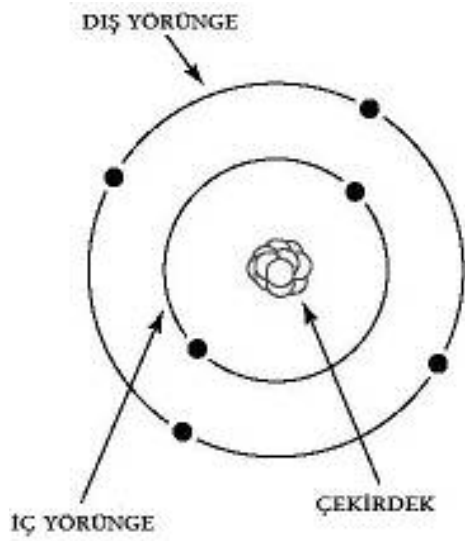
Hangi kompozitin kullanılacağı ise aşağıdaki şekilde belirlenir:



2. Atomsal Bağ

Atomsal bağların oluşumunda elektronların rolü büyüktür ve iki farklı tür bağ oluşabilir:

- Elektronlar aktarılır veya paylaşılır, bu şekilde atomlar arası çok güçlü bağlar oluşur. (iyonik ve kovalent)
- Elektron aktarımı veya paylaşımı yoktur; atomlar veya moleküller arasında zayıf çekim kuvvetleri vardır (van der Waals)



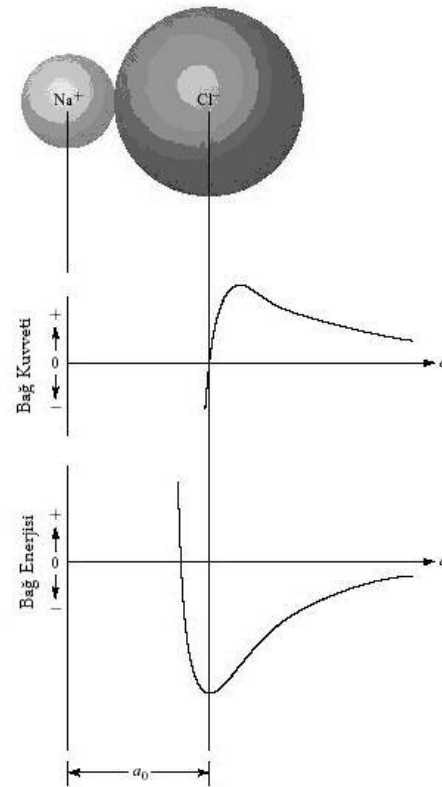
2.1. Atomun Yapısı

- Elektronlar bir çekirdek etrafında yörüngelerde bulunurlar.
- Çekirdekte protonlar ve nötronlar vardır.
- Proton ve nötronlar 1.66×10^{-24} gr ağırlığındadır. Bu ağırlık bir birim (gram-atom) olarak kabul edilir ve çekirdek kütleleri bu birimle ölçülür.
- Bir gram nötron veya protonda **Avogadro sayısı** kadar tanecik vardır: $6.02214199 \times 10^{23}$
- Çekirdekte bulunan proton sayısı, o atoma ait **atom numarasıdır**.
- Aynı sayıda proton içeren, ancak nötron sayıları farklı olan atomlar **izotop** olarak adlandırılır.
- Atomun kimyasal karakterini çekirdek yapısı, atomsal bağ karakterini ise elektronları belirler.

- Elektronların kütleleri çok düşük olmasına karşın her biri bir protonun ters işaretli elektrik yüküne sahiptir ve bunlar çekirdek etrafında belirli sabit yörüngelerde bulunurlar.

2.2. Bağ Enerjisi ve Bağ Türleri

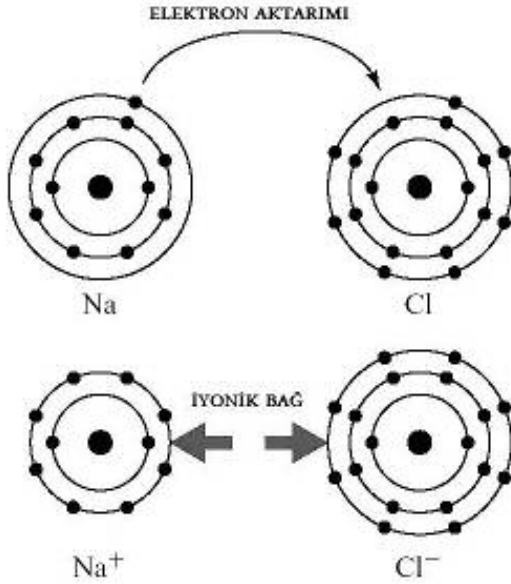
Bağ enerjisi iki atomu birbirinden ayırmak için sarf edilmesi gereken enerjidir. “Kuvvet – yol” eğrisinin altındaki alana eşittir. Kuvvet eğrisi enerji eğrisinin türevidir. Kuvvetin sıfıra eşit olduğu atomlararası çekme ve itme kuvvetlerinin eşit olduğu denge konumudur ve aynı zamanda enerji eğrisinin minimum olduğu konumdur.



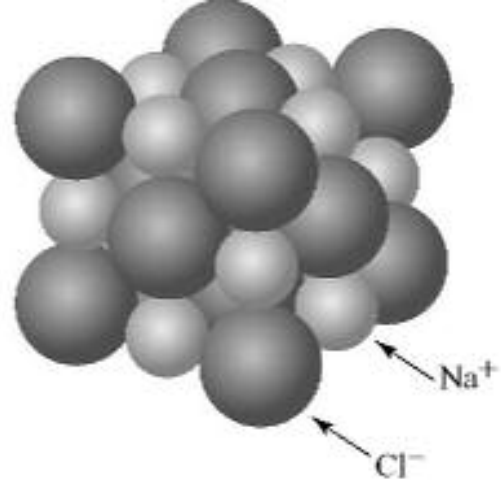
Komşu atomlar arasındaki bağlar en dış yörüngedeki (valans) elektronlarının aktarılması veya ortak kullanımı ile gerçekleşir, yani atomların bağlanması aslında elektronik bir olaydır. Bunun dışında elektron aktarımı veya paylaşımı olmayan (mesela dipol oluşturan moleküllerin ters elektriksel yüklü uçlarının birbirini çekimi) ikincil zayıf bağlar da vardır.

İyonik Bağ

Bir atomdan diğerine elektron aktarımı ile oluşur. İyonik bağlar metallerle ametaller ve metallerle kökler arasında oluşan bağlardır. Metaller kimyasal olaylar sırasında elektron vermeye yatkın olduklarından elektron vererek pozitif, ametaller ise elektron almaya yatkın olduklarından elektron alarak negatif yük kazanırlar. Bu şekilde oluşan (+) ve (-) yükler birbirini büyük bir kuvvetle çekerler. Bundan dolayı iyonik bağlarda bağ enerjisi çok yüksektir. Bu malzemeler katı halde elektriği iletmezler, ancak sıvı çözeltiler içinde bu iyonlar hareket edebildiklerinden bir elektrolit oluşur.

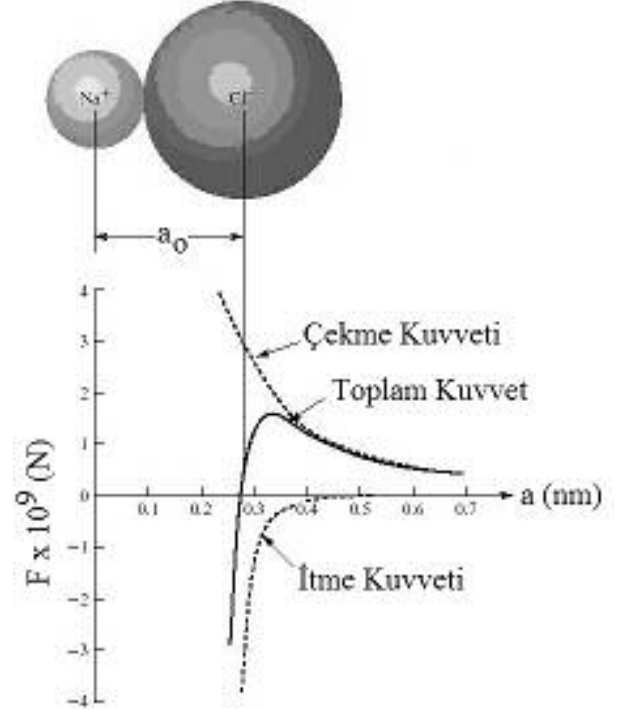


İyonik bağa sahip malzemeler, içinde (+) ve (-) atomların belirli bir düzen içerisinde yerleştiği bir kristal yapı oluşturabilirler. Örneğin NaCl molekülünde, bir elektron kloru aktarılır ve sodyum katyonu ile klor iyonu ortaya çıkar. Bu iki ters yükün birbirini çekmesi ile bağ oluşur. Bu bağ yöne bağlı değildir. Bu iyonlar birbirlerini her doğrultudan çekebilirler. Şekilde bu iyonların 3 boyutlu olarak nasıl istiflendiği görülmektedir. Bu düzenleme max. sayıda karşı yüklü atomla komşuluk sağlanacak şekilde olmaktadır. Burada her birine karşı atomdan 6 adet komşu (koordinasyon sayısı) düşmektedir.



Atomlararası Kuvvetler

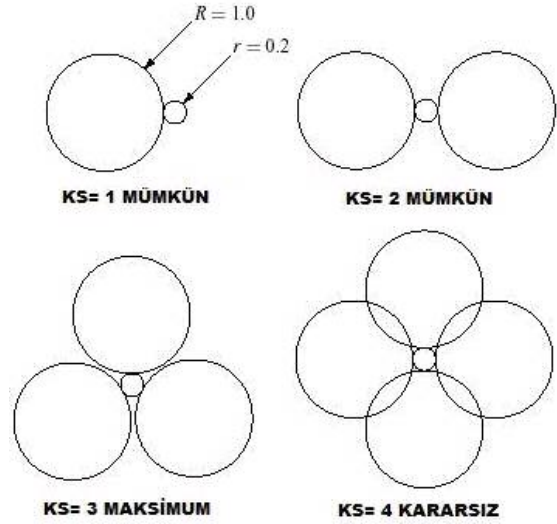
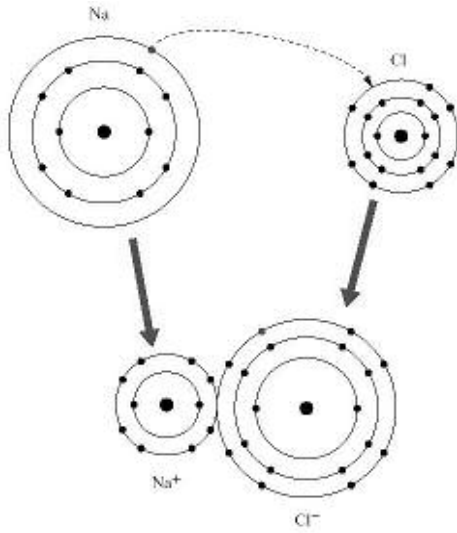
Çekme ve itme kuvvetlerinin eşit olduğu atomlar arası uzaklık, denge konumudur.



a₀ denge konumu her iki iyonun yarıçaplarının toplamına eşittir.

$$a_0 = r_{Na} + r_{Cl}$$

Burada iyonlar birbirine temas eden sert kürecikler olarak düşünülmüştür. Bu yarıçaplar, atomun nötr veya iyon halinde bulunmasına göre değişebilir.

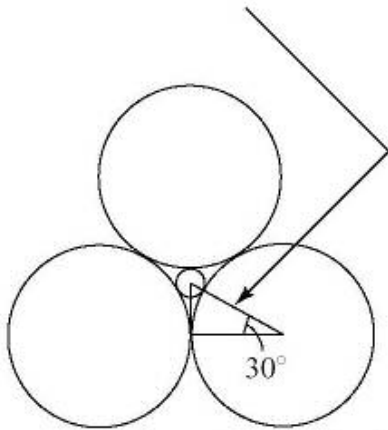


Koordinasyon Sayısı (KS)

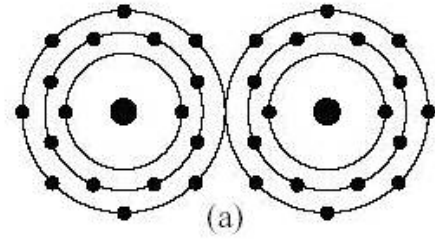
İyonik bağ yöne bağlı değildir. Örneğin NaCl kristalinde, Na atomu 6 Cl atomu ile, Cl atomu da 6 Na atomu ile çevrilmiştir. Bu durumda her iki iyon içinde koordinasyon sayısı 6 dır, yani her birinin 6 yakın komşusu vardır.

İyon bağlarında koordinasyon sayısını hesaplamak için küçük atom atomun çevresine sığabilecek en fazla büyük atom sayısı aranır. Bu sayı karşı yüklü iyonların yarıçapları oranına r/R bağlıdır.

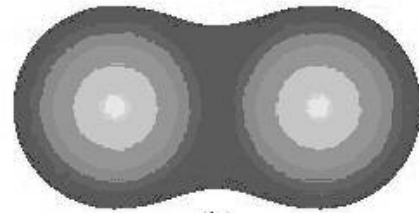
$$\cos 30^\circ = 0.866 = \frac{R}{r+R} \rightarrow \frac{r}{R} = 0.155$$



KS = 3 için minimum r/D oranının hesabı



(a)



(b)

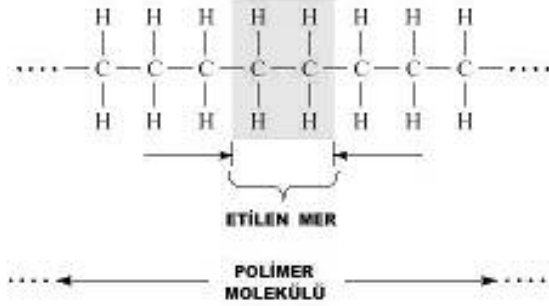


(c)



(d)

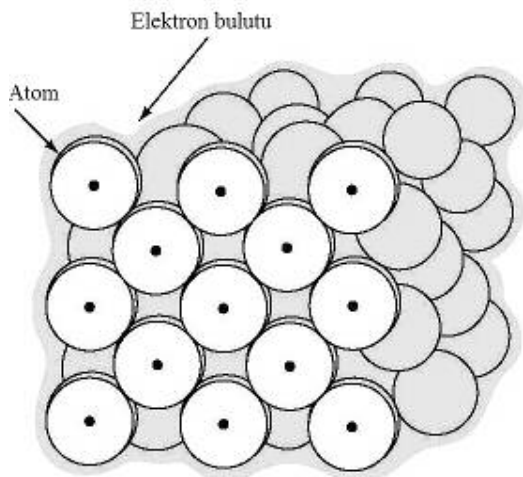
KLOR GAZI MOLEKÜLÜ



Çift çizgi iki çift ortak elektron olduğunu gösterir. Etilende bu bağ çifti ayrı ayrı tek bağ olarak kullanılarak polietilen zincir molekülünü oluşturulur.

Metalsel Bağ

İyonik bağ elektron transferi içerir ve yönden bağımsızdır. Kovalent bağ ise elektron paylaşımı içerir ve yöne bağımlıdır. Metalsel ise elektron paylaşımı içeren yönden bağımsız bir bağ türüdür. Burada valans elektronlarının konumu belirli değildir, çok sayıda atom kristal kafes içinde valans elektronlarını ortak olarak kullanırlar (elektron bulutu veya gazı !)



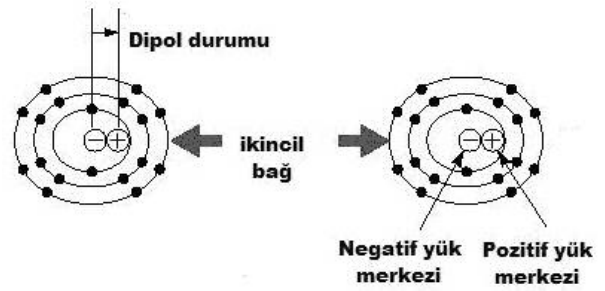
Elektronlar hareket edebildiklerinden metaller elektriği iletebilirler. İstiflenme geometrisi iyonik bağda olduğu gibi sık, koordinasyon sayısı yüksektir, $KS = 8 - 12$.

VanDerWaals veya İkincil Bağlar

Burada elektron aktarımı veya paylaşımı yoktur ve ters işaretli elektrik yüklerine sahip yapı taşlarının iyonik bağa benzer şekilde birbirini çekmesi söz konusudur. Ancak elektron aktarımı olmadığından elektrik yük farkları her bir atom veya molekül birimi içindeki pozitif ve negatif yüklerin asimetrik dağılımı ile ilgilidir (dipol) ve iyonik bağla karşılaştırıldığında çok daha zayıftır.

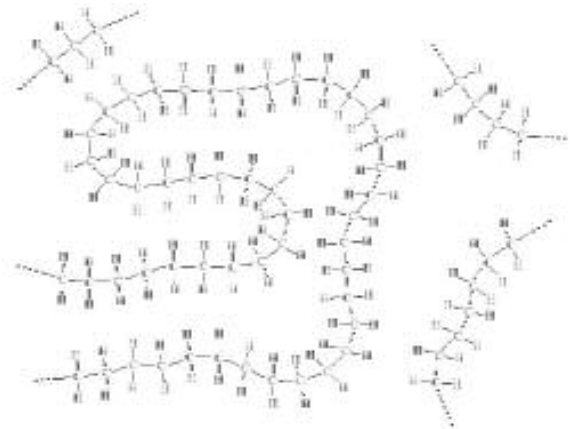
Bu tip bağlar geçici veya kalıcı dipollü olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Örneğin Argon gazı molekülünde karşı atomun çekirdeği tarafından çekilen elektronlar nedeniyle geçici zayıf bir dipol oluşturur.



Molekül yapısına bağlı olarak bu tür dipoller kalıcı da olabilir; bu durumda bağ biraz daha güçlü olur. Buna en iyi örnek su molekülüdür.

Kovalent bağlı zincirlerin oluşturduğu bir yapılarda (örneğin polimerler), zincirler arasında da zayıf ikincil bağlar vardır; dolayısıyla bu malzemelerde düşük dayanımlar ve düşük erime sıcaklıkları söz konusudur.



3. Kristal Yapılar

Malzemeler atomların bir araya gelmesi ile oluşur. Yapı içerisinde atomları bir arada tutan kuvvete 'atomlar arası bağ' denir. Yapı içerisindeki atomlar farklı düzenlerde bulunabilir:

Kristal Yapılar

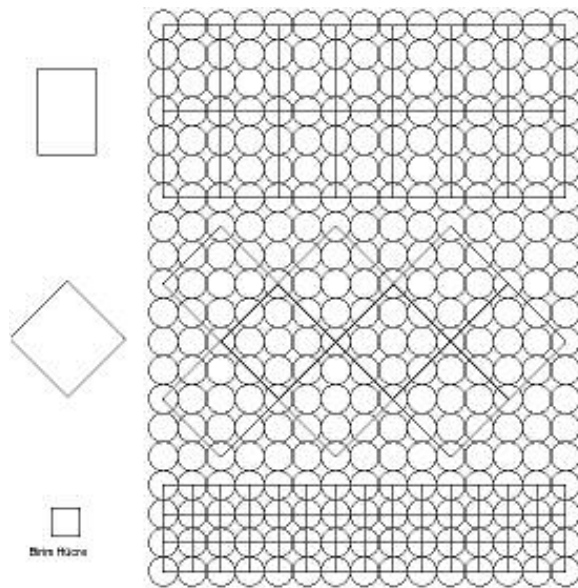
Atomlar üç boyutlu bir düzene göre dizilirler. Kristal yapı (kristal kafes) olarak adlandırılan bu yapı türü metallerde, seramiklerde, seramik camlarda ve bazı polimerlerde görülür. Polimerlerin molekül yapıları karmaşık olduğundan, bu malzemelerde kristalleşme, ancak yerel ve hacim olarak en çok %50 miktarında olabilir.

Kristal Olmayan Yapılar:

Atom veya moleküllerin rasgele dizildiği yapılar **amorf** olarak adlandırılır (örneğin gazlar). Bazı malzemelerde tüm yapı için geçerli olmayan **kısa mesafeli düzenler** görülebilir, örneğin bazı camlarda.

Kristallerde Birim Hücre:

Üç boyutlu düzende sürekli olarak tekrar eden yapıya 'birim hücre' denir. Birim hücre kristal yapının içerisinde tekrar eden yapıların en basitidir. Birim hücrelerinin kenar uzunlukları **kafes Parametreleri** olarak adlandırılır.



Birim Hücre

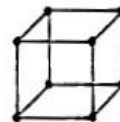
Kristal Kafes Sistemleri:

Doğadaki bütün kristal malzemeler 7 kristal sistemin birine uyarlar.

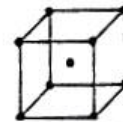
7 Kristal Sistemi

Kübik		$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal		$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorombik		$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Rombodrik		$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Hekzagonal		$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Monoklinik		$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Triklirik		$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

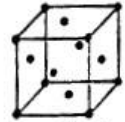
Bu birim hücelere atomların istiflenişi bakından da farklı seçenekler vardır. Örneğin kübik kristal için:



Basit Kübik



Hacim Merkezli Kübik



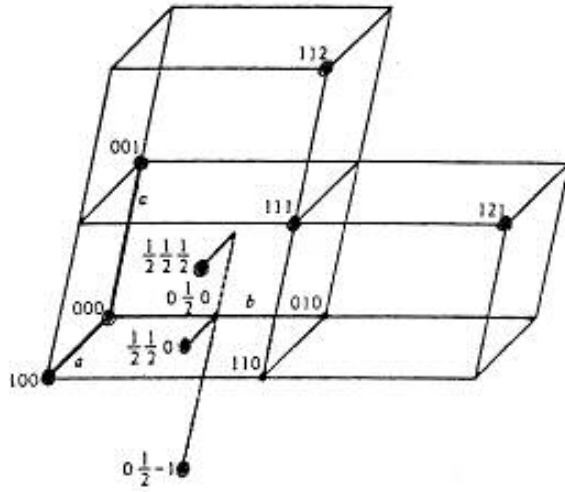
Yüzey Merkezli Kübik

3.1. Miller İndisleri

Kristal yapılarıdaki değişik düzlem ve doğrultuları adlandırmak üzere Miller indisleri kullanılır.

Kafes Noktaları

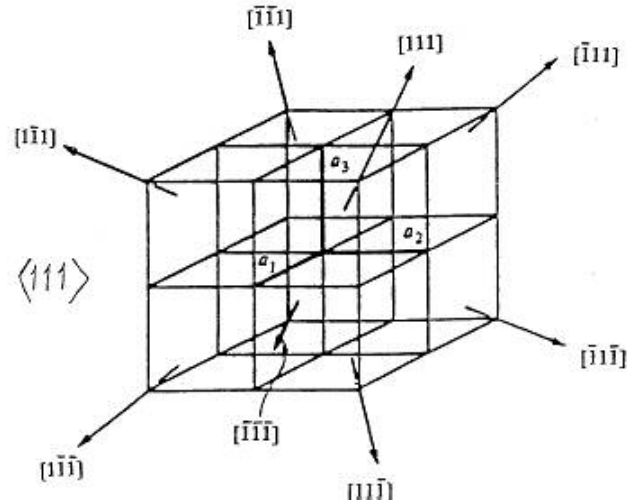
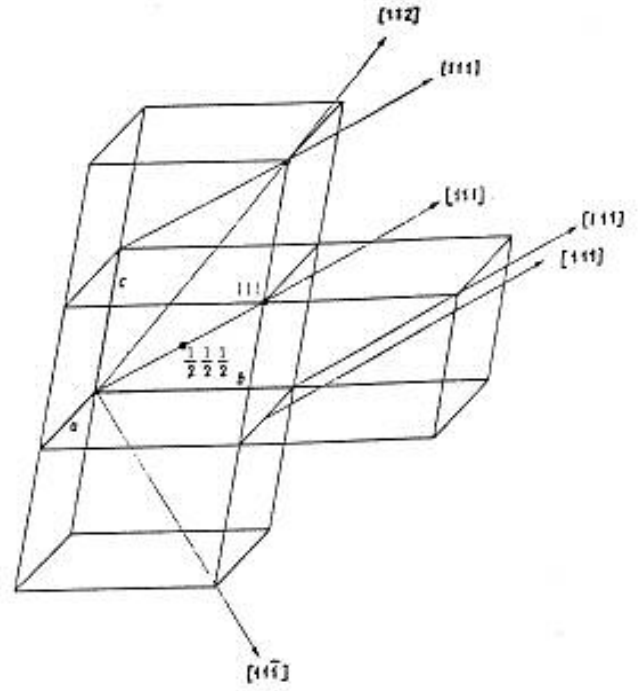
Eksen takımının başlangıcı olarak herhangi bir atom alınabilir. Kafes noktalarının konumları, birim hücrenin kenar uzunlukları birim kabul ederek bunların katları olarak verilir.



Kafes Doğrultuları:

Paralel doğrultular için tek bir indis kullanılır; bu doğrultuların indisinin belirlenmesinde, bu doğrultular arasından eksen takımı başlangıcından çıkan doğrultu alınır ve üzerindeki kafes noktalarından en küçük tam sayılı koordinatlara sahip noktanın koordinatları köşeli parantez ile gösterilerek indis oluşturulur [111], [112] gibi. Gerekirse orantılı olarak en küçük tam sayıya çevrilir. Sayılar köşeli parantez içine virgülsüz olarak konur. Negatif konumlar, sayılar üzerindeki (-) işareti ile gösterilir.

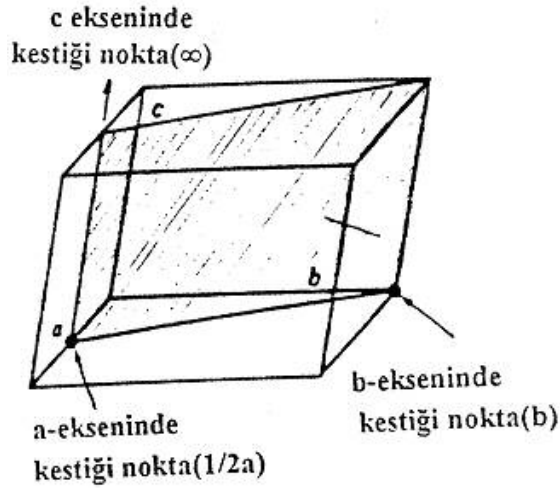
Kafes içinde birçok doğrultu kristallografik olarak eşdeğerdir, örneğin hacim diyagonalleri. Atom dizilişi bakımından aynı olan bu doğrultular bir aile olarak kabul edilir ve açılı parantez ile gösterilir.



Kafes düzlemleri:

Düzlem indisleri şu şekilde saptanır:

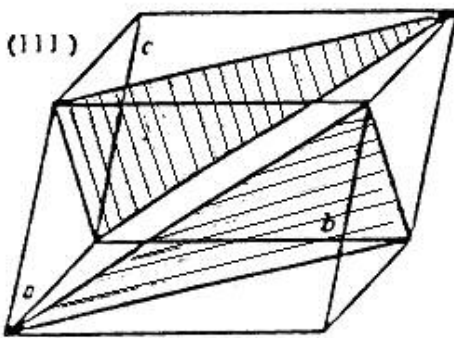
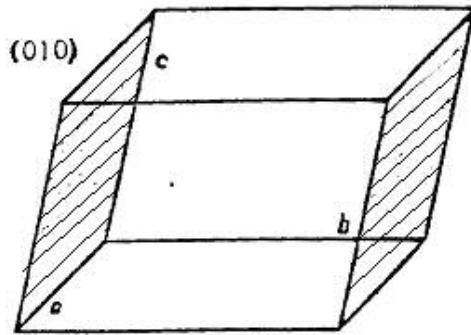
- Düzlemin eksen sisteminin başlangıcından geçmesi durumunda en yakın paralel düzlem alınır.
- Düzlemin koordinat eksenlerini kestiği noktalar belirlenir.
- Bu değerlerin tersi alınır, orantılı en küçük tam sayılar bulunur.
- Bulunan sayılar normal parantezde virgülsüz olarak ifade edilir.
- Negatif sayılar üzerinde (-) işareti ile gösterilir.



Miller indisleri (hkl):

$$\frac{1}{1/2} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{\infty}$$

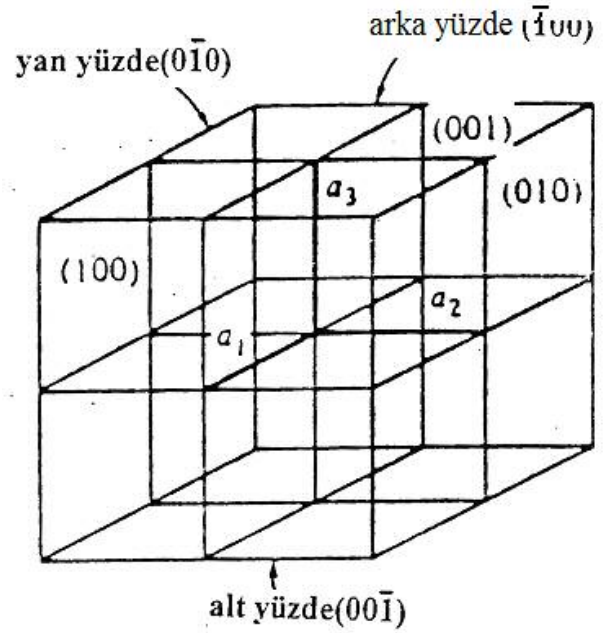
→ (210)



Örnekler

Aynı özelliğe sahip, yani atom dizilişi bakımından aynı olan düzlemler 'düzlem ailesi' oluştururlar. Büyük parantez ile gösterilir. Şekilde görüldüğü gibi {100} düzlem ailesine 6 farklı düzlem girer

{100} Düzlem Ailesi



Birim hücrede bulunan atom sayısı:

Birim hücrede bulunan tam atom sayısını ifade eder.(Atom sayısı/hücre).

Koordinasyon sayısı (KS):

Her bir atoma en yakın komşu atomların sayısıdır.

Atomal dolgu faktörü (ADF):

Atomların katı küre olarak kabul edilerek saptanan, atomların toplam hacminin birim hücre hacmine oranıdır. (ADF=Atom hacmi / hücre hacmi). ADF malzemenin ne kadar sıkı istiflendiğini gösterir.

Doğrusal atom yoğunluğu:

Merkezleri söz konusu doğrultu üzerinde bulunan atomlar dikkate alınarak, atomların dizilme sıklıkları bulunur (atom sayısı / birim uzunluk).

Düzlemsel atom yoğunluğu:

Merkezleri söz konusu düzlem üzerinde bulunan atomlar dikkate alınarak, atomların dizilme sıklıkları bulunur (atom sayısı / birim alan).

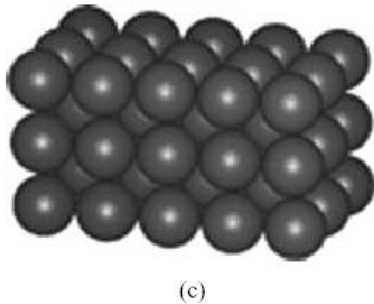
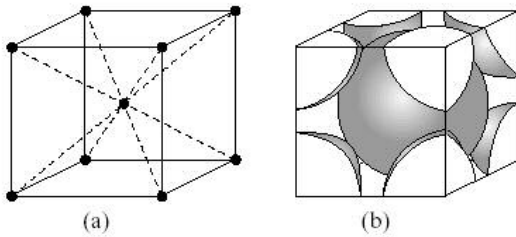
YAPI	KS	ADF	BAZI ÖRNEKLER
Basit kübik	6	0.52	-
Hacim merkezli kübik	8	0.68	α -Fe, Ti, W...
Yüzey merkezli kübik	12	0.74	γ -Fe, Cu, Al, ...
Hekzagonal sıkı paket	12	0.74	Zn, Be, ...

3.2 Metallerin Kristal Yapıları

Metallerde genellikle 3 tür kristal kafese rastlanır: hmk, ymk ve sdh

Hacim Merkezli Kübik Yapı (HMK)

Küpün her köşesinde birer atom ve merkezinde de bir atom bulunur. Köşe atomları merkez atoma temas ederler. Gerçekte her köşedeki atom 8 komşu birim hücre arasında paylaşılmaktadır. Bu durumda köşe atomlarının toplamı $8 \times 1/8 = 1$ dir. Küpün merkezinde bulunan bir atomla birlikte birim hücredeki toplam atom sayısı 2 olur. Hacim merkezli kübik yapının, koordinasyon sayısı 8'dir.



Yapı: Hacim Merkezli Kübik Yapı (HMK)
Atom/Birim Hücre: $1 + 8 \times 1/8 = 2$
Örnek Metaller: α -Fe, V, Cr, Mo ve W

Atomun yarıçapını R olarak alırsak ve birim hücrenin kenarını da a olarak alırsak a'nın R cinsinden ifadesi $a = 4R / \sqrt{3}$ tür.

Atomların diziliş sıklığını ifade etmek için atomsal dolgu faktörü ADF kullanılır. Bu faktörü hesaplamak için atomların dolu küreler olduğu varsayılır, sonra birim hücredeki atomların toplam hacmi birim hücre hacmine bölünür. Buna göre HMK'nın atomsal dolgu faktörü;

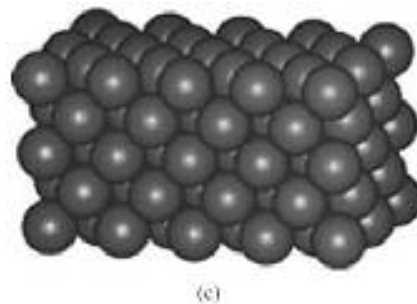
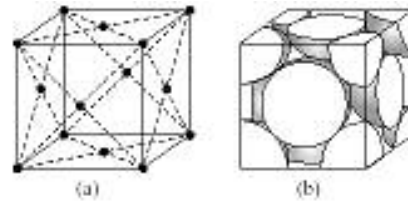
$$ADF = \frac{(\text{Atom Sayısı/Hücre}) \times (\text{Bir Atomun Hacmi})}{[\text{Birim Hücresinin Hacmi}]} \\ ADF = \frac{[2 \times 4\pi R^3/3]}{a^3} = \frac{[2 \times 4\pi R^3/3]}{[4R / \sqrt{3}]^3} = 0,68$$

Bu sonuca göre HMK kafese sahip bir yapıda hacmin %68'i dolu %32'si boştur.

Cr, α -Fe, V, W, hacim merkezli kübik yapıya sahip metallerden bazılarıdır.

Yüzey Merkezli Kübik Yapı (YMK)

Yüzey merkezli kübik kafeste birim hücrenin köşelerinde birer ve yüzeylerin merkezinde de birer atom vardır. Yüzey merkezlerindeki atomların yarısı göz önüne alınan birim hücreye, diğer yarısı da komşu birim hücreye aittir. Kafesteki atom sayısı yüzeylerde $6 \times 1/2 = 3$ (6 yüzey $1/2$ 'şer atom) köşelerde $8 \times 1/8 = 1$ (8 köşe $1/8$ 'er atom) olmak üzere toplamda 4'tür. Yüzey merkezindeki atomlar köşedekilere temas eder.



Yapı: Yüzey Merkezli Kübik Yapı (YMK)
Atom/Birim Hücre: $6 \times 1/2 + 8 \times 1/8 = 4$
Örnek Metaller: γ -Fe, Al, Ni, Cu, Ag, Pt

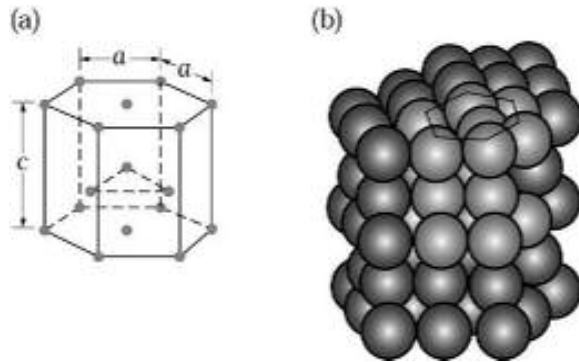
Birim hücrenin bir kenarı a , bir atomun yarıçapı da R olarak alınırsa a 'nın R cinsinden ifadesi

$a = 4R / \sqrt{2}$ dir. YMK'nın atomsal dolgu faktörü 0,74 tür. $ADF = [4 \times 4\pi R^3 / 3] / a^3 = 0,74$

Bu dolgu faktörü aynı büyüklükteki atomlar için en yüksek değerdir. YMK yapıda görünen hacmin %74'ü dolu, %26'sı boştur. Koordinasyon sayısı ise 12 dir. γ -Fe, Cu, Al, Pb, Ag, Au, Ni, Pt malzemeleri bu tip kristal yapıya sahiptirler.

Sıkı Düzen Hegzagonal Yapı (SDH)

Sıkı düzen hegzagonal yapı, HMK ve YMK yapıları göre daha karmaşıktır. Köşelerde $4 \times 1/12 = 1/3$ ve $4 \times 1/6 = 2/3$ ve merkezde 1 atom olmak üzere birim kafeste toplamda 2 tane atom bulunur. Hegzagonal sıkı düzenin atomsal dolgu faktörü 0,74 tür (YMK ile aynı). YMK'da en yoğun düzlem (111), SDH'da (0002)'ye tekabül eder. Aradaki fark sadece atom dizilişi en sık olan düzlemlerin birbirini izleme sırasından ileri gelir. Hegzagonal kafeste AB olarak iki, yüzey merkezli kübik kafeste ise ABC olarak üç değişik tabaka birbirini izlemektedir.



Be, Mg, α -Ti, Zn, Zr bu tip kafes yapısına sahip tipik metallerdir.

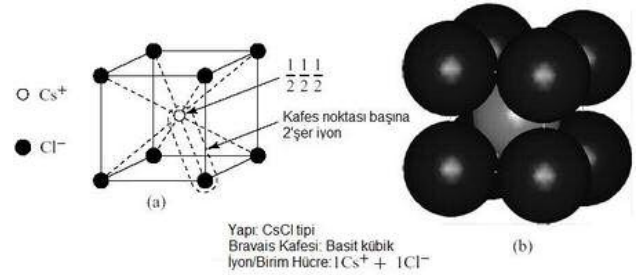
3.3. Seramiklerin Kristal Yapıları

Seramikler, metallere çok daha karmaşık kimyasal bileşimlere ve kristal yapılara sahiptir. Seramik malzemelerde sıkça rastlanan kristal kafeslerine örnekler aşağıda verilmiştir:

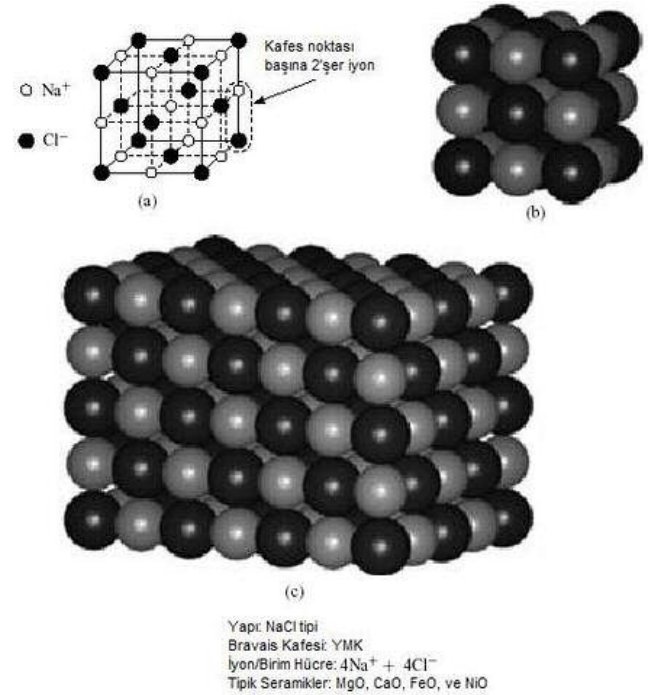
MX Formüllü Seramikler

M, metal elementini X ise ametal elementi göstermektedir.

CsCl Yapısı: Basit kübik yapıya sahiptirler. Birim hücre başına 1 Cs^+ iyonu ve 1 Cl^- iyonu olmak üzere toplam 2 iyon bulunmaktadır. Her ne kadar CsCl bileşik yapılara iyi bir örnek teşkil etse de yaygın olarak kullanılan bir seramik değildir.



NaCl Yapısı: Birçok önemli seramik malzeme bu yapıdadır. Her kafes noktasında iki iyonlu (bir sodyum ve bir klor) bir YMK yapıya söz konusudur. Klor iyonları normal YMK kafes noktalarında yerleşmişlerdir. Sodyum iyonları ise küpün kenarlarında ve küp merkezinde yerleşirler.



MX_2 Formüllü Seramikler

SiO_2 , UO_2 , ThO_2 ve TaO_2 bu yapıya sahip tipik metallerdir.

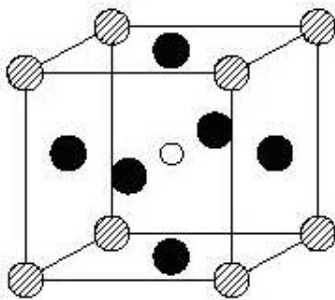
SiO_2 Yapısı: Silika veya SiO_2 mühendislikte yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Yeryüzünde ham madde olarak bolca mevcuttur. Karmaşık bir yüzey merkezli kübik yapıdadır.

M_2X_3 Formüllü Seramikler

Al_2O_3 Yapısı: Yaklaşık olarak hegzagonal bir yapıya sahiptir. Kafesin birim hücresinde 30 iyon bulunur. Formüle göre 12 iyon Al^{3+} ve 18 O^{2-} iyon olarak ayrılır.

$M^I M^{II} X_3$ Formüllü Seramikler

$CaTiO_3$ Yapısı: Basit kübik, yüzey merkezli kübik ve hacim merkezli kübik yapının kombinasyonundan oluşmaktadır. Köşelerde Ca^{2+} , yüzey merkezlerinde O^{2-} ve hacim merkezlerinde Ti^{4+} iyonları bulunmaktadır. Her kafes noktasında ve birim hücre başına 5'er iyon bulunmaktadır (bir Ca^{2+} , bir Ti^{4+} ve üç O^{2-}).



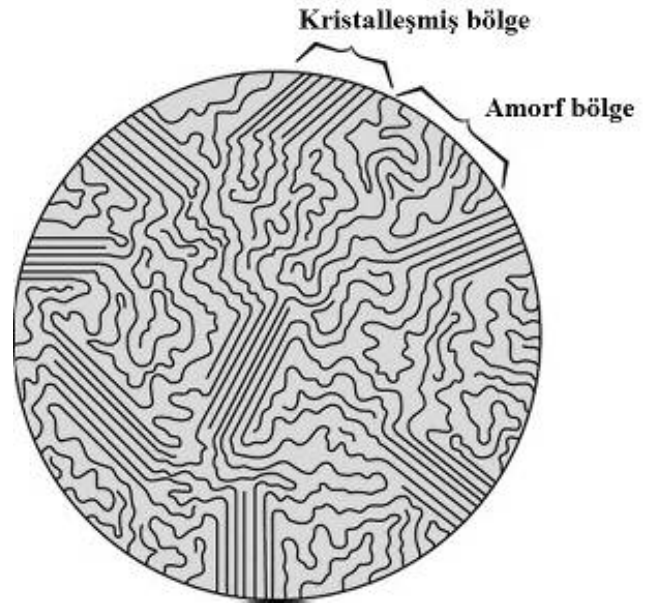
○ Ti^{4+} : Hacim merkezinde

● Ca^{2+} : Köşelerde

● O^{2-} : Yüzey merkezlerinde

3.4 Polimerlerde Kristal Yapılar

Metal ve seramiklerdeki atom ve iyonların düzenlenişlerine göre polimerlerin yapıları çok daha karmaşıktır. Burada uzun zincir moleküller söz konusu olduğundan, bu malzemelerin düzenli bir kristal yapı oluşturmaları çok zordur. Kristalleşme ancak bu zincirlerin uygun düzenlenmeleri ile yerel olarak ve en çok yapının %50'sinde oluşabilir.

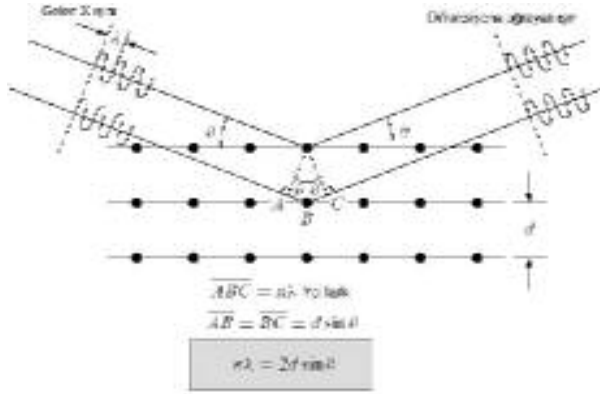


3.5. X-Işını Difraksiyonu

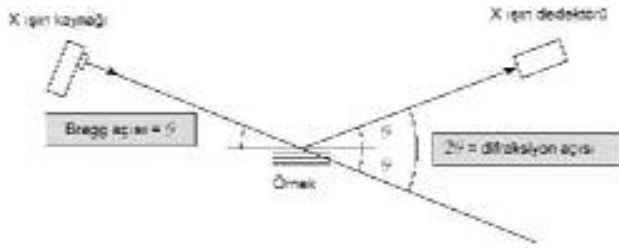
X ışınları yardımı ile, bir kristalde atom düzlemleri arasındaki etkileşim ve malzemenin kafes parametreleri belirlenebilir. X-ışınları difraksiyonu tekniği ile aynı zamanda bilinmeyen malzemelerin tanımlanması veya kafes yapıları belirlenebilir.

X ışınlarının rastladığı her atomdan, aynı dalga boyunda fakat düşük şiddette ikincil dalgalar saçılır. Küresel olarak yayılan bu dalgalar, aralarındaki girişim sonucu belirli açılarda birbirlerini yok eder veya kuvvetlendirir. Söz konusu kuvvetlendirme yayılan dalgalar arasındaki faz farkının dalga boyunun tam katları olması halinde gerçekleşir. Bu koşul, λ dalga boyu, d kafes düzlemleri uzaklığı ve θ geliş açısı arasındaki Bragg yansıma denklemi olarak

anılan $n\lambda = 2d\sin\theta$ bağıntısının sağlanması durumunda gerçekleşir. Burada n birinci, ikinci, üçüncü, vs. mertebeden difraksiyon dalgalarını tanımlar.



θ açısı genellikle Bragg açısı olarak tanımlanır. Buna karşın 2θ açısı difraksiyon açısı olarak tanımlanır.



4. Kristal Yapı Kusurları

Kristal yapılar kusursuz değildir ve bu kusurların varlığı çoğu kez malzemelerin davranışını belirleyici rol oynarlar.

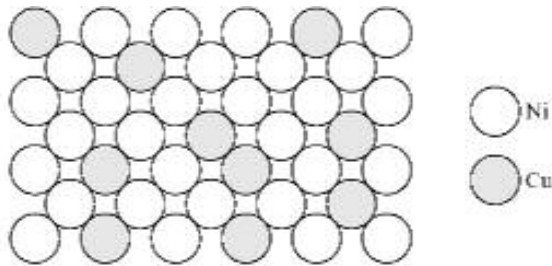
4.1. Noktasal (0-boyutlu)Kusurlar

4.1.1. Katı Çözelti (Kimyasal Kusur)

Bir metale ait kafes içinde diğer atomların varlığı bir kusur olarak düşünülebilir. Bu durum katı çözeltilerin oluştuğu metal alaşımlarında söz konusudur.

Yer alan katı çözeltisi: Metal kafesindeki bir atomun yerini farklı bir atomun almasıyla oluşur.

Örnek: Nikel metal kafesinin içinde bakır metalinin çözünmesi.

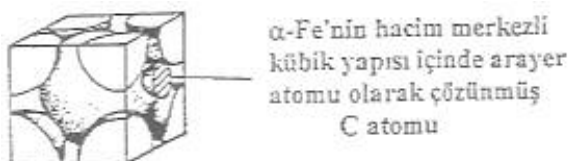


Bu tip bir katı çözeltinin her oranda oluşabilmesi (tam çözünürlük) için Hume-Rothery Kurallarının sağlanması gerekir:

- Kristal kafesler aynı olmalıdır
- Atom yarıçapları arasındaki fark en çok %15 olmalıdır
- Aynı sayıda valans elektronları bulunmalıdır
- Benzer elektro-negatiflik (elektron çekme kabiliyeti) olmalıdır

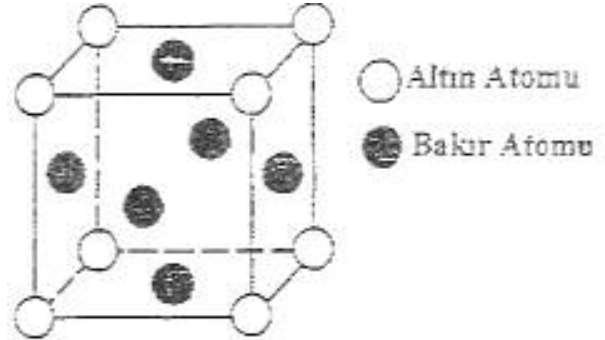
Ara yer katı çözeltisi: Metal kafesindeki boşluklara farklı atomların yerleşmesidir. Bunun için atom çapları arasındaki farkın büyük olması lazımdır.

Örnek: Fe-kafesinde C atomları



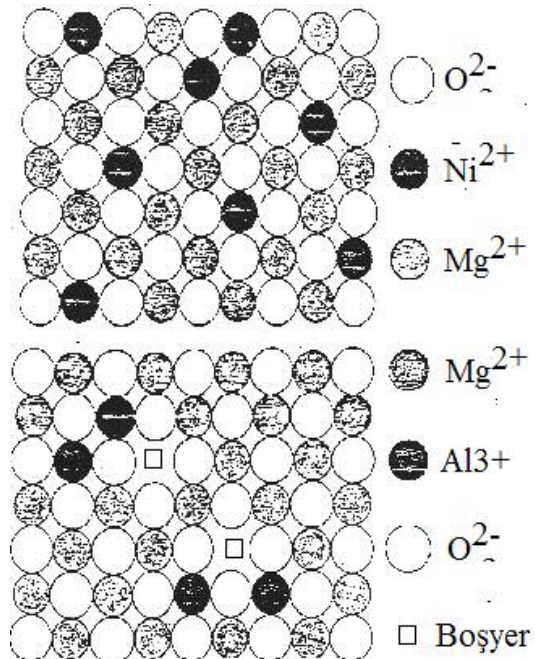
Düzenli Katı Çözeltiler: Bazı katı çözeltilerde düzenli istiflenme görülebilir (birim hacimdeki atomların karışım oranlarının sabit ve kafes içindeki yerlerinin belirli olması).

Örnek: AuCu₃ çözeltisi

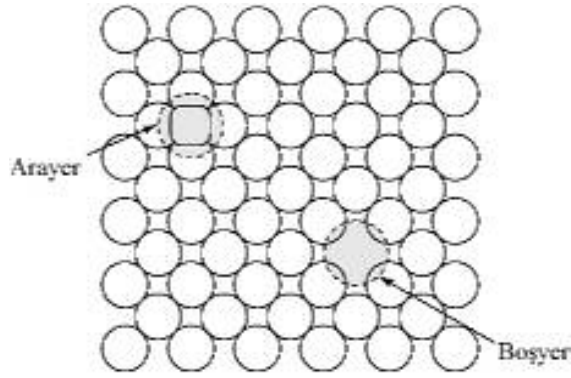


Metal dışı kristal kafeslerde katı çözelti oluşumunda (örneğin seramiklerde) katı çözelti oluşması için (özellikle iyonik bağlı kafeslerde) bir koşul vardır ve çözeltiye yeni atomların girmesi durumunda da toplam elektriksel yükün nötr olması gereklidir. Kafese giren atomun elektriksel yükünün diğer atomdan yüksek olması durumunda yapıda boşluklar oluşabilir.

Örnek: MnO kafesi içinde NiO ve Al₂O₃ çözünmesi



4.1.2. Boşyer ve Arayer Kusurları



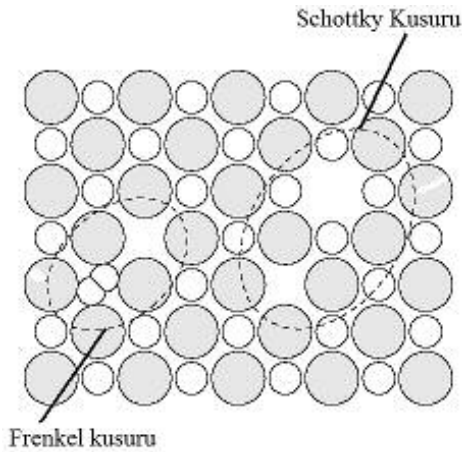
Boş yer kusuru: Atom olması gereken yerde, atomun eksikliğidir.

Ara yer kusuru: Atom olmaması gereken yerde fazladan bir atomun bulunmasıdır.

4.1.3. Frenkel ve Schottky Kusurları

Schottky Kusuru: Ters elektriksel yükte iki iyonun kristal kafesinde olması beklenen yerde bulunmamasıdır. Bu boşlukların çift olmasının nedeni, elektrik yükündeki nötrlüğün korunma gereğidir.

Frenkel Kusuru: Bir atomun yer değiştirerek, bir boş yer ile fazladan bir ara yer atomunun oluşturduğu bir kusurun ortaya çıkmasıdır.



4.1.4 Noktasal Kusurların Isıl Etkilerle Oluşumu

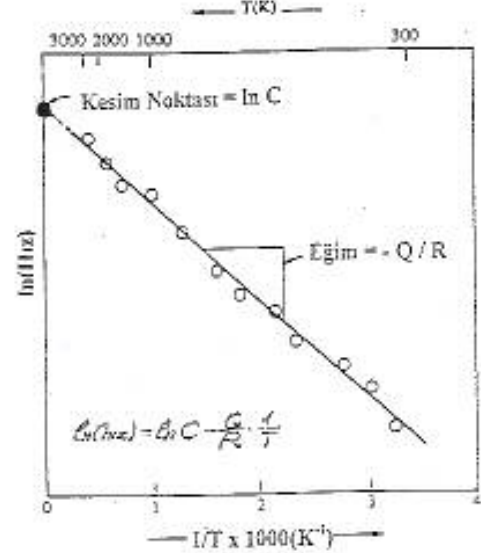
Malzemenin sıcaklığı arttıkça enerjisi ve atomlarının denge konumları etrafında

hareket hızı artar. Hız arttıkça denge mesafeleri büyür, ısınan metal genişler.

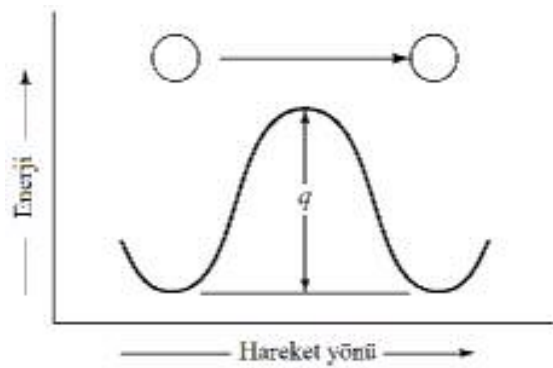
$$Hız = C \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

C: sabite
R: Universal gaz sabitesi
T: mutlak sıcaklık

Arrhenius tipi denklem



Bir atomun kafes içindeki bir denge konumundan diğer bir denge konumuna geçmesi için belirli bir eşik enerjisine (q) sahip olması gerekir. Aşağıda verilen **Maxwell-Boltzman Dağılımı**'na göre malzemenin sıcaklığını arttırdığında yüksek enerjili atom bulunma ihtimali, dolayısıyla bu eşik değerini aşarak kusur oluşma şansı artar.



Örneğin:

P = Gazlarda ortalama enerjiden ΔE kadar daha fazla enerjiye sahip bir moleküle rastlama olasılığı şu şekilde ifade edilebilir:

(Maxwell-Boltzman Dağılımı)

$$Hız = C \cdot e^{-\frac{q}{kT}}$$

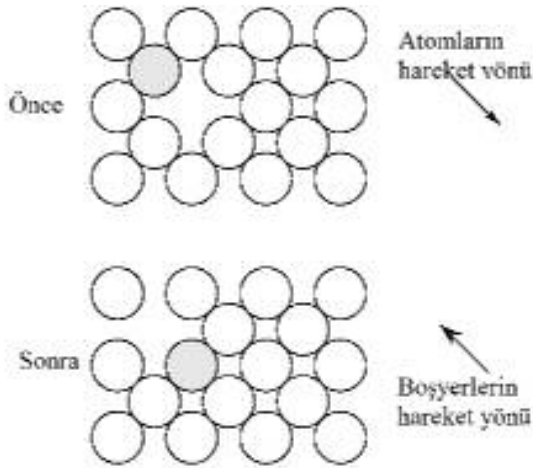
$$P \sim e^{-\frac{AE}{kT}}$$

$$k = R/N_{Av} \quad \text{Boltzman sabitesi}$$

$$q = Q/N_{Av} \quad \text{Birim atom (molekül) başına aktivasyon enerjisi}$$

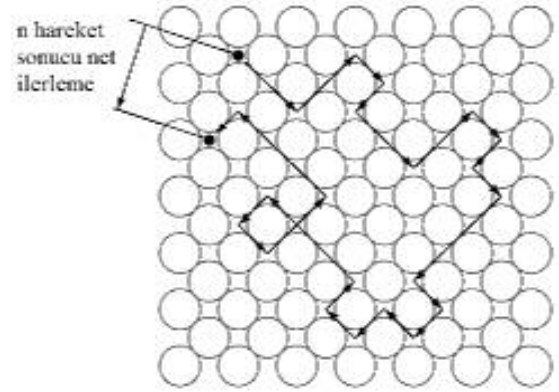
Yani malzeme sıcaklığı arttıkça atomlarının hareket hızını ve yüksek enerjili atom bulunma ihtimalini, dolayısıyla kusur oluşma şansını artırmış oluruz. Bir kusurun oluşması için atomun gerekli eşik enerjisini aşması gerekir. Nokta kusurları bu tür ısıl titreşimler sonucu ortaya çıkarlar.

Nokta Kusurları ve Katı Halde Yayınma: Kristal kafesleri içinde de yayınma (atomların yer değiştirmeleri) söz konudur ve bunun için kafeste boş yer olması önemlidir. Örneğin, metallerdeki noktasal kusurlar malzeme içinde atom yayınlamalarını kolaylaştırır. Ayrıca sıcaklığın yüksek olması bu olayın hızını artırır ve atomlar ısıl titreşimlerle bu hareketi sağlar.

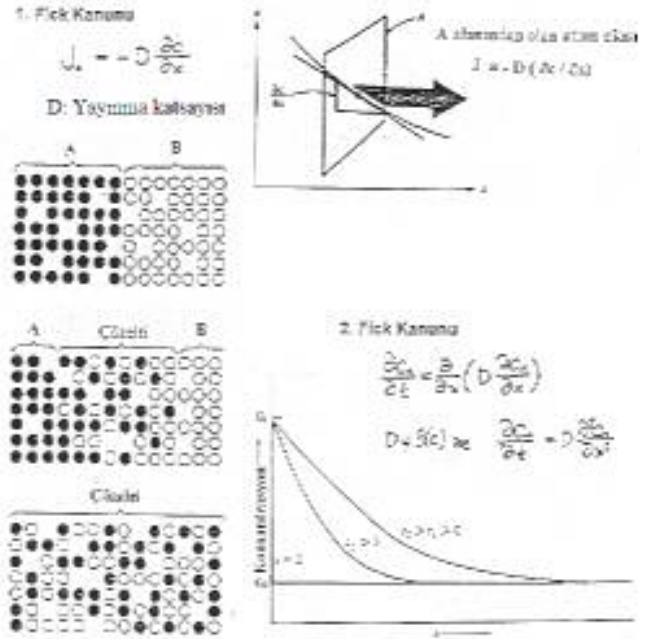


Yayınmadan yararlanarak, kafes içinde farklı atomların hareketi sağlanabilir; örneğin demir kafesinin içine karbon atomunun girmesi gerçekleştirilir (demir+karbon=çelik). Mühendislikte bazı parçaların yüzeyinin sert (aşınmaya dayanıklı), iç kısımların ise az karbonlu

(daha tok) olmasını istenebilir (örneğin dişli çarklar). Bunun için parça karbon oranı düşük bir malzemeden üretilir ve daha sonra karbonlu bir ortamda yüzeye karbon yayındırılabilir. Sıcaklık ve süre kontrol edilerek, karbon atomlarının dişli yüzeyine istenilen miktar ve derinlikte yayınmasını sağlanabilir. Böylece dişli çarkın dış yüzeyin istenilen yüksek sertlikte, iç kısımlarının ise daha tok olması sağlanabilir.



Yayınma (Fick) Kanunları:

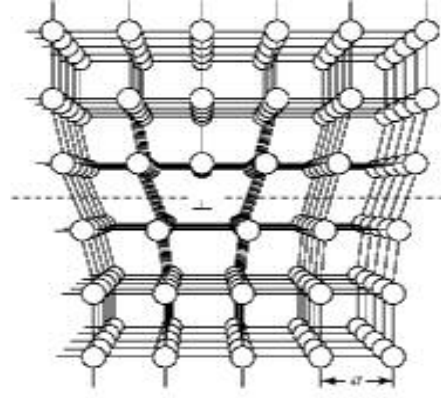
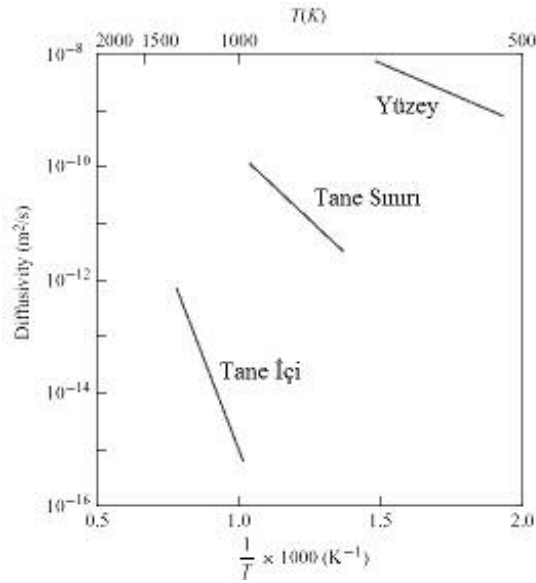


Fick kanunları difüzyon kurallarını verir. Bu denklemlerdeki difüzyon katsayısı sabit olmayıp aşağıdaki formüle göre sıcaklıkla artar. D_0 , çözen ve çözünen atomların cinsine bağlı olan bir sabit bir değerdir.

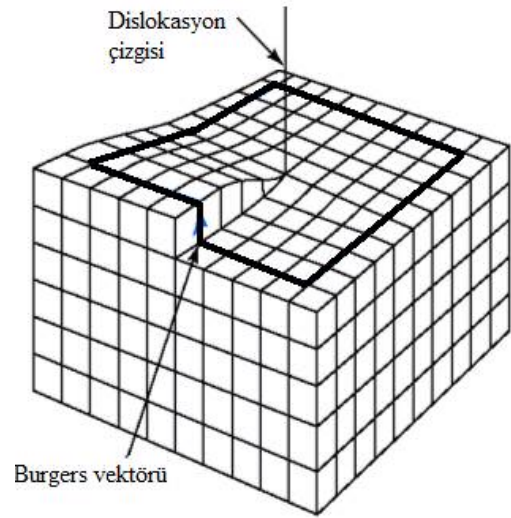
$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Sonuç olarak noktasal kusurun fazla olması durumunda ve yüksek sıcaklıklarda yayınma hızı daha yüksektir.

Atomların kafes içindeki yayınma hızları, tane sınırlarında, tane içinde ve yüzeyinde farklıdır. Tane içinde yayınma hızı en düşüktür, çünkü atomlar en iyi orada istiflenmişlerdir. Tane sınırında yayınma hızı, tane içinden daha fazladır, çünkü tane sınırındaki dar bir bölgede amorf yapı söz konusudur. Tane yüzeyinde ise yayınma hızı en büyüktür.



Kenar Dislokasyonu



Vida dislokasyonu

Dislokasyonlar sadece çok kısa bölümlerinde saf kenar veya saf vida karakteri gösterirler. Genellikle bu ikisinin bileşimi olan **karışık dislokasyon** halindedirler.

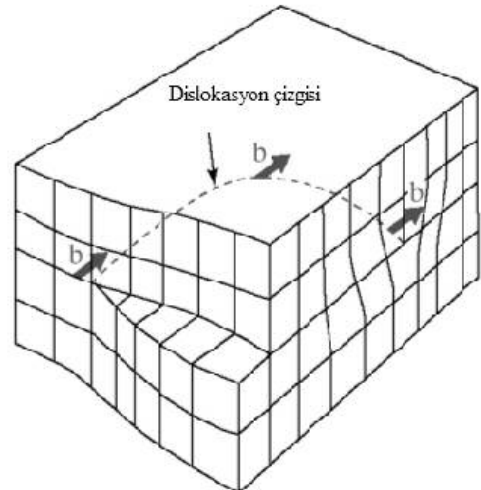
4.2. Çizgisel (1-boyutlu) Kusurlar

4.2.1. Dislokasyonlar

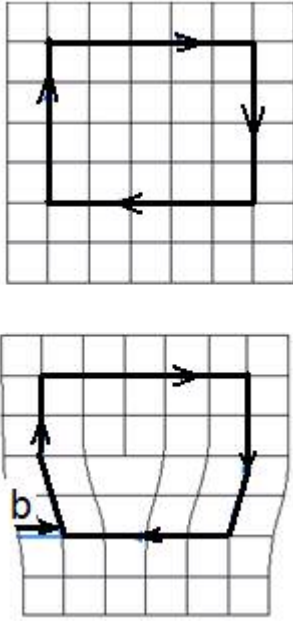
Dislokasyonlar kristal kafes içindeki çizgisel kusurlardır. İki tür dislokasyon vardır:

Kenar dislokasyonu; kafes içinde sona eren ek bir kafes düzleminin varlığı olarak düşünülebilir.

Vida dislokasyonu; Kafes düzlemi kendisine dik olan dislokasyon çizgisi etrafına spiral şeklini alır.

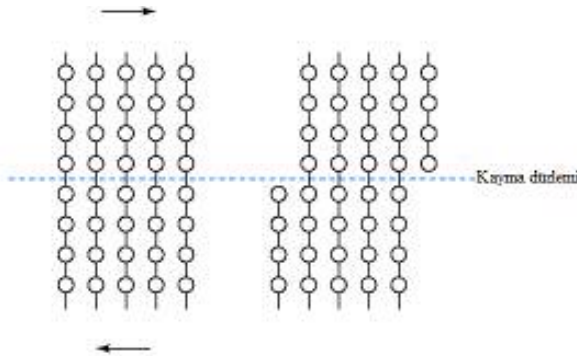


Bir dislokasyonu **Burgers Vektörü** karakterize eder. Dislokasyon çizgisini kapsayacak şekilde bir atomdan başlayıp saat yönünde aynı adımlarla önce yukarı, sonra sağa, daha sonra aşağı ve en son olarak sola doğru hareket ederiz. Bitişten başlangıca doğru bir vektör çizdiğimizde ortaya çıkan vektör Burgers Vektörüdür. Bu vektör kenar dislokasyonunda dislokasyon çizgisine dik, vida dislokasyonunda ise dislokasyon çizgisine paraleldir.



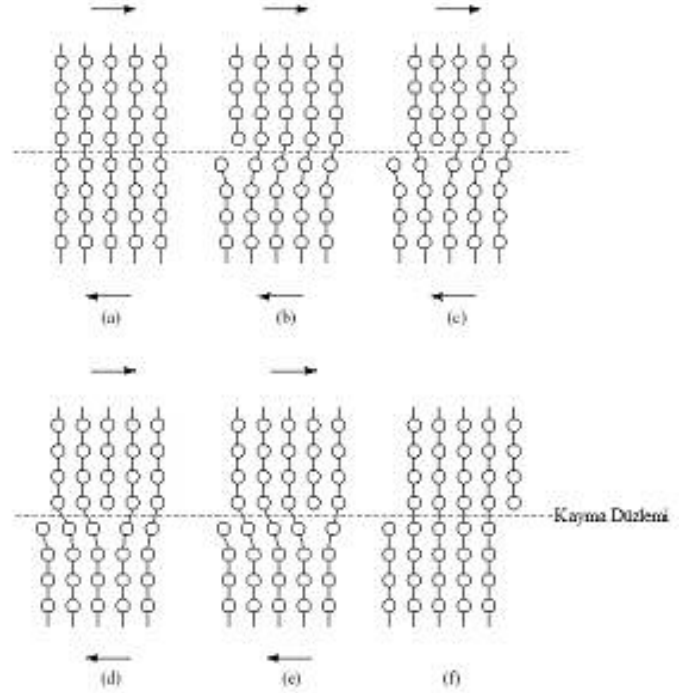
Kenar dislokasyonu için Burgers vektörü

Dislokasyonlar ve Plastik Şekil Değişimi



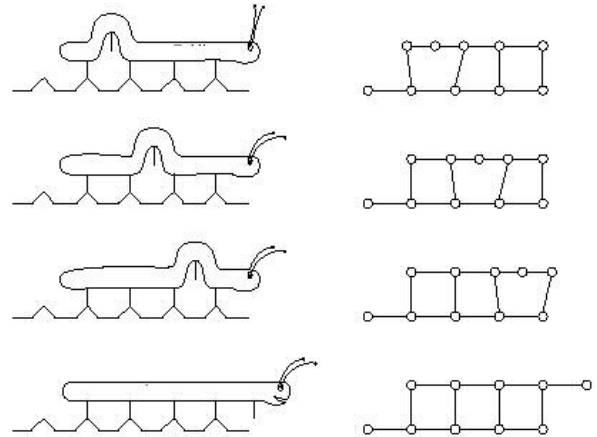
Kristal kafeste kalıcı (plastik) şekil değişimi için kafesin bir bölümünün, komşu atomlarla bağlarını koparıp kayma düzlemi boyunca ötelenmesi gerekir. Bunun için hesaplanan teorik kuvvetler

(yani tüm bağların aynı anda kopması için) çok büyüktür. Oysa deneysel olarak bulunan değerler bu teorik kuvvetlerin çok altındadır. Bunun nedeni dislokasyonların adım adım ilerleyerek çok daha düşük kuvvetlerle kalıcı şekil değişimini sağlamasıdır.



Dolayısıyla kristal yapılarda şekil değişimi için dislokasyonların varlığı çok önemlidir. Dislokasyonların hareketi ile bütün bağları koparmamıza gerek olmadan ile çok daha düşük zorlamalar ile şekil değişimleri gerçekleşir.

Bu hareketi bir solucanı ilerlemesine benzetebiliriz.



Dislokasyon hareketi mekanizması kristal yapıya sahip malzemelerde kalıcı şekil değişiminin nasıl oluştuğunu açıklamaya yardımcı eder. Malzemeler içinde kusur olarak belirli miktarda dislokasyon bulunur. Ayrıca etkiyen gerilmeler altında yeni dislokasyonlar ortaya çıkar. Dışarıdan mekanik bir zorlama olursa malzeme ortaya çıkan kayma gerilmeleri dislokasyonları hareketlendirir ve şekil değişimi oluşur.

Dislokasyonlar özellikle metal kafeslerinde kolay ilerlerler. Çünkü kafes içindeki tüm atomlar elektronlarını ortak olarak kullandıkları için, dislokasyon hareketi sonrası kristalin elektrik yükleri bakımından bir değişime uğraması söz konusu değildir.

Bir malzemenin kalıcı şekil değiştirmesini zorlaştırmak (akma dayanımını artırmak!) için alınması gereken en etkin önlem, dislokasyon hareketinin güçleştirilmeye çalışmaktır. Dislokasyon hareketini zorlaştıran değişik engeller söz konusudur: **Tane sınırları** dislokasyonu engeller. Tane sınırları arttıkça (taneler küçüldükçe) dislokasyonların hareketi zorlaşır. Bu yüzden dislokasyonlar ince taneli malzemelerde kaba taneli malzemelere göre daha zor hareket ederler ve bu durum dayanımı artırır. Kafes içindeki **yabancı atomlar** kristal yapıyı çarpılmasına ve dislokasyon hareketlerinin zorlaşmasına neden olur. Daha önce kalıcı şekil değişimine uğramış ve kafesi içinde çok yoğun dislokasyon bulunan malzemelerde ise **dislokasyonlar birbirlerinin hareketini engeller**.

Kristal yapıya sahip metal malzemelerde malzemelerin birçok mekanik davranışı dislokasyon hareketleri ile kolaylıkla açıklanabilir:

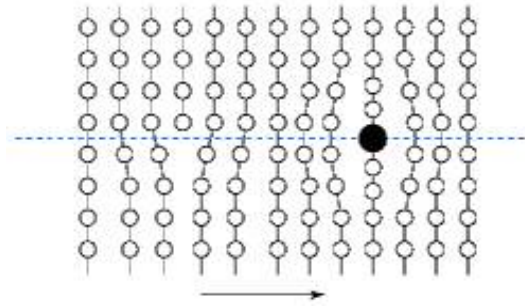
Soğuk şekil vermede pekleşme

Çok kristalli metallerde dislokasyon hareketleri çeşitli engeller tarafından kısmen önlenir. Şekil değişimi sırasında ilerleyen dislokasyonlar bu tür engellere gince durmak zorunda kalır ve

arkasından gelenler ile birlikte bu bölgelerde bir dislokasyon yığılması oluşturur. Artan zorlama ile birlikte yeni dislokasyonları oluşur, sayıları gittikçe artan dislokasyonlar birbirilerini de engellemeye başlarlar. Yani malzemeyi kalıcı şekil değiştirmek için gereken gerilmenin sürekli artırılması gerekir. Malzemenin plastik şekil değişimine karşı direnci giderek artar. Bu olay **pekleşme** olarak adlandırılır.

Alaşımlama yoluyla dayanım artışı

Alaşımlama ile kafesin içine çok sayıda arayer ve yeralan atomlarının gireceğinden, dislokasyon hareketi zorlaşır ve malzemenin akma dayanımı artar.



Dislokasyonun hareket etmek istediği yön

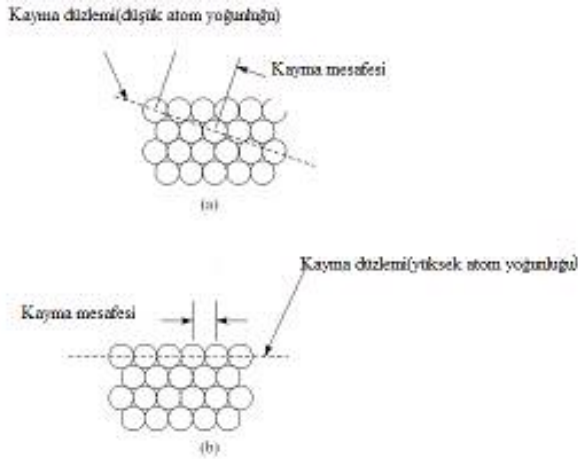
Yüksek sıcaklıklarda pekleşme olmaması

Yüksek sıcaklıklarda atom hareketliliği ve yayınma artacağından, kalıcı şekil değiştirme sonrası bozulan ve çok sayıda kusur içeren kristallerde atomlar yeniden düzenlenebilir (yeniden kristalleşme) ve dislokasyon yoğunluğu düşeceğinden pekleşmenin etkisi ortadan kalkar.

Kristal yapısı karmaşıklaştıkça şekil vermenin güçleşmesi

Seramikler de kristal yapıya sahip olmalarına rağmen, seramiklerde dislokasyon hareketleri görülmez ve bu malzemelere kalıcı şekil vermek imkansızdır. Buna neden hem kafes yapılarının karmaşık oluşu, hem de düzlemlerin ötelenmesi ile örneğin iyonik kristallerde elektrik yüklerinin dağılımında dengesizliklerin ortaya çıkmasıdır.

Kayma Sistemleri

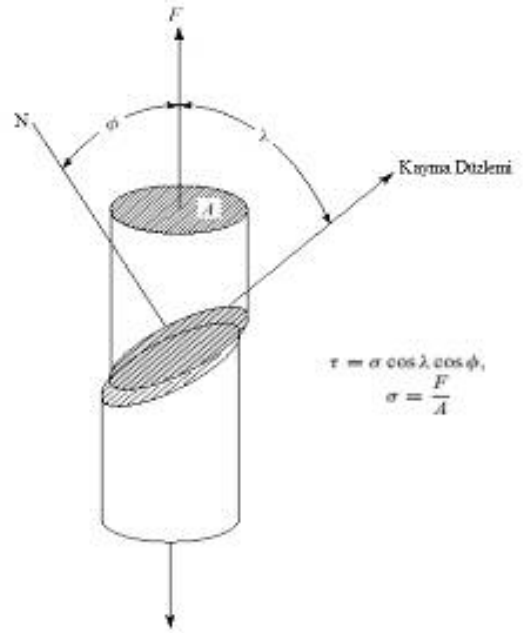


Dislokasyon hareketi kristal yapı içinde kayma gerilmelerinin etkisi ile gerçekleşir. Dislokasyonlar atom yoğunluğu en yüksek düzlemlerde ve bu düzlemler üzerindeki yoğun doğrultularda kayarlar. Çünkü bu şekilde atomların kayma için gerekli yer değişimleri azalacağından dolayı kaymaya karşı dirençleri küçülür ve hareket daha küçük gerilmelerle gerçekleşir. Örneğin yukarıda (b) şeklindeki kayma düzleminde dislokasyonlar en rahat ilerler.

Kaymanın meydana geldiği düzleme **kayma düzlemi**; bu kayma düzlemi içinde kaymanın meydana geldiği doğrultuya da **kayma doğrultusu** denir. Bu düzlem ve doğrultuların meydana getirdiği sisteme **kayma sistemi** denir. Kayma sistemi ne kadar çok olursa plastik şekil değişimi o kadar kolaylaşır.

Kristal Yapı	Kayma Düzlemi	Kayma Doğrultusu	Birim Hücre Geometrisi	Kayma Sistem Sayısı
HMK α -Fe, Mo	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$		$6 \times 2 = 12$
YMK Al, Cu	{111}	$\langle \bar{1}\bar{1}0 \rangle$		$4 \times 3 = 12$
SDH Cd, Mg	{0001}	$\langle \bar{2}0 \rangle$		$1 \times 3 = 3$

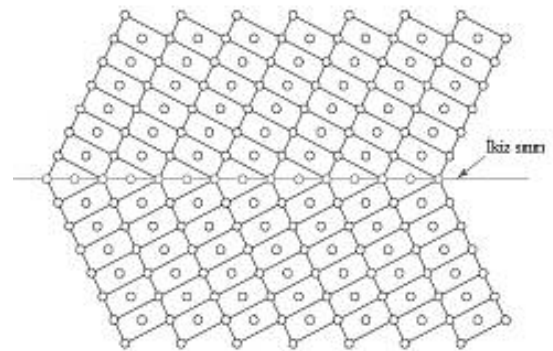
Kritik kayma gerilmesi bileşeni



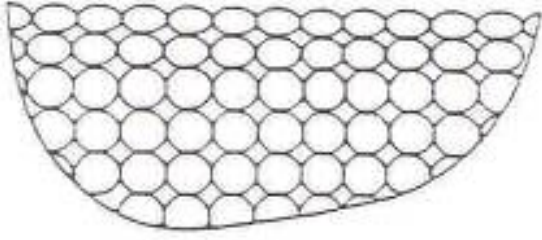
Dislokasyon hareketleri için kayma gerilmesinin etkimesi gereklidir. Tek eksenli zorlamalarda dahi (çekme, basma gibi) parça içindeki değişik kesit ve doğrultularda kayma gerilmeleri oluşur (τ) ve bu değer yukarıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir. Görüldüğü gibi en büyük kayma gerilmesi çekme doğrultusu ile 45 açı yapan düzlemde ortaya çıkmaktadır.

4.3. Düzlemsel (2 boyutlu)

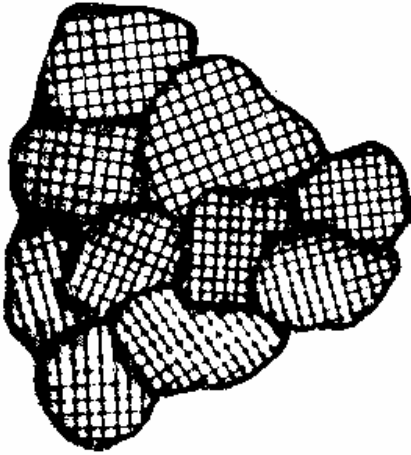
Kusurlar



İkiz sınırları: Kafeste atom düzlemleri ikiz düzlemlerine göre simetrik olarak düzenlenebilirler. Bu kusur, HMK ve SDH yapılarda mekanik zorlama; YMK yapılarda ise yumuşatma tavlaması (ısıtıl işlem) sonucu oluşur. İkiz sınırları dislokasyon kaymasını güçleştirir ve metallerin akma dayanımını artırır.



Malzeme Yüzeyleri: Kristal kafesinde malzemenin yüzeyleri de bir düzlemsel kusur olarak düşünülebilir.

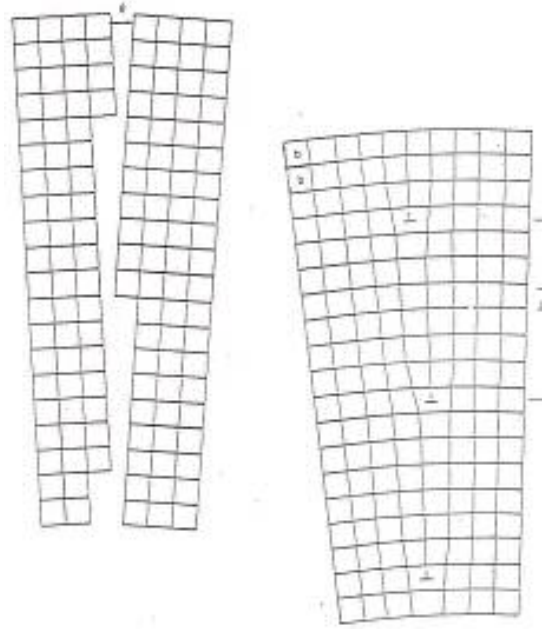


Tane sınırları: Mühendislik malzemelerinin yapıları tek bir kristalden oluşmaz. Bu malzemelerde yapıları aynı olduğu halde uzay içindeki konumları birbirinden farklı olan kristal parçacıkları (taneler) bulunur. Özel olarak üretilen tek kristaller dışında, normal malzemeler çok tanelidir. Bu nedenle tek kristalde özellikler yöne bağlı (anizotrop) olmasına karşın, çok taneli (polikristal) malzemeler, tanelerinin çok sayıda ve konumlarının rasgele olması nedeniyle izotrop olarak kabul edilebilirler.

Tane sınırları; birbirinden ayıran yüzeydir ve atomların düzgün yerleşmediği dar bir alandır.

Büyük açılı tane sınırlarında, sınır boyunca atomlar her iki kristale de uyum sağlayamadığından rasgele dizilmişlerdir ve çok dar bir alanda yapı amorf olarak düşünülebilir.

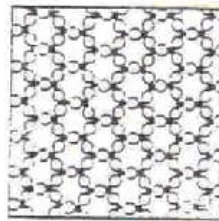
Küçük açılı tane sınırları



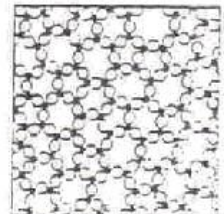
Küçük açılı tane sınırları, bitişik kafesler arasında küçük bir yönlenme bozukluğunun oluşturduğu bir dislokasyon sırasıdır. Kenar dislokasyonları tarafından oluşturulan küçük açılı tane sınırları eğik sınırlar, vida dislokasyonunun neden olduğu sınırlar ise burkulma sınırları olarak adlandırılırlar.

4.4 Kristal Yapıda Olmayan Katılarda 2-boyutlu Kusurlar

Atomların rasgele istiflendiği yapılar amorf olarak adlandırılır, Bazı malzemelerde ise kristal yapı olmasa da başka bir kısa mesafe düzeni bulunabilir.



kristal



kısa mesafe düzeni
(geleneksel cam)

4.5. Elektron Mikroskopları

Elektron mikroskoplarında elektronların parçacık ve dalga etkileşiminden yararlanır ve elektron ışını bir cismin görüntüsünü oluşturmak için kullanılabilir. Hızlandırılmış elektronlar çok kısa dalga boyuna sahiptir, böylece çok daha kısa dalga boyları ile daha fazla büyütme oranları ve daha iyi ayırma gücü elde edilmesi sağlanır. Standart bir elektron mikroskopunun ayırma gücü birkaç nanometre seviyesindedir. Elektron mikroskopunda ışının geçtiği bölge yüksek vakum altındadır ve ışın hava molekülleri tarafından saptırılamaz. Elektron mikroskopları iki çeşittir.

Transmisyon Elektron Mikroskobu

Bu mikroskopta elektron ışını kalınlığı çok inceltilmiş bir örneğe yönlendirilir. Elektron ışını malzeme içinden geçer (transmisyon), projeksiyon mercekleri gerçek görüntüyü fotoğraf gibi film üzerine düşürür. Malzeme içindeki kusurlar ışının yönünü etkileyeceğinden bunları belirlemek ve izlemek mümkün olur. Transmisyon electron mikroskopunda kullanılan örnekler çok ince olmalıdır. 10-20nm (100 atom kalınlığı) kadar ince örnekler özel yöntemlerle hazırlanabilir.



Transmisyon elektron mikroskobu

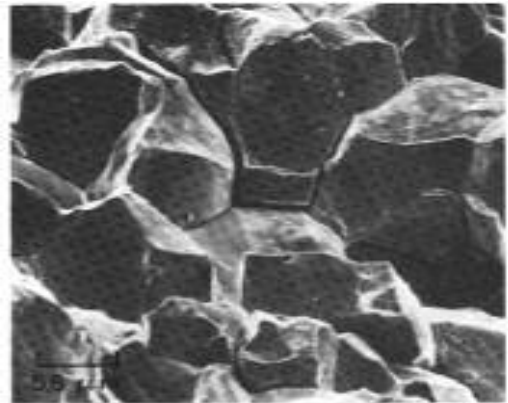
Tarayıcı Elektron Mikroskobu

Tarayıcı elektron mikroskopunda malzemenin inceltilmesine gerek yoktur ve elektron ışınlarının malzemenin yüzeyinden yansması incelenir. Elektron ışını incelenen yüzeye odaklanır ve yüzeyini taramaya başlar. Işının örnek yüzeyini taramaya başlamasıyla yüzeyden saçılan elektronlar, malzemeye göre pozitif voltajda tutulan anotta toplanır.

Yüzeyde bulunan ve elektron ışını ile uyarılan atomların yaydığı dalga boyu karakteristik bir özelliğidir ve her atomun dalga boyu farklıdır. Bu özellikten faydalanarak saçılan dalga boylarını belirleyerek incelediğimiz malzeme yüzeyindeki elementleri bulabiliriz. Tarayıcı elektron mikroskobu ile malzeme yüzeyinin topografik görüntüsü de incelenebilir ve mikroskopun ayırma gücü 10nm mertebesinde.



Tarayıcı elektron mikroskobu



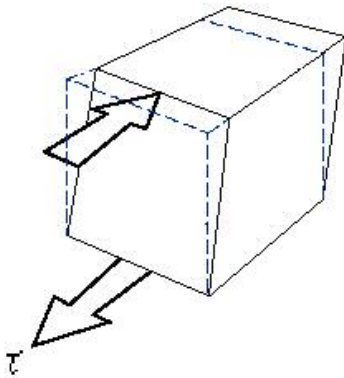
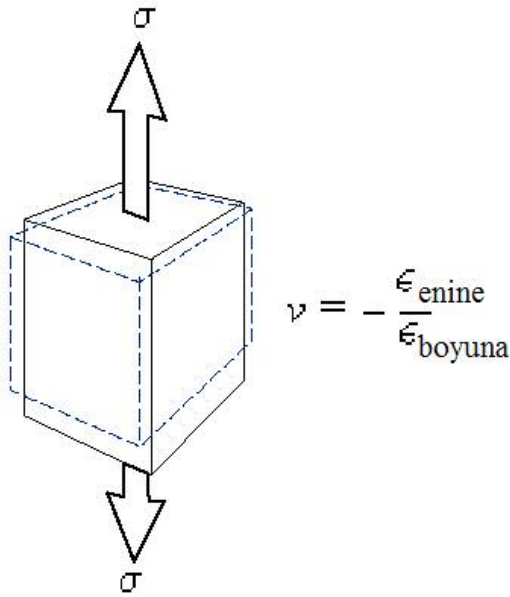
Bir metalde kırık yüzeyi

5. Mekanik Özellikler

Malzemelerin uygulanan mekanik zorlamalara altındaki davranışı, mekanik özellikler olarak adlandırılır. Mekanik özellikler esas olarak atomlar arası bağ kuvvetlerinden kaynaklanır, ancak bunun yanında malzemenin iç yapısının da büyük etkisi vardır ve iç yapısal değişiklikler yapılarak mekanik özellikler önemli oranda geliştirilebilir.

Her malzeme için karakteristik bir “gerilme – şekil değiştirme” ilişkisi vardır; bu eğri genellikle çekme deneyi ile saptanır ve malzemenin mekanik davranışı ile özellikleri hakkında çok önemli bilgiler içerir.

5.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Tanımları



Normal ve kayma gerilmeleri

Gerilme:

Herhangi bir kesitte birim alana düşen kuvvete **gerilme** denir. Kuvvet kesite dik ise ve boy değişimlerine yol açıyorsa **normal gerilme** (σ), kuvvet kesit içinde ise ve açı değişimlerine neden oluyor ise **kayma gerilmesinden** (τ) söz edilir. Normal gerilmeler artı işaretli ise çekme, eksi işaretli ise basma anlamına gelir. Bir parçaya uygulanan kuvvet ve momentler, incelenen kesitin durumuna göre hem normal, hem de kayma gerilmeleri oluşturacaktır.

Şekil Değişimleri:

Dış kuvvetler altında malzemeler şekil değişimine uğrarlar. Kuvvetlerin kaldırılması halinde başlangıç boy ve biçimine dönülürse, malzemenin uğradığı şekil değişimi **elastik**, aksi halde **plastik** (**kalıcı**) olarak adlandırılır.

Gerilme altındaki parçalarda boy ve açı değişimleri meydana gelir. ΔL boy değişimi ilk ölçü boyu L_0 değerine oranlanırsa **birim uzama** ϵ olarak adlandırılan birimsiz bir büyüklük elde edilir. $\epsilon = \Delta L / L_0$

Bu değer yüzde olarak verilirse yüzde uzama $\% \epsilon = (\Delta L / L_0) \times 100$ olarak adlandırılır. Şekil değişiminin uzama veya kısalma olmasına göre bu değer artı veya eksi işaretli olabilir.

Tek eksenli gerilme altındaki bir parça uzarken aynı zamanda gerilmeye dik doğrultuda da daralır.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{enine}}{\epsilon_{boyuna}}$$

oranı **Poisson oranı** olarak adlandırılır. Elastik şekil değişimindeki Poisson katsayısı metaller için yaklaşık olarak 0,3 civarındadır.

Kayma gerilmeleri nedeniyle oluşan açısallık şekil değişimi ise boyutsuz bir büyüklük olan γ (radyan) ile verilir ve **birim kayma** γ olarak adını alır.

Elastiklik ve Kayma Modülü E:

Elastik alanda gerilme ile birim uzama doğru orantılıdır ve bu bölgede Hooke kanunu geçerlidir. Gerilme-birim uzama eğrisinde bu bölge görülen doğrunun eğimi **elastiklik modülü** olarak adlandırılır. Elastiklik modülü malzemenin yay katsayısı olarak düşünülebilir ve birimi gerilme ile aynıdır.

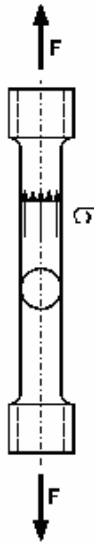
$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \text{ (bak çekme eğrisi)}$$

Kayma gerilmesi τ ile elastik birim kayma arasındaki ilişki ise $G = \Delta\tau / \Delta\gamma$ olarak verilir. Burada G **kayma modülüdür**.

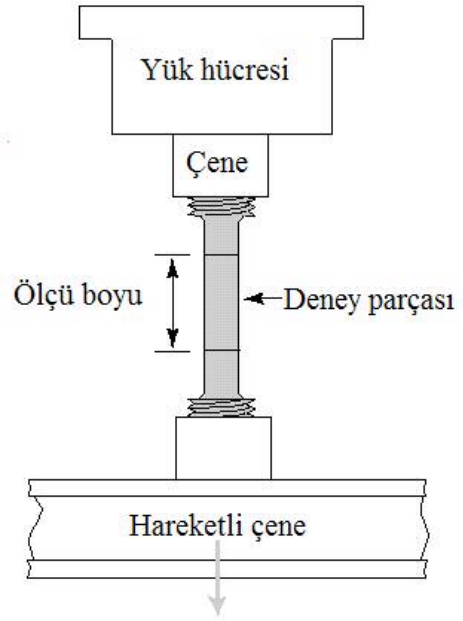
Yukarıda anılan üç elastiklik büyüklüğü (E , G ve ν) birbirinden bağımsız değildir ve aralarında aşağıda verilen bağıntı vardır, yani ikisinin bilinmesi durumunda üçüncüsü hesaplanabilir.

$$E = 2G(1 + \nu)$$

5.2. Çekme Deneyi



Çekme deneyi, bir malzemenin dayanımını ve mekanik davranışlarını belirlemek için yapılır ve malzeme deneyleri arasında en önemlilerden biridir. Karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için, çekme deneyleri standartlara uygun olarak yapılır. Türk Standartlarında bu deneyin yapılışı ve deney parçasının hazırlanışının ayrıntıları **TS 138 – EN 10002-1** standardı ile belirlenmiştir.



Çekme deneyinde malzemeye yavaş yavaş artan darbesiz çekme zorlamaları uygulanır. Uygulanan kuvvet, deney parçası eksenindedir ve malzemenin kesitine üniform olarak dağılır. Kuvvet parça kesitine dik olduğu için normal gerilmeler söz konusudur. Deney sırasında uygulanan kuvvet F ve bu zorlama altında gerçekleşen uzama değerleri ΔL kaydedilir ve deney kopma oluşana kadar sürdürülür.

Gerilme değeri

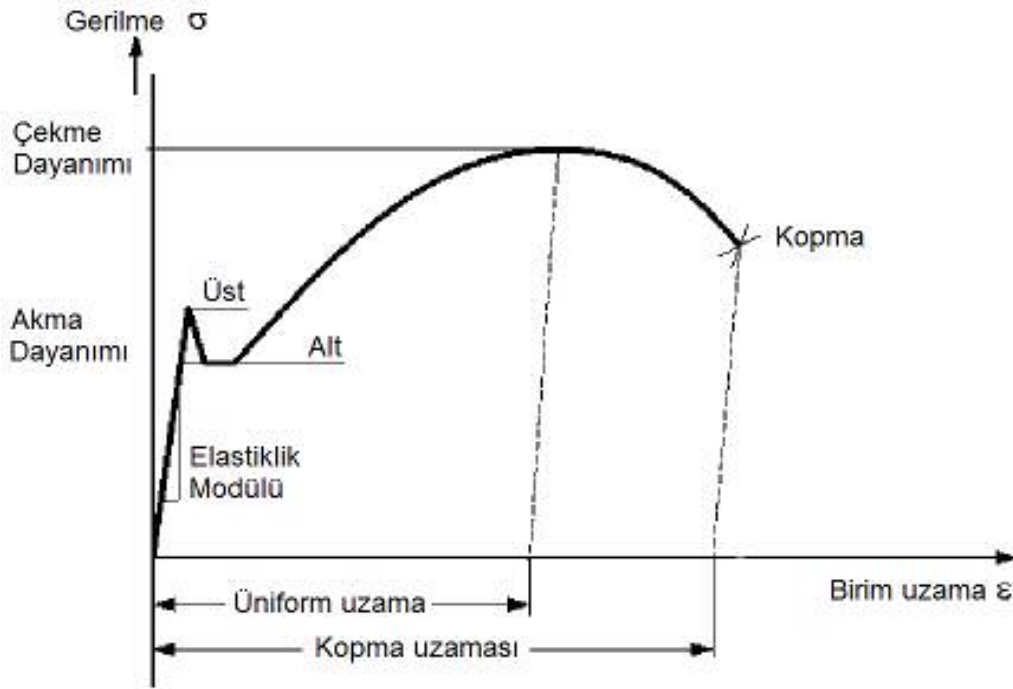
$$\sigma = \frac{F}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

Birim uzama değeri de ilk ölçü boyuna oranlanarak birim uzama ε (veya yüzde uzama) olarak hesaplanır.

$$\Delta L = L - L_0 \text{ [mm]}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\%$$

Gerilme ve birim uzamanın hesaplanmasında deney başlangıcındaki kesit büyüklüğü ve başlangıçtaki ölçü boyunun kullanılması ile elde edilen bu değerlere **mühendislik gerilmesi** ve **mühendislik birim uzaması** adı verilir. Deney sırasındaki kesit ve boy değişimlerini dikkate alarak hesaplama



Düşük karbonlu bir çelik için mühendislik çekme eğrisi

yapılırsa elde edilen değerler ise **gerçek gerilme** ve **gerçek birim uzama** olarak adlandırılır ve ileride daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Çekme makinesinde kaydedilen “kuvvet – uzama eğrisi” ve yukarıdaki bağıntılar yardımıyla **mühendislik ekme eğrisi** kolaylıkla elde edilir, $\sigma = f(\epsilon)$. Eğrinin doğrusal olan başlangıç kısmında şekil değişimleri elastiktir. Akma gerilmesinin aşılması ile kalıcı şekil değişimleri başlar. Akma başladıktan sonra kuvvetin boşaltılması ile elastik şekil değişiminin geri döndüğü ancak kalıcı birim uzamaların kaldığı görülür.

Çekme eğrisi yardımıyla malzemeye ait şu özellikler belirlenebilir:

Elastiklik E ve Kayma Modülü G (GPa)

Hooke kanunu geçerli olduğu bu bölgede gerilme ile birim uzama doğrusal orantılıdır. Bu bölgedeki doğrunun eğimi **elastiklik modülü** olarak adlandırılır.

$$E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

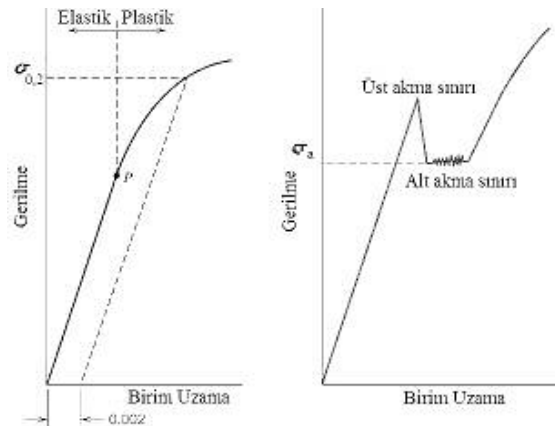
Bu değer atomlar arasındaki bağ kuvveti ve kafes yapısı ile ilgilidir. Eğri ne kadar dik olursa malzeme o kadar rijit, ne kadar yatık olursa o kadar esnek olur.

Poisson Oranı ν

Tek eksenli gerilme altında bir parçaya gerilmeye dik doğrultuda da şekil değiştirmek zorundadır,

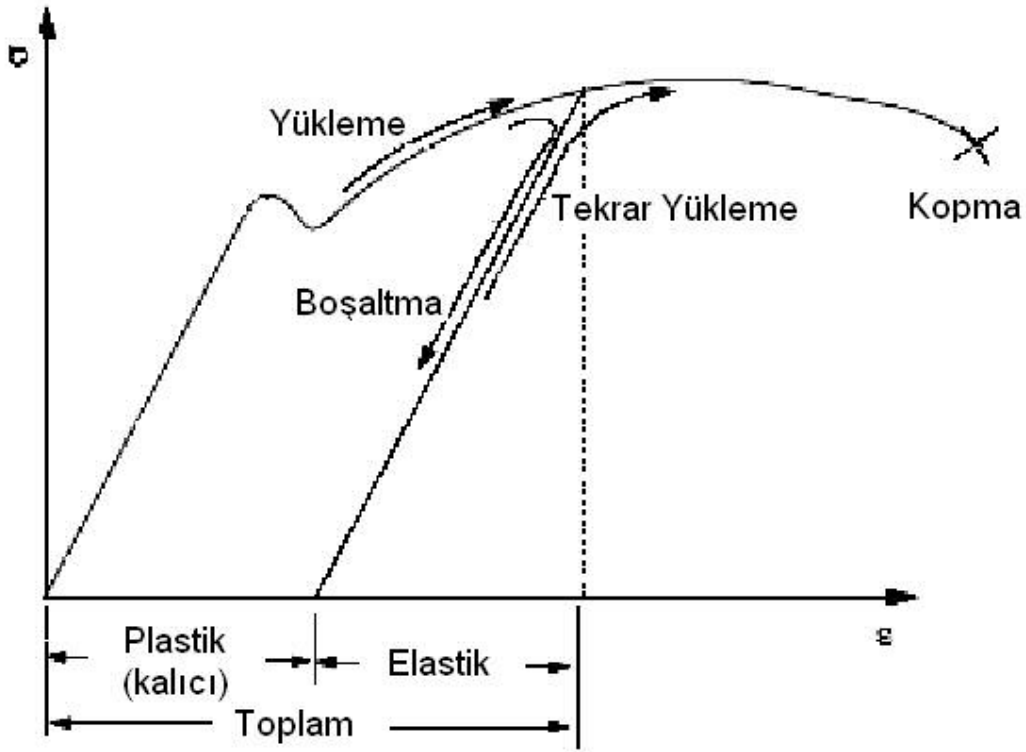
$$\nu = - \frac{\epsilon_{enine}}{\epsilon_{boyuna}}$$

oranı **Poisson oranı** olarak adlandırılır.



Elastiklik Sınırı σ_e

Bu değer malzemede elastiklik bölgesinin sona erdiği ve kalıcı şekil değişiminin başladığı gerilme değeridir. Bu değer eğri üzerinde tam olarak belirlenmesi güç olduğundan bunun yerine karşılaştırma değeri olarak belirli bir kalıcı uzamanın olduğu (mesela %0,2) gerilme değeri (akma dayanımı) daha yaygın olarak kullanılır.



Akma Dayanımı

Belirli bir miktar kalıcı uzamanın oluştuğu (mesela %0,2) gerilme değeri akma dayanımı $\sigma_{0,2}$ olarak kullanılır. Bu değer elastiklik sınırından çok daha kolay belirlenebilir. Bazı özel durumlar için % 0,2'den farklı değerler kullanılabilir. Örneğin yüksek sıcaklıklarda ve plastik malzemelerde % 1 alınabilir.

Akma dislokasyonların hareketiyle başlar. Akma dayanımı, malzemenin kalıcı şekil değiştirmeden çıkılabilecek en üst gerilme sınırıdır.

Bazı malzemelerde (yumuşak çeliklerde) akmanın başladığı gerilme değeri açıkça görülebilir (**Belirgin Akma Dayanımı**). Burada alt ve üst akma sınırları söz konusudur. Bu malzemede üst akma sınırıyla alt akma sınırı arasında dalgalanmanın nedeni, başlangıçta kafeste bulunan ara yer atomlarının dislokasyon cephesindeki boşluklara yerleşmesi ve dislokasyonların ilk hareketini güçleştirmesidir. İlk hareket sonrası bu engellerden kurtulan dislokasyon hareketlerinin rahatlaması ile bir süre akma daha kolay gerçekleşir. Şekil değişimi görmüş bu malzeme akmadan sonra uzun süre bekletilirse, ara yer atomları dislokasyonları engelleyen konumlarına

geri döner ve malzemede belirgin akma tekrar ortaya çıkar.

Kalıcı Şekil Değişimi ve Pekleşme:

Akma sınırından sonra kalıcı şekil değişimi başlar. Kalıcı şekil değişimi sürdükçe, şekil değişiminin devam etmesi için gerilmenin artırılması gerektiği görülmektedir. Bunun nedeni örneğin metalsel malzemelerde artan dislokasyon yoğunluğu sonucu, dislokasyonların birbirini karşılıklı engellemesidir (**pekleşme**).

Kuvvetin kaldırılması durumunda boşalma, Hooke eğrisine paralel bir doğru boyunca olur ve geriye kalıcı bir şekil değişimi kalır. Kuvvet yeniden artırılırsa şekil değişiminin boşalma eğrisi boyunca ilerlediği ve bir önceki yüklemde gerilmenin boşaltıldığı gerilme değerine kadar elastik olarak devam ettiği ve bu noktadan sonra kalıcı şekil değişiminin devam ettiği görülür. Yani kalıcı şekil değiştirmiş bir malzemenin akma dayanımı pekleşme sonucu artmaktadır.

Çekme Dayanımı σ_{ϵ}

Çekme deneyindeki en büyük kuvvetin F_m başlangıç kesitine S_0 bölünmesi ile elde edilen maksimum gerilmedir.

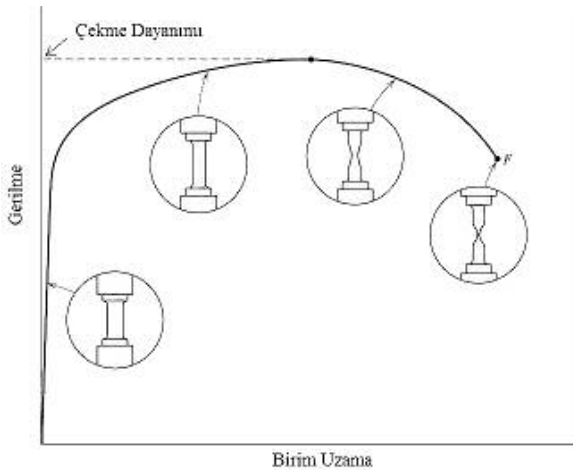
$$\sigma_{\epsilon} = F_m / S_0$$

Maksimum değere ulaştıktan sonra kuvvetin düşmesi, deney parçasının belirli bir kesitten büzülmeye başlaması nedeniyledir, kesitin daralması nedeniyle şekil değişiminin devamı için gereken kuvvet giderek düşer ve sonuçta kopma oluşur.

Üniform Uzama Yüzdesi

Deney parçasında yerel büzülme başlayana kadar (max. Kuvvet noktası) gerçekleşen uzama miktarıdır. Buraya kadar uzama üniformdur, yani parçada boy uzar, kesit üniform olarak daralır, ancak biçim korunur. Uzamanın üniform olmasını sağlayan, yani yerel büzülmenin deneyin en başlangıcında başlamasını engelleyen pekleşme olayıdır, yani şekil değiştiren malzemenin dayanımının artmasıdır. Bu sayede deney parçasının herhangi bir kesiti diğerlerinden daha fazla şekil değiştirse bile, bu bölge derhal pekleşir, dayanımı artar ve şekil değiştirme diğer kesitlerde devam eder. Ancak şekil vermeye devam ettikçe pekleşmenin etkisi giderek azalır ve bir noktadan sonra bu dengeleme artık sağlanamaz, yani en zayıf kesitteki şekil değişimi devam ederek şekil değişimi (büzülme) ve kopma bu bölgede yoğunlaşır.

Üniform uzama değeri önemli bir malzeme özelliği olup, bir malzemeye çekme yoluyla yerel büzülme olmadan üniform olarak şekil verilebilecek üst sınırı belirler.



Kopma Uzaması A ve Kopma Büzülmesi Z:

Çekme dayanımına ulaşıldıktan sonra şekil değişimi devam eder ve sonunda kopma oluşur. Kopma uzaması, deney numunesinde oluşan toplam kalıcı şekil değişiminin $(L_u - L_0)$ başlangıç boyuna oranı olarak verilir.

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100[\%]$$

Kopma büzülmesi ise kopma sonrasındaki en büyük kalıcı kesit değişiminin başlangıç kesitine S_0 oranıdır.

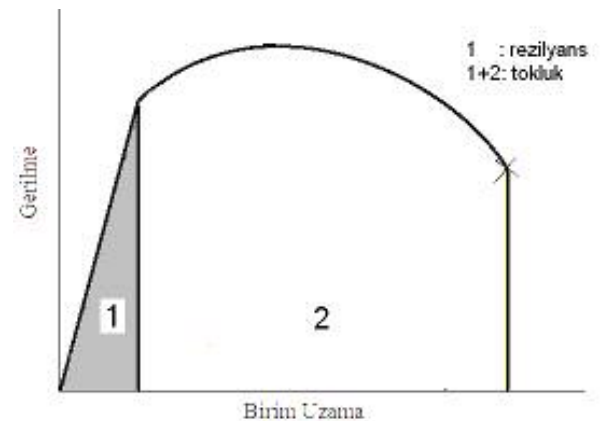
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100[\%]$$

Kopma uzaması ve büzülmesi değerleri, malzemenin dayanım hesaplarında çok önemli değildir, ancak malzemenin **şekil değiştirme kabiliyeti (sünekliği)** hakkında önemli bilgiler içerir.

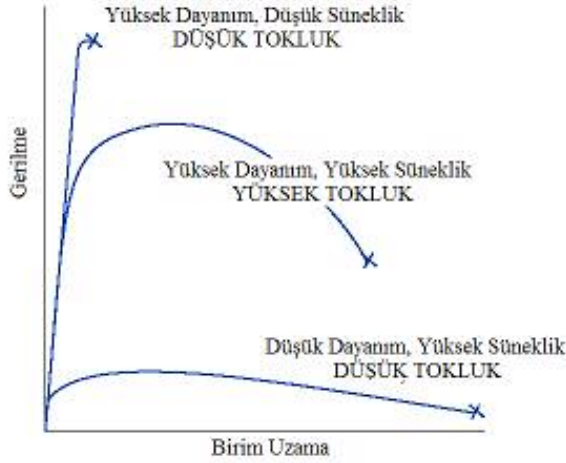
Rezilyans ve Tokluk:

Malzemenin birim hacmi için harcanan şekil değiştirme işi, çekme eğrisinin altındaki alan yardımıyla hesaplanabilir.

Elastik sınıra kadar harcanan iş, bir malzeme içinde kalıcı şekil değişimi (akma) başlamadan depolanabilecek maksimum elastik şekil değiştirme enerjisini verir ve **rezilyans** olarak adlandırılır. Örneği yay malzemelerinde rezilyansın yüksek olması arzu edilir.



Malzemenin kopmasına kadar harcanan enerji ise eğrinin altında kalan alanın tümüdür ve **tokluk** olarak adlandırılır. Yüksek tokluk mühendislik malzemeleri için aranan çok önemli bir özelliktir.

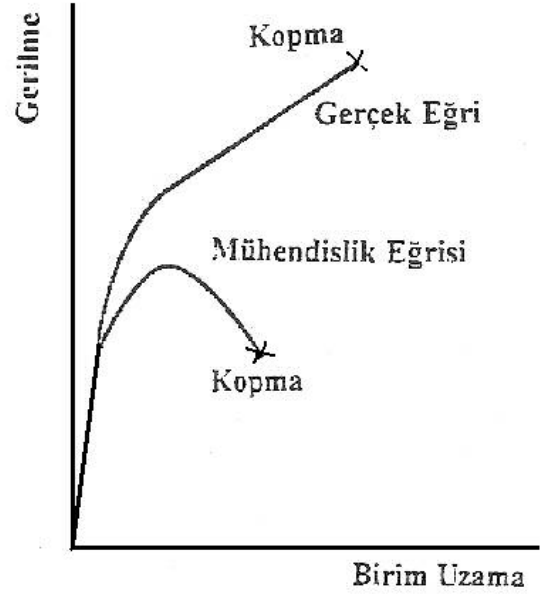
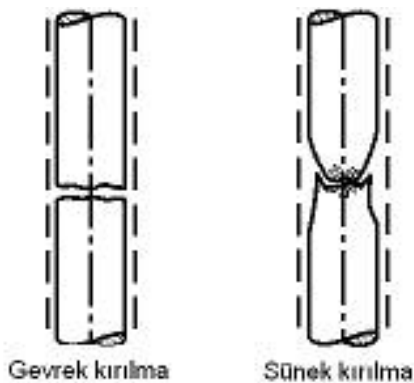


Süneklik / Tokluk

Bir malzemenin kalıcı şekil değiştirme kabiliyetine ise **süneklik** denir ve bu özellik için kopma uzaması ve kopma büzülmesi ölçütü olarak kullanılabilir. **Tokluk** için ise malzemenin kopması için harcanması gerekli enerji bir ölçüttür, süneklik yanında malzemenin dayanımı da tokluk için belirleyicidir.

Gevrek – Sünek Kırılma

Kopma kesitinin görünümü de malzemenin şekil değişimi davranışı hakkında bilgiler içerir. Gevrek malzemeler fazla şekil değiştirmeden kuvvete dik bir ayrılma kırılması ile koparlar. Sünek malzemelerde belirgin önemli bir yerel kalıcı şekil değişimi görülür.



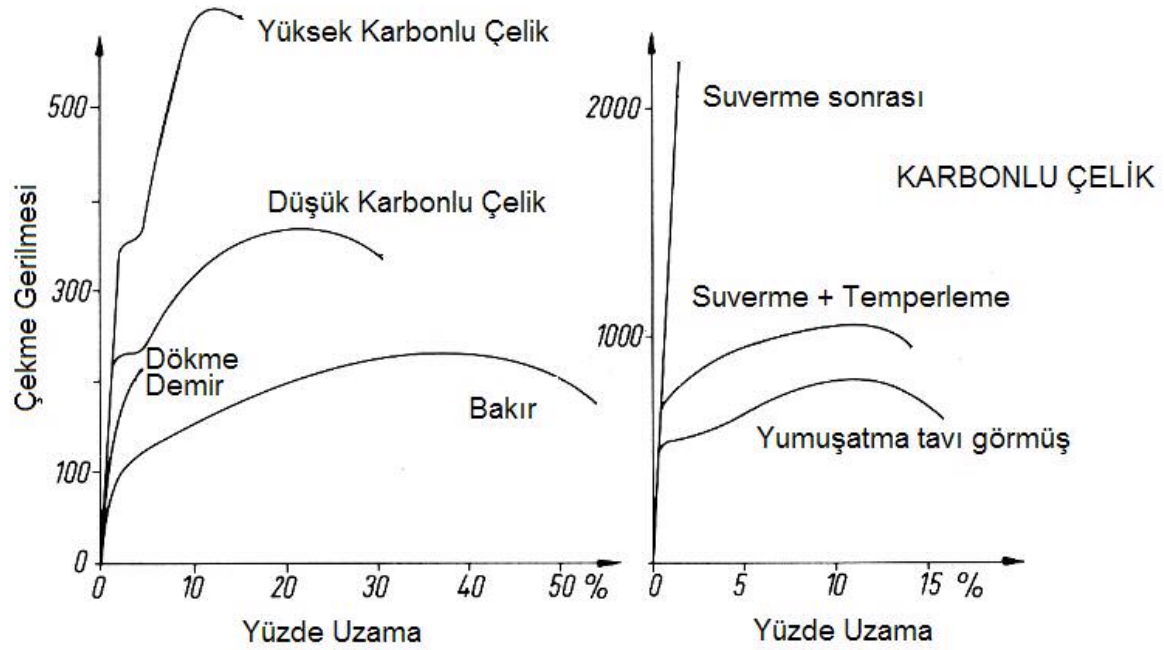
Gerçek Gerilme – Birim uzama eğrisi

Mühendislik gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri, deney sırasında kaydedilen kuvvet F ve uzamaların AL başlangıç kesiti S_0 ve ilk ölçü boyuna L_0 bölünmesi ile hesaplanmıştır, yani kesit ve boy değişimleri dikkate alınmamıştır. Birçok uygulamada sadece küçük şekil değişimleri söz konusu olduğundan çoğu kez bu değerler ile çalışmak yeterlidir.

Ancak büyük şekil değişimlerinin söz konusu olduğu (örneğin şekil verme) gibi uygulamalarda, başlangıç kesiti yerine anlık gerçek kesit ve boy değerleri alınarak **gerçek gerilme ve birim uzama değerleri** gereklidir. Her iki eğri arasında özellikle boyun vermenin olduğu noktadan sonra büyük fark vardır.

Gerilme - birim uzama bağıntısı (çekme eğrisi) her malzemeye özgü bir karakteristik bir eğridir ve malzemelerin mekanik davranışları ile ilgili çok yararlı bilgiler içerir. Malzemenin türü ve durumuna bağlı olarak değişik eğriler elde edilir; aşağıda değişik malzeme ait çekme eğrisi örnekleri verilmiştir.

Ayrıca aşağıdaki tabloda önemli mühendislik malzemelerinin çekme deneyi ile saptanan özellikleri verilmektedir.

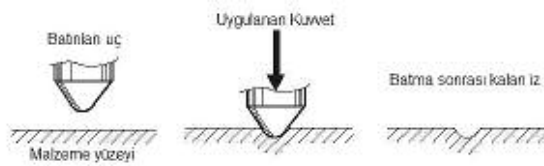


Bazı malzemelerin mekanik özellikleri				
	Elastiklik Modülü (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
Orta karbonlu çelik	200	600	750	17
Alaşımlı çelik	200	680	800	22
Ostenitik paslanmaz çelik	193	205	515	40
Martenzitik paslanmaz çelik	200	700	800	22
Takım çeliği		1380	1550	12
Lamelli Dökme Demir				
Sfero Dökme Demir				
Aluminyum 3000 serisi	70	145	150	13
Aluminyum 2000 serisi	70	410	460	8
Magnezyum alaşımı	45	220	290	15
Pirinç				
Bronz	110	320	650	34
Lehim alaşımı		33	42	60

5.3. Sertlik

Sertlik, malzemelerin sert bir ucun batırılmasına gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Bu deneyde genellikle standart bir uç, sabit bir kuvvetle cisme bastırılır, bu batma ile oluşan izin büyüklüğü, bu malzemenin plastik (kalıcı) şekil değiştirmeye direncinin bir ölçütü olarak değerlendirilir. Kuvvet uygulanarak uç batırma dışında: yüzeyi çizme, darbe ile uç batırma, parçaya vurulan cismin geriye sıçraması gibi yöntemlerin kullanıldığı sertlik deneyleri de vardır.

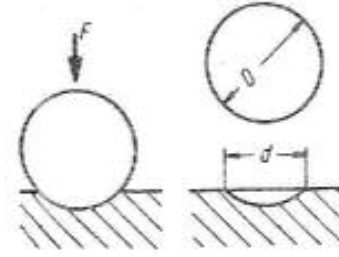
Ölçülen sertlik değerleri sadece karşılaştırma sayılarıdır, yani elde edilen değerler tasarımlarda doğrudan kullanılamaz. Ancak bu deney, kolay yapılabildiği ve sadece küçük bir iz bırakarak malzemenin dayanımı ve aşınma davranışı hakkında bilgi sağladığı için özellikle kalite kontrolde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.



Değişik sertlik yöntemleri arasında malzemenin türü ve sertliğine en uygun olanının seçilmesi önemlidir. Metal ve alaşımları için kullanılan en yaygın sertlik yöntemleri şunlardır:

Brinell Deneyi:

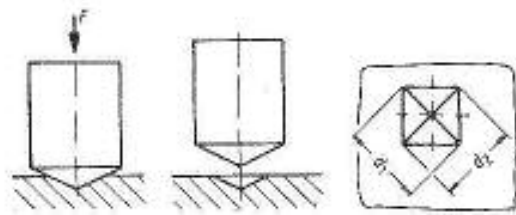
D çapında bir çelik bilya, bu çapa uygun olarak seçilmiş bir F kuvveti ile malzemenin yüzeyine bastırılır. Standart kuvvet ve bilya çapları (1,25 -10 mm) seçilerek malzemeye uygun deney koşulları belirlenir. Ancak farklı bilya çapı ve bastırma kuvveti ile yapılan deneylerde sonuçlar arasında bazı farklar görülebilir. Deney sonrasında iz optik olarak ölçülür ve kuvvet oluşan izin yüzey alanına bölünerek Brinell Sertlik Sayısı elde edilir.



Brinell Sertlik Deneyi yumuşak ve orta sertlikte malzemeler için kullanılır, örneğin sertleştirilmiş çelikler için Brinell sertliği genellikle tercih edilmez. İz yüzeyi alanının belirlenmesi için iz çapının optik olarak ölçülmesi gerekir ve hassas bir ölçüm için malzeme yüzeyi deney öncesinde düzgün ve parlak olarak hazırlanmalıdır.

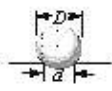
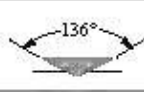
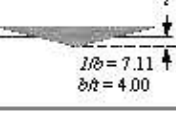
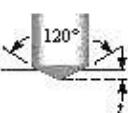
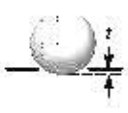
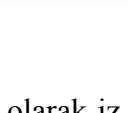
Vickers Deneyi:

Bu yöntemde kullanılan uç tepe açısı 136° olan bir elmas kare piramittir. Oluşan izin köşegen ortalamaları alınarak yüzey belirlenir ve Vickers sertliği hesaplanır:



Standart kare piramit bu uç ile farklı kuvvetler uygulanabilir ve yöntem değişik sertlikte ve kalınlıkta malzemeler için kullanılabilir, yani kullanım alanı geniştir. Çok küçük kuvvetlerle ve mikroskop altında çalışarak malzeme içyapısındaki değişik bölgelerin sertliklerini belirlemek dahi mümkündür. Ancak Brinell deneyinde olduğu gibi, iz alanının belirlenmesi için iz boyutunun optik olarak ölçülmesi zaman alır ve malzemenin yüzeyi düzgün ve parlak olarak hazırlanmalıdır.

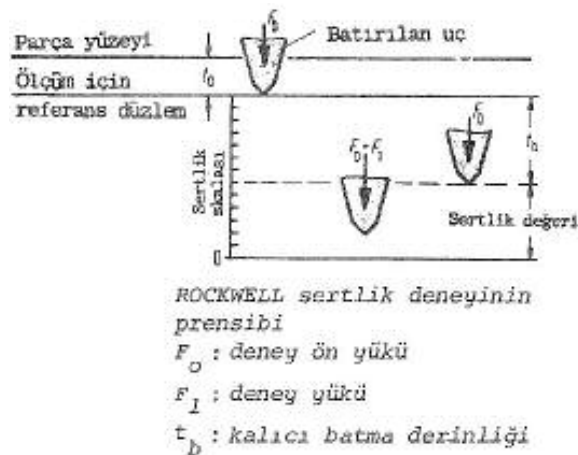
Bu yöntemin üstünlüğü, ölçülen sertliğin deneyde uygulanan kuvvetten bağımsız olmasıdır. Ancak çok küçük yüklerde elastiklik payı artar, dolayısıyla sertlik değeri biraz yüksek çıkar.

Deney	Batıcı uç	Iz geometrisi	Kuvvet	Sertlik formülü
Brinell	Bilya		P	$BHN = \frac{2P}{\pi D \left[D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$
Vickers	Elmas Piramit		P	$VHN = 1.72 P / d_1^2$
Knoop	Elmas Piramit		P	$KHN = 14.2 P / d_1^2$
Rockwell				
A C D	Elmas Koni		60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$ } 100 - 500
B F G	1/16 bilya		100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$ } 130 - 500
E H	1/8 Bilya		100 kg 60 kg	$R_E =$ $R_H =$ }

Rockwell Deneyi:

Bu yöntemde diğerlerinden farklı olarak iz yüzeyi değil, iz derinliği ölçülür. Dolayısıyla batırılan ucun oluşturduğu izin kalıcı batma derinliğini, hassas olarak ölçülerek sertlik değeri doğrudan belirlenebilir. İz üzerinde optik ölçümlerin yapılması gerekmediğinden deney daha kısa sürede yapılabilir.

Deney sırasında ilk teması sağlamak ve varsa boşlukları gidermek için bir ön yük F_0 uygulanır. Daha sonra ana yükün F_1 uygulanması ve kaldırılması ile kalıcı bir batma derinliği t_b oluşur ve bu derinlik ölçülerek malzemenin sertliği doğrudan belirlenir.



Farklı malzemeler ve sertlikler için kullanılmak üzere değişik Rockwell Sertlik skalaları tanımlanmıştır. Batırılan uç elmas koni veya çelik bilya olabilmekte ve değişik batırma kuvvetleri uygulamaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılan yöntemler yukarıdaki tabloda verilmiştir.

Farklı yöntemlerle belirlenmiş sertlik değerleri karşılaştırma amacıyla birbirine dönüştürülebilir ve bu amaçla kullanılan dönüştürme tabloları vardır.

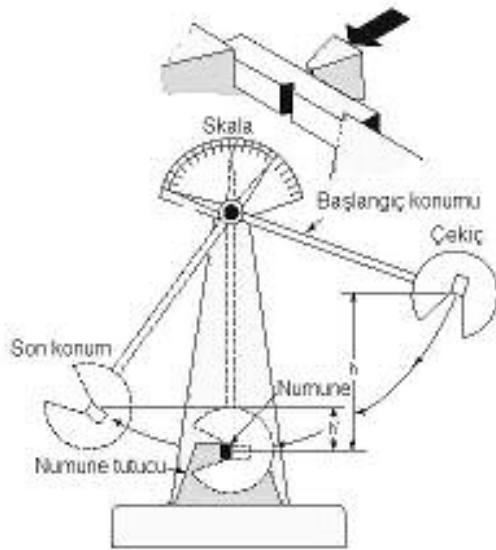
Sertlik - Çekme Dayanımı ilişkisi

Sertlik değeri malzemenin kalıcı şekil değiştirmeye olan direncinin bir ölçütü olduğundan, malzemenin akma dayanımı ile ilgilidir. Çok basit ve çabuk yapılabilen bu deney yardımıyla malzemenin dayanım değeri hakkında **çok kaba** bir fikir edinilebilir.

Alaşım	Brinell	Dayanım (MPa)
Karbon Çelîi	235	750
Az Alaşımı Çelik	220	800
410 Paslanmaz Çelik	250	800
Sféro Dökme Demir	167	461
Alüminyum Alaşımı	40	150
Bronz	165	652
Monel	110-150	579

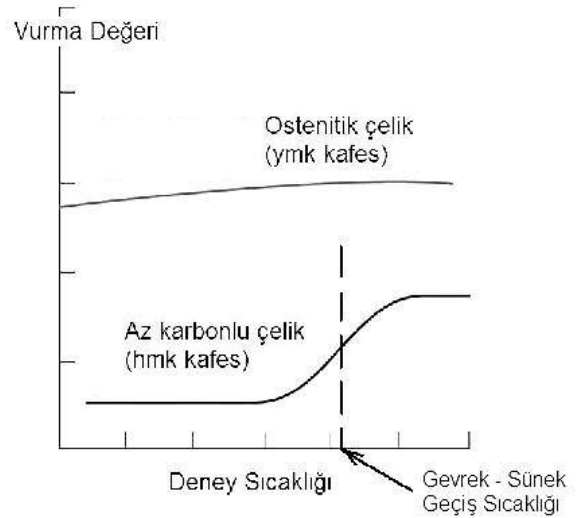
5.4. Vurma (Çentik Darbe) Deneyi

Malzemenin gevrek kırılma eğilimini belirlemek için yapılır. Mühendislik tasarımlarında malzemelerin yeterli tokluğa sahip olmaları çok önemlidir. Bu deneyde üzerinde çentik açılmış standart deney parçası bir sarkaç çekiç yardımıyla kırılır ve çekiçin salınma yüksekliği kaybindan ($h > h'$) kırma için sarf edilen enerji saptanır. Bu şekilde belirlenen kırma işinin sayısal değeri tasarım hesaplamalarında sayısal bir değer olarak kullanılamaz, sadece malzeme davranışının bir göstergesi olarak değerlendirilir.

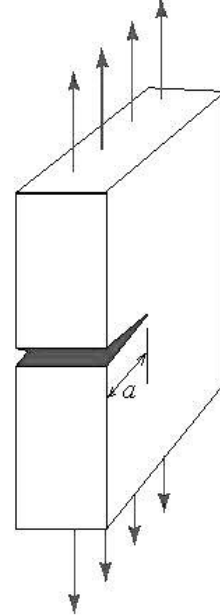


Gevrek-Sünek Geçiş Sıcaklığı

Malzemenin gevrek kırılma eğilimi oram sıcaklığına bağlıdır. Özellikle hacim merkezli kübik kafese sahip malzemeler (örneğin ferritik ve martenzitik çelikler) keskin bir gevrek-sünek geçiş sıcaklığı gösterirler; yani belirli bir sıcaklığın altında malzemenin vurma işi çok düşer, yani malzeme gevrek davranmaya başlar. Bu sıcaklığın belirlenmesi için en uygun yöntem değişik sıcaklıklarda vurma deneyi yaparak şekildeki eğriyi belirlemektir.



5.5. Kırılma Mekanikği



Malzemelerin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılması kırılma olarak adlandırılır. Kırılma **gevrek** ve **sünek** karakterde olabilir; kırılmanın nasıl olacağı malzemeye bağlı olduğu gibi uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır.

Gevrek kırılmada kalıcı şekil değişimi önemsiz düzeydedir ve çatlağın oluşması ile büyümesi büyük bir hızla olur. Aniden ortaya çıkan bu kırılma türü çok tehlikelidir. Özellikle tokluğu düşük yüksek dayanımlı metaller, seramikler ve

hatta bazı plastikler gevrek davranış gösterirler ve özellikle yapıda çentik oluşturabilecek süreksizliklerin (örneğin çatlak, mikro gözenek, kalıntı vb) bulunduğu noktalardan gevrek olarak kırılırlar. Gevrek kırılmaya neden olabilecek en önemli faktörler şunlardır:

- Bir çentiğin varlığı,
- Darbeli zorlamalar,
- Düşük sıcaklıklar

Malzemelerin kırılma davranışlarının bilinmesi güvenli tasarımlar yapabilmek için çok önemlidir ve **Kırılma Mekanik**i olarak adlandırılan ayrı bir bilim dalı olarak ele alınmaktadır.

Kırılma Mekanikinin temelini Griffith'in ideal bir gevrek cisim için ortaya koyduğu kriter oluşturmuştur: *"Bir çatlağın büyümesi ancak bu sırada serbest kalan elastik enerjinin yeni bir yüzey yaratmak için gerekli yüzey enerjisine eşit veya daha fazla olması halinde gerçekleşebilir"*

Bu kriterden yola çıkarak gevrek kırılma kritik olan büyüklüğün **Gerilme Şiddeti Çarpanı K** olduğu gösterilmiştir.

$$K = \alpha \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Burada α boyutsuz geometrik değişken, σ kırılma noktasındaki gerilme ve a ise çatlak uzunluğudur.

K değerinin bir malzeme özelliği olan **Kırılma Tokluğu K_c** değerini aşması durumunda kırılma oluşur. Kırılma mekanik'i esas alınarak yapılan tasarımlarda, parçanın herhangi bir zorlama altında ani ve gevrek kırılmaması için

$$K = \alpha \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} < K_c \text{ şartı sağlanmalıdır.}$$

Dolayısıyla ani ve gevrek kırılma olmaması için:

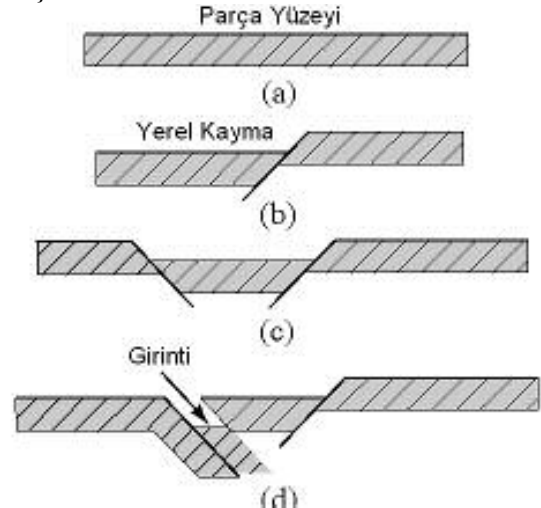
- Gerilme belirli ise çatlak boyunun kritik değerden küçük olması veya
- Çatlak boyu belirli ise gerilmenin kritik gerilmeden daha küçük olması gerekir.

Malzemenin kırılma tokluğu **K_{Ic}** değeri önemli bir özelliktir ve standartlarla belirlenen deneyler yardımıyla belirlenir. (K_{Ic} çatlağın normal gerilmeler ile açılarak gevrek kırılmaya zorlandığı duruma – I modu- ait Kırılma tokluğudur). Kırılma tokluğu deneylerinde deney parçasında bir çentik açılır ve bu çentikte dinamik zorlamalar altında keskin bir yorulma çatlağı oluşturulur. Daha sonra deney parçası çekmeye zorlanarak bu çatlağın gevrek kırılması için gerekli gerilme değeri bulunarak malzemenin kırılma tokluğu hesaplanır.

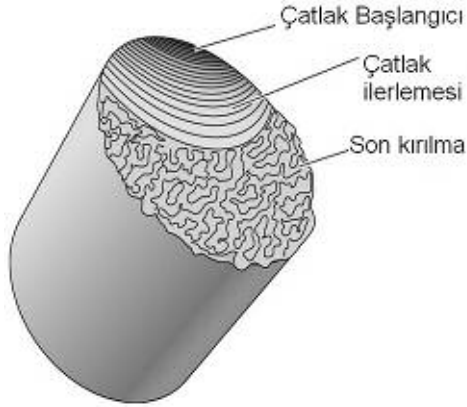
5.6. Yorulma

Bir parçaya etkiyen gerilmelerin, malzemenin akma dayanımının altında, yani elastik bölgede kalması durumunda herhangi bir mekanik hasar beklenmez. Ancak bu zorlamaların yönü ve şiddeti dinamik olarak değişiyorsa bu durumda dahi hasar oluşabilir ve kırılmaya kadar gidebilen bu olay **yorulma** olarak adlandırılır. Dinamik zorlamalar altında çalışan tüm tasarımlarda malzemenin yorulma dayanımı çok önemlidir ve uygulamada oluşan hasarların çoğunluğu yorulma kırılmalarıdır.

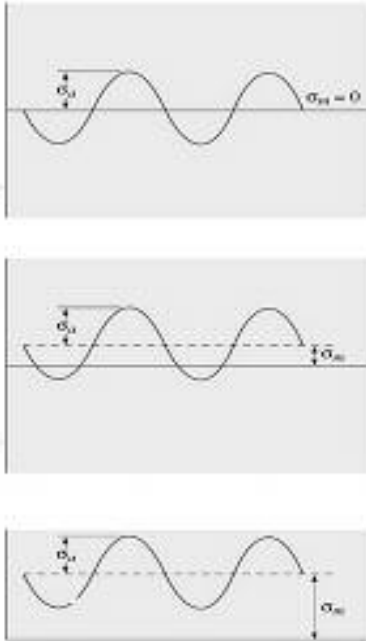
Yorulma hasarının oluşumunda iki farklı evre söz konusudur: Çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi. Çatlağın başlangıcı genellikle içyapıda veya yüzeyde bulunan çok küçük bir kusurda (içyapıda kalıntı, yüzeyde çentik, çizik vs) gerilme yığılması oluşması ve bunun sonucu akma



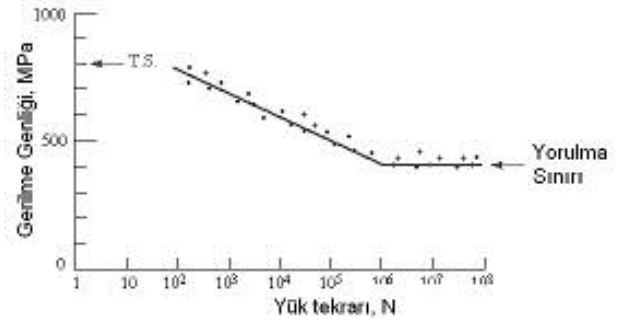
dayanımının yerel olarak aşılması ile ortaya çıkar. Yerel kaymaların bulunduğu bu bölgede yön değiştiren şekil değişimleri yüzeyde girinti ve çıkıntılara, bir süre sonra da bir mikroçatlak oluşumuna neden olur. Bu mikroçatlak adım adım ilerleyerek bir makro çatlak oluşturur ve bu çatlak yeterli büyüklüğe ulaştığında yorulma kırılmasını ortaya çıkar.



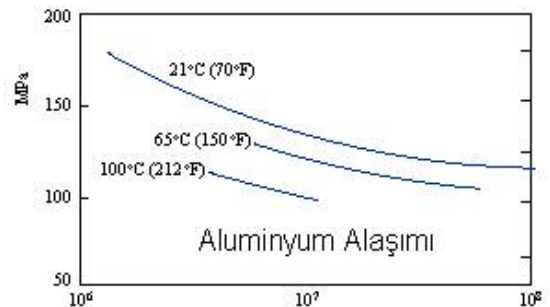
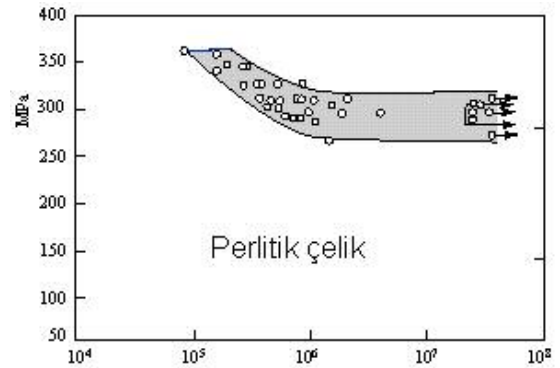
Bir yorulma kırığının karakteristik yüzeyi, üstteki şekilde görülmektedir. Çatlağın ilerlediği bölgede yayılan dalgalara benzeyen çizgiler dikkati çekmektedir. Bu çizgiler, farklı çatlak ilerleme koşullarına tekabül eden bölgeleri ayırır ve duraklama çizgileri olarak adlandırılır. Duraklama çizgileri yardımıyla çatlağın başladığı ve ilerlediği bölgeler kolaylıkla belirlenebilir.



Yorulma deneyleri sabit bir ortalama gerilme için farklı gerilme genlikleri alınarak yapılır ve yorulma kırılmasının görüldüğü kırılma çevrim sayıları saptanır. Farklı genliklerde yapılan bu deney sonuçları yardımıyla seçilen ortalama gerilme için Wöhler eğrisi olarak adlandırılan eğri çizilir. Wöhler eğrisinin belirlenmesi için çok sayıda deney noktasına gerek duyulur; dolayısıyla yorulma deneyleri uzun ve pahalı deneylerdir.



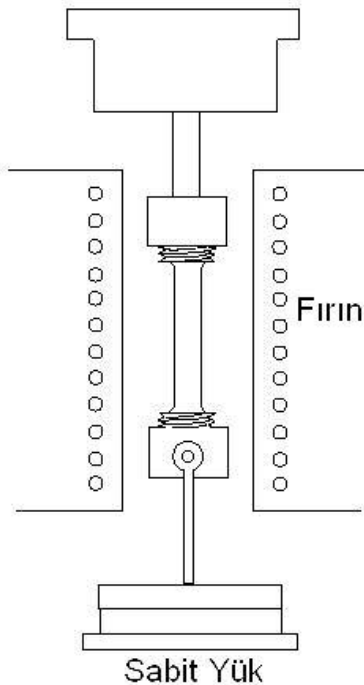
Wöhler eğrisi bazı malzemeler için (örneğin çeliklerde) bir asimtota yaklaşır, yani belirli bir gerilme genliğinin altında kaldığı sürece yorulma hasarı oluşmaz, yani malzeme sonsuz ömürlü olur. Metallerin ise birçoğunda bu asimtot görülmez (örneğin alüminyum alaşımlarında).



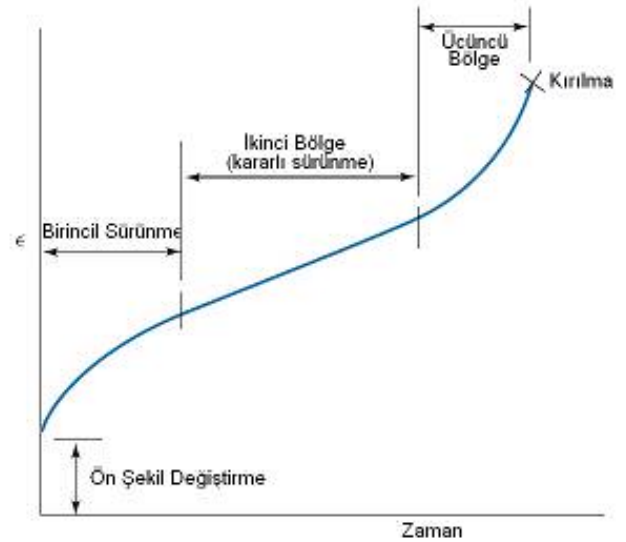
5.7. Sürünme ve Gerilme Gevşemesi

Uygulanan gerilmeye bağlı olarak malzemeler önce elastik şekil değişimi gösterirler; eğer zorlama değeri akma dayanımını geçmiş ise malzeme plastik şekil değişimi gösterir. Malzemenin gösterdiği bu şekil değişimleri zamanın bir fonksiyonu değildir, yani gerilmenin uzun süre uygulanması durumunda, şekil değişiminde zamanla bir artma görülmez. Buna karşın ortam sıcaklığı yeterince yüksek ise, gerilme ve sıcaklık seviyelerine bağlı olarak, malzeme zamanla plastik şekil değişiminin devam ettiği görülür, yani malzemenin boyu sürekli olarak artar. Bu olayın görüldüğü yüksek sıcaklıklar, genellikle malzemenin mutlak erime sıcaklığının (K olarak) yarısından daha büyük olan sıcaklıklardır

Sabit bir gerilmenin yüksek sıcaklıkta malzemeye etkimesi durumunda malzemenin zamana bağlı olarak kalıcı şekil değiştirmesine **sürünme** (creep) adı verilir.



Sürünme deneyi sabit sıcaklık ve sabit gerilme altında yapılır ve birim uzamanın zamanla artışı sürünme eğrisi olarak çizilir.



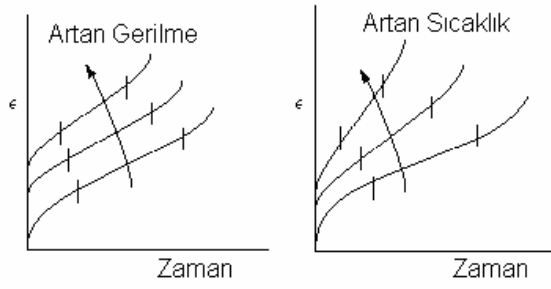
İlk yüklemde, gerilmenin etkisiyle ϵ_0 kadar bir ön şekil değişimi görülür. Daha sonra, sabit altında malzemenin boyu sürekli olarak artar. Eğride 3 farklı bölge dikkati çekmektedir:

- Sürünme hızının zamanla azaldığı birincil sürünme,
- Hızın yaklaşık sabit olduğu ikincil bölge (en önemli bölgedir; sürünme hesaplamaları yapılırken bu bölge dikkate alınır). Bu bölgede sürünme hızı $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ sabittir ve **kararlı sürünme hızı** olarak adlandırılır. Kararlı sürünme hızı; gerilmeye, sıcaklığa ve iç yapının fonksiyonu olan bir malzeme özelliğidir,
- Hızın zamanla artıp kırılma ile sonuçlanan üçüncü bölge.

Sürünme şekil değişimi yayınmadan (difüzyondan) etkilenir. Dolayısıyla, sürünme Arrhenius tipi bağıntıyla sıcaklığın kuvvetli bir fonksiyondur. Q değeri (sürünme aktivasyon enerjisi) yüksek ve difüzyon katsayısı düşük olan malzemeler, sürünme ile şekil değişimine, diğer bir deyişle sürünme hasarına karşı daha dayanımlıdır.

Yani sürünme ısıl aktive bir olaydır, ve kararlı sürünme hızının gerilme ve sıcaklık ile değişimi aşağıdaki bağıntı ile verilir:

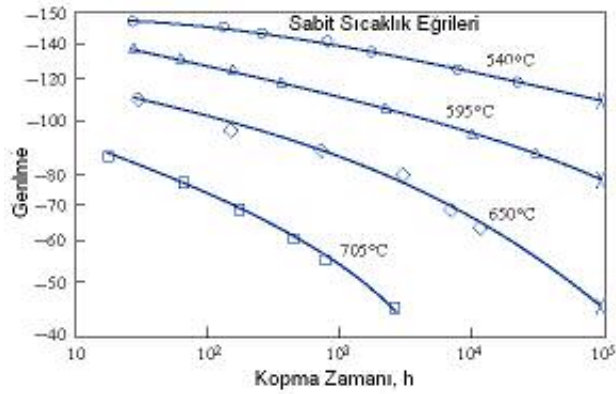
$$\dot{\epsilon}_k = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \exp - \frac{Q}{RT}$$



Mühendislik tasarım hesaplamalarında kullanılmak üzere, bir malzemeye ait sürünme özellikleri değişik şekillerde verilebilir. Örneğin:

Sürünme Sınırı: belirli bir sıcaklık ve süre için malzemede belirli bir kalıcı uzamaya neden olan gerilme

Sürünme Kopma Süresi: belirli bir sıcaklık ve süre için malzemenin kopmasına neden olan gerilme (aşağıdaki şekil)



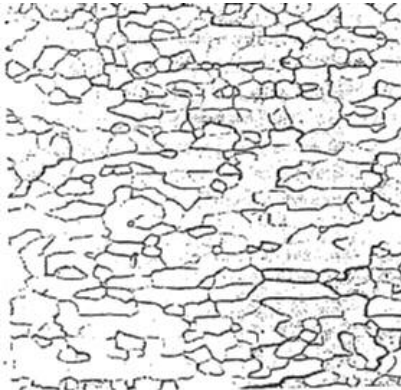
6. Faz Diagramları

6.1. Faz Kanunu

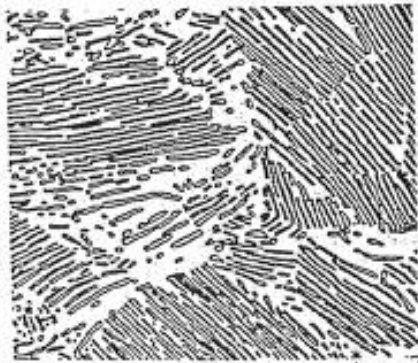
Bir madde bağ kuvvetleri etkisi altında en düşük enerjili denge konumunda bulunan atomlar grubundan oluşur. Koşullar değişirse enerji içeriği değişir, denge bozulur, atomlar daha düşük enerji gerektiren başka bir denge konumuna geçerek değişik biçimde dizilir ve sonuçta yeni bir faz oluşur.

Faz: İçyapının 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 eşanlamlı değildir. Örneğin metal alaşımlarında aynı anda birden fazla katı faz mevcut olabilir.

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



Tek fazlı içyapı (saf molibden)



İki fazlı içyapı (perlit)

20 µm

Saf metaller tek fazlıdır, içyapıları çok taneli olsa bile, taneler farklı olmadığından ayrı faz sayılmaz. Çeliklerde karakteristik bir içyapı olan perlit ise, yukardaki şekilden görüldüğü gibi ferrit ve sementit fazlarının lamelli olarak düzenlenmesi ile oluşur.

Serbestlik Derecesi: Fazların sayısı sabit kalmak koşuluyla birbirinden bağımsız olarak değiştirilebilecek durum büyüklüklerinin sayısıdır. (Sıcaklık, basınç, bileşim...)

Gibbs Faz Kanunu: Denge de olan çok fazlı bir sistem için aşağıdaki gibi gösterilir:

$$S = B - F + 2$$

B: Bileşen Sayısı

F: Faz Sayısı

S: Serbestlik derecesi

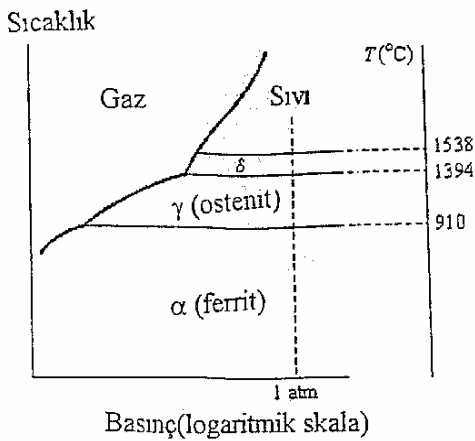
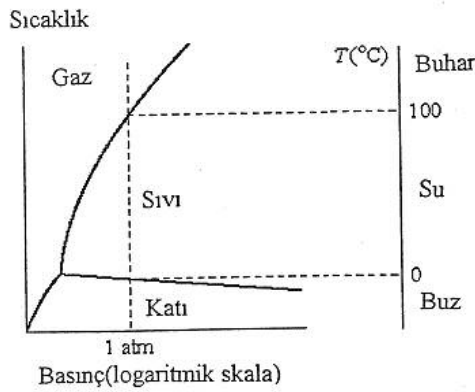
Teknikte genelde atmosfer basıncında çalışıldığından, basıncın sabit olması durumunda Gibbs Faz Kanununda serbestlik derecesinin sayısı 1 azalır (1 atm sabit basınçta)

$$S = B - F + 1$$

6.2. Faz Diyagramları

Fazların oluşumunda ve dönüşümünde ana etken enerji içeriğidir, bu içeriği değiştiren üç ana etken sıcaklık, basınç ve bileşimdir. Faz (Denge) Diyagramları yardımı ile belirli bir malzemede sisteminde sıcaklık ve bileşime bağlı olarak oluşacak fazların türleri, bileşimleri ve miktarları hatta iç yapılar da belirlenebilir.

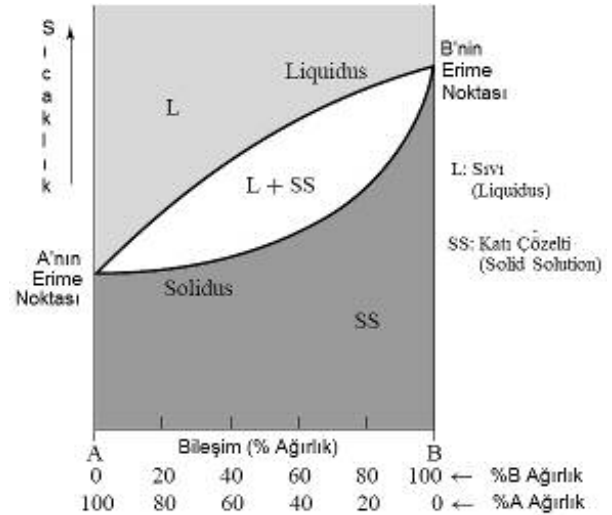
Tek bileşenli, yani derişikliğin sabit olduğu saf su için faz diyagramı aşağıda verilmektedir, bu diyagramda sıcaklık ve basınca bağlı olarak fiziksel durum değişimleri görülmektedir. Benzer şekilde saf demire ait faz diyagramı da verilmiştir.



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 ikili faz diyagramlarıdır ($B=2$, $p=st.$). İki bileşenli olan faz diyagramlarında yatay ekseninde bileşim (derişiklik), düşey ekseninde ise sıcaklık bulunmaktadır. Bu diyagramlar, verilen her sıcaklık ve bileşim için denge durumundaki fazlarını gösterirler.

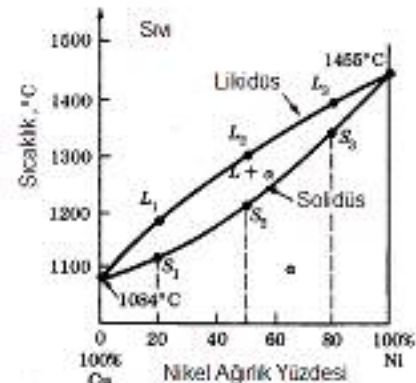
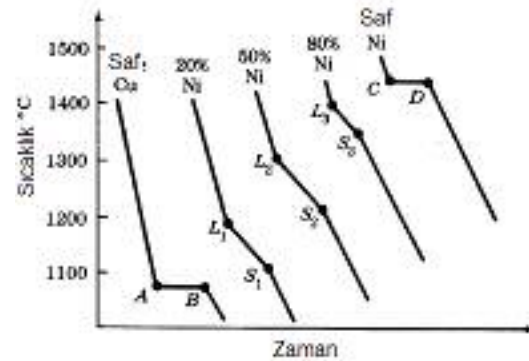
İkili Diyagramlara Örnekler:

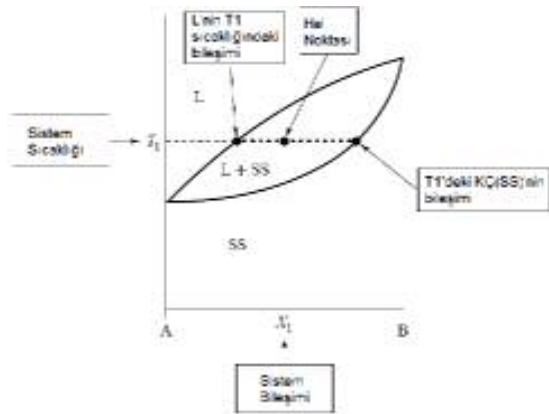
a) Katı Durumda Tam Çözünürlük: Diyagramda görüldüğü A ve B bileşenleri sürekli olarak, yani her oranda tek fazlı bir yapı (SS katı çözeltisi) oluşturmaktadırlar. Yani düşük sıcaklıklarda her iki atom ortak bir kafes içinde birbiri içinde her oranda çözünmektedirler (tam çözünürlük). Bunun dışında yüksek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



Tam çözünürlük, alaşımlarda yaygın bir durum değildir. Tam çözünme durumuna verilebilecek bir örnek Bakır ve Nikel alaşımıdır. Tam çözünürlük durumunun oluşması için bileşenlerin Hume - Rothery koşullarına uygun olması gerekir (bak. 4.1).

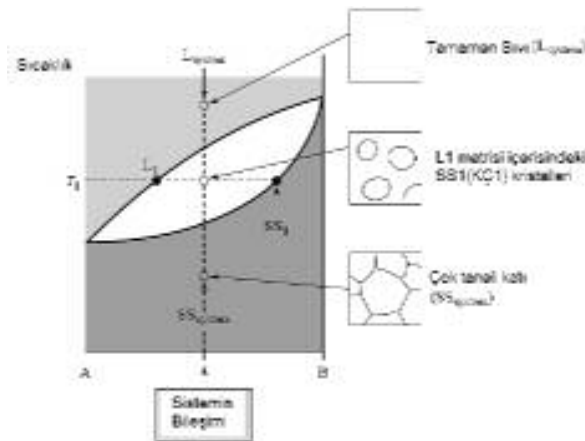
Bu tür faz diyagramları soğuma diyagramları yardımı ile elde edilirler. Birbirini içinde katı durumda tam olarak çözünen iki bileşenli bir sistem olan Cu-Ni sisteminin faz diyagramının elde edilişi aşağıda görülmektedir.



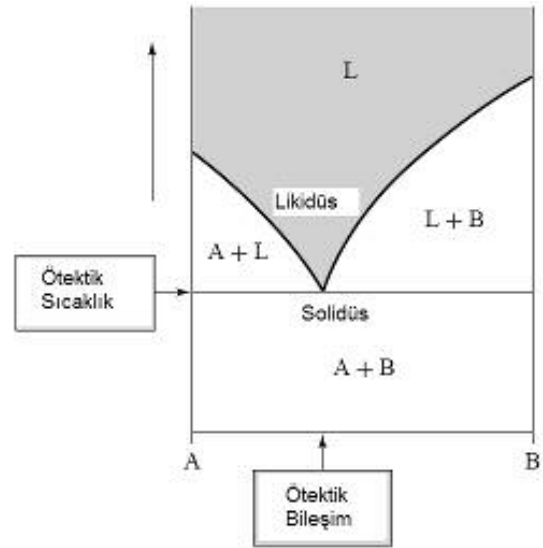


Faz diyagramları yardımıyla iki fazın birlikte bulunduğu bölgede belirli bir sıcaklıktaki fazların derişikliklerini bulmak mümkündür. Yukarıdaki diyagramda da gösterildiği gibi, önce iki fazlı bölgede liküdüs ve solidüs eğrilerini kesecek şekilde bir doğru çizilir (bağ çizgisi). Bu yatayın, eğrileri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

Aşağıdaki diyagramda ise tam çözünürlük için belirli bir bileşimdeki sistemin, sıvıdan itibaren soğurken içyapısının 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 ulaşıldığında katılaşma tamamlanmış ve taneli bir yapı ortaya çıkmış olur.



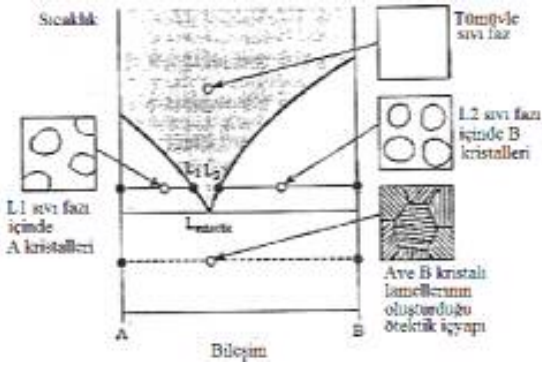
b) Çözünmezlik Durumunda Ötektik Reaksiyon



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

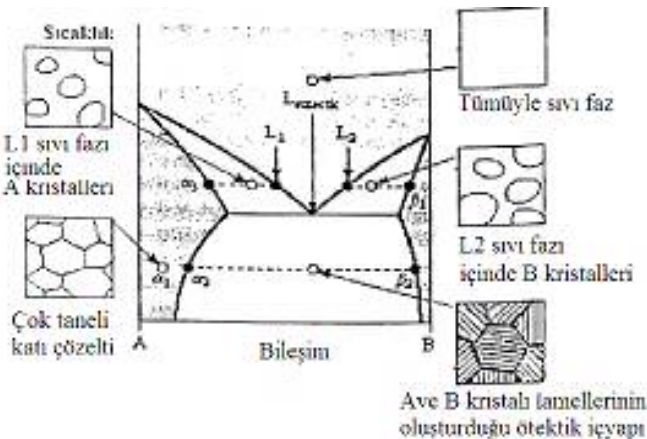
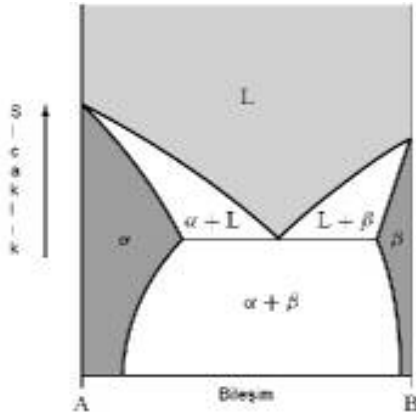
Diyagrama adını veren ötektik nokta, soğuma sırasında sıvı fazın sabit sıcaklıkta iki katı faza dönüştüğü noktadır. Bu noktanın sıcaklığına ötektik sıcaklık, bu bileşimine de ötektik bileşim denir. Her iki fazın bir arada oluşması nedeniyle, ötektik içyapılar ince taneli içyapılardır ve fazlar sıkı istiflenmiş olarak yan yana bulunurlar. Örneğin bir fazın içinde diğeri kürecik veya lamel şeklinde dağılabilir. Bu tür içyapıların mekanik özellikleri iyidir.

Malzemenin bileşimi ötektik bileşimden farklı ise, kristalleşme sabit sıcaklıkta değil belirli bir sıcaklık aralığında olur ve ötektik sıcaklığa inildiğinde bir miktar sıvı mevcuttur. Artan bu sıvı ötektik bileşim oranına sahip olacağından, iki ayrı katı faza ayrılarak ötektik yapıda katılır .



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 için hali görülmektedir. Burada α -fazı, A atomunca zengin olup içinde belirli bir miktar B atomu bulunan bir katı çözeltilidir. β -fazı ise, B atomunca zengin olup içinde belirli bir miktar A atomu çözmüştür.



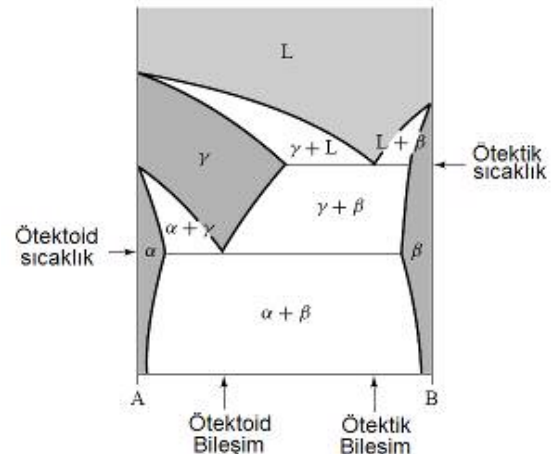
Diyagramda görüldüğü gibi ötektik bileşimde ve sıvı fazdan soğutularak elde edilen içyapı, tam çözünmezlik durumundan farklı değildir. Ancak bu noktanın sağına ya da soluna gittiğimizde sıvı içinde yukarıda da anlatıldığı gibi birincil kristalleşmeler olduğu görülür. Bazı bileşimlerde ötektik reaksiyon görülmeyebilir ve oda sıcaklığında doğrudan α -fazının bölgesine inildiğinde tek fazlı çok taneli bir katı çözeltili söz konusudur, aynı şey " β " fazı için de geçerlidir. Sıvı ve katının birlikte bulunduğu bölgelerden geçerek ortaya çıkan içyapılarda, birincil kristallerin dışında son kalan sıvının katılaşmasında ötektik içyapı da ortaya çıkar.

Teknik bakımdan önemli bazı ötektik (veya yakın ötektik) alaşımlar

Alaşım	Bileşenler ve ergime noktaları (°C)	Alaşım ergime noktası (°C)
Yumuşak lehim	%60 Sn (232) %40 Pb (327)	183
Güçlü lehim	%55 Cu (1083) %45 Ag (961)	620
Basınçlı Al	%88 Al (660) %12 Si (1414)	577
Basınçlı Zn	%96 Zn (419) %4 Al (660)	380

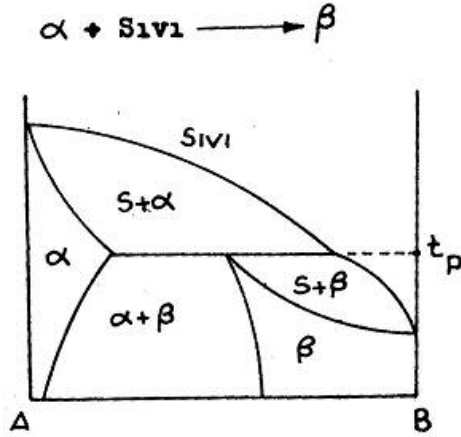
d) Ötektoid Reaksiyon

Ötektik reaksiyona benzer şekildedir; burada bir katı çözeltili sabit sıcaklıkta iki farklı faza ayrışmaktadır. (Ötektikte sıvı faz, iki katı faza ayrışır)



e) Peritektik Reaksiyon

Sabit bir sıcaklıkta, biri sıvı olan iki faz reaksiyona girerek yeni bir katı faz oluşturur.

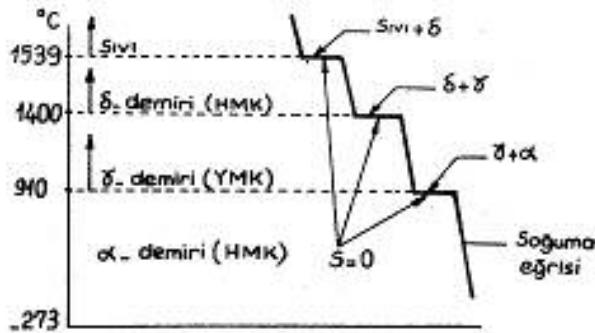


f) Peritektoid Reaksiyon

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

g) Allotropi :

Bileşimi sabit kalan bir malzemenin sıcaklıkla birlikte kafes yapısının değişmesine allotropi adı verilir. Aşağıda görüldüğü gibi saf demir, atmosfer basıncında sıcaklıkla kafes yapısını değiştirmektedir.

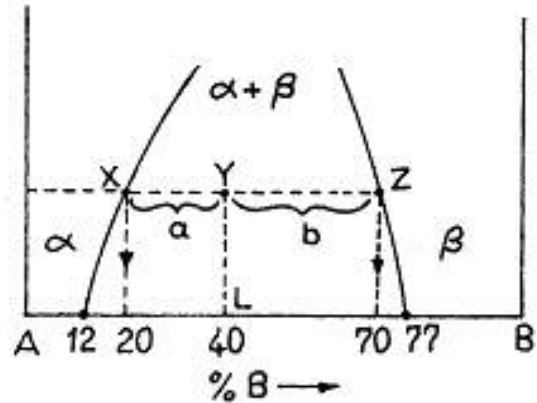


Fazların ağırlık oranının hesaplanması (Kaldıraç Kuralı):

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

- Hangi fazların bulunduğu,
- Fazların bileşimleri ve

- Fazların ağırlık oranları.

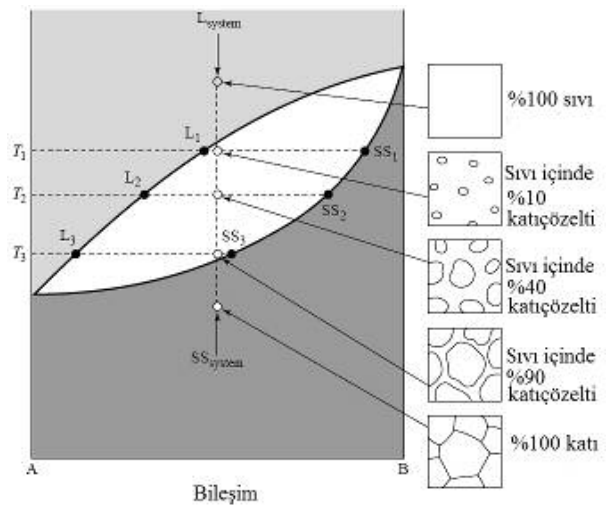


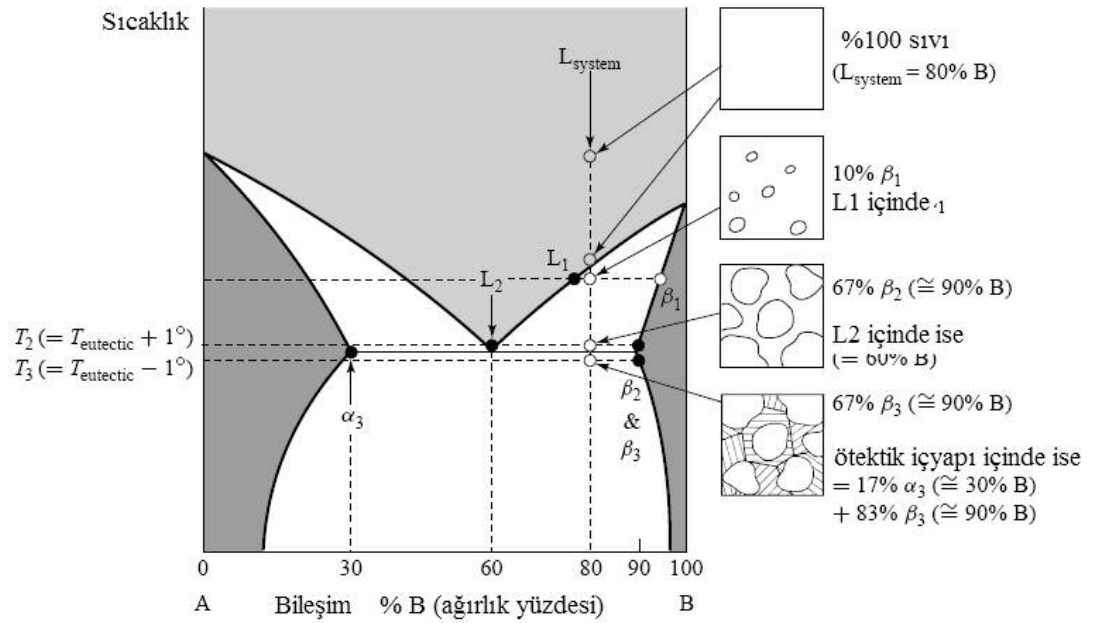
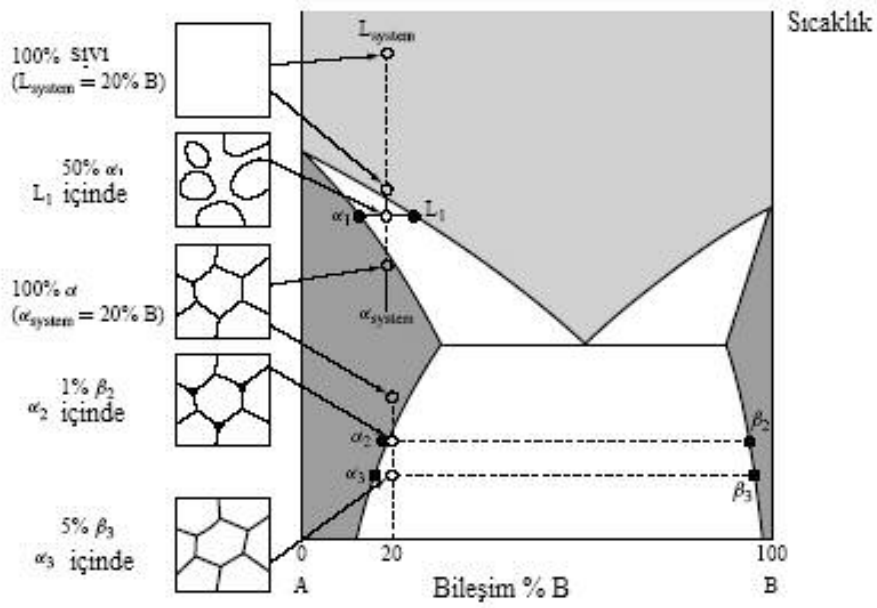
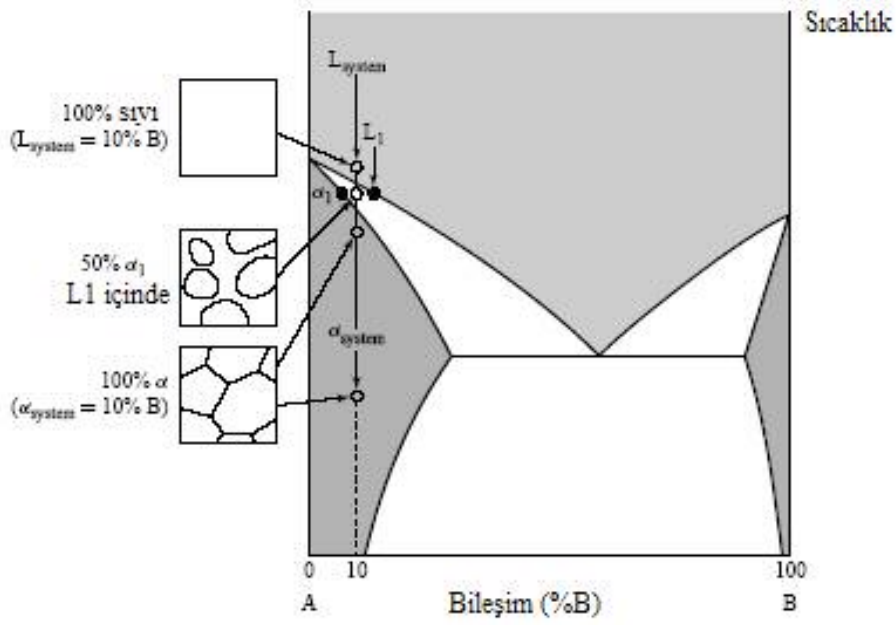
Örneğin yukarıdaki diyagramda verilen sıcaklık ve bileşim (% 40 B) için bağ çizgisi çizilirse, α ve β fazları bulunmaktadır. Bağ çizgisinin iki ucundan inilen düşeyler bu fazların bileşimlerini vermektedir (%20 ve 77). Bu fazların ağırlık yüzdeleri ise kaldıraç kuralı ile kolaylıkla hesaplanır (Kaldıraç kuralına göre, Y noktasında desteklenmiş bir kaldıraçın dengede olabilmesi için X ve Z noktalarına asılması gereken ağırlıkların hesaplandığı düşünülebilir).

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

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

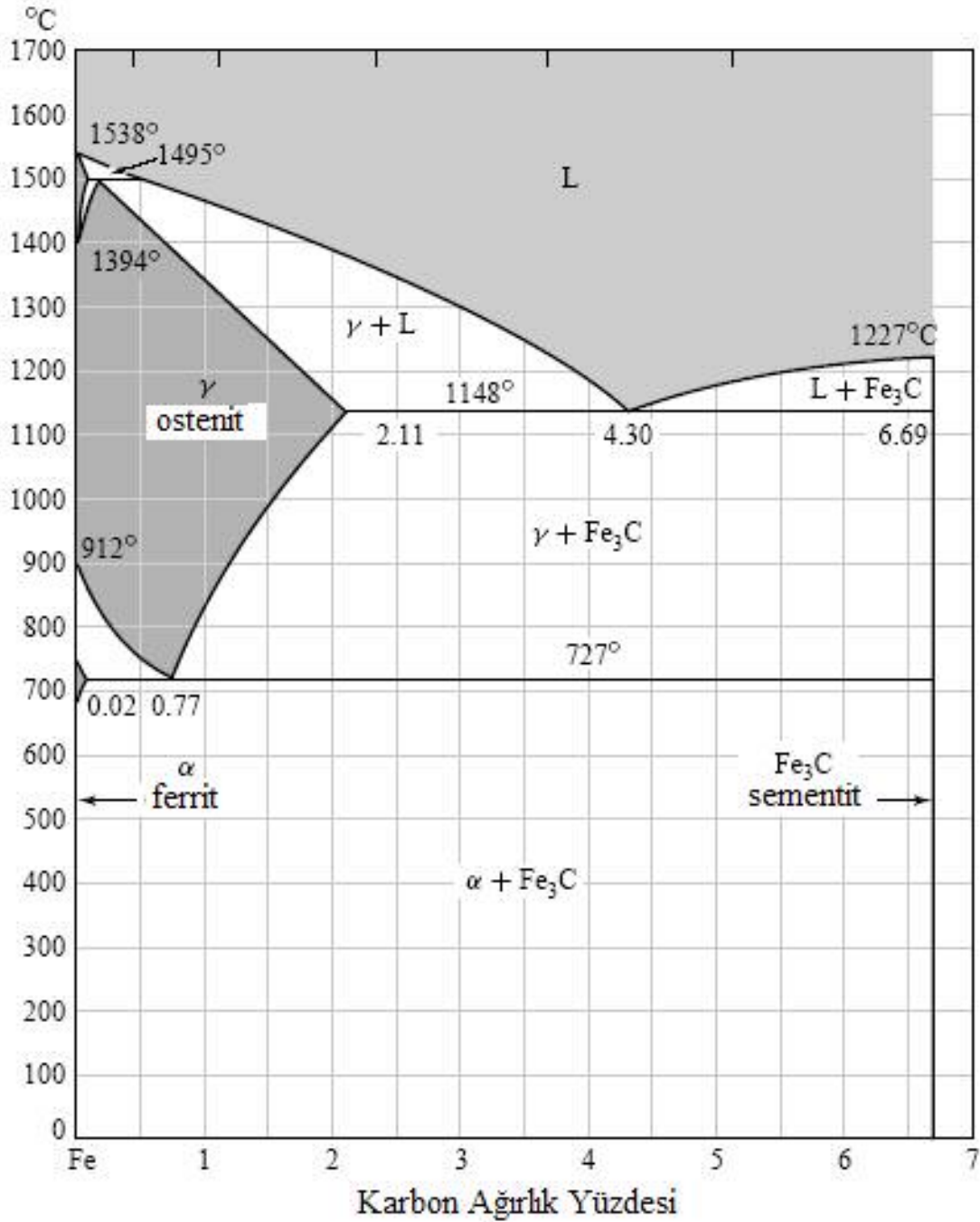
İçyapıların Oluşumuna Örnekler (yavaş soğuma):





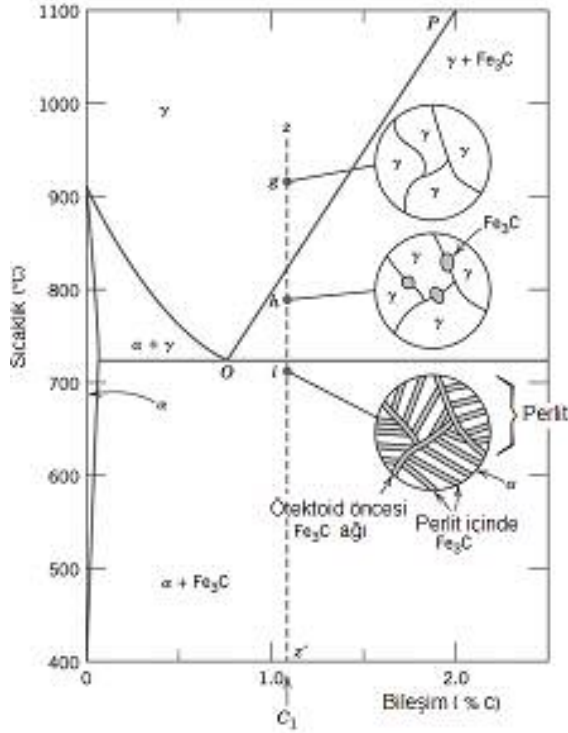
Bazı Önemli İkili Faz Diyagramları:

Fe – Fe₃C Sistemi



Demir-Karbon alaşımları mühendislikte yaygın olarak kullanılan çelikler ve dökme demir malzemelerin esasını oluşturur. %2'nin altında karbon içeren alaşımlar çelik, %2'nin üstünde karbon içeren malzemeler ise dökme demirlerdir.

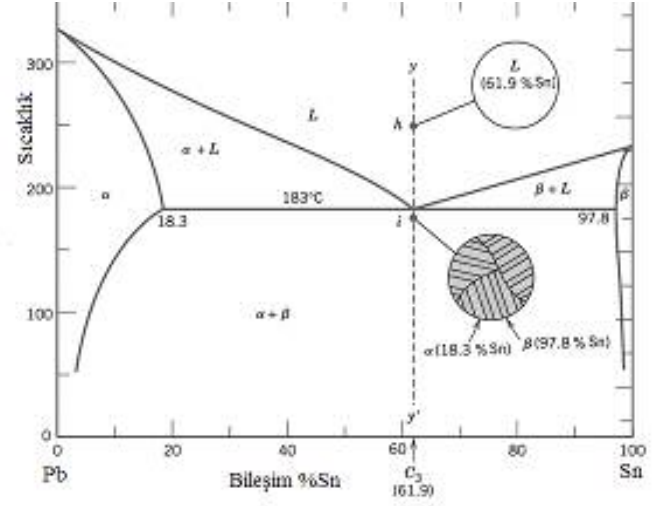
Çeliklerin iç yapısındaki karbon, teknikte geçerli soğuma hızlarında ayrı bir faz olarak değil, demir karbür (sementit) içinde bulunur. Bu nedenle yukarıdaki diyagram Fe-Fe₃C olarak verilmiştir.



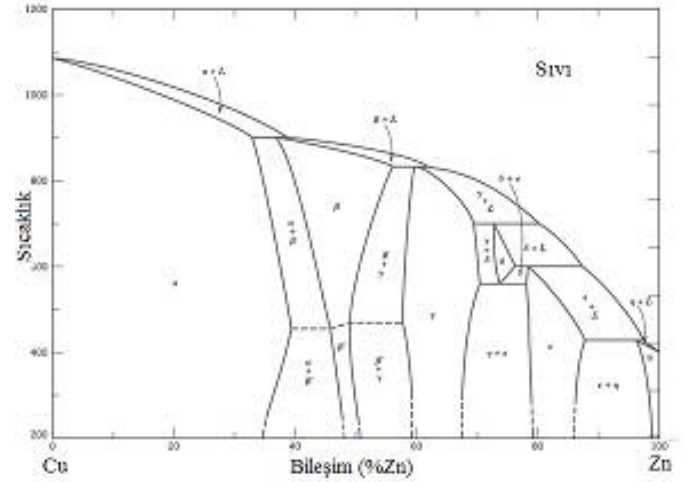
Bu diyagram yardımıyla, bileşiminde %1,1 C bulunan bir çeliğin iç yapısının nasıl saptanacağı bir örnek olarak yukarıda gösterilmektedir. Sıvıdan katılaşarak %100 ostenit (g) olarak oluşan iç yapıdan, sıcaklık düştükçe (h) tane sınırlarında sementit ayrıışmaktadır, ağ şeklinde tane sınırlarında ayrıışan bu sementitin dışında iç yapıda ostenit bulunmaktadır. Ötektoid sıcaklığın hemen üstünde ötektoid bileşime sahip olan ostenit, ötektoid dönüşümün tamamlanmasından sonra perlitte (ferrit + sementitin lamelli karışımı) dönüşmektedir. Bu tür bir iç yapının mikroskop altında gerçek görünümü aşağıda verilmektedir.



Pb – Sn Sistemi (örneğin lehim malzemeleri)



Cu- Zn Sistemi (örneğin pirinçler)



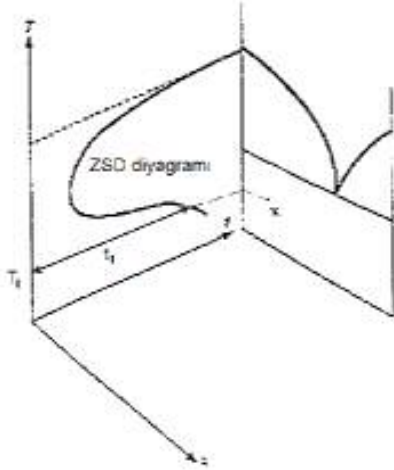
7. Kinetik ve Isıl İşlemler

Faz diyagramlarının bir diğer adı “denge diyagramları”dır ve herhangi bir sıcaklıkta denge durumundaki içyapıları verir, yani söz konusu fazların oluşumu için gerekli yayınma sürelerinin var olduğu kabul edilir. Dolayısıyla soğumanın yavaş gerçekleştirildiği ve sıcaklığın her an dengenin sürdürülebileceği yavaşlıkta değiştirildiği varsayılır.

Pratikte ise bu durum farklı olabilir, soğuma hızlı olabilir ve “zaman” çok önemli bir faktör haline gelebilir. Gerekli yayınma süresi var olmadığı için, faz değişimi için koşulların aynı olmasına rağmen, soğutma hızının farklı olduğu durumlarda çok farklı yapılar ortaya çıkabilir.

Yani istenilen içyapılara ulaşmak için sıcaklık yanında zaman da önemlidir. Bu amaçla faz diyagramlarına zaman boyutunun da eklendiği ZSD (zaman – sıcaklık – dönüşüm) diyagramları geliştirilmiştir. (İngilizce TTT: time - temperature - transformation).

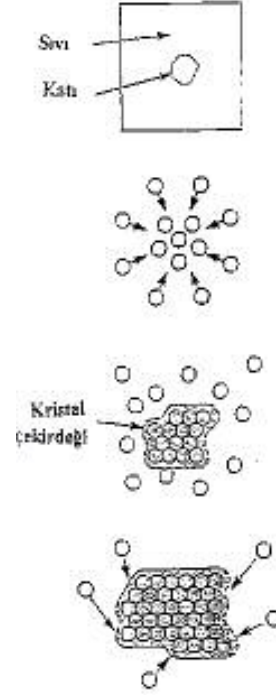
Zaman- Üçüncü Boyut:



Örneğin; yukardaki diyagramda T_1 sıcaklığında herhangi bir x noktasındaki fazların dönüşümünün tamamlanması için gerekli süre t_1 süresidir. Diyagram üzerinde her bir sıcaklıkta gerekli dönüşüm için süreler açıkça görülür ve her sıcaklık için faz değişim süresi farklılık göstermektedir. Çok yüksek ve düşük

sıcaklıklarda faz değişimi süreci daha uzun iken, belli bir sıcaklık aralığında bu dönüşüm çok hızlı gerçekleşmektedir. Bu nedenle eğrinin ortasında bir burun oluşmaktadır. Bu eğrinin neden bu şekilde oluştuğunu açıklamak için bazı temel kinetik kuralların bilinmesi gerekir.

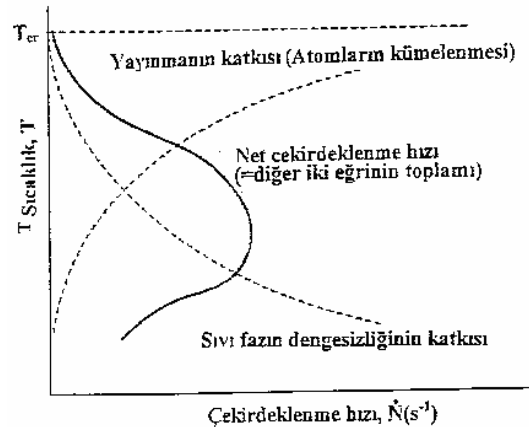
Faz Dönüşümü:



Katılaşmada Çekirdeklenme ve Büyüme Aşamaları

Sıvı içinde bir katı fazın oluşumunu örnek alalım. Önce sıvının içinde kristal düzeninde katı faz oluşumu başlar (çekirdeklenme), daha sonra bu çekirdekler büyür ve tüm sıvıyı kaplar.

Çekirdeklenme Hızı:



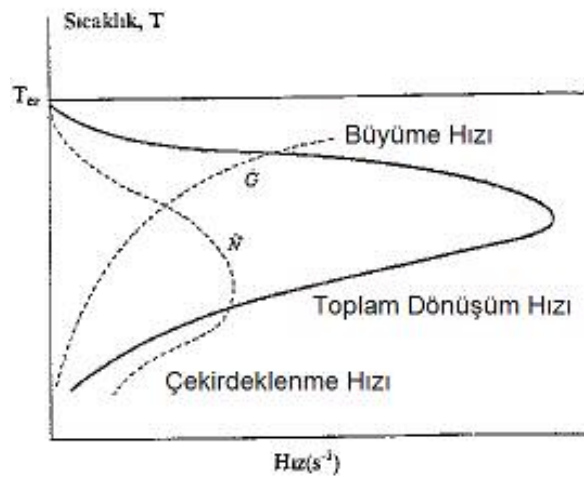
Sıvı içinde katı faz çekirdeklerinin oluşmasını etkileyen en önemli etken sıcaklıktır. Sıcaklık, faz diyagramı ile belirli olan likidüs sıcaklığının altına indiğinde, atomlar katı faza ait kristali oluşturmak isterler ve bu “katılaşma isteği” sıcaklık düştükçe artar. Yani sıcaklık düştükçe **sıvı fazın dengesizliğinin katkısı** ve birim zamanda oluşan çekirdek sayısı artar.

Öte yandan düşük sıcaklıklarda çekirdeklerin oluşması için gerekli olan atom hareketliliği (yayınma) düşüktür, atom hareketliliği sıcaklık yükseldikçe artar, yani çekirdek oluşumu için gerekli olan **yayınmanın katkısı** yüksek sıcaklıkta daha fazladır.

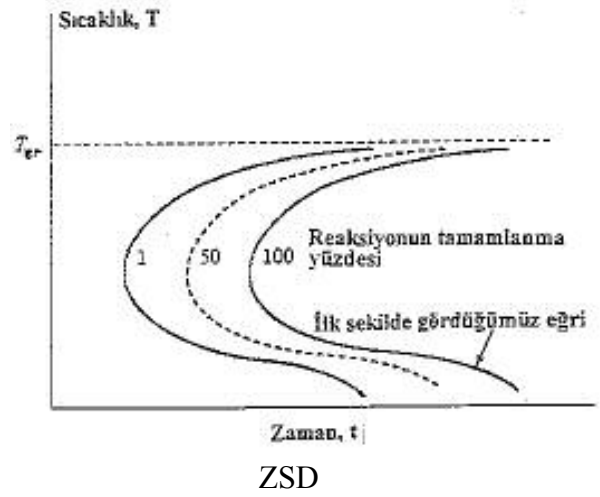
Bu iki etki yukarıda grafik olarak gösterilmiştir ve bunların toplanması sonucu ortaya çıkan net çekirdeklenme hızının belirli bir **optimum** sıcaklıkta en yüksek olduğu görülmektedir.

Büyüme Hızı

Oluşan bu çekirdeklerin büyümesi için de atomların yayınması gereklidir ve büyüme hızı yüksek sıcaklıklarda daha yüksektir. Bu şekilde büyüyen çekirdekler taneleri oluşturarak tüm sıvı katılaşır. Toplam dönüşüm hızını, çekirdeklenme ve büyüme hızları belirler

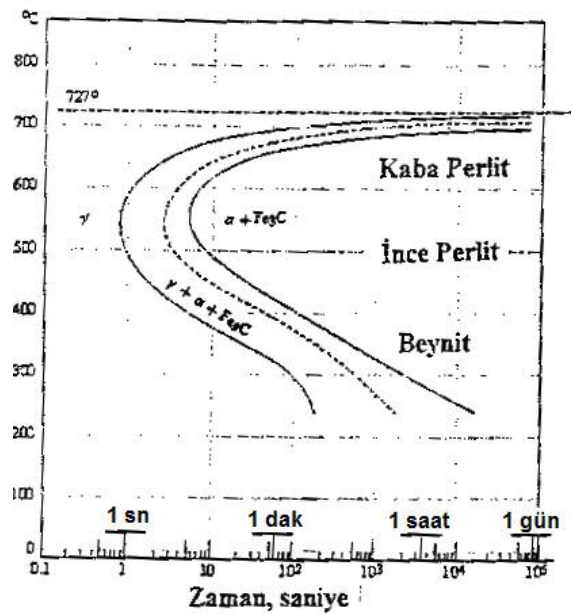


Katılaşma reaksiyonu için ZSD diyagramı

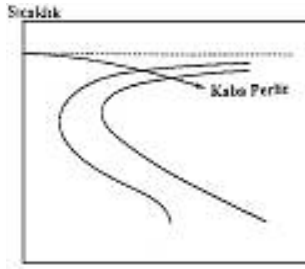


Yayınmalı Dönüşümler

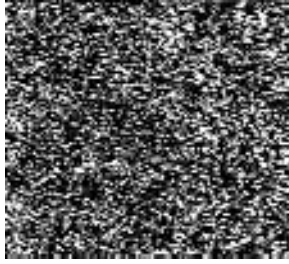
Belirli bir sıcaklıkta faz diyagramında görülen bir fazın oluşması için belirli bir süreye ihtiyaç vardır. Ayrıca dönüşümün gerçekleştiği sıcaklık oluşan iç yapıyı da belirleyici rol oynar ve farklı sıcaklıklarda farklı iç yapılar ortaya çıkabilir. Ostenit – Perlit (γ -Fe – Fe_3C) ötektoid dönüşümü buna bir örnektir. Ötektoid bileşimdeki bir çelik için bu dönüşüme ait ZSD-diyagramı aşağıda verilmektedir. 600 – 700 C arası dönüşümlerde kaba perlit, 600 – 400C arası ince perlit, 400C'nin altında ise beynit iç yapıları oluşmaktadır. 400 C'nin altında oluşan beynit, ferrit ve sementitin lamel oluşturamadan birlikte bulunduğu ince taneli bir mikroyapıdır.



Ötektoid Çeliğin ZSD-Diyagramı



Yavaş Soğuma >> Kaba Perlit



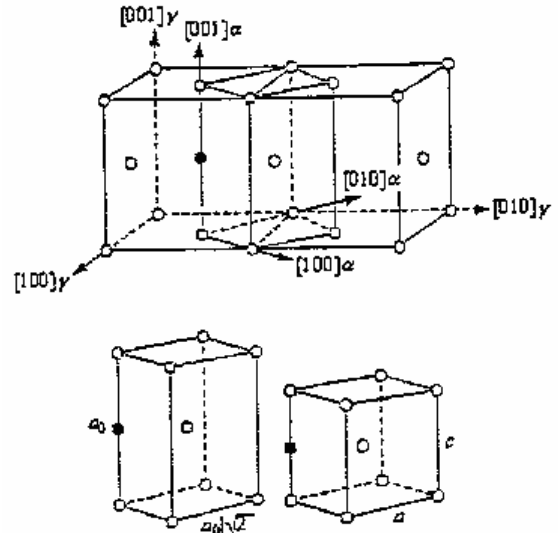
Beynit: Ostenit ve sementitin en ince yapısı

Yayınmasız Dönüşümler (Martenzitik)

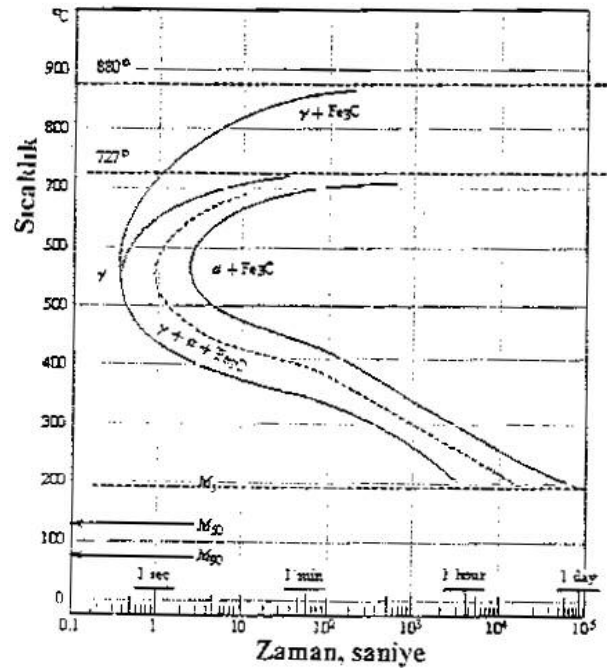
Soğuma hızı, faz değişimi için mevcut süreleri belirler ve bu hız yüksek olursa denge fazlarının oluşumu dahi gerçekleşemeyebilir

Örneğin çeliğin ötektoid reaksiyonunda ostenit ve ferrite dönüşmektedir. Bu iki fazın kafesleri farklıdır: ostenit yüzey merkezli kübik kristal yapıya (ymk), ferrit ise hacim merkezli kübik yapıya sahiptir. Faz dönüşümü sırasında bu kristal yapı değişimi küçük ötelenmelerle gerçekleştirilir. Örneğin yüzey merkezli kübik birim hücrelerin arasında hacim merkezli tetragonal bir birim hücrenin var olduğunu düşünebiliriz. İşte bu tetragonal birim hücre boyca kısalarak hacim merkezli kübik kafese dönüşür.

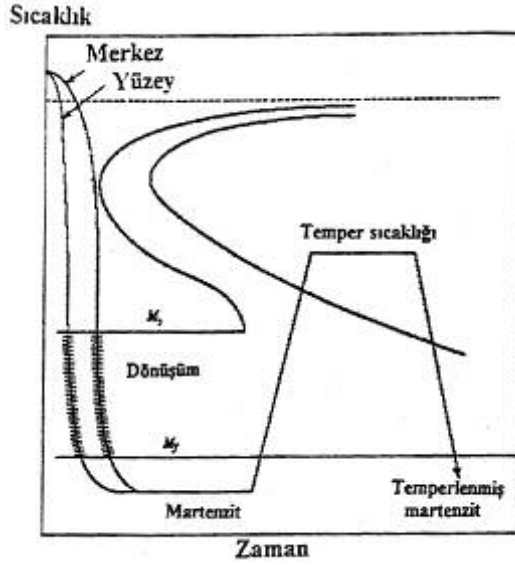
Ancak kafeste karbonun arayer atomu olarak bulunması durumunda, ymk kristal yapının merkezine yerleşmiş olan karbon arayer atomu, hmk yapıya dönüşümde, hmk tetragonal yapının bir kenarında kalır ve eğer başka konumlara yayınacak zamanı bulamaz ise, tetragonal kafesin kübik kafese dönüşmesini engeller ve birim hücrenin kısalarak tam kübik kristale ulaşmasına engel olur. Yüksek soğutma hızlarında ortaya çıkan, bu farklı faza martenzit denir. Martezitin iç gerilmeler içeren tetragonal bir kafesi vardır.



Dislokasyon hareketlerinin engellendiği gevrek, akma dayanımı ve çekme dayanımı çok yüksek bir fazdır.

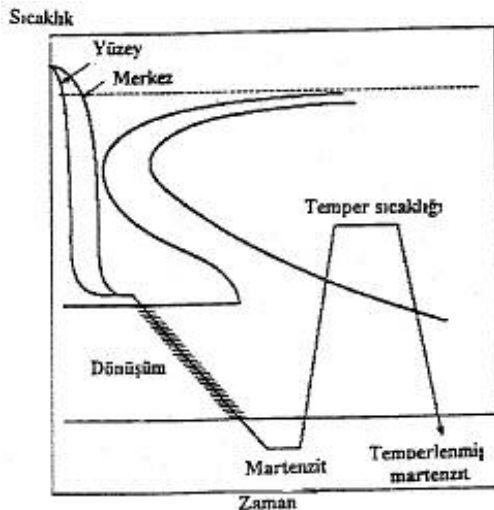


Ötektoidüstü Çeliğin ZSD-Diyagramı

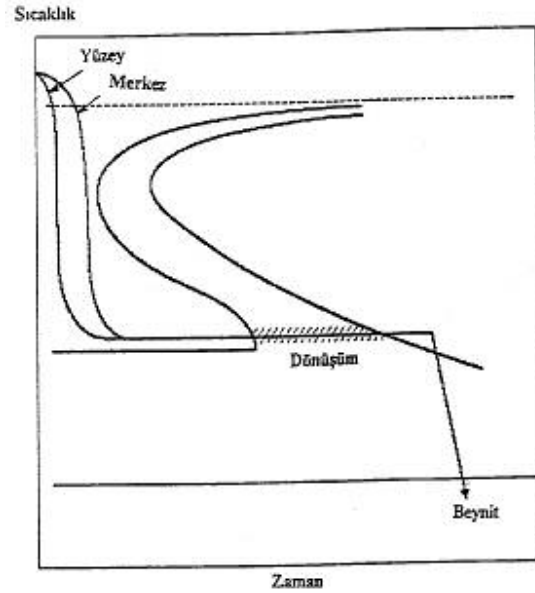


7.1. Çeliklerin Isıl İşlemi

Suverme ve Temperleme: Martenzit dayanımı yüksek, ancak buna karşın çok gevrek ve kırılgan bir fazdır. Temperleme işlemi ile, suverme sonrası oluşan martenzitik içyapıya sahip çelik daha az kırılgan ve tok yapılabilir. Temperleme ötektoid dönüşüm sıcaklığının altında uygulanan bir ısıl işlemdir. Şekilde görüldüğü gibi çeliğe önce ostenit sıcaklığından martenzite dönüşecek bir hızda suverilir. Daha sonra ötektoid sıcaklığın altında bir sıcaklıkta tutularak temperlenerek çelik içyapısındaki martenzit, ferrit fazı içinde demir karbür parçacıklarından oluşan bir yapıya dönüştürülerek yumuşatılır. Böylelikle gevrek martenzit daha tok hale getirilerek onun dayanımından yararlanılır.



Martemperleme: Suverme gibi hızlı soğutmalarda parçanın farklı bölgeleri arasında soğuma hızı farkından dolayı sıcaklık farklılıkları ve yüksek iç gerilmeler oluşur ve bunlar çatlaklara neden olabilir. Örneğin suvermede merkez ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı çok yüksektir. Yüzey daha düşük sıcaklıkta olacağı için daha fazla büzülme ister, merkez ile büzülme farkından dolayı yüzeyde çekme gerilmeleri ortaya çıkar. Sonuç olarak yüzeydeki içyapı gevrek bir martenzit ise, suverme çatlakları meydana gelebilir. Bunu önlemek için suverilen malzeme yukarıdaki grafikte görüldüğü gibi martenzit dönüşüm sıcaklığının hemen üstünde bir süre bekletilir ve yüzey ve merkez sıcaklıklarının dengelenmesi sağlanır. Daha sonra yavaş soğuma ile dahi gerçekleşen martenzit dönüşümü sırasında çarpılma ve çatlamların oluşması söz konusu değildir.



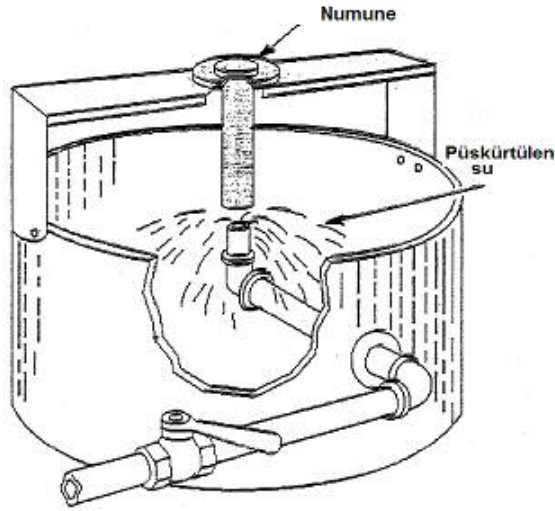
Ostemperleme: Karbon çeliklerinde beynit yapısı elde etmek için yapılan bir ısıl işlemdir. İşlem bazı çeliklerde tokluk ve sünekliği artırmak için, su verme ve temperleme yerine kullanılır. Çelik önce ostenit hale getirilir daha sonra martenzit dönüşüm sıcaklığının hemen üstündeki bir sıcaklıkta sabit sıcaklıkta tutulur (örneğin erimiş tuz banyosunda), burada bekletilerek ostenit > beynit dönüşümünün tamamlanması beklenir. Daha sonra

havada su verilir. Elde edilen son içyapı beynittir. Ostemperlenmiş beynitik çelikte iyi dayanım özellikleri yanında yüksek tokluk da elde edilir.

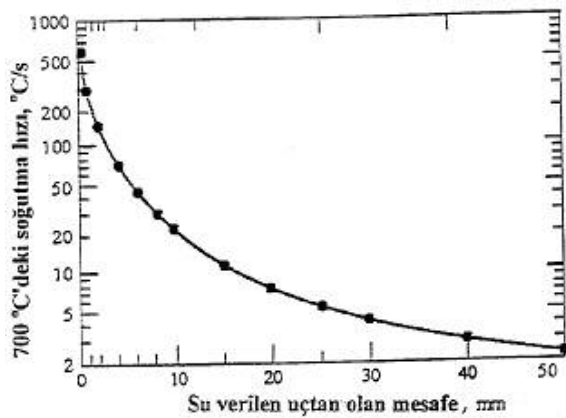
Sertleşme kabiliyeti Jominy Deneyi:

Çeliğin sertleşme kabiliyeti, malzemede su verme sonrasında meydana gelen sertliğin derinliğini ve dağılımını belirten bir özelliktir.

Sertleşme kabiliyeti Jominy deneyi ile belirlenir. Jominy deneyinde normalize edildikten sonra ostenit sıcaklığına çıkarılmış numunenin bir ucuna hızla su püskürtülür. Numune boyunca farklı soğuma hızları ve farklı sertlikler oluşur.



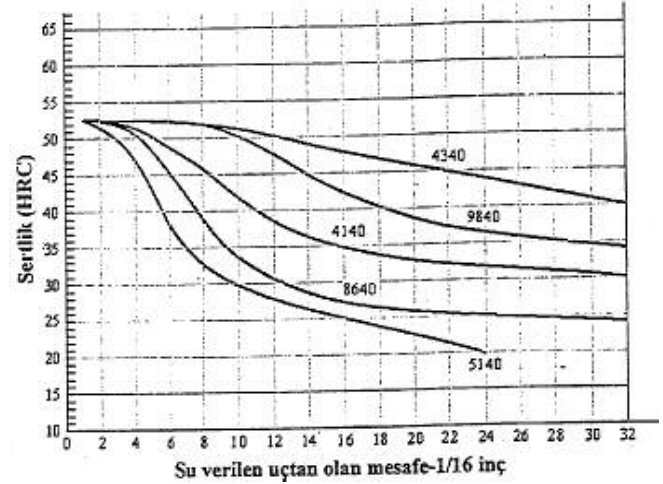
Jominy Deneyi



Jominy Deneyi soğuma hızının değişimi

Jominy Deneyinde numune içindeki soğuma hızı, su püskürtme ucundan uzaklığa bağlı olarak değişir. Deney sonrasında numune yüzeyi taşlanır, su

verilen uçtan uzaklığına (farklı soğuma hızları) bağlı olarak sertlik değerleri ölçülür ve grafiğe taşınır.

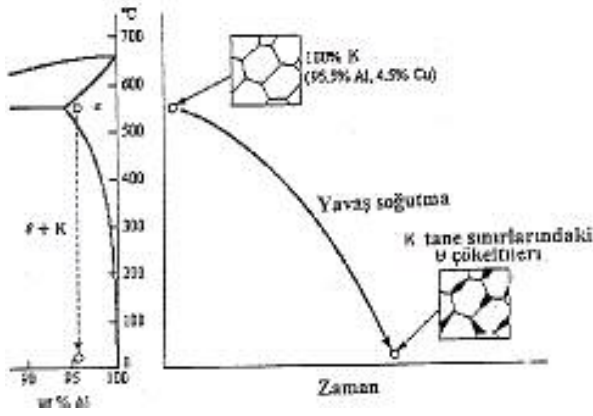


Değişik çelikler için Jominy Deneyi Sonuçları

Yukarıdaki grafikte değişik çelikler için sertleşme kabiliyetleri veren Jominy eğrileri görülmektedir. Bu çeliklerin hepsinde karbon yüzdesi aynıdır (%0,4); ancak örneğin 4340 çeliğinde su püskürtülen yüzeyden uzaklaştıkça sertlikteki düşme sadece 13 HRC iken, 8640 çeliğinde ise bu fark 35 HRC'dir. 4340 ve 8640 çeliklerinin yüzey sertlikleri aynıdır (53 HRC); fakat 4340 çeliği, düşük soğuma hızlarında dahi sertleştirilebildiği için 8640 çeliğine göre sertleşme kabiliyeti daha iyidir. Yani sertlik değeri ile sertleşme kabiliyeti birbirinden tamamen farklı kavramlardır.

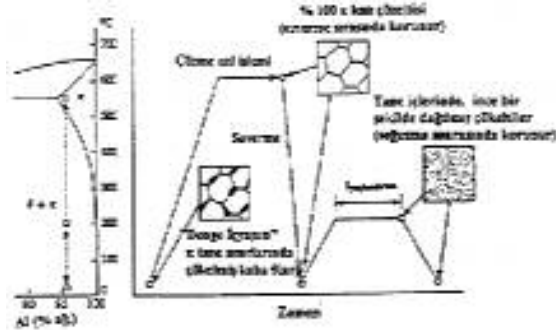
7.2. Çökelme Serleşmesi (Yaşlandırma).

Bu ısıl işlemde dayanımı yüksek olan bir ikinci faz, içyapıda küçük parçacıklar halinde çökeltir. Çökelen parçacıklar dislokasyon hareketlerine engel olarak malzemenin dayanımı artırır. Çökelme sertleşmesinin uygulanabilmesi için, bir faz içinde ikinci fazı oluşturacak alaşım elementinin çözünürlüğünün sıcaklık düştükçe azalması gerekir.



Örneğin yukarıda verilen Cu-Al faz diyagramında, alüminyumca zengin **K** katı çözeltisinde, sıcaklık 550'den aşağı düşerken, Cu çözünürlüğünde bir azalma olmakta ve normal koşullarda bu soğuma sırasında tane sınırlarında θ fazı oluşmaktadır.

Ancak θ fazını tane içlerinde ve daha ince olarak çöktirmek ve bu şekilde dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanım artışları sağlamak mümkündür. Bunun için aşağıdaki çöktirme (yaşlandırma) ısıtma işlemi yapılabilir.



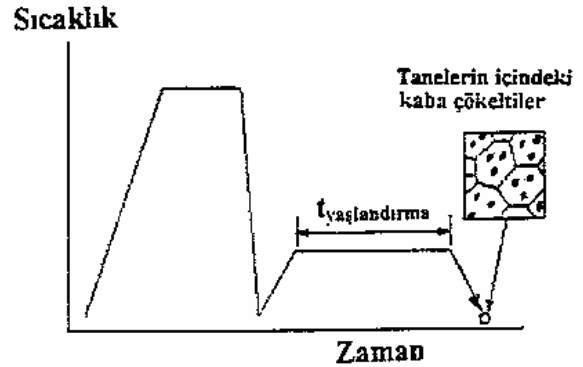
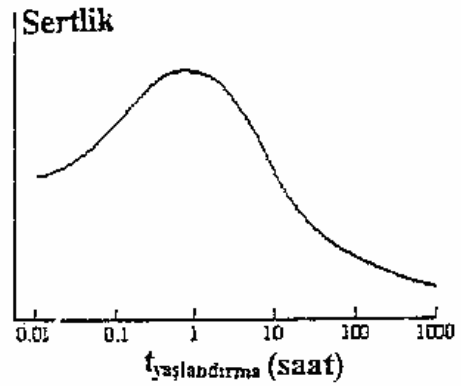
Çökelme sertleşmesi üç temel basamağı:

Çözeltiye alma: Malzeme 550 C sıcaklığa çıkarılıp gerekli süre tutulur ve bakırın tümü çözündürülür.

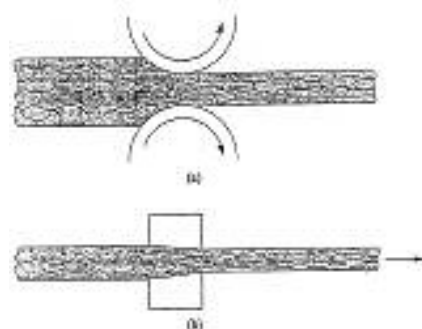
Su verme: Malzeme hızla oda sıcaklığına soğutulur, soğutma ortamı genellikle sudur. Yayınma imkanı bulamadığı için kendi fazını oluşturamayan Cu atomları, katı çözelti içinde aşırı doymuş olarak kalır.

Yaşlandırma: Aşırı doymuş bu yapıya, uygun sıcaklık ve süreler ısıtma işlemi uygulanarak ve θ fazının ince dağılımı sağlanarak çökmesi sağlanır.

Aşırı Yaşlanma: Çöktirme (yaşlandırma) işleminde tutma süresi ile sertliğin değişimi aşağıda görülmektedir. Grafiğin başladığı nokta aşırı doymuş katı çözeltiyi temsil eder daha sonra çökelmelerin başlaması ile sertlik (ve dayanım) artar. Maksimum sertlik için optimum bir yaşlandırma süresinin olduğu görülmektedir. Burada alaşımın içindeki çökeltiler en uygun boyutta ve en iyi dağılımdadır. Malzemenin daha uzun süreler bu sıcaklıkta tutulması halinde sertliğin azalmaya başladığı görülmektedir, bu durumda alaşımın içindeki çökeltiler irileşir ve çökeltilerin dayanımı artırma etkisi giderek azalır.



7.3. Yeniden Kristalleşme:



Soğuk şekillendirme uygulanmış metallerde (örneğin haddeleme işlemi sonrasında) malzeme içyapısında büyük şekil değişimleri oluşur: taneler deforme olur, dislokasyon yoğunluğu ve kafes kusurları artar. Malzeme pekleşir, dayanımı artar, ve sünekliği düşer.

Bu durumdaki bir malzeme, atomsal yayınmalarının mümkün olduğu yüksek sıcaklıklarda tutulursa (tavlama), içyapıda yeni düzenlemeler gerçekleşir.

Tavlama sırasında sıcaklığa bağlı olarak;

- Toparlanma veya
- Yeniden kristalleşme görülür.

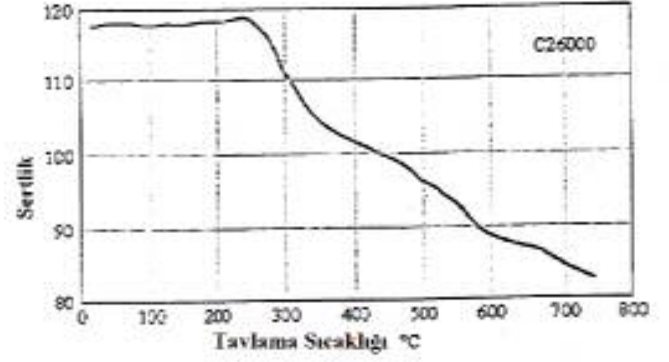
Toparlanma: Çok yüksek sıcaklıklara çıkılmayan toparlanma sırasında dislokasyonlar ve diğer kusurlar küçük ötelenmeler ile daha uygun konumlara hareket ederler. Sertlik az da olsa düşer, süneklik biraz artar ve ancak en belirgin etki elektrik iletkenliğinin artmasıdır (kafes içinde elektronların hareketi kolaylaşır).

Yeniden Kristalleşme(Rekristalizasyon): Aynı malzeme daha yüksek sıcaklıklara çıkarıldığında, içyapının tümüyle yenilenmesi, yani yeni ve gerilmesiz tanelerin çekirdeklenerek büyümesi ile malzemenin şekil verme öncesi içyapısına kavuşması mümkün olur.

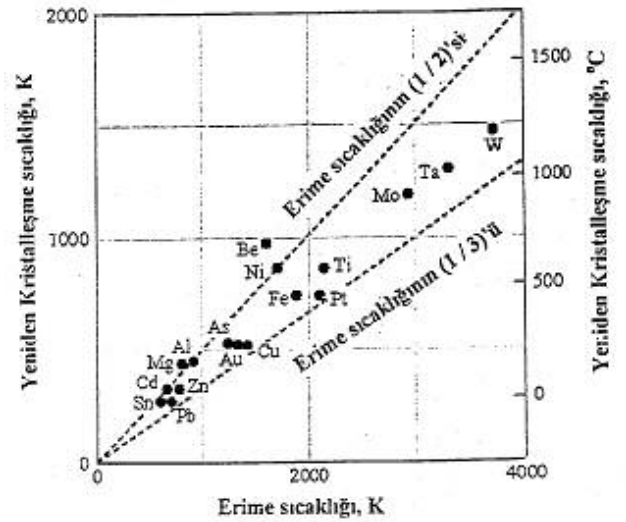
Yeniden kristalleşmenin mümkün olabilmesi için:

- Malzemenin soğuk şekil değiştirmiş ve içyapısının yüksek oranda kusur içermesi,
- Yayınmanın kolaylıkla mümkün olduğu bir sıcaklıkta yeterli süre tutulması gereklidir.

Yeniden kristalleşmeye etki eden faktörler: Metalin daha önceki biçim değiştirme miktarı, sıcaklık, zaman, başlangıçtaki tane büyüklüğü, alaşımın bileşimidir. Malzemenin önceden gördüğü şekil değiştirme miktarı arttıkça yeniden kristalleşme için gerekli sıcaklık düşer ve çok sayıda noktadan çekirdeklenme başlayacağı için yeniden oluşan tanelerin boyutları küçülür.



Tavlama sıcaklığının artışı ile malzemede soğuk şekil verme sonrası oluşan pekleşmenin etkisi azalır. Sertliğin hızla düştüğü sıcaklıklar, yeniden kristalleşmenin olduğu sıcaklıklardır.



Metallerin yeniden kristalleşme sıcaklığı, malzemenin erime sıcaklığı ile ilgilidir. Yeniden kristalleşme sıcaklığı, Kelvin olarak ifade edilen erime sıcaklığının 1/2'si ile 1/3'ü arasındadır.



Tane irileşmesi: Kristalleşme işlemi sırasında malzeme, gereğinden daha yüksek sıcaklıklarda ve gereğinden daha uzun süreler tutulur ise tane irileşmesi meydana gelir. Tane irileştikçe malzemenin dayanımı düşer.

8. Metal ve Alaşımları

Metaller ve alaşımları mühendislikte en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir ve genellikle demir esaslılar ile diğerleri olmak üzere iki grupta ele alınırlar.

8.1. Demir Esaslı Mühendislik Malzemeleri

Kullanılan metalsel malzemelerin %90'ı demir esaslıdır. Demir esaslı malzemeler karbon içeriğine göre çelikler ve dökme demirler olmak üzere ikiye ayrılırlar:

Çelikler % C 0,05 - 2

Dökme demirler % C 2 - 4,5

8.1.1. Çelikler

Çelikler esas olarak Fe-C alaşımlarıdır. Ancak bileşimlerinde sadece karbonun bulunması durumunda (karbon çelikleri) bu çeliklerin bazı özellikleri yetersiz kalır:

- Gevrekliğe yol açmadan 700 MPa üzerindeki dayanımlara sahip olamazlar,
- Sertleşme kabiliyetleri düşüktür,
- Korozyon dirençleri zayıftır,
- Gevrek-sünek geçiş sıcaklıkları yüksektir.

Bu nedenle çeliklerde karbon dışında Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W, Al gibi değişik elementlerle alaşımlama yapılır:

Alaşımlama ile çeliklerin **kullanım özelliklerinin** (Dayanım, Süneklik, Tokluk, Aşınma Dayanımı, Sertleşebilme Kabiliyeti, Tane Küçültme Etkisi, Korozyon Dayanımı, Yüksek Sıcaklık Dayanımı, Elektriksel, Manyetik Özellikler vs) ve **imalat özelliklerinin** (Soğuk Şekillendirilebilirlik, Sıcak Şekillendirilebilirlik, Talaşlı İmalata Elverişlilik, Dökülebilirlik, Kaynak Kabiliyeti, Nitrlenebilirlik vs) geliştirilmesi mümkündür.

Çelikler değişik standartlara göre sınıflandırılır ve kodlanır. Örneğin AISI(ABD) normlarına göre sınıflandırma ve kodlama aşağıdaki şekildedir.

Sınıf	Alaşım Elementleri	Yaygın Örnekler
10XX	C	1020, 1040, 1060
11XX	C,S (Otomat)	1120
2XXX	Ni	2130
3XXX	Ni + Cr	3140
4XXX	Mo + Cr + Ni	4140, 4340
5XXX	Cr	5160
6XXX	V	6150
7XXX	W	7230
86XX	Ni + Cr + Mo	8620, 8660
92XX	Si	9260

Çelik Türleri

a. Yapı Çelikleri:

Profil, lama, çubuk, boru, vb..

Fe 37, Fe 42, Fe 50 (çekme dayanımına göre kodlama- Avrupa)

USA 1010, 1020 vb.

Yassı ürünler...

Fe10 Siyah sac

Fe12 DKP sac (Tufalı alınmış)

Fe13 ve Fe14 Derin çekme kalitesinde sac

Teneke,

Galvaniz sac,

Gemi sacları vb...

b. Islah Çelikleri

Su verme / temperleme işlemleri ile özellikleri düzenlenebilir çeliklerdir. Basit karbonlu veya alaşımlı türleri vardır.

c. Sementasyon Çelikleri

Yüzeye karbon yayındırılarak, iç kısımları tok, yüzeyleri ise sertleştirilmiş parçaların imalatı için kullanılan çeliklerdir. Düşük karbonlu veya düşük alaşımlı malzemelerdir.

d. Nitrürasyon Çelikleri

Yüzeye azot yayındırarak yüzey sertliği sağlanan çeliklerdir. Orta karbonlu ve nitrür yapıcı element içeren malzemelerdir.

e. Otomat Çelikleri

Çok iyi talaşlı imalat özellikleri vardır. Genelde kükürt ile alaşımlı çeliklerdir.

f. Paslanmaz Çelikler:

Alaşımlı elementi olarak yüksek oranda Cr ve Ni içeren pahalı çeliklerdir. Paslanmaz çeliğin bileşiminde en az %12 Cr bulunması halinde yüzeyde koruyucu bir oksit tabakası oluşur. Değişik türleri vardır.

- Cr içeren **ferritik** paslanmaz çelikler görece olarak daha ucuzdur (410, 430).
- **Ostenitikler** ise Cr ve Ni içerir. Bu tür çeliklerin korozyon direnci daha iyidir ve daha kolay şekillendirilebilirler (304, 316).
- Suverilerek ıslah edilebilen **martenzik** paslanmaz türleri de vardır. (420, 440)

g. Yay Çelikleri

Bu tür çelikler iyi sertleşebilme kabiliyetine sahiptir. Genellikle orta karbonludur ve elastik sınırları yüksektir.

h. Cıvata Çelikleri

Soğuk şekil vermeye (ovalamaya) uygun, basit karbonlu veya alaşımlı çeliklerdir.

i. Yüksek Sıcaklık (Boru-Kazan) çelikleri

Yüksek sıcaklık kullanımları için düşünülmüştür. Kaynak kabiliyeti iyidir ve yüksek işletme sıcaklıklarında grafitleşme (sementitin grafit ve ferrite fazlarına dönüşmesi) eğilimi düşük çeliklerdir.

j. Düşük Sıcaklık Çelikleri

Çok düşük sıcaklıklarda bile yüksek tokluklarını koruyan genellikle Mn veya Ni ile alaşımlandırılmış çeliklerdir.

k. Supap Çelikleri

Yüksek sıcaklık dayanımı ve erozyona dayanımı yüksek çeliklerdir, motorlarda kullanılır.

l. Takım Çelikleri:

Değişik imalat yöntemlerinde takım malzemesi için düşünülmüş çeliklerdir.

- **Sıcak İş Çelikleri** Sıcak şekillendirme ve döküm kalıplarında
- **Soğuk iş çelikleri:** soğuk şekillendirmede
- **Kesme takım çelikleri:** Talaşlı imalat takımları için kullanılır.

m. Rulman Çelikleri

Sertlik açısından yüksek karbonlu, yorulma dayanımı açısından ise metallujik olarak temiz (kalıntılar az) kalite çelikleridir.

n. Elektrik Çelikleri

Si oranı yüksek çeliklerdir. Bu tür çeliklerde manyetik kayıp azdır. Transformatörler ve elektrik motorlarında kullanılır.

o. Ostenitik Çelikler (manyetik değil)

Deformasyon sertleşmesine çok duyarlı malzemelerdir, oda sıcaklığında ostenit faz elde etmek için Mn ile alaşımlama yapılmıştır.

p. Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımlı Çelikler (HSLA Steels)

Bu çeliklerde yüksek dayanım ve şekillendirilebilme kabiliyeti, mikro alaşımlama ile ekonomik olarak sağlanır (Ti, Nb, V gibi). Bu malzemelerde özellikler etkili bir alaşımlama ve kontrollü ısı / mekanik işlemlerle geliştirilir. Bu malzemeler özellikle otomotiv sektöründe sac kaporta malzemesi olarak kullanılır. Yüksek dayanımlar hafif tasarımlara imkan sağlar, ayrıca imalat kolaylığından dolayı da tercih edilirler.

r. Maraging Çelikleri:

Çok yüksek çekme dayanımlarına sahip çeliklerdir(2000-3000Mpa). Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımları da yüksek

olduğundan stratejik malzemelerdir. İki ayrı dayanım artırma mekanizması birlikte vardır: martenzit dönüşümü ve yaşlandırma. Günümüzde birçok stratejik uygulama için (örneğin askeri amaçlı) gerekli çeliklerdir.

s. Süperalaşım:

1000 C üzerindeki sıcaklıklarda dahi yüksek dayanımlı ve kararlı çeliklerdir.

t. Dökme Çelikler:

Çeliğin dökülebilme kabiliyeti çok iyi değildir. Bu nedenle sadece plastik şekil verme (dövme gibi) yöntemleriyle imalatın zor olduğu (çok büyük parçalar) ve dökme demirlerin dayanımının yetersiz kaldığı durumlarda kullanılırlar.

8.1.2. Dökme Demirler

Dökülebilme özellikleri çok iyi olan Fe-C-Si alaşımlarıdır. Dayanımları çeliklere oranla düşük ve gevrek malzemelerdir; buna rağmen ekonomikleri ve bazı imalat özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılırlar.

Dökme demirlerde sıvı fazdan soğuma yeterince yavaş olur ise, ve bileşimde grafitin ayrı bir faz olarak ayrışmasını sağlayan elementler (Si gibi) bulunursa,

içyapıda **grafit fazı** oluşur.

Hızlı soğuma >> Sementit + Perlit (Yarı Kararlı)

Yavaş soğuma >> Grafit + (Perlit veya Ferrit) (Kararlı)

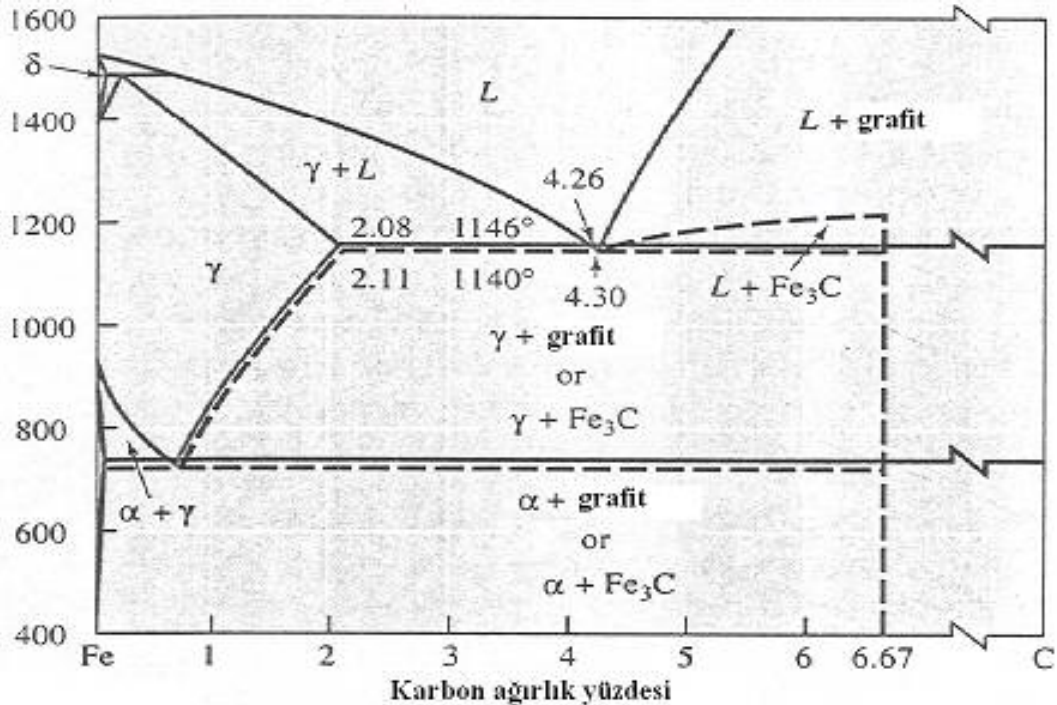
Dökme Demir Türleri:

Bileşimdeki karbonun hangi faz içinde bulunduğu ve bu fazın içyapıdaki dağılım geometrisine göre sınıflanan değişik dökme demir türleri vardır. Bunların kimyasal bileşimleri arasında önemli bir fark yoktur.

a. Beyaz Dökme Demir

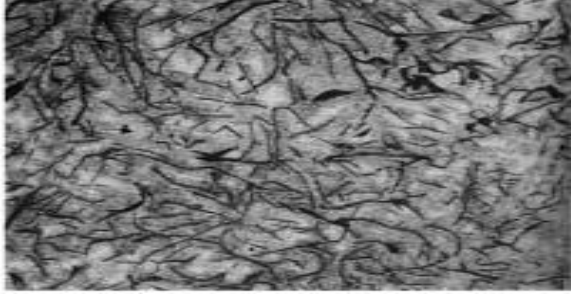


Yüksek hızda soğuma neticesi tüm karbon içyapıda sementit içinde bulunur, grafit fazı yoktur. Beyaz dökme demirin bu şekilde adlandırılmasının nedeni kırılma yüzeyinin beyaz veya parlak kristalsi bir yapıda olmasıdır. Beyaz dökme demirler



yüksek sertlik ve kırılmalığa sahiptir ve çoğunlukla mükemmel aşınma ve yıpranma dirençleri için kullanılmaktadır. Ancak beyaz dökme demirlerin talaşlı olarak işlenmesi imkansızdır.

b. Lamel Grafitli (Kır) Dökme Demir



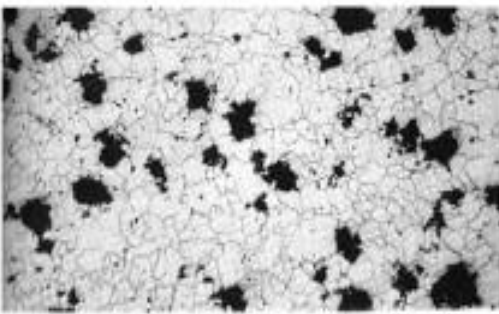
Karbon içyapıda lamel şeklinde grafit fazı içinde bulunur. Koşullara bağlı olarak karbonun bir kısmı perlit içinde de (sementit olarak) bulunabilir:

- Çok yavaş soğuma hızı (Ferrit + Lamel grafitler), dayanım düşük
- Daha hızlı soğutma ile (Perlit + Lamel Grafitler), Karbonun bir kısmı sementit içinde olduğundan dayanım göreceli olarak daha yüksek

Gevrek ve çekme dayanımları düşük malzemelerdir. Ancak döküme çok uygun ekonomik malzemelerdir.

Grafitin yağlayıcı etkiye sahip olması nedeniyle, sınırlı bir yağlama gerçekleşir ve aşınmaya dirençleri yüksektir. Talaşlı imalat özellikleri çok iyidir. Grafit lamellerinin olumlu bir etkisi malzemeye titreşim sönümleme özelliği kazandırmasıdır.

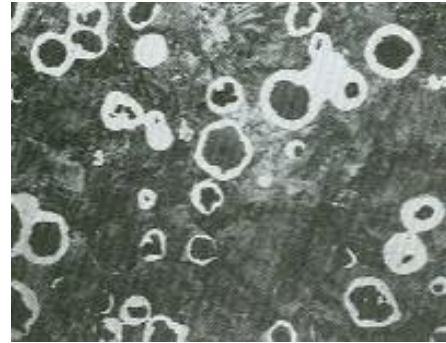
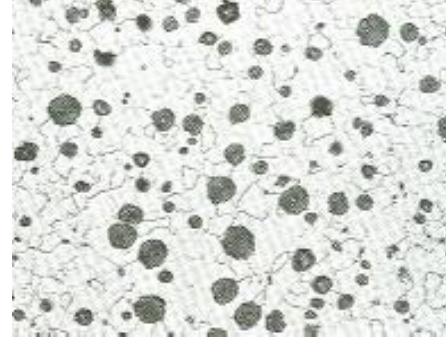
c. Temper Dökme Demir



Temper dökme demirin başlangıç malzemesi beyaz dökme demirdir. Beyaz dökme demirde karbon tümüyle sementit

içindedir. Temper dökme demiri elde etmek için beyaz dökme demirler yüksek sıcaklıkta ve uzun süreli bir ısıtma işlemine tabi tutularak sementit içindeki karbonun küçük parçacıklar halinde grafitte ayrışması sağlanır. Ferritik ve perlitik tipleri vardır. Perlit oranı ile dayanım artar. Grafitin lameller halinde bulunmaması ile dayanım ve toklukta önemli iyileşmeler sağlanır.

d. Küresel (Sfero) Dökme Demir



Ferritik ve Perlitik Sfero Demirler

Küresel grafitli dökme demirler kır dökme demirin üretim üstünlükleriyle çeliğin mühendislik üstünlüklerini birleştirir. Bunu sağlayan grafit fazının küresel olarak bulunmasıdır. Sıvı metale yapılan alaşımlama ile katılaşma sırasında grafitler küresel olarak oluştuğundan, temper dökme demirlere göre imalat süreci çok daha kolaydır. Küresel grafitli dökme demir iyi bir akışkanlığa, mükemmel talaşlı işlenebilirliğe ve iyi aşınma direncine sahiptir. Ayrıca bu tür dökme demirin yüksek dayanım tokluk süneklilik sıcak işlenebilirlik ve sertleşebilirlik gibi çeliğe benzer özellikleri de vardır. Kullanım özellikleri bakımından en gelişmiş dökme demir türü olarak kabul edilirler.

Dökme Demir Türleri, Sembolleri ve Kullanım Yerleri

DD Türü	Kullanım Yerleri
Beyaz DD	Öğütücüler, Temper Dökme Demir için başlangıç malzemesi
Sert Kabuklu	Tekerlekler, zincir dişlileri,...
Kır DD	Motor blokları, kompresör silindirleri, tezgah gövdeleri, motor ve pompa gövdeleri,
Temper DD	Güç aktarma organlarına ait parçalar, direksiyon mafsalları, bağlama elemanları, fittingler
Sfero DD	Valf ve pompa gövdeleri, dişli taslakları, miller, krank milleri, yüksek dayanımlı otomotiv parçaları..

8.2. Demirdışı Metal ve Alaşımları

Bazı metal alaşımları ve bunların çelikler ile karşılaştırılması (bağlı)

Metal	Yoğunluk g/cm ³	Max.Çekme Dayanımı MPa	Bağlı Özgül Dayanım	Bağlı Fiyat
Aluminyum	2.70	580	1.2	6
Magnezyum	1.74	580	1.9	15
Berilyum	1.85	385	1.2	3000
Bakır	8.93	1000	0.6	7
Nikel	8.90	1200	0.7	40
Titanyum	4.51	1100	1.2	40
Çelikler	~7.87	1400	1	1

8.2.1. Alüminyum ve Alaşımları

- Yoğunluğu 2,7g/cm³ tür. Çelikten sonra kullanım alanı en yaygın olan metelsel mühendislik malzemesidir ve hafifliği nedeniyle özellikle uçak uzay sanayinde tercih edilir.
- Elastiklik modülü 70GPa'dır (Çelik 200 GPa); yani çelikten daha az rijittir ve aynı zorlama altında çeliğe göre 3 misli daha çok esner.
- Özgül dayanımı iyidir (birim ağırlık başına dayanım). Aynı yükü çeliğe göre daha hafif malzemeyle taşır.

- Elektrik ve ısı iletkenliği çok iyidir.
- Gevrek-sünek geçiş sıcaklığı olmadığından dolayı, aniden çok soğuk ortama girdiğinde dahi gevrekleşmez.
- Oksidasyon ve korozyona dayanıklıdır. Yüzeyinde koruyucu oksit tabakası bulunur, çizilse bile hemen tekrar oluşur. Oksit tabakasının bileşimi ayarlanarak farklı renkler alması sağlanabilir.
- Sertliği ve aşınma dayanımı düşüktür.
- Yüksek sıcaklıklarda özellikleri iyi değildir.
- Alüminyum alaşımlarında değişik dayanım artırma yöntemleri seçilebilir, ancak en etkin dayanım artırma yöntemi, çökeltme sertleşmesidir (yaşlandırma).

Alüminyum ve Alaşımlarında Dayanım Artırma Mekanizmaları

Malzeme	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	% Uzama	Dayanım Oranı
Saf Alüminyum	45	18	60	1
Ticari Saf Alüminyum	91	35	45	2.0
Soğuk Şekillendirilmiş	168	154	15	6.8
Çökeltme Sertleşmeli	588	510	11	29.2

Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır.

Dövme Alaşımları

1xxx	Ticari saflıkta Al	Yaşlandırma yapılamaz
2xxx	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Mn	Yaşlandırma yapılamaz
4xxx	Al-Si ve Al-Mg-Si	Magnezyum varsa yaşlandırılabilir
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırma yapılamaz
6xxx	Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Li, Sn, Zr, veya B	Yaşlandırılabilir

Döküm Alaşımları

1xxx	Ticari saflıkta Al	Yaşlandırma yapılamaz
2xxx	Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3xxx	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları yaşlandırılabilir
4xxx	Al-Si	Yaşlandırma yapılamaz
5xxx	Al-Mg	Yaşlandırma yapılamaz
7xxx	Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8xxx	Al-Sn	Yaşlandırılabilir

Malzemelerin ısıtılma durumları temper gösterimleri ile ifade edilir. Alüminyum alaşımlarının bazı temper gösterimleri aşağıdaki gibidir. Örneğin: 2024 – T6 (yapay yaşlandırılmış bir Al-Cu alaşımı)

ALUMİNYUM ve ALAŞIMLARINDA TEMPER GÖSTERİMLERİ

F	İmal edildiği gibi
O	Tavlama
H	Soğuk Şekil Verilmiş (H12, H22 gibi)
W	Çözme Tavlama Uygulanmış
T	Yaşlandırma (Çök.Sert.) uygulanmış
Mesela	T4—çözme tavlama ve doğal yaşlandırma T6—çözme tavlama ve yapay yaşlandırma

8.2.2. Magnezyum ve Alaşımları

- Yoğunluğu sadece 1,74 g/cm³ 'dir. Hafifliğin önemli olduğu yerlerde kullanılır.
- Elastiklik Modülü düşüktür (45 GPa) Yaygın kullanılan mühendislik malzemeleri arasındaki rijitliği en az olan malzemelerden biridir.
- SDH kafes yapısından dolayı, gevrek ve şekillendirilmesi güç bir malzemedir.
- Yüksek sıcaklıklarda oksijenle hızla tepkimeye girer ve tutuşur. Bu durum imalat ve kullanımda sorunlar yaratır.
- Tuzlu sulu ortamlar dışında korozyona dayanıklıdır.

8.2.3. Bakır ve Alaşımları

- Yoğunluğu yüksektir, 8,9 g/cm³.
- Elektrik ve ısı iletkenliği mükemmel bir malzemedir
- Diğer demirdışı metallerle göre sertlik, aşınma dayanımı ve yorulma dayanımı daha iyidir.
- YMK kafese sahip olduğundan, kolay şekillendirilebilir. Diğer birçok imalat yöntemi için de uygundur.
- Korozyon dayanımı iyidir.
- Bileşimine göre değişik renkler alabilir. Süs eşyası ve madeni para imalinde kullanılır.
- Değişik yöntemlerle dayanımı artırılabilir.(Bak aşağıdaki tablo). En yüksek dayanımlar yaşlandırılmış Cu-Be alaşımlarında elde edilir.

Bakır ve Alaşımlarında Dayanım Artırma Mekanizmaları				
Malzeme	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	% Uzama	Dayanım Artırma Mekanizması
Saf Cu, tavlama	210	32	60	Yok
Ticari saf bakır, in. taneli	225	70	55	Katı Çözelti
Ticari saf bakır, ince taneli	240	77	55	Tane İncelmesi
Ticari saf Cu, %70 soğ. sek. deg.	400	371	4	Pekleşme
Tavlama Cu - %35 Zn	330	105	62	Katı Çözelti
Tavlama Cu - %10 Sn	462	196	68	Katı Çözelti
Soğ. Sek. Deg. Cu - %35 Zn	685	441	3	Katı Çözelti + Pekleşme
Yaşlandırma Cu - %2 Be	1330	1225	4	Yaşlandırma

En Önemli Bakır Alaşımları:

- Pirinçler Cu – Zn
- Bronzlar Cu – Sn (kalay bronz), (Mn-, Al-, Si- bronz)

8.2.4. Diğerleri

Berilyum ve Alaşımları

- Yoğunluğu sadece 1,85 g/cm³'dir.
- Elastiklik Modülü 280 GPa (çelikten yüksek !)
- Rijitlik ve hafifliğin önemli olduğu yerlerde kullanılır (örneğin uzay sanayi konstruksiyonlarında)
- Elektromanyetik geçirgen bir malzemedir.
- Çok pahalı, toksik, ve reaktiftir.

Nikel ve Alaşımları

- Korozyon dayanımı ve yüksek sıcaklık özellikleri iyidir.
- Nikel, ostenitik paslanmaz çeliklerin ana alaşım elementlerinden biridir.
- YMK kafese sahip olduğundan kolay şekillendirilebilir
- Monel olarak adlandırılan Ni+Cu alaşımları, korozyon dayanımı çok yüksek malzemelerdir.
- Süperalaşımların ana alaşım elementlerinden biridir.

Kobalt ve Alaşımları

- Aşınmaya ve vücut sıvılarına dayanıklı bir malzeme olduğundan, vücut protezlerinde tercih edilir.

Titanyum ve Alaşımları

- Mekanik ve korozyon özellikleri iyidir.
- Yoğunluk sadece 4,5 g/cm³'dir.
- Akma dayanımı, yorulma dayanımı bakımından çelik ile karşılaştırılabilir ve daha hafif bir malzeme olduğundan örneğin uçak-uzay sanayinde tercih edilir.

Çinko ve Alaşımları

- Erime sıcaklığı düşüktür.
- Korozyona dayanıklıdır
- Basınçlı döküm yöntemine uygun bir malzemedir.
- Saçların galvanizlenerek korozyondan korunmasında kullanılır.

Kurşun ve Alaşımları

- Erime sıcaklığı düşüktür, oda sıcaklığında yeniden kristalleşir.
- Yüksek yoğunluktadır ve ısıyı geçirgenliği düşük olduğu için radyasyondan korunmada kullanılır.
- Lehim alaşımlarında ana alaşım elementlerindendir.
- Az miktarda antimon ile alaşımlandırılarak dayanımı yükseltilebilir.
- Toksik olması kullanım alanlarını sınırlar
- Akü plakaları, imalinde kullanılır.

Refrakter Metaller

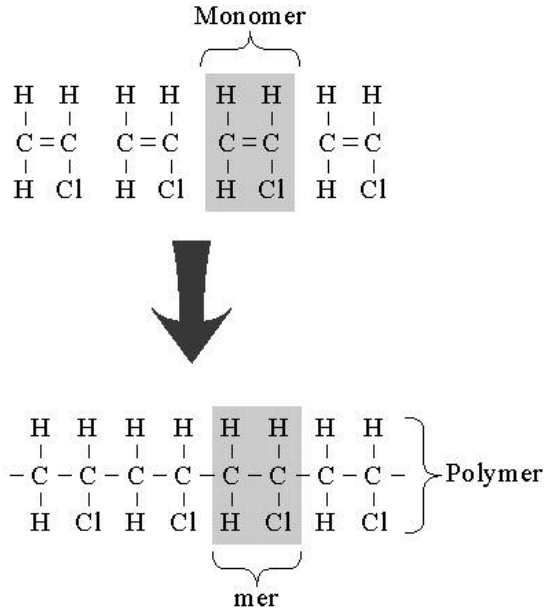
- Molibden, Niyobyum, Renyum, Tantal, Volfram...
- Çok yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybetmeyen malzemelerdir.
- Yüksek sıcaklıklarda süper alaşımlardan daha dayanıklıdır.
- Metalik malzemelerin pahalı olduğu veya kullanılmadığı yerlerde tercih edilir.

Kıymetli Metaller

- Altın, gümüş, platin...
- Korozyon dayanımları çok yüksektir.
- Altın elektrik sanayinde, platin ise otomotiv sanayinde egzoz filtresi olarak kullanılır.

9. Polimerler

Küçük molekül birimlerinin (mer) uzun zincirler halinde birleşerek oluşturduğu zincir moleküllerinden (polimer), ikincil veya çapraz bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu malzemelerdir.

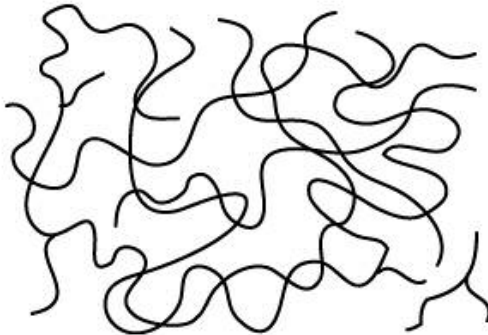


Merlerin birleşmesi ile polimerlerin oluşumu

9.1. Polimer Türleri

Polimerler termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere üç ana gruba ayrılır.

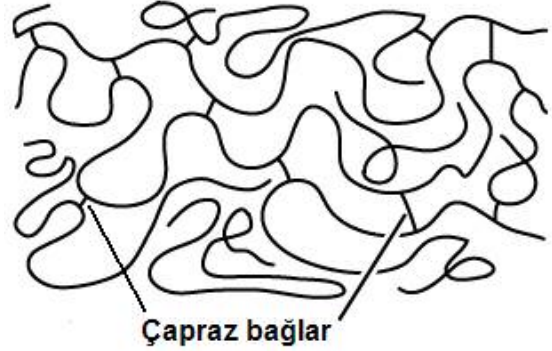
Termoplastikler: İkincil van der Waals bağlarla bağlı, lineer polimer molekülleridir.



- VanderWaals bağları yaklaşık 100°C da zayıflar ve malzeme yumuşar.
- Kolaylıkla şekil verilebilir.
- Geri kazanılarak tekrar kullanılabilir.

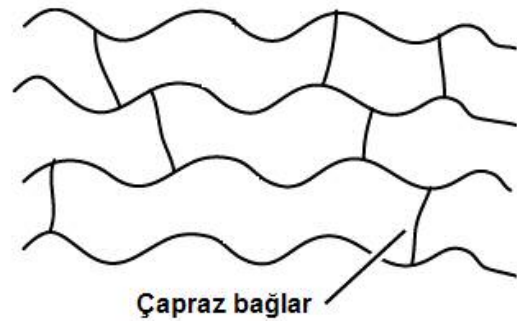
- Mühendislik uygulamaları için daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen türleri geliştirilmiştir.

Termosetler: Molekül zincirleri çapraz ağlarla bağlanmış ve rijit 3 boyutlu bir yapı ortaya çıkmıştır.



- Çapraz bağlanma tamamlandıktan sonra malzeme rijitlik kazanır ve bu işlem geri çevrilemez.
- Yüksek sıcaklıklarda yumuşama ve erime olmaz, malzeme yanar.
- Geri kazanılması çok güçtür.

Elastomerler: Az sayıda çapraz bağlı zincirlerdir. Yapı rijit değildir,



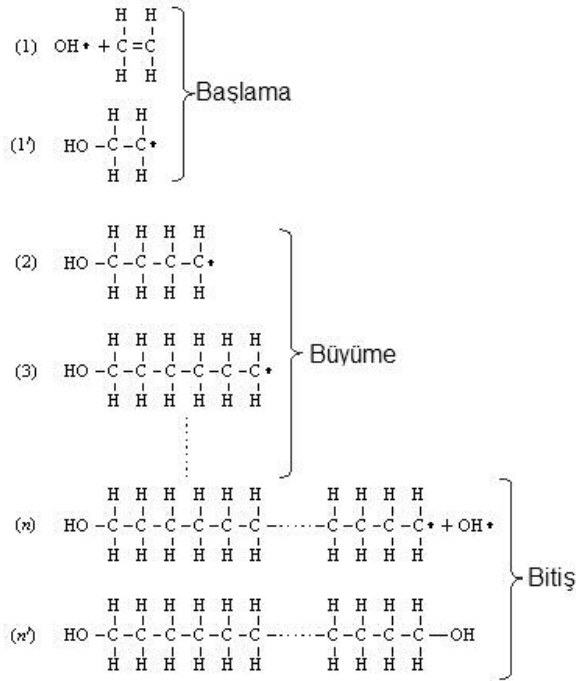
Polimer zincirleri, uygulanan kuvvet ile birbiri üzerinde kaymazlar, ama çapraz bağlar kopmadan malzeme esneyebilir (lastik gibi). Yay gibi davranabilen moleküller, uygulanan kuvvet kaldırıldığında çapraz bağlar sayesinde eski konumların geri dönerler.

9.2. Polimerizasyon

Monomer birimlerinden başlayarak polimer zincirlerinin elde edilmesine yol açan reaksiyonlara polimerizasyon denir.

Polimerizasyon reaksiyonları iki türlü olabilir: Ekleme Polimerizasyonu, Yoğuşma Polimerizasyonu (polikondenzasyon)

Ekleme Polimerizasyonu: Bu tip polimerizasyonlarda molekülün çift bağı açılır ve herhangi bir yan ürün oluşmadan iki ayrı bağ bağı oluşturur.



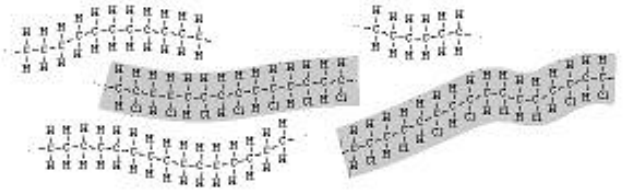
Polietilende Ekleme polimerizasyonu (OH-serbest radikali)

Kopolimerizasyon: Molekül zincirleri genellikle sadece tek bir tür mer içerir, ancak plastik teknolojisinin ilerlemesiyle 2 veya daha fazla mer eklenerek yapılan polimerlerin daha üstün fizik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Bu şekildeki yapılara **kopolimer** denir ve metallerdeki katı çözeltiye benzetilebilir.



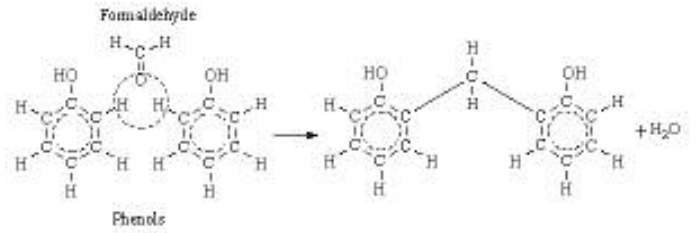
Etilen / vinil-klorür **kopolimeri**

Bazı durumlarda ise, malzeme iki farklı zincir molekülün karışımından oluşur.

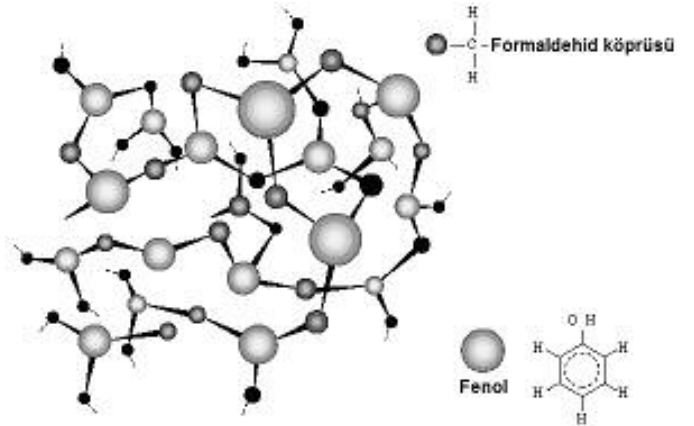


Etilen ve vinil-klorit karışımı

Yoğuşma Polimerizasyonu (Polikondenzasyon): Burada bağ oluşumu reaksiyonu sırasında polimer zincirine girmeyen bir molekül açığa çıkar. Bu genellikle H_2O , HCl ve CH_3OH gibi basit bir moleküldür.



Fenol-formaldehid'in **polikondenzasyonla** oluşumu (bir su molekülü açığa çıkar)



Polikondenzasyon sonucu ortaya çıkan üç boyutlu ağ molekül yapısı

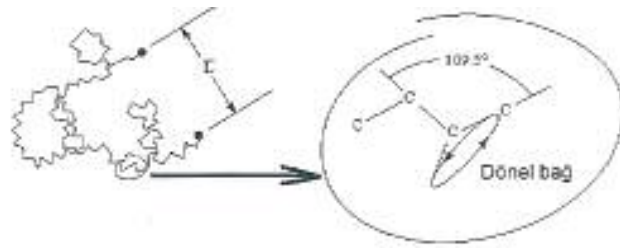
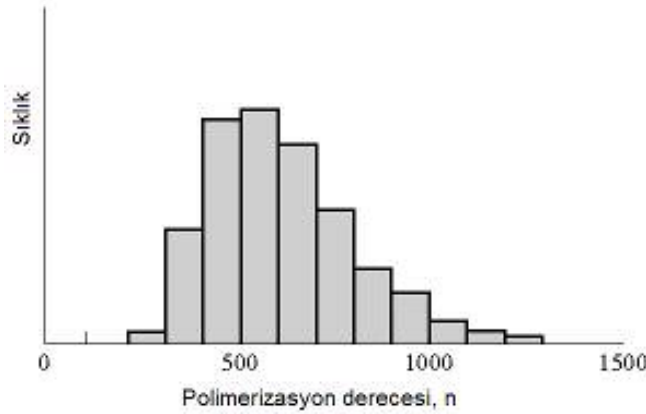
9.3. Polimerlerin Yapısal Özellikleri

Polimerizasyon derecesi, n:

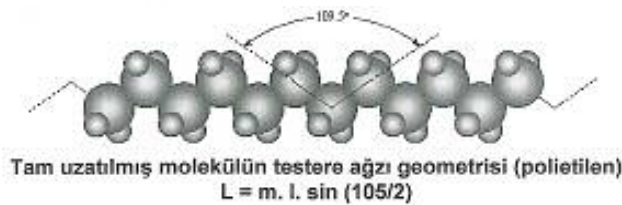


Polimerizasyon derecesi, zincirdeki –mer sayısı n ile ifade edilir. Molekül ağırlığı veya uzunluğu ile de verilebilir. Polimerizasyon derecesi molekül türüne ve

polimerizasyon şekline bağlıdır. Polimerizasyon derecesi ne kadar büyük olursa zincirler o kadar zor hareket eder ve malzemenin yüksek sıcaklık dayanımı ile rijitliği artar. Polimerizasyon derecesi dolaylı olarak vizkozite veya ışık saçılması ile de ölçülebilir. Bir polimerde molekül uzunluklarının dağılımı aşağıdaki şekildedir.



Kıvrık moleküllerin ortalama uzunluğu yaklaşık olarak:
 $L = l \cdot \sqrt{m}$
 m: bağ sayısı
 l : tek bir bağın uzunluğu

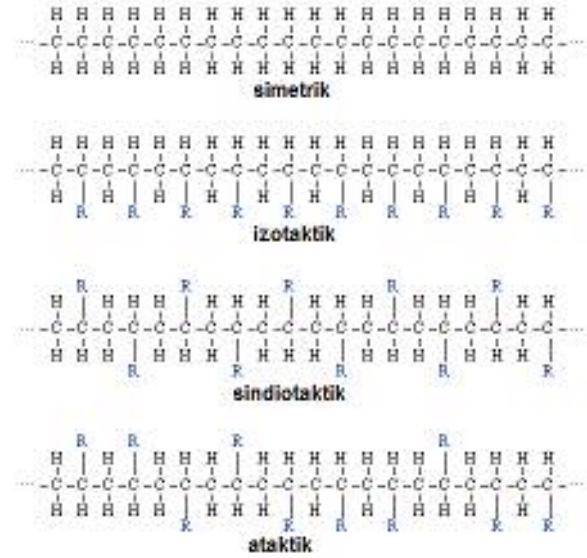


Polimerizasyon derecesinin etkileri:

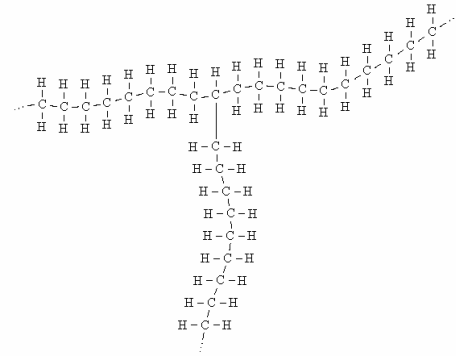
- Polimerizasyon arttıkça rijitlik ve akma dayanımı artar
- Molekül yapısı karmaşıklaştıkça yüksek sıcaklık dayanımı ve erime noktası yükselir
- Molekül yapısı karmaşıklaştıkça kristalleşme oranı düşer.
- Molekül zincirleri arası zayıf vanderWaals bağları çapraz bağlar ile güçlendirilebilir.

Molekül zincirlerinin değişik yapıları:

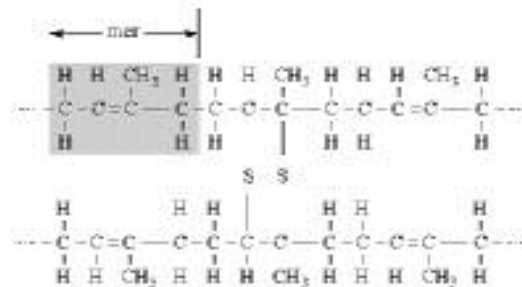
Değişik Atom Düzenleri:



Dallanma: Ana zincir dallanır. Dallanma sonucu moleküllerin birbirine kenetlenir ve hareketleri zorlaşır (yüksek dayanım ve rijitlik)

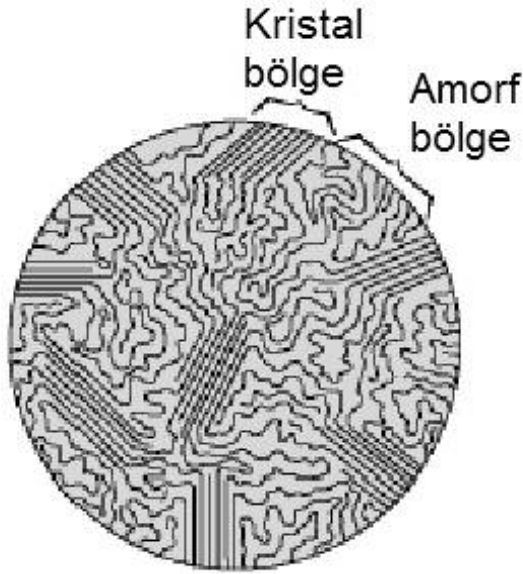


Çapraz Bağlanma: Komşu zincirler çapraz bağ görevi yapan bir molekül veya atom yardımıyla bağlanır. Böylece zincirlerin kayma hareketleri önlenir. Çapraz bağlanmanın olması için zincirde polimerizasyon sonunda doymamış C atomlarının bulunması gerekir ve bağlama bu noktalarda gerçekleşir.



Çapraz bağlı (vulkanize) lastik

Polimerlerde Kristalleşme:



Polimer molekülleri kısmen kristal düzene sahip olabilir. Ancak malzemenin %100 kristalleşmesi mümkün değildir, kristalleşmiş bölgeler amorf yapı içinde dağılır.

Polimer Katkıları

Polimerlerin görünüşlerini, imalat özelliklerini ve kullanım alanlarını genişletmek için değişik katkıları kullanılır.

Yumuşatıcı: Düşük molekül ağırlıklı bir polimer ile karıştırılır.

Dolgu: Zincir hareketliliğini kısıtlayarak dayanımı artırır. Boyut kararlılığı ve ekonomiklik sağlar.

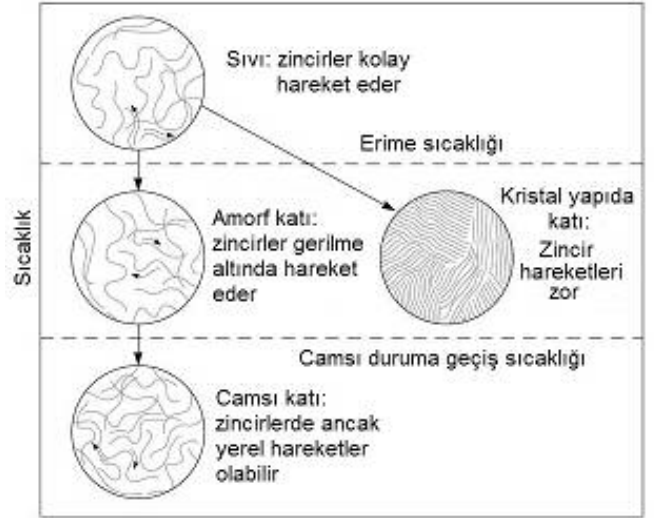
Takviyeler: Polyesterin cam lifler ile takviye edilmesi gibi.....

Stabilizatör: Zamanla özelliklerin olumsuz yönde değişmesini (oksidasyon, ısı, ultraviyole vs etkilerle) önler

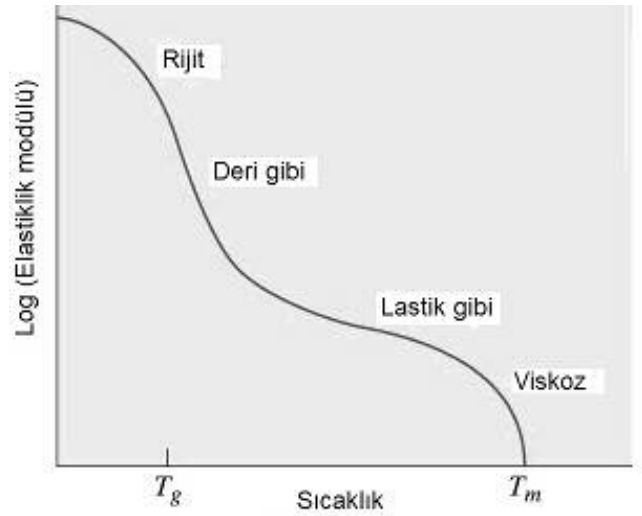
Ayrıca alev geciktirici ve renklendiricilerden yararlanılır.

9.4. Termoplastik Polimerlerin Mekanik Davranışı

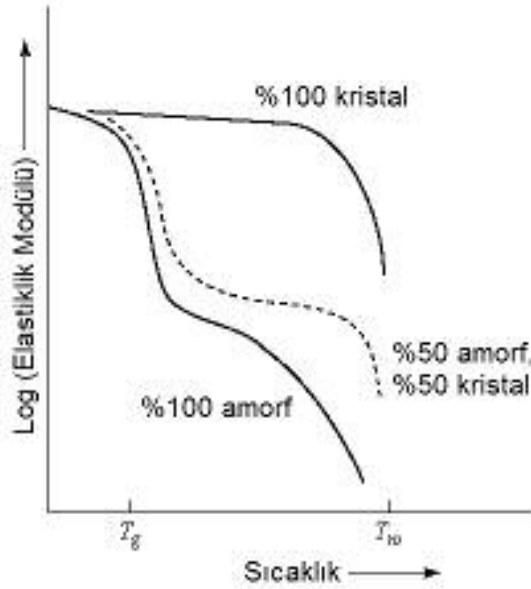
Sıcaklığın yapı ve özelliklere etkisi



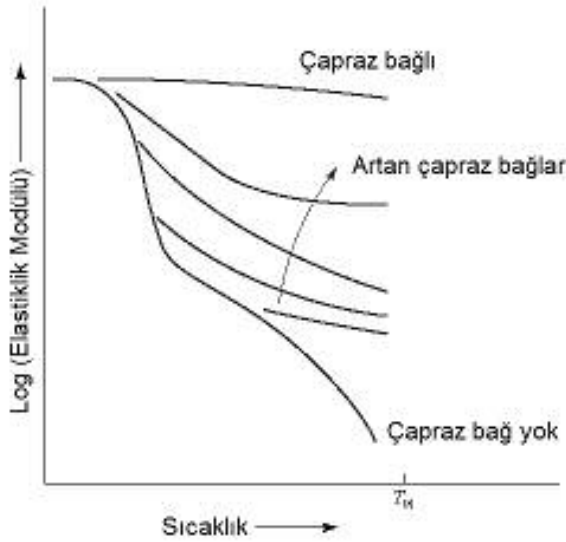
Vizkoelastik Şekil Değişimi



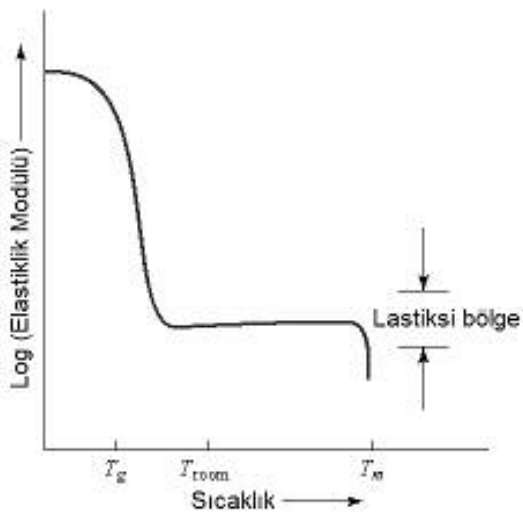
Bir termoplastikte (%50 kristalleşmiş) elastiklik modülünün sıcaklıkla değişimi (T_g geçiş sıcaklığı, T_m erime sıcaklığı)



Termoplastiklerde kristalleşme ile mekanik davranışlarının değişimi

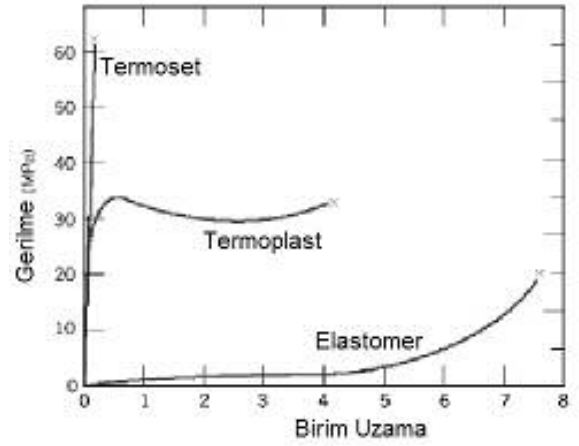


Artan çapraz bağların rijitliğe etkisi



Elastomerlerde lastiksi bölge geniştir

Polimerlerde Çekme Eğrisi

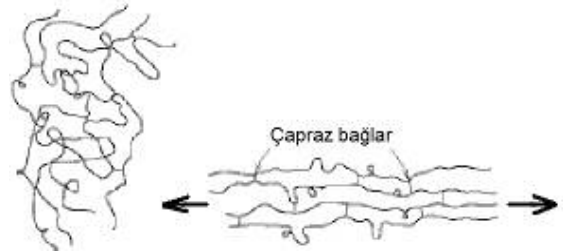


Termosetlerde çapraz bağlar bulunduğu için zincirler üç boyutlu bir rijit bir ağ oluşturur; zincirler hareket edemez ve süneklik çok düşüktür. Malzemenin rijitliği ve dayanımı yüksektir.

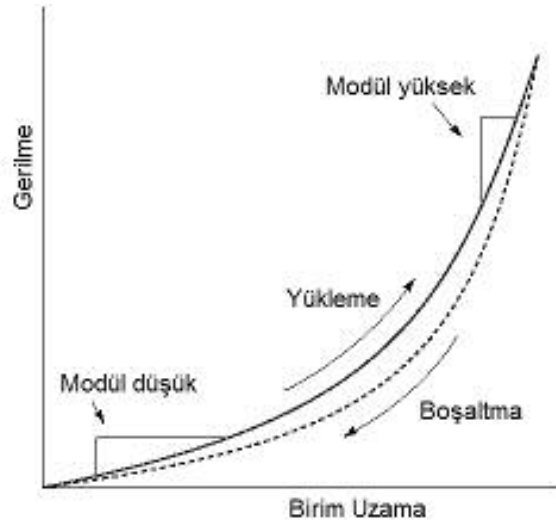
Termoplastiklerde ise akma sınırına kadar elastik şekil değişimi görülür, bu noktadan sonra molekül zincirlerinin birbiri üzerinde kayması ile plastik şekil değişimi başlar. Zincirler birbiri üzerinde kayar ve polimer zincirleri çekme doğrultusunda düzenlenirler.

Elastomerler kuvvet etkimesi ile açılırlar ve az sayıda çapraz bağ eski konumlarının kaybolmasını önler, ve zorlamanın kaldırılmasıyla eski boylarına geri dönerler.

Elastomerlerin Şekil Değişimi



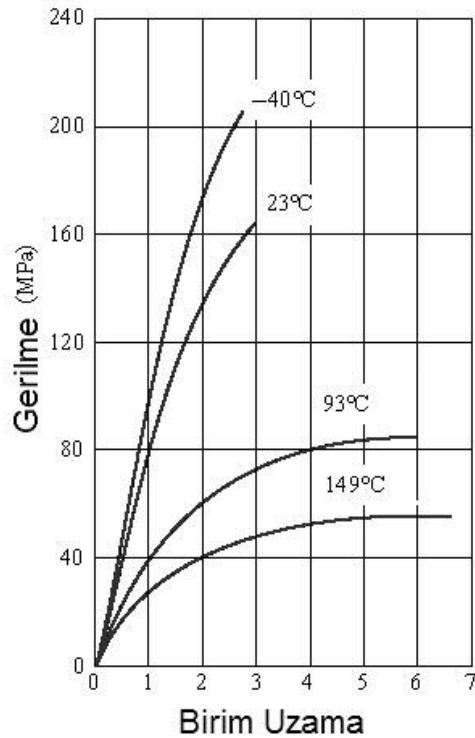
Elastomerler kopma oluşmadan %1000'e kadar uzama kapasitesine sahiptirler. Şekilde görüldüğü gibi çekme gerilmeleri altında molekül zincirleri açılmaktadır ve gerilme kalktığında çapraz bağlar sayesinde eski konumlarına dönmektedirler.



Bir elastomerin gerilme-birim uzama eğrisi (doğrusal olmayan elastiklik)

Elastomerlerde zincir moleküller açıldıkça ve çekme doğrultusunda düzenlendikçe, zincirlerin daha fazla açılmaya devam etmesi güçleşir ve malzemenin rijitliği (elastiklik modülü) artar. Yani malzeme doğrusal olmayan (Hooke kanununa uymayan) bir elastik davranışa sahiptir.

Sıcaklığın Etkisi:



Bir mühendislik termoplastiğinin değişik sıcaklıklar için gerilme-birim uzama eğrilerinden görüldüğü gibi, sıcaklık

arttıkça van der Waals bağları zayıflamakta ve

- Elastiklik modülü düşmekte,
- Çekme dayanımı düşmekte,
- Süneklik artmaktadır.

Yaygın Kullanılan Polimerlere Örnekler

POLİMER	MER	BAZI KULLANIM YERİ
Termoplastikler		
Polietilen (PE)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Ambalaj filmleri, hortum, ev eşyaları, şişeler
Polivinilklorür (PVC)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{Cl} \end{array}$	Boru, yer kaplamaları
Polipropilen (PP)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{CH}_3 \end{array}$	Boru, levha
Polistiren (PS)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	Ambalaj ve yalıtım köpükleri
Naylon	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \quad \\ -\text{N}-\text{C}-\text{N}-\text{C}-\text{N}-\text{C}-\text{N}-\text{C}- \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Elyaf, halat, makina parçaları
Polietilentereftalat (PET)	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \quad \\ -\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{O}-\text{C}- \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{O} \end{array}$	Makina parçaları, pervaneler
Polikarbonat	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \quad \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \quad \\ -\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{O}-\text{C}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}-\text{O}-\text{C}- \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \quad \text{O} \end{array}$	Elyaf, fotoğraf filmleri, içecek kapları
Termosetler		
Fenolformaldehid (Bakalit)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{C}_6\text{H}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	Elektrik donanımları
Polyester	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \\ -\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}- \\ \quad \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{O} \end{array}$	Cam Takviyeli Kompozitler, Kaplamalar
Epoksi	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \quad \\ -\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}- \\ \quad \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \quad \text{O} \quad \text{H} \end{array}$	Yapıştırıcı, Kompozit matrisi, Elektrik donanımları
Elastomerler		
İzopren (lastik)	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \quad \quad \\ -\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{C}- \\ \quad \quad \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \quad \text{H} \end{array}$	Oto lastikleri, conta

Bazı Polimerlerin Mekanik Özellikleri

Polimer	E (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama
Polietilen (PE)			
Yüksek yoğun.	830	28	15 - 100
Düşük yoğun.	170	14	90 - 800
Polivinilklorür (PVC)	2800	41	2 - 30
Polipropilen (PP)	1400	34	10 - 700
Polistiren (PS)	3100	48	1 - 2
Poliamid (Naylon66)	2800	83	60
Polikarbonat	2400	62	110
Polyester	6900	25	-
Epoksi	6900	69	-

10. Seramik ve Camlar

Seramikler, bir veya birden fazla metalin, metal olmayan elementler ile birleşmesi ile oluşan inorganik malzemelerdir. Kullanımı çok eski olan ve ortam etkilerine en dayanıklı malzeme grubudur. Günümüzde seramikler, çömlek, tuğla ve porselenleri içeren klasik seramik tanımına göre daha geniş bir malzeme grubunu içermekte ve özelliklerinin geliştirilmesi için en araştırmacıların çok yoğun çalıştığı bir malzeme grubunu oluşturmaktadır.

Seramiklerin karakteristik özellikleri:

- Genellikle bir metal ile ametalin bileşimidir; bağlar tamamen iyoniktir veya iyonik ile kovalent kombinasyonu karakterindedir.
- Dislokasyon gibi her hangi bir kalıcı şekil değiştirme mekanizması olmadığı için sert ve çok gevrek.
- Genellikle elektrik ve ısı yalıtıcıdır
- Saydam, yarı-saydam veya opak olabilirler

Camlar ise genellikle silikat esaslı amorf malzemelerdir ve seramiklerin alt grubu olarak ele alınırlar.

Bu bölümde incelenecek malzemeler şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Seramikler (kristal yapılı)
- Camlar
- Cam seramikler

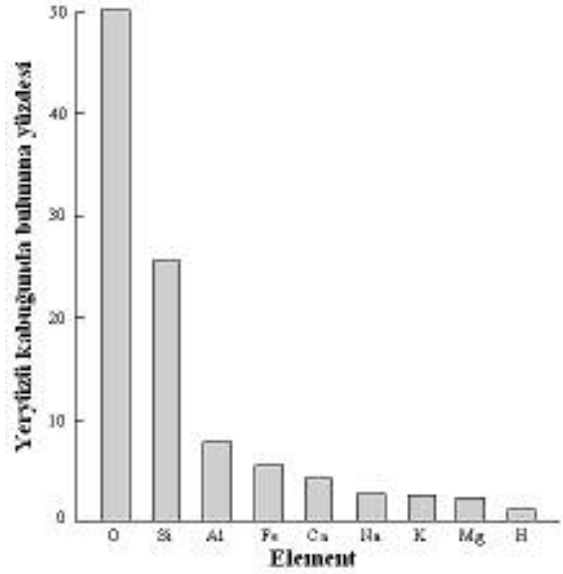
10.1 Seramikler

Seramiklerde kendi aralarında üç ayrı grup altında ele alınırlar.

- Silikatlar
- Silikat olmayan oksit seramikler
- Oksit olmayan seramikler

Silikatlar:

Doğada bol miktarda bulunan silikatlar, seramik malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılır. Beton, tuğla, kiremit, cam ve porselen gibi yapı malzemelerinin temel bileşenleri silikatlardır.



Yer kabuğunda bulunan elementler

Silikat Esaslı Bazı Seramiklerin Bileşimleri

Seramik	Bileşim (ağ. %)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Diğer
Silika refrakter	96					4
Ateş tuğlası	50-70	45-25				5
Elektrik porseleni	61	32	6			1
Portland çimentosu	25	9			64	2

Silikat olmayan oksit seramikler:

Silikat seramiklerden daha pahalıdır; nükleer yakıt (uranyum oksit), elektronik ve manyetik seramikler olarak değişik uygulama alanları vardır.

Oksit olmayan seramikler:

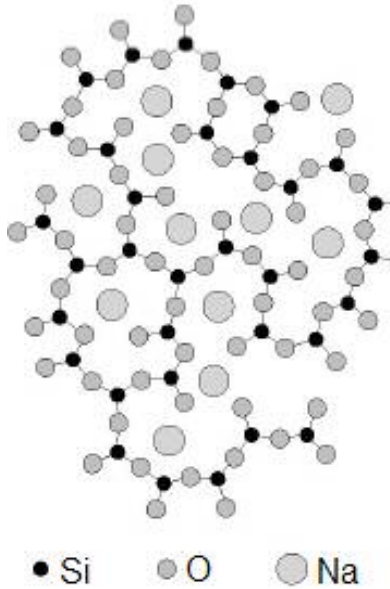
Silisyum karbür (ısıtma elemanı, aşındırıcı), silisyum nitrür (kesme takımı) bu gruba giren malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

10.2 Camlar - Amorf Malzemeler

Camlar da genellikle silikat esaslıdır ve silikat ağı içine uyumlu diğer oksitlerin de katılması ile elde edilir. Camlar amorf malzemelerdir ve belirli bir sıcaklığının altında rijit katı gibi davranırlar; bu halde aşırı soğutulmuş sıvı olarak düşünülebilirler.

Silikat esaslı camlar, Si ve O elementlerinin yerkabuğunda çokça

bulunması dolayısıyla maliyet açısından avantajlıdır. Ağ oluşturan silikat içine eklenen diğer katyonlar, tetrahedral ağı kesintiye uğratarlar ise malzemenin erime sıcaklığı düşer; böylece cama biçim vermek kolaylaşır (Na_2O gibi). Bazı oksitler ise (TiO_2 , Al_2O_3) silikanın yerine geçer ve ağır bir parçası olurlar.



Cam Bileşimindeki Değişik Oksitler

Ağ yapıcılar	Ağa katılanlar	Ağı kesintiye uğratanlar
SiO_2	Al_2O_3	Na_2O
B_2O_3	TiO_2	K_2O
GeO_2	ZrO_2	CaO
P_2O_5		MgO
		BaO
		PbO
		ZnO

BAZI SİLİKAT ESASLI CAMLARIN BİLEŞİMLERİ

Cam Türü	Bileşim (wt %)									
	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	K_2O	ZnO	PbO	Diğer
Vitray silika	100									—
Bor Camı	76	13	4	5	1					1
Pencere	72		1	14	8	4				1
Cam Kağıt	73		2	14	10					1
Cam elvaf	54	8	15		20					1
Emaye	34	3	4				17		42	—

Yaygın kullanılan camlar:

Vitray silika: %100 e yakın SiO_2 içerir. 1000°C 'ye kadar dayanabilir. Örnek: Fırın ve Pota camları.

Bor Camı: Cam biçimlendirici olarak SiO_2 den başka Bor içeren oksit B_2O_3 bulunur. Laboratuvar ve mutfak eşyası

Pencere Camı: %30 katkı içerir

Emaye: Metalleri korozyondan korumak amacıyla kullanılırlar. (DERS KİTABI)

Silikat esaslı olmayan camlar reaktif olduklarından ticari önemleri daha azdır. Genellikle silikat camlara katkı olarak kullanılırlar. Bazıları ise elektronik ve optik uygulamalarda kullanılırlar.

BAZI SİLİKAT OLMAYAN CAMLAR

B_2O_3	As_2Se_3	BeF_2
GeO_2	GeS_2	ZrF_4
P_2O_5		

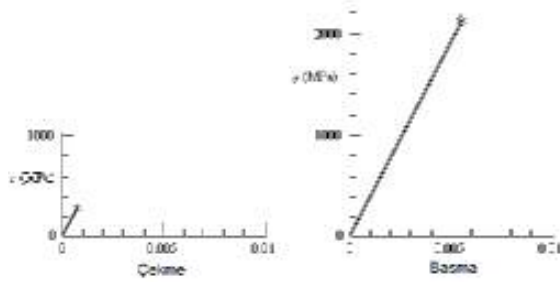
10.3 Cam - Seramikler

Cam olarak biçimlendirilip, daha sonra kristalleştirilerek seramik malzemeye dönüştürülürler. Böylece hem camın kolay biçimlendirilebilme özelliğinden, hem de seramiğin üstün kullanım özelliklerinden yararlanılır.

Isıl şoka dayanıklı, genleşme katsayısı düşük hatta negatif olan ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ gibi) gibi türleri vardır.

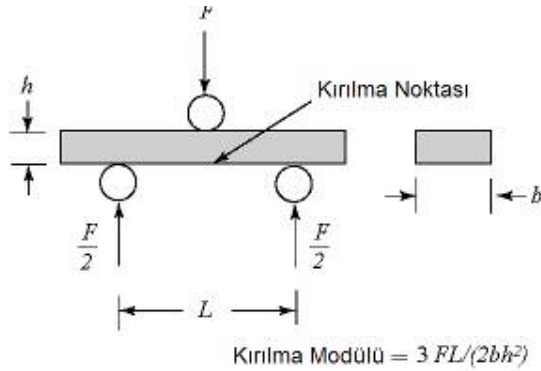
10.4 Mekanik Özellikler

Seramik ve camlar gevrek malzemelerdir. Bu malzemelerde çatlak genellikle mevcut süreksizliklerden ve çekme gerilmelerinin etkisi ile başlar. Dolayısıyla bu gruba giren malzemelerin basma dayanımları, çekme dayanımlarının yaklaşık 10 katıdır. Bu nedenle mühendislik tasarımlarda seramik ve camlar, genellikle basma zorlamaları altında kullanılırlar.



Çekme ve Basma Gerilmeleri Altında Gevrek Kırılma

Seramik benzeri gevrek malzemelerde çekme deneyi yapmak güç olduğundan, mekanik özellikleri saptamak için **üç noktadan eğme deneyi** yapılır.



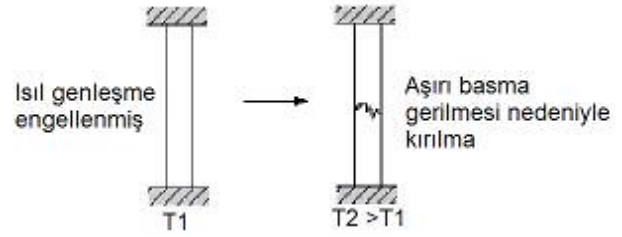
10.5 Isıl Şok

Seramiklerin yüksek sıcaklık kararlılıkları ve ısı yalıtımlıkları yüksektir. Bu nedenle yüksek işletme sıcaklığında çalışan uygulamalarda: örneğin fırın ve ocaklarda, uzay mekiğinin atmosfere girişte sürtünme nedeniyle aşırı ısınan dış kaplaması gibi yerlerde kullanılırlar.

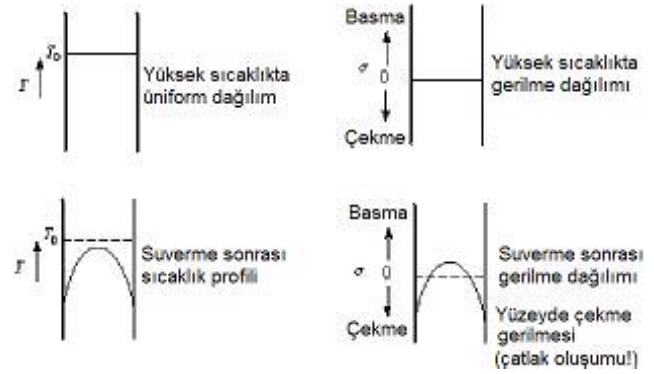
Öte yandan çok gevrek olan bu malzemelerin ısı iletimleri düşük, ısı genleşmeleri yüksek olduğundan,

- Isıl genleşmenin engellendiği durumlarda ve
- hızlı soğuma sırasında oluşabilecek sıcaklık farklılıkları nedeniyle

yüksek gerilmeler ortaya çıkar ve ısı şok hasarı meydana gelir.



Isıl Genleşmenin Sınırlanması Nedeniyle Oluşan Isıl Şok



Isıl Yayınmanın Sınırlı Olması Nedeniyle Oluşan Isıl Şok

10.6 Camların Viskoz Şekil Değişimi

Kristal yapıya sahip seramiklerde dislokasyon hareketleri veya viskoz akış gibi mekanizmalar söz konusu olmadığından, biçimlendirilebilmeleri çok güçtür. Ancak camlar amorfudur ve **viskoz akış mekanizması** şekil değişimini kolaylaştırır.

Amorf camlar düşük sıcaklıklarda aşırı soğumuş sıvılar olarak düşünülebilirler. Geçiş sıcaklığının (Tg) altında rijit ve gevrek bir katı gibi davranırlar; geçiş sıcaklığının üstünde ise yumuşak viskoz bir malzemeye dönüşen cama kolaylıkla şekil verilebilir. Erime sıcaklığının üstünde ise cam, artık bir sıvıdır.

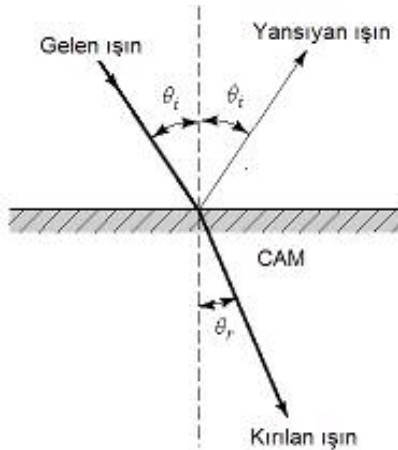
Soğumanın bu ilk evrelerinde hala yumuşak olan iç kısımda etkiyen basma gerilmeleri sonucu viskoz akış mekanizması ile şekil değişimi (kısalma) gerçekleşir ve iki bölge arasındaki dış kısmın önceden büzülmesinden kaynaklanan boy farkları dengelenir.

Soğuma devam ettiğinde bu kez soğuyan iç bölgeler büzülmeye çalışır, ancak bu oda sıcaklığına önceden soğumuş ve katı durumda bulunan dış yüzey buna engel olmaya çalışır. Yani dış kısım iç kısmın büzülmesini engellemek (onu eski boyunda tutmak) için iç kısma çekme gerilmeleri uygular; iç kısım ise büzülmeye çalışırken dış kısmında kendisiyle birlikte boyunun kısılmasını sağlamak için dış kısma basma gerilmeleri uygular. Sonuçta dış yüzeyde basma, iç yüzeyde ise çekme iç gerilmeleri oluşur.

Gevrek malzemelerde çatlak oluşumu için çekme gerilmeleri daha etkin olduğundan, yüzeyinde basma iç gerilmeleri bulunan bu malzeme kırılmaya karşı daha az duyarlıdır (Temperlenmiş Cam).

10.7. Optik Özellikler

Bazı malzemelerde optik özellikler (ışığı yansıtma, kırma, yutma, geçirme gibi özellikler) mekanik özelliklerden daha önemlidir. Örneğin birçok optik uygulamada (pencere camları, mercekler gibi) kullanılan camlar, bu gruba giren malzemelerdendir.



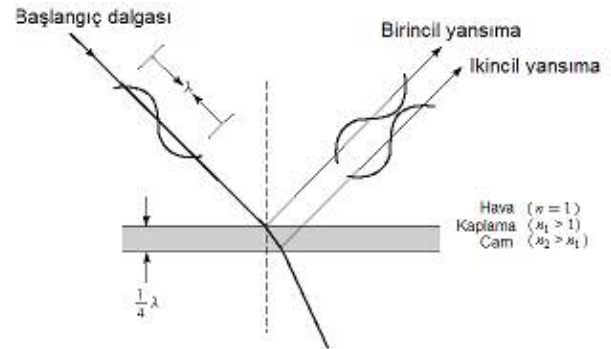
Kırılma ve Yansım

Işık, bir ortamdan diğerine geçerken kırılmaya ve yansımaya uğrar. Işığın düştüğü düzlemin normali ile gelen ve yansıyan ışığın yaptığı açılar eşittir; ancak kırılmayla oluşan açı gelme açısından kırılma indisine bağlı olarak büyük veya küçük olabilir. Kırılma indisi n , malzemeye özgü bir özelliktir; kırılma indisi büyük olan malzeme, ışığı normale yaklaştırarak kırar.

Her malzemenin kırılma indisi

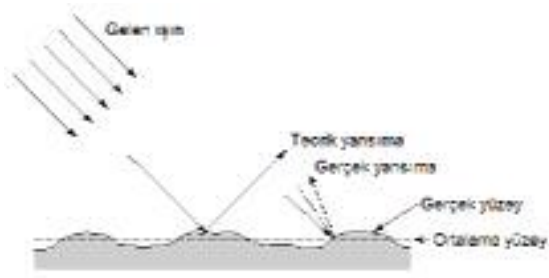
$$n = v_{\text{vakum}}/v_{\text{faz}} = \sin\theta_i/\sin\theta_r$$

şeklinde tanımlanır. Kırılma indisi n -değeri büyük olan malzemeler iyi yansıtıcıdır. Örneğin cam emaye kaplamalarda yansıtıcılık istenen bir özelliktir, lenslerde ise ışık kaybından dolayı istenmeyen bir özelliktir.



Yansımayı azaltmak için yüzey kaplaması kullanımı

Yansımayı azaltan yüzey kaplamaları: Mikroskop merceklerinde ve gözlük camlarında uygulanır. Örneğin $1/4 \lambda$ kalınlığında bir kaplama yansımayı azaltır. Kaplama malzemesinin kırılma indisi, fazların indislerinin arasındadır, kaplamanın üst ve alt yüzeyinden yansıyan birincil ve ikincil yansımaların girişimi sonucu yansımaya yok edilmiş olur. Sonuçta yansımaya azalır, ancak kırılıp geçen ışığın güçlendiği söylenemez.



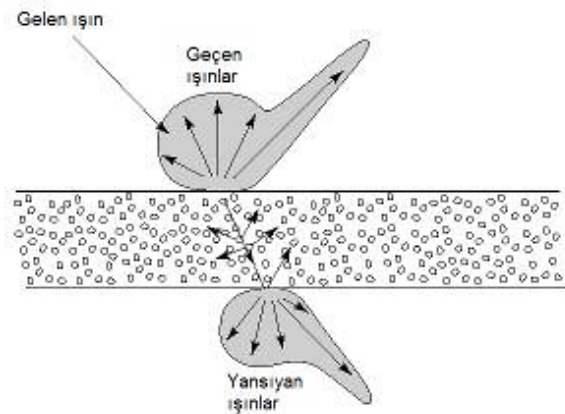
Yüzey pürüzlülüğünün yansımaya etkisi

Yüzey pürüzünün yansımaya etkisi:

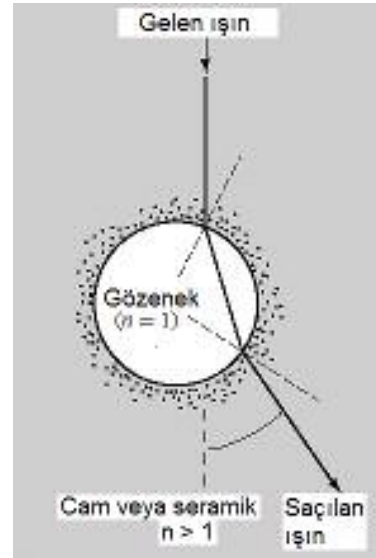
Ortalama yüzey ile gerçek yüzeyin paralel olmaması pürüzlülük oluşturur. Ortalama yüzey dışındaki gerçek yansımalar sonucu oluşan dağınık yansıma, yüzey pürüzlülüğü ile artar.

Saydamlık, Yarısaydamlık ve Opaklık:

Malzemeler ışık geçirgenliklerine göre saydam, yarısaydam ve saydam olmayan şeklinde sınıflandırılabilir. Camlarda opaklık, saçılma mekanizmasıyla açıklanabilir. Yapı içindeki gözenek veya taneciklerden dolayı ışığın saçılması gerçekleşir. Bunların boyutunun görülebilir ışık dalga boyundan çok küçük olması durumunda saçılmayı etkilemezler. Dalga boyuna yakın tanecikler veya gözenekler saçılmayı maksimuma yaklaştırır. Saydamlığı önleyen gözenekler ve tanecikler saçılma merkezleri olarak da adlandırılırlar.



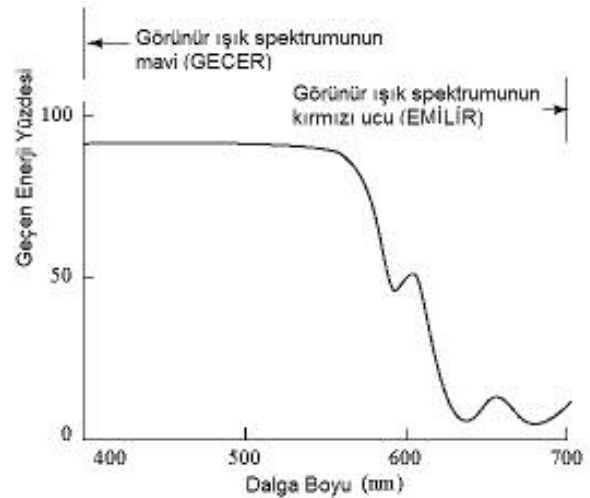
Yarısaydam bir cam levhadan ışığın yansımaları ve geçişi



Bir gözenekte ışığın saçılması

Renk oluşumu:

Bu durum belirli dalga boylarının malzeme tarafından emilmesi ile ilgilidir. Yansıyan veya geçen farklı ışınların değişik dalga boydaki "karışımları" gözümüz tarafından algılanarak renk oluşur. Beyaz ışık görünür spektrumdaki tüm dalga boylarındaki ışınların karışımıdır. Ancak kırmızı dalga boyunun çok emilmesi bir durum ortaya çıkarsa, mavi ışık ön plana çıkar ve maviye yakın bir renk algılanması olur. Cama uygun iyonlar katılarak, belirli dalga boylarının emilmesi ve malzemede renk ayarlaması yapılması mümkündür.



%1 kobalt içeren camın emme eğrisi

11. Kompozitler

Bilindiği gibi mühendislik malzemeleri genellikle metaller, seramikler ve polimerler olmak üzere üç ana grupta ele alınmaktadır. Bu gruplara ait malzemelerin en karakteristik özellikleri birbirinden çok farklıdır. Yoğunluk, dayanım, tokluk, ısı kararlılık gibi özellikler, malzemenin kullanım özellikleri; biçimlendirme, birleştirme gibi özellikleri ise imalat özellikleridir. Bazı malzemelerin imalat özellikleri, bazılarının ise kullanım özellikleri iyidir. Örneğin; metallerin toklukları iyi, seramiklerin ise oldukça kötüdür. Polimerlerin biçimlendirilmesi sünek olduklarından dolayı kolay iken, dayanımlarının düşük olması dezavantaj oluşturur. Seramiklerin ısı kararlılıkları iyidir, fakat biçimlendirme, birleştirme gibi imalat özellikleri genelde kötüdür. Tüm özellikler dikkate alındığında, metallerin özellikleri en uygundur, dolayısıyla (yanlış yapma ihtimali en az olduğu için) mühendisler uzun yıllar malzeme seçiminde genellikle metalleri tercih etmişlerdir.

Bu üç gruba ek olarak birden çok malzemenin birleştirilmesiyle oluşturulan **kompozitler** dördüncü malzeme grubu olarak değerlendirilmektedir. İki veya daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzemede toplamak, veya yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile geliştirilmiş malzemeler, kompozit (karma malzeme) olarak adlandırılır (örneğin cam takviyeli plastik, beton, ahşap vb.).

Kompozitlerde Geliştirilen Özelliklere Bazı Örnekler:

- **Rijitlik,Dayanım:** Polimer matrise elyaf takviye ile dayanım ve rijitlik artırılır.
- **Kırılma tokluğu:** Kerpiç, balık içine saman lifleri katılarak yapılan ve asırlardır kullanılan bir yapı malzemesi türüdür. Saman katılarak kerpiğin

tokluğu, yani parçalanması için gereken enerjiyi artırılır.

- **Elektrik iletkenliği:** Enerji nakil hatlarında elektrik tellerinin dayanımlarının yüksek, iletkenliğinin de iyi olması gerekir. Bunun için dışı bakır (alternatif akım yüzeyden iletilir), içi ise dayanımı yüksek çelikten meydana gelen teller üretilir.
- **Aşınma dayanımı:** Aşınma dayanımını artırmak amacıyla; malzeme yüzeyleri sert (aşınmayan) bir malzemeyle kaplanır.
- **Korozyona dayanım:** Malzeme yüzeyine ortam etkilerine daha dayanıklı bit tabaka kaplanır. Çökelme sertleşmesi uygulanmış alüminyum alaşımlarının (örneğin Al-Cu) korozyon dayanımı düşük olduğu için, yüzeylerine saf alüminyum (100-200 mikron kalınlığında) giydirilir.

11.1. Kompozit Türleri

Kompozitler matris malzemesine göre

- Plastik Matrisli,
- Metal Matrisli ve
- Seramik Matrisli olarak sınıflanır.

Matris; takviyeyi taşıyan esas malzemedir.

Kompozitlerde matrisin görevi şunlardır:

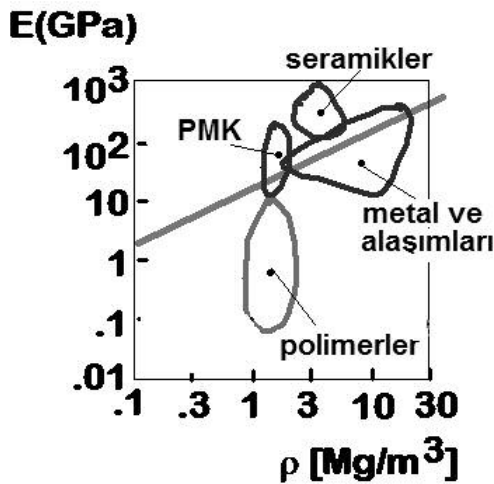
- dış zorlamaları takviye malzemelerine aktarır,
- onları darbelerden ve ortam etkisinden korur,
- bazı durumlarda malzemenin tokluğunu artırır (örneğin, matrisin metal olması tokluk sağlar).

Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer Matrisli Kompozitlerde polimer matrise takviye tapılarak rijitlik ve dayanım kazandırılır. Genel olarak matris olarak termosetler seçilir. Termoset sıvı halde kullanılarak, takviye yapılır ve matris içerisinde çapraz bağları oluşturacak sertleştirici katılır. Yani, üretimi kolaydır.

Bazı plastik matris malzemeleri

TERMOSETLER	
Polyester	Genel amaçlı yapılar (genellikle dokuma elyaf takviyeli)
Epoksi	Yüksek dayanım
Fenolik	Yüksek sıcaklık uygulamaları
TERMOPLASTİKLER	
Naylon66	Termoplastiklerin kullanımı yaygın değildir, ancak yüksek tokluğun gerektiği durumlarda tercih edilir
Polikarbonat	
Polistiren	



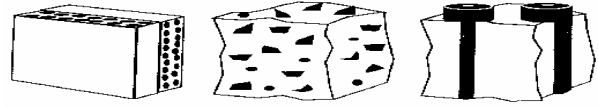
Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisler dayanımı daha yüksek malzemelerdir, toklukları ve kullanım sıcaklıkları daha yüksektir. Ancak erime sıcaklıkları yüksek olduğundan, üretimleri daha güçtür. Bu nedenle takviye olarak her malzeme kullanılamaz.

Seramik Matrisli Kompozitler

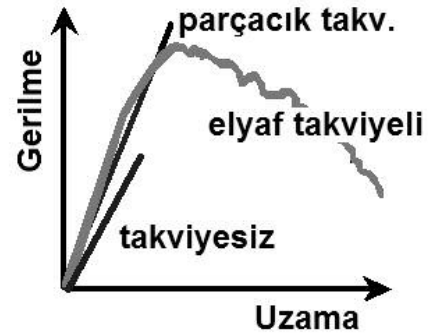
Çok yüksek sıcaklıklar için uygundur, dayanımları yüksektir ancak gevrek malzemelerdir. Seramiklerde genellikle elyaf takviye katılarak tokluk artırılmaya çalışılır (kerpiç örneği).

Kompozitler takviye türüne göre de sınıflandırılır:

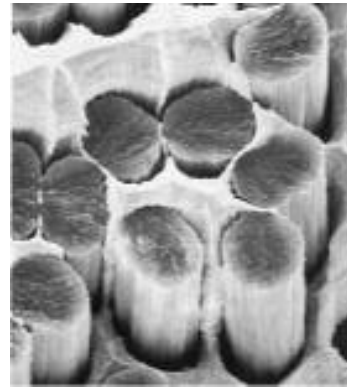


Takviye, matrisin özellikle mekanik özelliklerini geliştirir.

- Elyaf Takviyeli Kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler

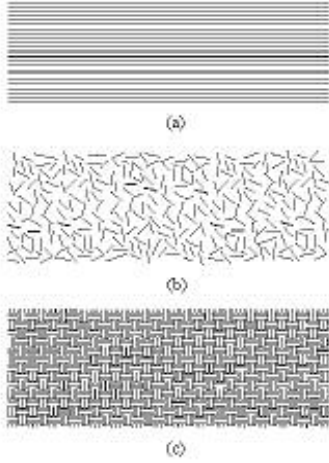


Elyaf Takviyeli Kompozitler (ETK)

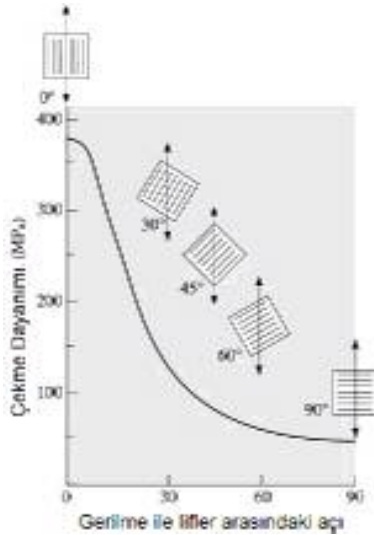


Bu tür kompozitlerde, matristen dayanım bakımından önemli bir beklenti yoktur. Matris lifleri yerinde tutar, ortam etkilerinden korur ve kuvvetleri liflere iletir; kuvvet ise tümüyle elyaf tarafından taşınır. Dayanımı ve rijitliği yüksek olan elyaf lifleri takviye olarak kullanılır. Kuvvet tümüyle elyaf tarafından taşınır. Sürekli veya süreksiz elyaf ile takviye yapılabilir.

Bu malzemelere örnek olarak cam takviyeli plastikler (fiberglas) gösterilebilir.



Takviye olarak kullanılan elyaf biçimleri
 (a) sürekli elyaf (Bu tip bir takviyede, liflere paralel doğrultuda dayanım yüksek olur. Yani, özellikler kuvvetin yönüne bağlıdır (anizotropik).
 (b) kırılmış elyaf (örn. Keçe)
 (c) dokuma (örn. Kevlar)



Elyafın yönlendirilerek kullanılması halinde özellikler yöne bağımlı (anizotropik) olur.

Bazı Elyaf Türleri ve Özellikleri:

Elyaf	Yoğunluk, g/cm ³	Çekme Dayanımı, MPa	Elastiklik Modülü, GPa
Cam	2,54	3500	75
Karbon	1,85	2000-3000	520-220
Kevlar	1,44	2700	130
Bor	2,68	3500	415

Cam, karbon, kevlar ve bor elyaf çeşitlerine bazı örneklerdir. İstenilen kompozitin özelliklerine göre uygun bir elyaf seçilerek kompozit oluşturulur.

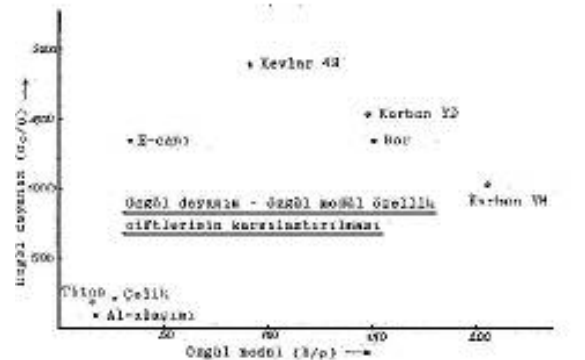
Cam liflerin dayanımları yüksektir, ancak elastiklik modülü ancak Al kadardır.

Karbon, kristal ya da amorf yapı içinde bulunabilir. Kristal şeklinde bulunması yüksek rijitlik sağlarken, amorf yapıya dahip iken dayanımı yükseltir.

Kevlar, yoğunluğu çok düşük, daha az rijit, fakat karbona göre daha ucuz bir takviye malzemesidir. İmalat özellikleri iyi olduğundan, sıkça kullanılır.

Bor; rijitliği yüksek bir takviye türü olup, metal matrise uygun bir malzemedir. (Örneğin; alüminyum matrisli bir kompozit yapılacaksa, yüksek sıcaklıklarda alüminyum eritip içine takviyeyi koymak lazımdır. Bu nedenle matris için yüksek sıcaklıklara dayanabilecek bir malzeme uygun olur. Bu tür kullanımlar için bor uygundur, ancak diğer elyaf çeşitlerine göre çok daha pahalıdır.

Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Bazı Malzemeler ile Karşılaştırılması

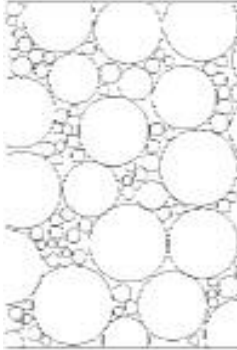


MALZEME	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Day. (Mpa)	Elast. Mod. (Gpa)	Özgül Çekme Day. (Mpa)	Özgül Elast. Mod. (Gpa)
Alaşımsız çelik	7,9	400	203	58	26
Aluminyum	2,8	84	71	30	25
Al alaşımı 2024	2,8	247	69	88	25
SiC(parç.)- Al KM	2,8	500	90	179	32
Ahşap (kayın)	0,7	110	13	157	1
Kemik	1,8	38	26	75	14
Plastik Malzeme	1,2	60	3	50	2,5
Karbon-Epoksi KM	1,5	1650	140	110	93
Kevlar-Epoksi KM	1,4	1400	77	1000	55
Cam-Epoksi KM	1,8	1150	42	639	23

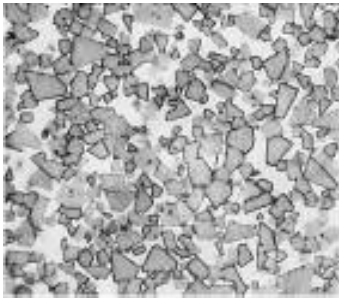
Parçacık Takviyeli Kompozitler

a. İri Parçacık Takviyeli:

Yükü matris ve elyaf birlikte taşırlar .
Özellikler izotropik malzemelerdir.
Örnekler:



Beton: çakıl + kum + çimento. İri ve küçük parçacıkların belirli bir hacmi doldurması

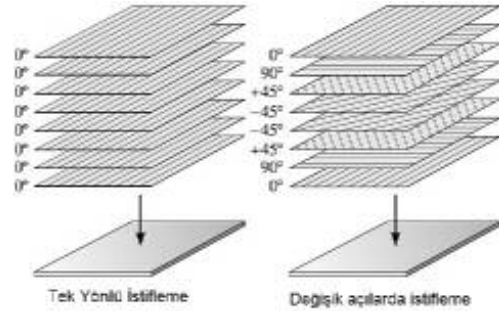


Sermet: WC/Co, Sert wolfram karbür parçacıklarının, tokluğu yüksek kobalt matris içinde bulunduğu kesici uçlar.

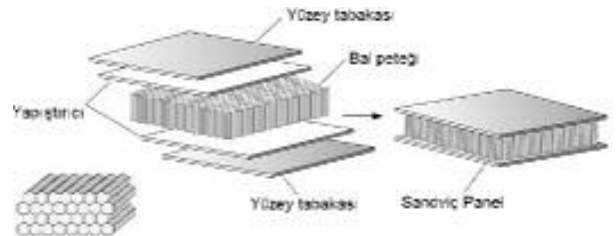
b. Küçük Parçacık Takviyeli:

Genellikle metal matrisli malzemelerde kullanılır. Kuvvetler matris tarafından taşınır. Parçacıklar dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanımı artırır. Özellikler izotropiktir.

Tabakalı Kompozitler



İstifleme geometrisi özellikleri belirler.



Sandviç Paneller: İki yüzey tabakası arasına bal peteği şeklinde bir tabakanın birleştirilmesi ile meydana gelir. Bu tür kompozitler basmaya ve eğmeye dayanıklıdır, ayrıca hafif olması da bir avantajdır.

11.2. Elyaf Takviyeli Kompozitlerin (ETK) Mekanik Özellikleri:

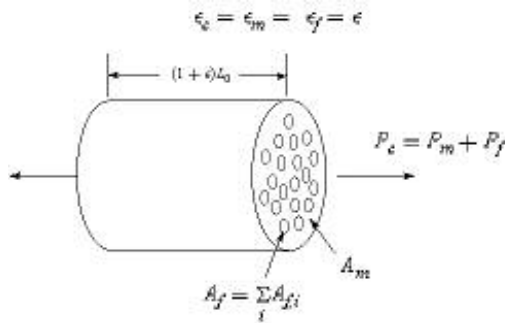
ETK malzemelerin özellikleri, homojen ve izotrop (örneğin metaller gibi) malzemelerden çok farklıdır. Bu malzemelerde, malzemeyi oluşturan bileşenlerin özellikleri (elyaf ve matrisin) ve bunların geometrik düzeni belirleyicidir. Elyaf ve matris özellikleri verildiğinde malzemenin yeni mekanik özelliklerini inceleyen bilim dalına mikromekanik adı verilir.

ETK'ların özelliklerine etki eden faktörlerin başlıcaları şunlardır:

- Bileşenlerin hacim oranları, biçim ve büyüklükleri
- Bileşenlerin geometrik düzenlenişi
- Bileşenlerin özellikleri
- Bileşenler arasındaki arayüzeydeki bağların özellikleri

Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Elastik Modülün Bulunması:

Takviye Doğrultusunda Yükleme



Sürekli elyafı tek yönde düzenlenmiş bir karma malzemeye takviye doğrultusunda kuvvet uygulandığında elyaf (f), matris (m) ve kompozit (c) aynı miktarda uzayacağından:

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f = \epsilon$$

yazılabilir (eş uzama durumu). Kompozitin taşıdığı kuvvet ise, elyaf ve matrisin taşıdığı kuvvetlerin toplamıdır.

$$P_c = P_m + P_f$$

Kuvvetleri gerilme ve alanlar cinsinden yazarsak

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f$$

bulunur. Burada

$$A_c = A_m + A_f$$

eşitliği geçerlidir.

Elyaf sürekli olduğundan hacim oranları için

$$v_m = A_m / A_c \quad v_f = A_f / A_c$$

$$v_m + v_f = 1$$

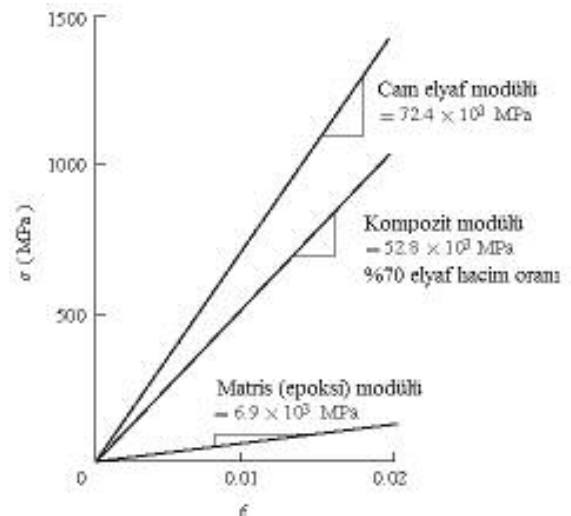
eşitlikleri geçerlidir. Dolayısıyla yukardaki denklemi A_c 'ye ve birim uzama değerine bölersek

$$\frac{\sigma_c A_c}{\epsilon_c A_c} = \frac{\sigma_m A_m}{\epsilon_m A_c} + \frac{\sigma_f A_f}{\epsilon_f A_c}$$

bulunur ve gerekli kısaltma düzenlemeler ile

$$E_c = v_m E_m + v_f E_f$$

elde edilir. Yani bu kompozitin takviye doğrultusundaki elastiklik modülü her bir bileşenin hacim oranı ve elastiklik modülünün çarpımlarının toplamıdır. Bu tarz bir hesaplama **KARIŞIMLAR KURALINDA PARALEL TOPLAMA** olarak adlandırılır.



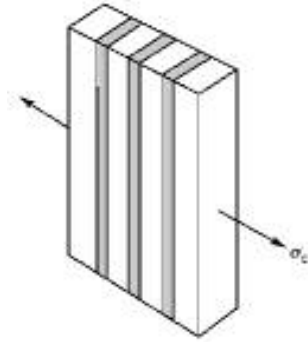
Burada dikkat edilmesi gereken, bulunan E değeri malzemenin takviye doğrultusundaki elastiklik modülü olduğudur. Bu denklemin geçerli olması için: takviye sürekli olmalı ve elyaf matris bağı tam olmalıdır.

Bu denklemin herhangi bir diğer kompozit özelliği için genel ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$E_c = \sum v_i \cdot \bar{O}_i$$

Burada v_i i bileşenin hacim oranı, $\bar{O}_i$ ise i bileşenin özelliğidir. Örneğin kompozitler için yoğunluk da bu şekilde hesaplanabilir.

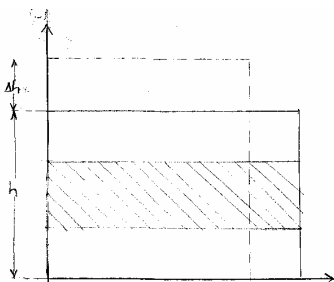
Takviye Doğrultusuna Dik Yükleme



Sürekli elyafı tek yönde düzenlenmiş bir karma malzemeye takviye doğrultusuna dik kuvvet uygulandığında elyaf (f), matris (m) ve kompozit (c) aynı gerilmeler altında kalacağından

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$$

yazılabilir (eş gerilme durumu). Kompozitin uzaması ise elyaf ve matrisin uzamalarının toplamıdır. İşlem yaparken kolaylık sağlaması açısından toplam lif alanına sahip tek bir lif varmış gibi düşünülebilir



Bu durumda malzemenin uzaması

$$\Delta h_c = \Delta h_m + \Delta h_f$$

olur. Öte yandan

$$\Delta h_c = \epsilon_c \cdot h_c,$$

$$\Delta h_m = \epsilon_m \cdot h_m,$$

$$\Delta h_f = \epsilon_f \cdot h_f$$

olduğundan

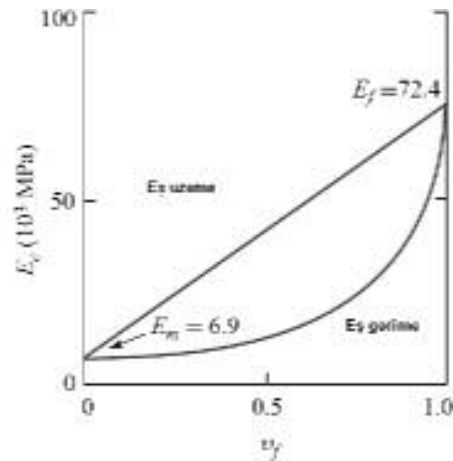
$$\epsilon_c \cdot h_c = \epsilon_m \cdot h_m + \epsilon_f \cdot h_f$$

$$\sigma_c / E_c = \sigma_m / E_m \cdot v_m + \sigma_f / E_f \cdot v_f$$

ve gerilmeler eşit olduğundan aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{1}{E_c} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_f}{E_f}$$

yani kompozitin takviyeye dik elastiklik modülü her bir bileşenin hacim oranı ile elastiklik modülünün bölümlerinin toplamıdır. Bu tarz bir hesaplama *KARIŞIMLAR KURALINDA SERİ TOPLAMA* olarak adlandırılır. Aşağıda eş uzama ve eş gerilme durumları için değişik hacim oranlarında kompozitin elastiklik modülünün değişimi gösterilmektedir. , Eş uzama durumunda elyafın elastiklik modülüne katkısı eş gerilme durumundakinden daha ciddidir.

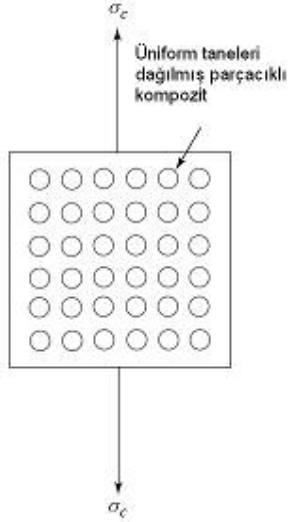


Bu denklemin herhangi bir diğer kompozit özelliği için genel ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$E_c = \sum (v_i / \bar{O}_i)$$

Burada v_i i bileşenin hacim oranı, $\bar{O}_i$ ise i bileşenin özelliğidir.

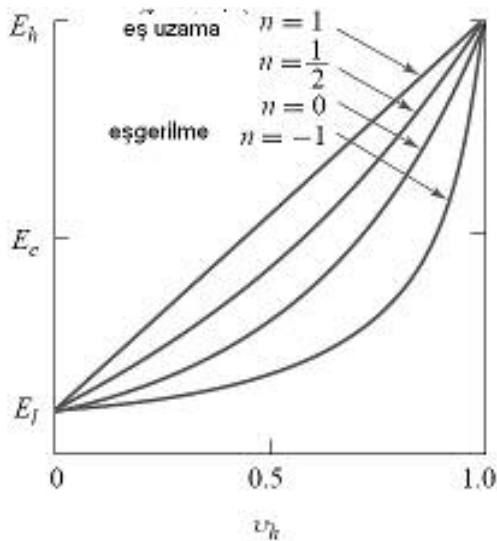
Taneleri Üniform Dağılmış Parçacıklı Bir Kompozit



Bu tür malzemelerin elastiklik modülü hesaplanırken eş uzama ve eş gerilmede kullanılan eşitliklerin genelleştirilmiş hali kullanılır

$$E_k^n = v_m \times E_m^n + v_e \times E_e^n$$

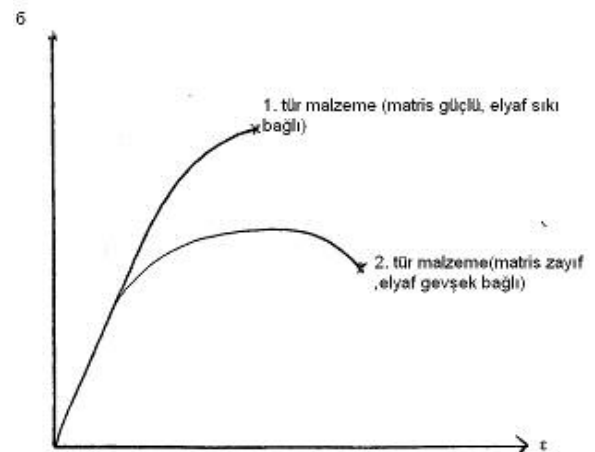
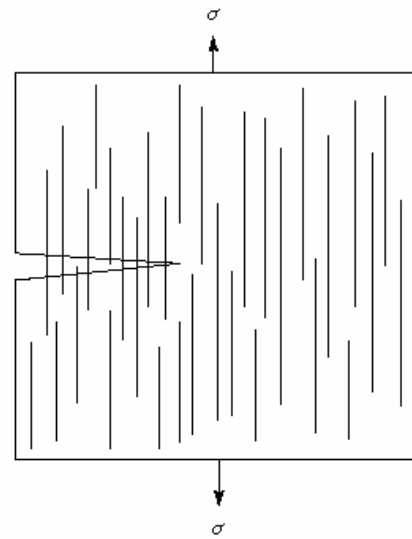
Denklemdaki n değeri, eş uzama durumu için +1, eş gerilme durumu için -1'dir. Yüksek elastik modüllü parçacık ve düşük elastik modüllü matris olduğunda $n=0$, elastik modülü düşük parçacık ve elastik modülü yüksek olan matrisler için $n=1/2$ alınır. Aslında bunlar bize kesin sonuç vermemekle beraber malzeme hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar.



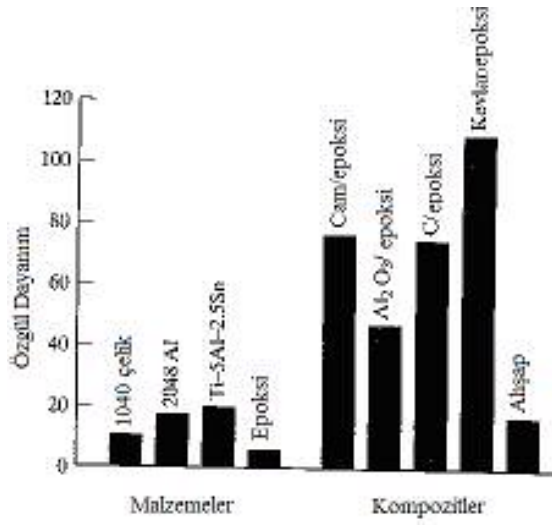
Takviye-Matris Arayüzeyinin Dayanımı:

Bir kompozitte hasar oluşumu aşağıdaki biçimlerde olur:

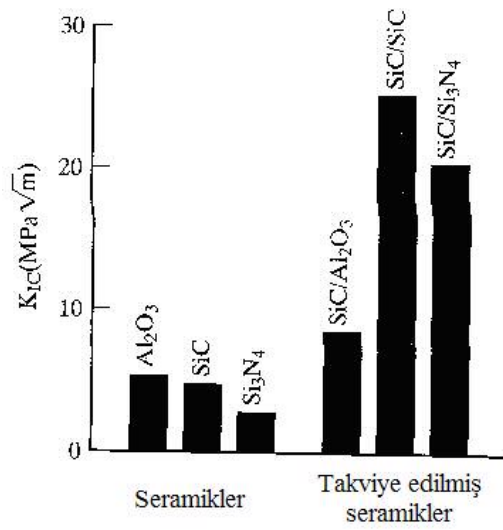
- 1) Matris takviye arabağı güçlü ise kırılma birlikte olur, malzeme rijit ve gevrektrir. ırılır
- 2) Ara yüzey bağı zayıf ise matris kırılır, tam hasar oluşumu için liflerin matrsten çekilmesi gerekir. Malzemenin tok olması için liflerin matrise çok sıkı bağı olmaması gerekir, bu durumda liflerin çekilmesi için sürtünmeye karşı enerji harcanacaktır.



BAZI KARŞILAŞTIRMALAR:



Kompozit malzemelerin özgül dayanımlarının klasik malzemelerle karşılaştırılması



Seramik matrislerde süreksiz elyaf takviyesi ile toklukta önemli artışlar sağlanır.

12. Ortamın Etkileri

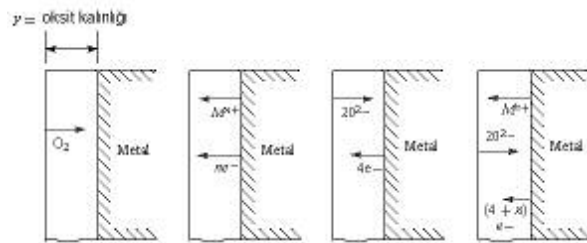
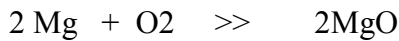
12.1. Korozyon

Korozyon metallerin ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonu sonucu, özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesidir.

- **Kimyasal Korozyonda** metalin genellikle elektron verdiği bir reaksiyon oluşur.
- **Elektrokimyasal Korozyonda** konum olarak çoğunlukla farklı yerlerde oluşan iki ayrı reaksiyon vardır. Bunlar arasında elektrik yüklerinin karşılıklı değişimi söz konusudur.

12.1.1 Kimyasal Korozyon

Metal ve alaşımlarının, elektrik iletkenliği olmayan, gaz ortamlar içindeki korozyonudur. Metal genellikle elektron verir ve reaksiyon oluşur. Diğer element genellikle oksijen olduğundan metal elektronu oksijene verir ve reaksiyon sonucu yüzeyde metal oksit tabaka oluşur. Oksidasyon reaksiyonu özellikle yüksek sıcaklıklarda belirgindir ve bu durumda oluşan korozyon ürününe **tufal** denir.



Oksit Tabakaları

Oksit tabakaları değişik özelliklerde olabilir:

- Yüzeye tutunan, ancak gözenekli
- Yüzeye tutunan, gözeneksiz ve koruyucu
- Yüzeye tutunmayan ve dökülen

PILLING - BEDWORTH ORANLARI

Koruyucu	Koruyucu değil
Be—1.59	Li—0.57
Cu—1.68	Na—0.57
Al—1.28	K—0.45
Si—2.27	Ag—1.59
Cr—1.99	Cd—1.21
Mn—1.79	Ti—1.95
Fe—1.77	Mo—3.40
Co—1.99	Hf—2.61
Ni—1.52	Sb—2.35
Pd—1.60	W—3.40
Pb—1.40	Ta—2.33
Ce—1.16	U—3.05
	V—3.18

Pilling Bedworth oranı malzemenin oksitlenmeye olan direncini belirler. Bu değer oluşan oksit hacminin, yerini aldığı metalin hacmine oranı olarak hesaplanır.

$$P-B = \frac{M \cdot d}{a \cdot m \cdot D}$$

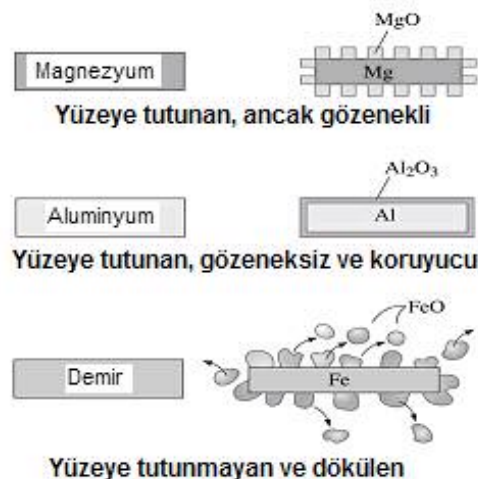
M = Oksitin molekül ağırlığı

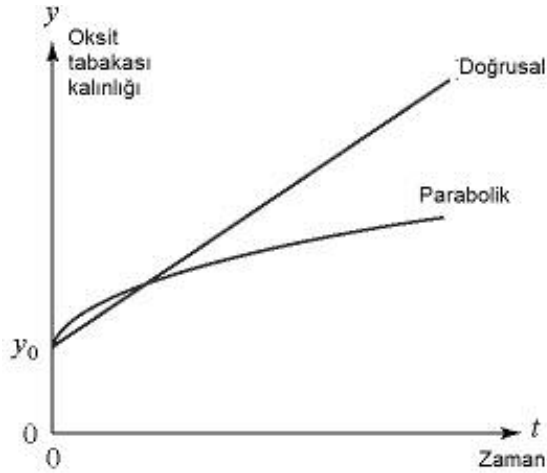
d = Metalin özgül ağırlığı

m = Metalin atom ağırlığı

D = Oksit içindeki metal atomu sayısı

Bu değer 1'den küçük ise gözenekli bir oksit tabakası, çok büyük ise yüzeye tutunamayan ve dökülen bir oksit tabakası oluşur. Her iki durumda da oksit tabakası koruyucu değildir. Yüzeye tutunan koruyucu oksit tabakalarında P-B oranı genellikle 1 ile 2 değerleri arasındadır.





Oluşan metal oksidin yüzeye tutunması ve koruyucu karakterine göre oksit tabakasının kalınlığı parabolik veya doğrusal olarak artar.

- Lineer (doğrusal) karakter (koruma özelliği kötü):

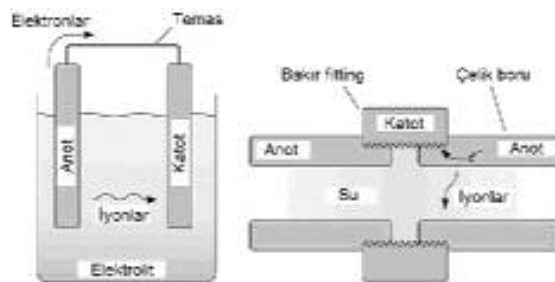
$$y_1 = c_1 \cdot t + c_2$$

- Parabolik karakter (koruma özelliği iyi)

$$y_2 = c_3 \cdot t^2 + c_4$$

12.1.2 Elektrokimyasal Korozyon

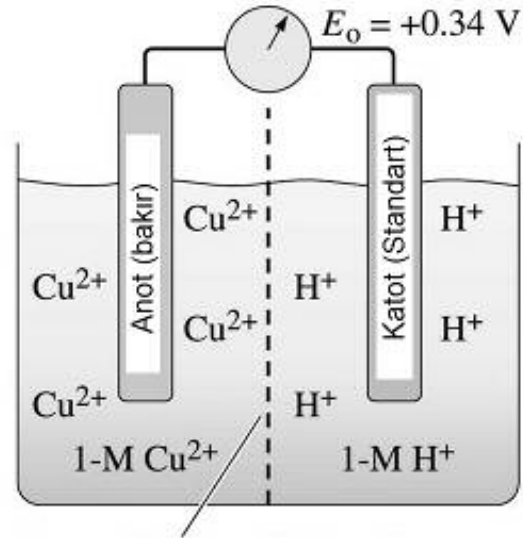
Elektrokimyasal korozyonda konum olarak **farklı yerlerde oluşan iki reaksiyon** vardır (anot ve katot). Elektrokimyasal korozyonun her iki kimyasal reaksiyonunda da **elektrik yüklerinin karşılıklı değişimi** zorunludur. Bu değişim metallerde elektron iletimi yoluyla olur, metalin dışında ise akım elektrolit üzerinden sağlanır. **Elektrolitler** çoğunlukla sıvı çözeltiler olmakla birlikte, toprakta ve tuz eriyiklerinde de iyon iletimi mümkündür.



Katotta (-) elektrolit içindeki pozitif iyonlar yönelir ve burada elektron alarak

çökeler (galvanik yüzey kaplama!). Anotta (+) ise metal atomları elektron vererek reaksiyona girerler.

Dış bir elektrik akım kaynağı olmasa dahi her metalin farklı bir elektrolitik çözünme eğilimi vardır. Bu özellik elektrokimyasal gerilim değeri ile verilir. Her malzemenin standart bir elektroda göre elektod gerilimini aşağıda görülen yarı pil hücresi ile ölçülebilir. Eğer E_0 sıfırdan büyük ise bakır standart elektroduna göre katodiktir.



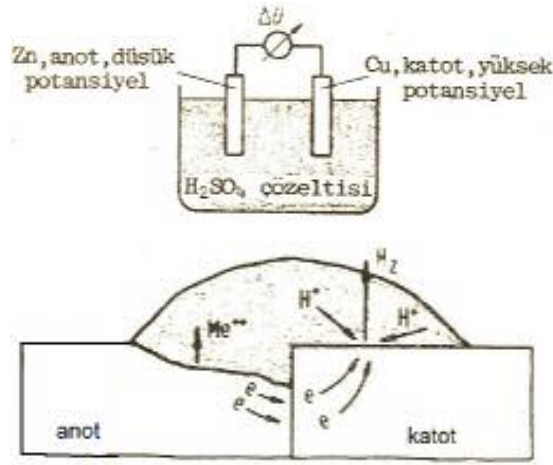
Aradaki membran elektrolitlerin karışmasını önler, ancak elektrik yükü geçebilir.

Elektrokimyasal Gerilim Değerleri

	Metal- metal iyonu	Elektrokimyasal Gerilim [V]
Asal Katodik ↑	Au-Au ³⁺	+1.498
	Pt-Pt ²⁺	+1.2
	Pd-Pd ²⁺	+0.987
	Ag-Ag ⁺	+0.799
	Hg-Hg ₂ ²⁺	+0.788
	Cu-Cu ²⁺	+0.337
	H ₂ -H ⁺	0.000
	Pb-Pb ²⁺	-0.126
	Sn-Sn ²⁺	-0.136
	Ni-Ni ²⁺	-0.250
Asal Olmayan Anodik ↓	Co-Co ²⁺	-0.277
	Cd-Cd ²⁺	-0.403
	Fe-Fe ²⁺	-0.440
	Cr-Cr ³⁺	-0.744
	Zn-Zn ²⁺	-0.763
	Al-Al ³⁺	-1.662
	Mg-Mg ²⁺	-2.363
	Na-Na ⁺	-2.714
	K-K ⁺	-2.925

Farklı elektrokimyasal gerilim değerine sahip metallerin yanyana getirilmesi ve bir elektrolit üzerinden teması halinde bir korozyon pili (galvanik hücre) oluşur. Bu metallerden göreceli olarak asal olmayan metal anot olarak elektrolite metal iyonları verir.

Galvanik hücre, iki metalin elektrolit içine daldırılması ve elektrotların birbirine bağlanmasıyla oluşan yapıdır. Bu metallerden biri daha asaldır, yani anottur, diğeri katottur. Korozyon anotta meydana gelir, katoda bir şey olmaz.



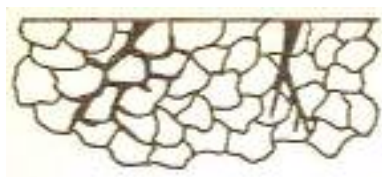
12.2 Korozyon Türleri

Biçimsel Sınıflama



Genel korozyon: Tüm yüzeyde etkindir, üniform ve yavaş ilerler. Korozyonun neden olduğu maddelerden ötürü kolaylıkla farkedilerek önlem alınabilir.

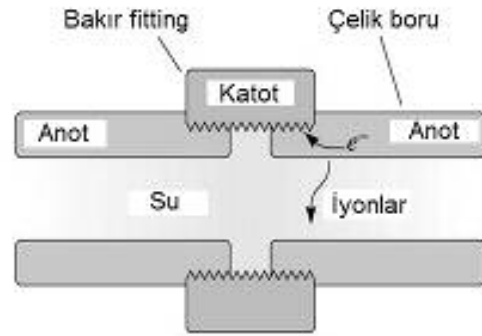
Noktasal korozyon: Yerel çukurlar oluşur veya yüzeyin altı oyulur. Zor fark edilir; oluşacak hasar, korozyon hasarının kendisinden çok daha ıdırır.



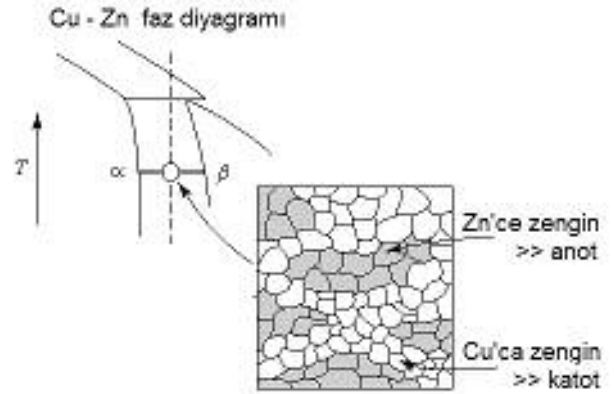
Korozyon çatlağı: Mekanik zorlamalar altında çatlak uçlarında. En tehlikeli korozyon biçimi olup, noktasal korozyon gibi çok zor fark edilir. Tanelerarası ve taneleriçi olabilir.

Elektrokimyasal Korozyon Türleri

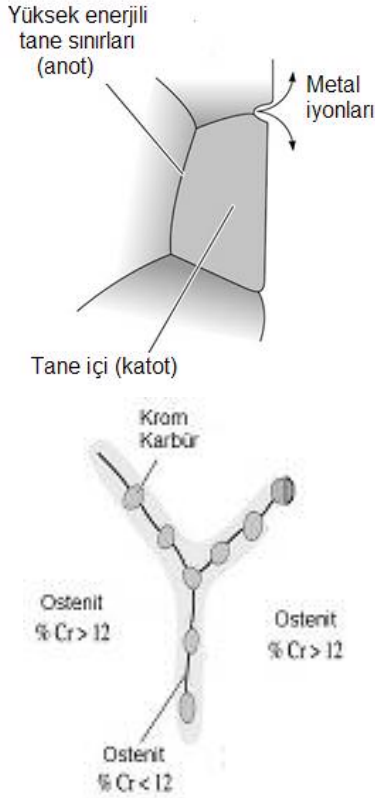
Temas korozyonu: Farklı malzemeler teması sonucu ortaya çıkar. Cıvata ile bunun bağlandığı ana malzemelerin farklı olması gibi gibi, makro temas pili.



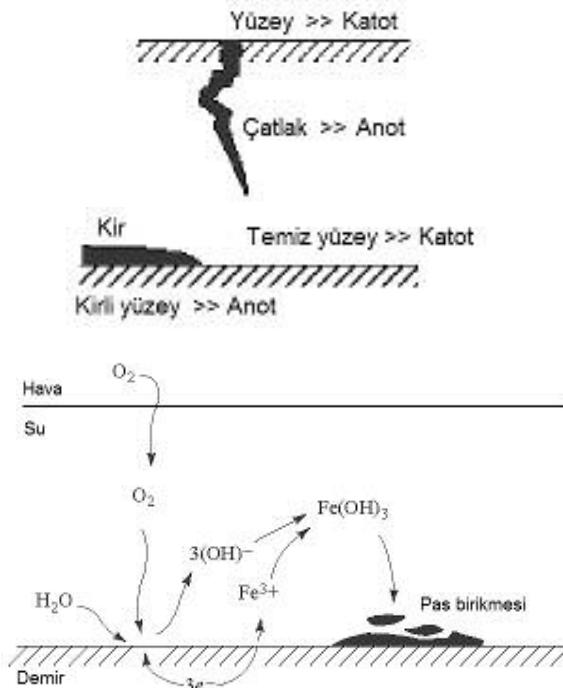
Bu tür temas pilleri (galvanik hücreler) mikroskopik düzeyde de oluşabilir. Örneğin farklı içyapı bileşenlerinin bulunması (alfa-beta pirinci), tane sınırının tane içinden farklı olması (tanelerarası korozyon) gibi..



Tanelerarası korozyon: Tane sınırına yakın amorf bölgelerde veya bazı alaşım elementlerindeki farklılıklar nedeniyle (örneğin paslanmaz çeliklerde tane sınırında krom karbür çökmesi) ortaya çıkar.



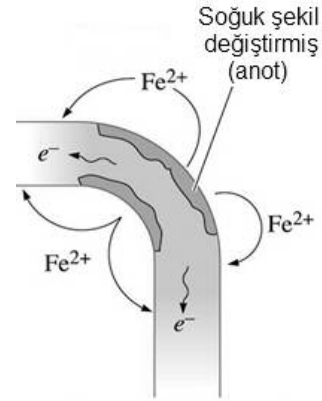
Oksijen Derişikliği Pili: Elektrolit içindeki oksijen girişinin çeşitli bölgelerde farklı olması nedeniyle oluşan havalandırma pili nedeniyle korozyon oluşabilir. Örnekler:



Aralık korozyonu: Dar aralıklarda veya sızdırmazlık yüzeylerinde oluşan aralık korozyonu da farklı havalandırma nedeniyle oluşur.



Şekil değiştirme farklılıkları nedeniyle oluşan elektrokorozyon, örneğin bükülmüş bir çivide soğuk şekil değiştirmiş bölgeler.



Mekanik zorlamalı korozyon türleri:

Gerilme korozyonu: Gerilme korozyonu elektrolit içinde bulunan ve bir çatlak başlangıcı taşıyan parça üzerine çekme gerilmelerinin etkimesi ile ortaya çıkar.

Hidrojen gevrekliği: Gerilme, elektrolit ve çatlak gibi üç eleman mevcuttur. Ancak hasar mekanizması diğer korozyon türlerinden farklıdır. Burada hidrojenin malzeme içine yayılması ve daha sonra malzeme içi mikro boşluklarda hidrojen molekülünü meydana getirirken iç basınçlara, gerilmelere ve dolayısıyla çatlaklara yol açması söz konusudur.

Korozyon yorulması: Korozyon oluşum nedenleri benzerdir, yalnız burada çatlak yorulma sonucu oluşur.

Mekanik zorlamalı korozyon türleri arasında iki katı maddenin sürtünmesi sonucu ortaya çıkan **sürtünme korozyonu**, akan sıvılar içinde oluşan **erozyon korozyonu** ve **kavitasyon korozyonu** da sıralanabilir.

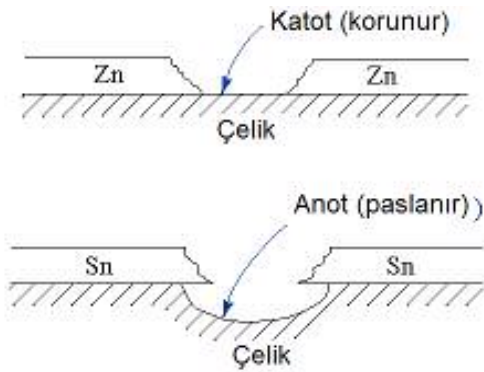
12.3 Korozyondan Korunma

Korozyondan korunmak için değişik yöntemler uygulanabilir:

- Uygun Malzeme Seçimi
- Uygun Tasarım
- Aktif Korunma
- Pasif Korunma

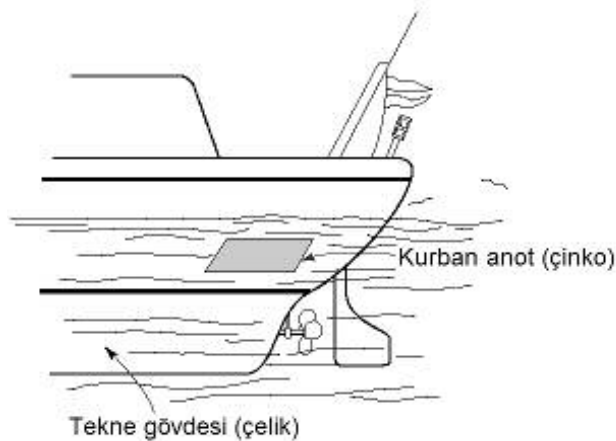
12.3.1. Aktif korunma

Katodik koruma: Kurban anot kullanarak korunacak malzeme katot haline getirilir, örneğin çinko kaplama (galvanizleme)

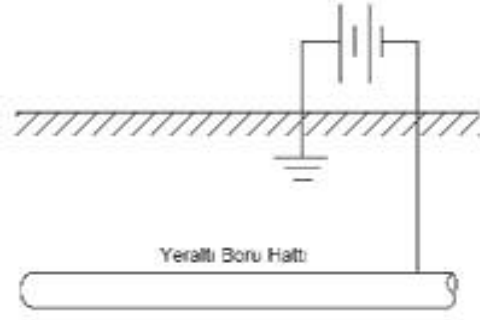


Çinko ve kalay kaplı çeliklerin korozyonu

Katodik korumaya bir diğer örnek, suyun içinde veya toprak altında kalan metallerde korozyonu engellemek için bu metallere temas edecek şekilde asal olmayan reaktif bir metal yerleştirilmesidir.



Kurban elektrot gövdenin malzemesinden daha anodik yapıda olacak şekilde seçilir. Bu sayede kurban elektrotta korozyon meydana gelir ve bu kurban elektrot bitene kadar gövde korozyondan korunmuş olur.



Dış elektrik potansiyeli uygulanması ile de korozyon reaksiyonları azaltılabilir, örneğin toprak altındaki boruya doğru akım uygulanır. Bu sayede boru katot durumuna gelir ve korunmuş olur.

12.3.2. Pasif korunma:

Bu yöntemlerde elektrolitin etkinliğini azaltılmaya çalışılır

Elektrolitin değiştirilmesi: İnhibitör denilen kimyasal maddeler eklenebilir, kapalı devre sistemlerde akışkan oksijence fakirleştirilebilir.. Kalorifer suyuna iyon hareketini yavaşlatan tuzlar katmak bu yöntemle örnek olarak verilebilir.

Korunacak metalden elektroliti uzak tutan her türlü önlem anlaşılar. Organik (yağ, balmumu, plastik), metal olmayan inorganik (oksitler, fosfatlar, seramikler, emaye) ve metal **yüzey koruma** kaplamalarından yararlanılır.

Farklı malzemeler arasında korozyon pili oluşması için ara **yalıtkan tabakalar** ile engellenebilir. Yani galvanik hücre oluşumu engellenmeye çalışılır.

Malzemede iç gerilmenin olduğu bölgelerde anodik davranma eğilimi vardır (örneğin soğuk şekil değiştirmiş bölgeler). Homojenleştirme, yeniden kristalleşme, gerilme giderme tavı ısıtma işlemleri bu **gerilmeleri gidermek** korozyonu azaltır.

Tasarım tedbirleri alınabilir. Örneğin; cıvataya plastik pul koyma, boyama, emaye kaplama, metal birleştirmelerde aralık bırakmama ve son çare olarak da malzemenin ömrünün biraz daha uzaması için anot yüzey alanını büyük seçmek.

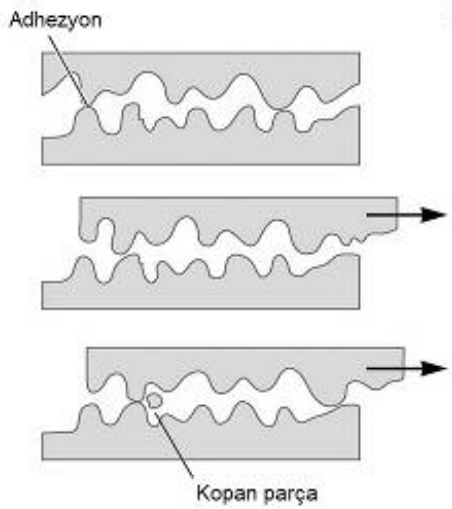
12.2. Aşınma

Değişik aşınma türleri vardır:

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Erozyon
- Kavitasyon

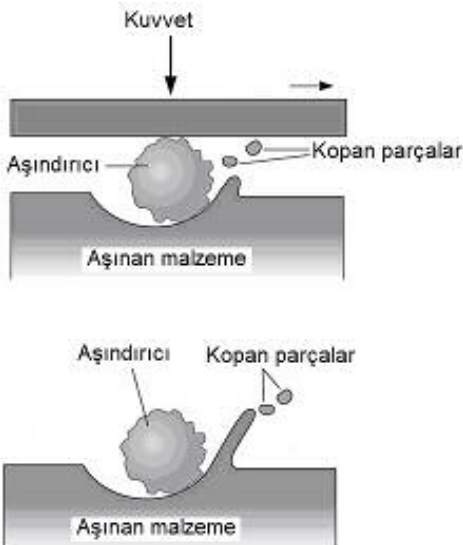
Adhezif aşınma

Adhezif aşınmada iki yüzey birbiri üzerinde kayar. Pürüzler yüksek basınç altında temas eder, kısmen kaynar ve koparlar.



Abrazif aşınma

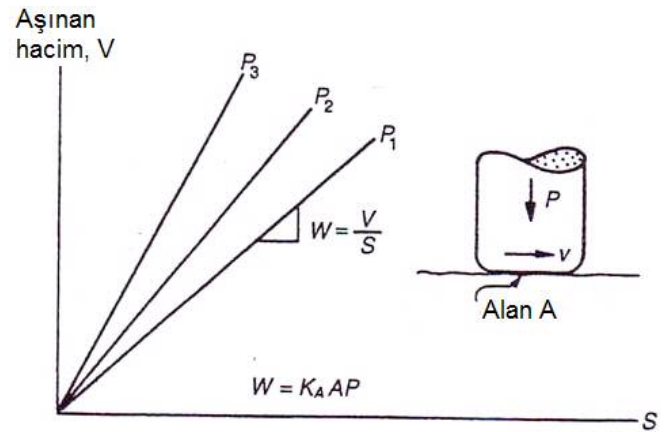
Bu tür aşınmada araya giren aşındırıcı sert parçacıklar vardır. Bu durumdan imalatda da yararlanılır (taşlama, zımparalama vb.)



Archard Aşınma Katsayısı

Birbiri üzerinde hareket eden bir malzeme çiftinin aşınma dayanımı Archard Katsayısı k_A ile ifade edilir.

Birim kayma uzunluğu başına yüzeyden kaybedilen malzeme hacmi, aşınma hızı W olarak tanımlanır. Archard Aşınma Katsayısı k_A , birbiri üzerinde sürtünen malzeme çiftinin aşınmaya direncini temsil eden bir değerdir.



$$W = k_A A p$$

Burada

A: yüzey alanı, p: basınç, k_A : Archard aşınma katsayısıdır.

13. Elektriksel ve Manyetik Özellikler

13.1. İletkenlik

Malzemeler içindeki elektrik iletimi, uygulanan bir elektriksel alanın etkisiyle malzeme içindeki yük taşıyıcıların hareketleri ile oluşur. Elektronlar, elektron boşlukları, anyon (-) ve katyonlar (+) başlıca yük taşıyıcılardır. Metallerin elektrik iletkenliğinin iyi olması, kafes içinde valans elektronlarının serbestçe hareket edebilmesi ile ilgilidir.

Bir iletkenin elektrik direnci R , iletkenin geometrisi ve malzemenin özgül direncine bağlıdır

$$R = \rho \cdot L / A$$

Burada ρ özgül direnç(ohm.cm), L direncin uzunluğu(cm), A ise direncin kesit alanıdır (cm²). Bu değerin tersi olan σ değeri ise özgül iletkenlik olarak tanımlanır ($\sigma = 1 / \rho$; ohm⁻¹.cm⁻¹) Özgül iletkenlik ve özgül direnç malzemenin ayırt edici özelliklerindendir.

Elektrik iletkenliği taşıyıcı sayısı, yük miktarıyla ve taşıyıcının hareketliliği ile orantılıdır.

$$\sigma \sim n \cdot q \cdot \mu$$

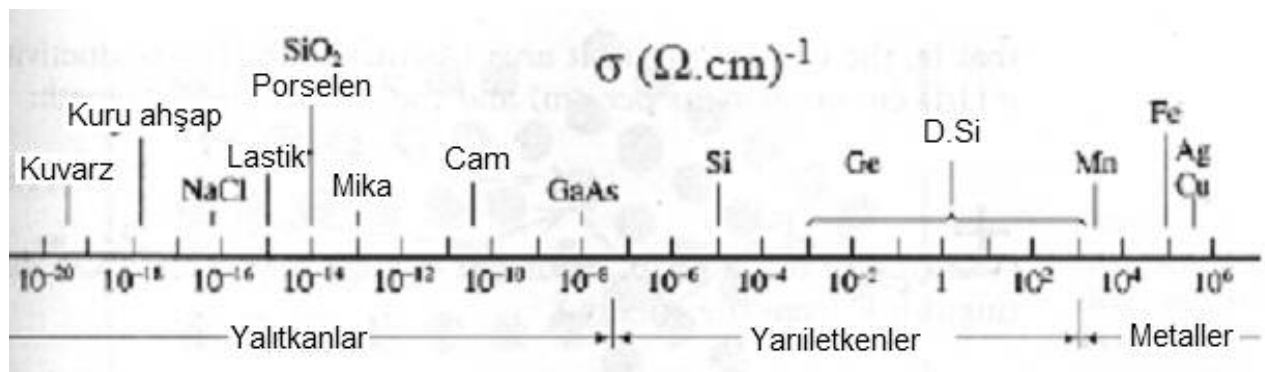
n : yük taşıyıcı sayısı

q : taşıyıcı başına yük

μ : taşıyıcı hareketliliği

Metaller için taşıyıcı hızı önemli iken yalıtkan ve yarı iletkenler için taşıyıcı sayısı önemlidir. Çünkü metallerde taşıyıcı elektron sayıca boldur, daha çok taşıyıcının hızı ve taşıyıcıların engellerle karşılaşp karşılaşmadığı önemlidir. Yalıtkanlarda ve yarıiletkenlerde ise taşıyıcı sayısı az olduğundan sayıları önem kazanmaktadır.

Metallerde taşıyıcı eleman elektronlardır. Yarı iletkenlerde ise elektronlar ve elektronların oluşturduğu boşluklar elektrik iletimine katkıda bulunur. Taşıyıcıların hızı atomik bağa, kafes kusurlarına, mikro yapıya, iyonik bileşenlere ve difüzyon oranına bağlıdır. Bütün bu etkilerden dolayı malzemeler çok farklı iletken özelliklere sahiplerdir. Değişik malzemelerin iletkenlik değerleri aşağıda görülmektedir.



Metaller : $\sigma > 10^5 \text{ (}\Omega.\text{m)}^{-1}$

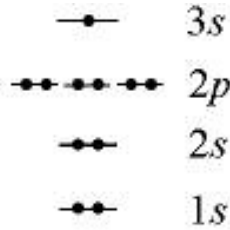
Yarıiletkenler : $10^{-6} < \sigma < 10^5 \text{ (}\Omega.\text{m)}^{-1}$

Yalıtkanlar : $\sigma < 10^{-6} \text{ (}\Omega.\text{m)}^{-1}$

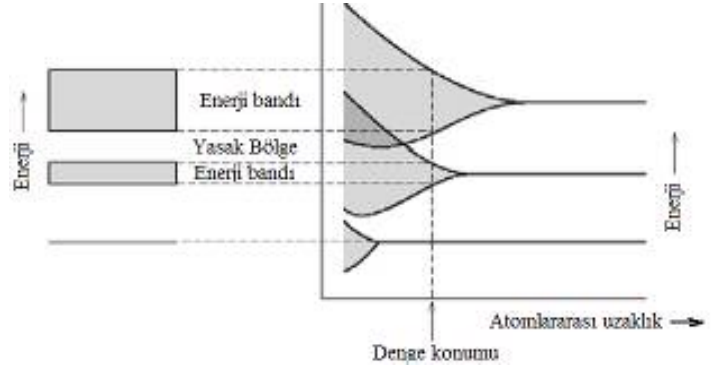
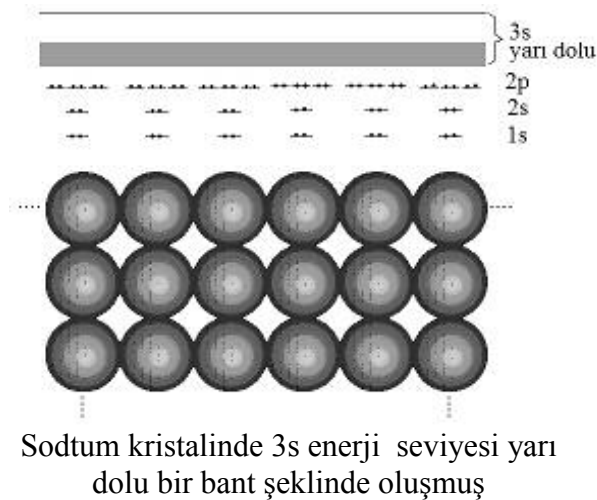
Enerji Bantları Modeli

Elektriksel iletkenliği elektronların enerji bandı modeli ile açıklanabilir. Bir atomda elektronlar tanımlanmış enerji seviyelerinde bulunabilirler, aynı konumda spin yönleri ters olan bir çiftten fazla elektron bulunamaz (Pauli prensibi).

Atomlar bir katı içinde yan yana bulunduklarında, aralarındaki uzaklığa bağlı olarak birbirleri ile girişimde bulunurlar ve tek atom için belirlenmiş enerji seviyesinde değil, birbirine çok yakın enerji seviyesinin yer aldığı belirli enerji bantları içine yerleşirler. İletkenlik için en dış bantlar önem taşır, örnek olarak sodyum kristalindeki enerji seviyelerini alırsak:



Tek bir sodyum atomunun enerji seviyeleri



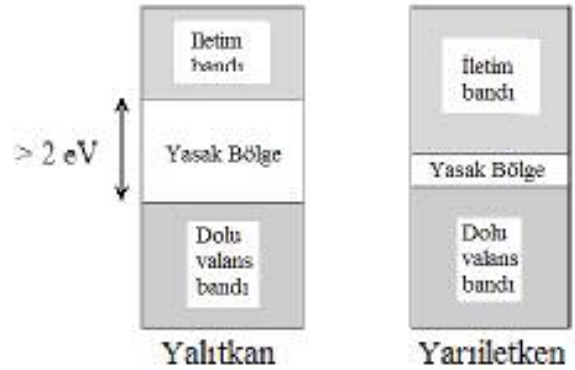
Enerji bantlarının atomlararası uzaklık ile değişimi

Valans bandı: Kısmen veya tamamen dolu en yüksek enerji bandı,

İletim Bandı: Kısmen dolu veya boş enerji bandı. İletim bu enerji seviyesindeki elektronlar ile gerçekleşir. Yarı dolu bir valans bandı aynı zamanda iletim bandıdır.

Bu bantlar arasında elektronların bulunamayacağı yasak enerji seviyeleri bulunabilir.

Yalıtkan ve Yarıiletkenler

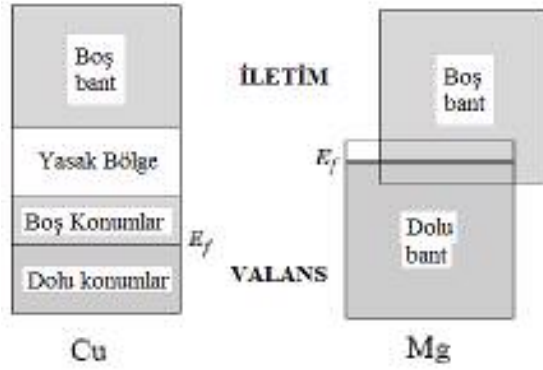


Elektrik iletkenliği, yani bir elektronun serbest hale gelerek hareket edebilmesi için bulunduğu düzeyin üstünde boş bir enerji seviyesine yükseltilmesi gerekir. Yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda valans bandı tam doludur, boş üst seviyeler yoktur; yani daha fazla elektron alamaz, dolayısıyla iletim normal koşullarda mümkün değildir.

Bu malzemelerde valans bandı ile iletim bandı ile arasında boş bir yasak bölge vardır, iletim için elektronların üst enerji seviyesine çıkması ve bu bölgeden atlaması gerekir. Bu durum örneğin yüksek

sıcaklıklarda ısı aktivasyondan ile sağlanabilir. Yarıiletkenlerde bu atlama oda sıcaklıklarında dahi mümkün olabilir; bir elektronun iletim bandına atlaması halinde valans bandında geriye bir boşluk (artı yük) kalır. Bunların yük taşıyıcı olarak kullanılması ile iletim mümkün olur. Yalıtkanlarda ise bu yasak bölge aralığı aralık daha fazladır (>2 eV) ve atlama imkansızdır.

Metallerde ise valans bandı tam dolu değildir veya iletim bandı ile örtüşür. Dolayısıyla elektronlar üst enerji seviyelerine kolaylıkla çıkarak iletimi sağlayabilirler.



İletkenlik ve atomsal bağın ilgisi:

Yalıtkanlar: Genellikle elektronların atomlara bağlı olduğu iyonik (ve kısmen kovalant) bağlar

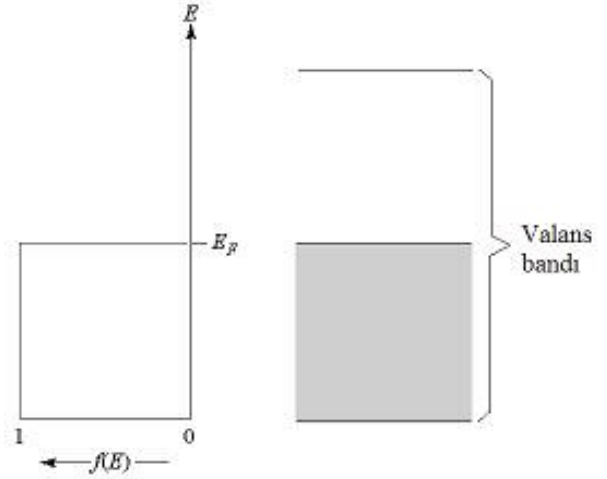
Yarıiletkenler: Genellikle zayıf kovalent bağlar

İletkenler: Elektronların serbestçe hareket edebildiği metaller

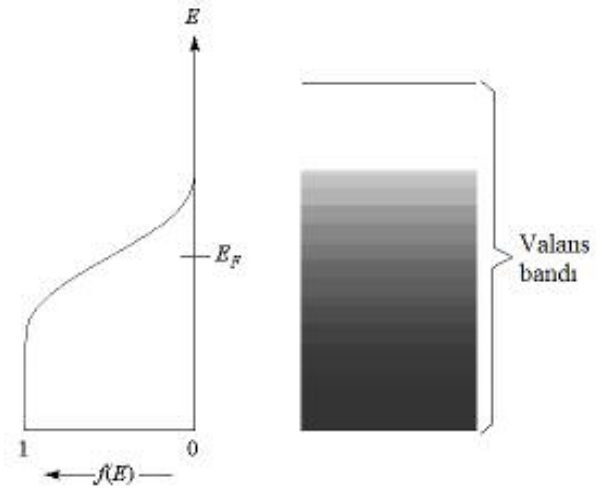
Fermi enerjisi

Elektronlar enerji bandının en alt düzeyinden başlayarak bandı doldururlar. 0 K'de en üst enerji düzeyine Fermi enerjisi adı verilir.

Sıcaklık arttıkça ısı aktivasyonla bazı elektronlar Fermi enerjisinin üstüne çıkar ve arkalarında boş düzeyler oluşur. Örneğin yarı dolu valans bantlarında ısı aktive olmuş elektronların seviyesi yükselir, Fermi değerinin üzerine çıkar.

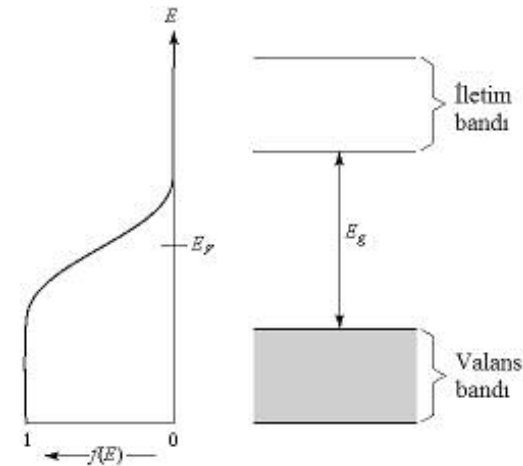


0 K sıcaklığında yarı dolu bir valans bandında enerji seviyeleri (E_f : Fermi enerjisi)



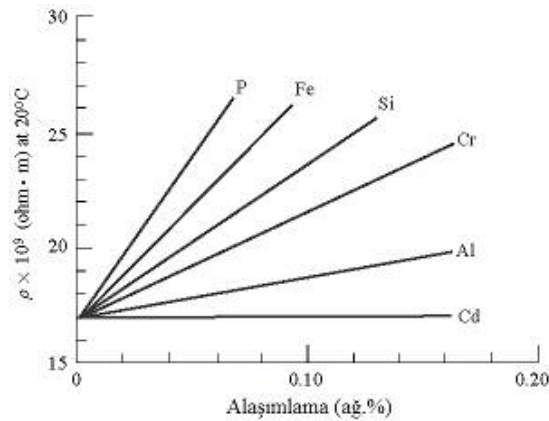
$T > 0$ K için yarı dolu bir valans bandında enerji seviyeleri

Valans bandı tam dolu ise, en üst enerji düzeyi iletim bandına atlayabilecek seviyeye yükselebilir.



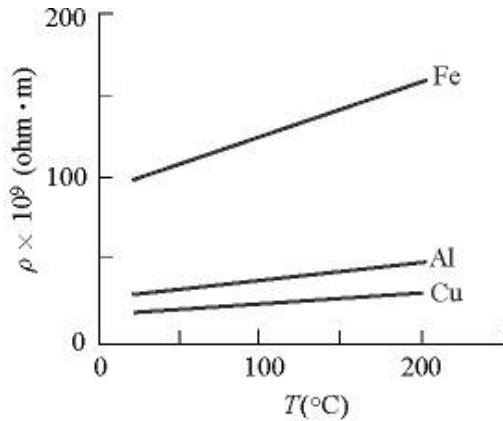
İletkenliğe etki eden değişik faktörler:

Elektrik iletkenliği malzemenin iç yapısına da duyarlıdır. Metallerde kafes kusurlarının varlığı özgül direnci artırır. Örneğin ticari bakırın direnci saf bakırdan daha yüksektir, bunun nedeni ticari bakırın içinde bulunan katışkıların birer kafes kusuru olarak elektron hareketliliğini düşürmesidir.



Az miktarda katılan elementlerin bakırın özgül direncine etkisi

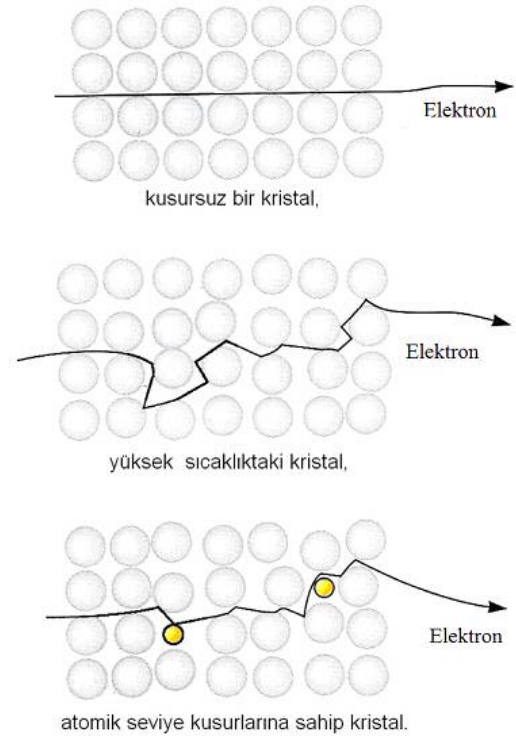
Ayrıca soğuk şekil değiştirerek pekleşmiş malzemede dislokasyon yoğunluğu yüksektir ve bu kafes kusurları direncin artmasına neden olurlar.



Öte yandan metallerde, sıcaklık arttıkça kafesteki atomların ısı titreşimleri artacağından, elektron hareketi zorlaşır ve direnç artar. Sıcaklık arttıkça özgül direnç doğrusal olarak artar (ısı titreşimleri).

$$\rho = \rho_{os} [1 + \alpha(T - T_{os})]$$

os: oda sıcaklığı



Bazı İletken Malzemeler:

Gümüş: Çok iyidir , ancak pahalıdır

Bakır: en yaygın kullanılan, ancak dayanımı düşük.tür (dayanım artırmak için pekleşme veya çökeltme sertleşmesi, mesela Cu-Be alaşımları)

Aluminyum: Hafifliğin önemli olduğu yerlerde kullanılır

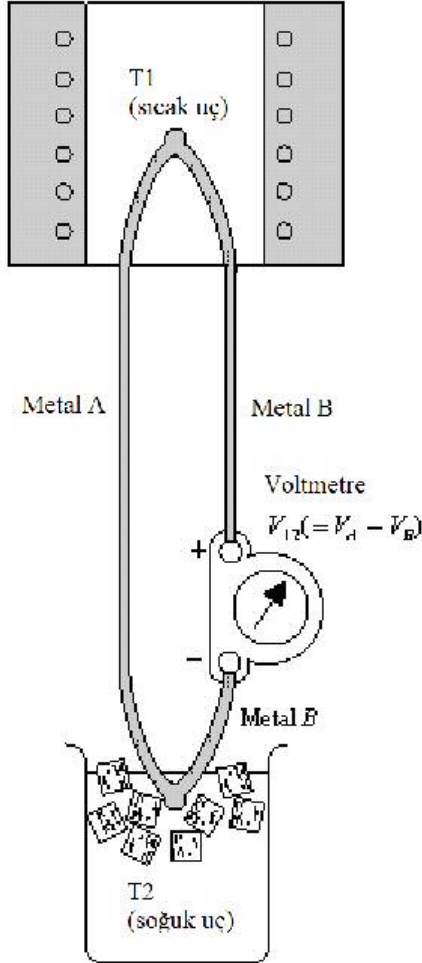
Isıtma elemanları: Yüksek özgül dirence sahiplerdir, Ni-Cr alaşımları

13.2. Isıl Çiftler (Termokupl – termoeleman)

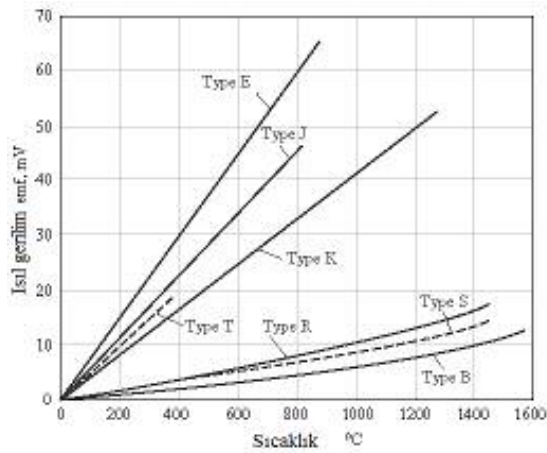
Fermi enerji seviyesi sıcaklığa duyarlıdır, yani iletken bir telin sıcak ucunda soğuk ucuna göre daha yüksek enerji seviyelerinde elektronlar bulunur ve bu elektronlar karşı uca giderek, sıcak uç (+), soğuk uç ise (-) yüklü olur. Bu tür duyarlılığı farklı olan iki malzemeden (A ve B metalleri) oluşturulan bir “ısıl çift” sayesinde sıcaklık ölçümleri yapılabilir.

Eğer voltmetreyi bağladığımız telle, diğer teli aynı malzemeden kullanırsak

voltmetrenin iki ucu arasındaki gerilim 0 olacaktır. Bu yüzden farklı teller den oluşan bir ısı çift (termokupl) kullanırız. Çünkü farklı tellerin ısı duyarlılığı de farklıdır.



A ve B metallerinden oluşan bir Isıl Çift



Bazı ısı çiftlerinde oluşan gerilimin sıcaklıkla değişimi

Yaygın Olarak Kullanılan Isıl Çift (termokupl) sistemleri

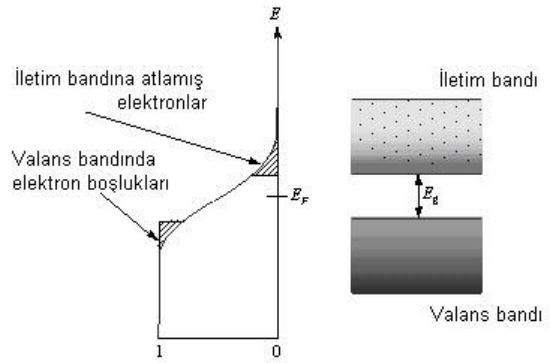
Type	Isıl çiftin adı	Positive element*	Negative element*	Recommended service environment [°C]	Maximum service temp. (°C)
B	Platinum-rhodium/platinum-rhodium	90 Pt-10 Rh	94 Pt-6 Rh	Oxidizing, Vacuum, Inert	1700
E	Chromel-constantan	90 Ni-9 Cr	44 Ni-55 Cu	Oxidizing, Reducing	870
J	Iron-constantan	Fe	44 Ni-55 Cu	Oxidizing, Reducing	760
K	Chromel-alumel	90 Ni-9 Cr	94 Ni-Al, Mn, Fe, Si, Co	Oxidizing, Reducing	1260
R	Platinum-platinum-rhodium	87 Pt-13 Rh	Pt	Oxidizing, Inert	1400
S	Platinum-platinum-rhodium	90 Pt-10 Rh	Pt	Oxidizing, Inert	1480
T	Copper-constantan	Cu	44 Ni-55 Cu	Oxidizing, Reducing	370

13.2 Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerde iletim bandı boş, valans bandı ise doludur, ancak yasak bölge dar olduğundan ($<2\text{eV}$), örneğin yüksek sıcaklıklarda elektronlar valans bandından iletim bandına atlayabilir. En önemli yarıiletkenler periyodik cetvelin IV. Grubunda olan Si, Ge ve Sn'dir. Yarıiletkenler, *Has* ve *Katkılı* olmak üzere iki ayrı gruba ayrılır.

Has Yarıiletkenler:

Bu malzemelerde yasak bölge aralığı dar olduğundan ısı ve benzer etkilerle elektronlar iletim bandına geçebilirler.



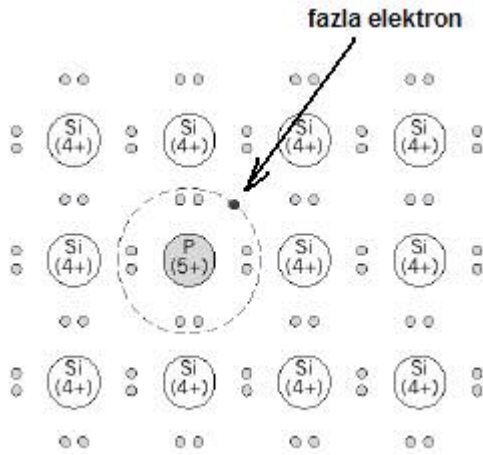
İletim bandına geçen bir elektron valans bandında bir boşluk (artı yük) bırakır. Elektron ve boşlukların sayısı aynıdır. Bir elektriksel alan uygulanır ise elektronlar ve boşluklar ters yönde hareket ederek iletme katkıda bulunurlar.

Örneğin Si'da oda sıcaklığında ($E_g=1,1\text{eV}$) 1013 atomdan sadece bir tanesi iletim bandına geçer. Sıcaklık arttıkça has yarıiletkenlerde iletkenlik artar (normal metallerin tersine!).

Katkılı Yarıiletkenler:

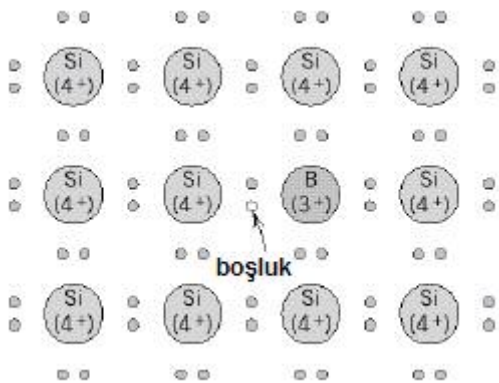
Has yarıiletkenin iletkenlik özellikleri, malzemeye kafes yapısına uygun katkılarla (doping) değiştirilir. n-tipi ve p- tipi olmak üzere iki türü vardır. Bu katkı difüzyon veya ion implantasyonu gibi yöntemlerle çok düşük düzeylerde yapılır.

Katılan yeralan atomlarında, valans elektronları sayısı yarıiletken malzemeden farklıdır. Örneğin fosfor gibi 5 valans elektronuna sahip bir element 4 valans elektronlu Si kafesine katılırsa, beşinci elektron zayıf bir bağla kalır ve kolaylıkla iletim bandına atlayabilir. Bu tip katkılarla n-tipi yarıiletken elde edilir.



n- tipi yarıiletken

Valans elektron sayısı matris malzemesinden daha az olan bir katkı yapıldığında (mesela 3 valans elektronlu Al), valans bandında bir boşluk oluşur (+ yük taşıyıcı). Bu tip katkılara akseptör denir ve yarıiletken p-tipi olarak anılır.



p- tipi yarıiletken

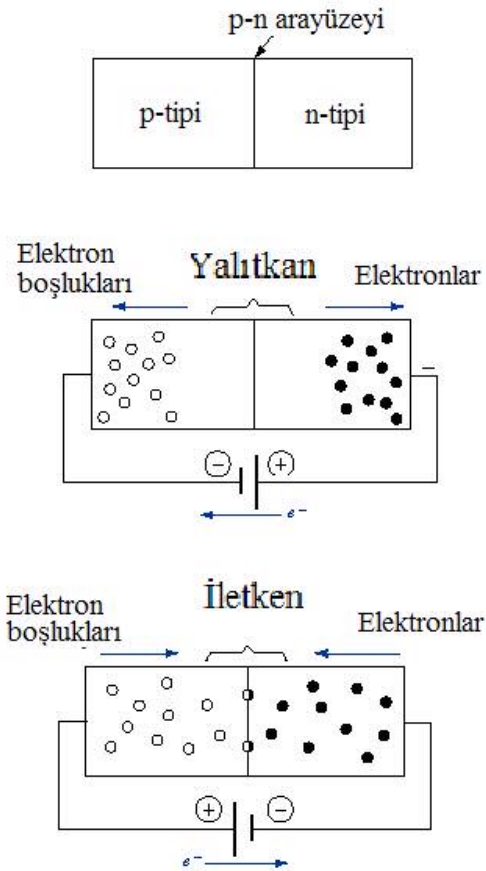
IIIA	IVA	VA
13 Al	14 Si	15 P

Has yarıiletken (4 valans elektronu)

P-tipi katkı (sadece 3 valans elektronu, boşluk oluşur)

n- tipi katkı (5 valans elektronu, fazla elektron)

Yarıiletken Kullanımına Örnek: Diyot



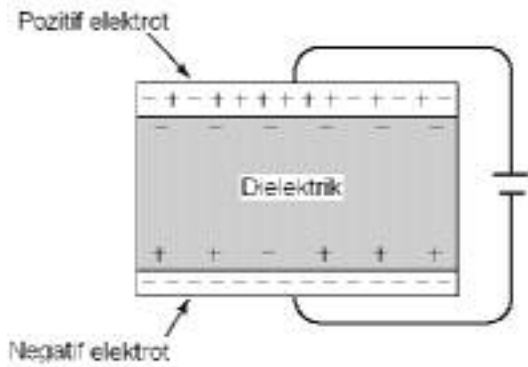
Bir p-n diyodunda uygulanan gerilimin yönüne bağlı olarak, arayüzey iletken veya yalıtkan olur. Yani p-n diyodu sadece bir yönde akım geçmesine izin verir.

13.3. Dielektrik Malzemeler

Kapasitörler

Kapasitörde elektronların kutuplanarak elektriksel yükü elektrik alanının içerisinde depolayabilme özelliklerinden faydalanılır. Burada iki metal tabaka arasına bir yalıtkan malzeme yerleştirilir. Bir elektrik ve elektronik devre elemanı olan kapasitörler yük depolamak amacıyla kullanılır ve genelde paralel iki plakadan oluşurlar. Bir kapasitörün sığası $C = Q / V$, gerilim birimi başına depolayabildiği yük miktarıdır.

Artan gerilim plakalar arasında deşarj yol açabildiğinden, araya dielektrik malzeme konulur. Böylelikle kapasitörün plakalarına, aynı gerilim düzeyi için daha fazla elektriksel yük konulabilir ve kapasitörün sığası artırılmış olur.



İki paralel iletken plaka $+Q$, $-Q$ ile yüklenirse, plakalar arasında bir elektrik alanı oluşur. Paralel plakalı kapasitör için, kapasite değeri C , plakaların geometrisine ve plakalar arasındaki dielektrik malzemeye bağlıdır.

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A / L = \epsilon \cdot A / L$$

A plakaların yüzey alanı, L plakalar arası açıklık, ϵ ise ortamın dielektrik sabitidir.

ϵ_0 vakumdaki dielektrik sabiti (8.85×10^{-12} F/m²), ϵ_r ise malzemenin bağıl dielektrik sabitidir.

Yalıtkan dielektrik malzemelerin içinde depolayabileceği yük miktarı o malzemeye özgü bir karakteristiktir, yani farklı malzemelerin aynı koşullarda depolayabilecekleri yük miktarı da farklı

olur. Bir malzemenin üzerinde yük depolayabilme yeteneği dielektrik (yalıtkanlık) sabiti ϵ adı verilen katsayı ile ölçülür ve bu katsayı her malzemede farklı değer alır. Hesaplama kolaylığı açısından her malzemenin dielektrik katsayısı, boşluğun dielektrik katsayısına göre oranlanır ve ortaya çıkan yeni katsayıya bağıl dielektrik (yalıtkanlık) sabiti adı verilir, kısaca *vakumun yalıtkanlığı temel alınarak diğer malzemelerin yalıtkanlığı buna göre kıyaslanır*. Vakumun dielektrik sabiti 1'dir; hava ve diğer birçok gazın 1 ise yakındır. Ancak plakalar arasına bir başka malzeme yerleştirilirse kapasite belirgin olarak artar.

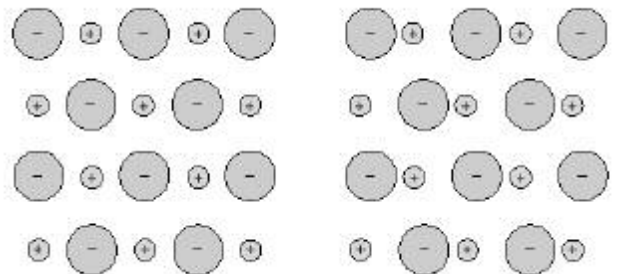
Elektrik alan içinde olan malzeme yapısındaki düzenleme **polarizasyon** olarak adlandırılır ve kapasitörün elektrik yük yoğunluğunun artmasının nedenidir.

Polarizasyon mekanizmaları (dipol oluşumu/vönlenme)

Değişik polarizasyon mekanizmaları vardır:



Elektronik polarizasyon: Uygulanan elektrik alanı negatif elektron "bulutlarını" pozitif çekirdeğe göre kaydırır. Tüm malzemelerde görülür.



İyonik polarizasyon: Tüm iyonik malzemelerde görülür. Uygulanan elektrik alanı katyon ve anyonları ters yönlerde öteler.



Moleküler polarizasyon: Bazı malzemeler kalıcı elektrik dipollere sahiptir (H₂O gibi). Elektrik alan olmadan dipoller rastgele dağılır, uygulanırsa yönlendirilir.

Dielektrik dayanım

Çok yüksek elektrik alanlar uygulanırsa (>108 V/m) dielektrik malzeme içindeki elektronlar iletim bandına zorlanırlar ve elektrik boşalımı olabilir (dielektrik dayanım, bozulma veya yıkım gerilmesi).

Dielektrik dayanım, yalıtkan malzemelerin karakteristikleri arasındadır ve bir malzemenin yalıtkanlığını yitirip bozulduğu gerilim, yalıtkanlar için önemli bir göstergedir. Kondansatörlere belirtilen sınır gerilimlerden daha yüksek bir gerilim kesinlikle uygulanmamalıdır, çünkü bu şekilde kondansatör iletken haline gelir ve işlevsiz kalır

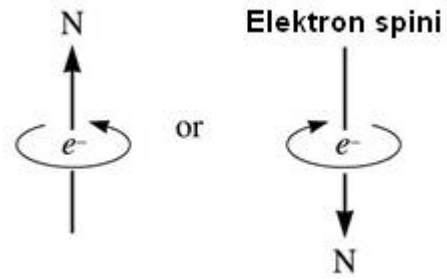
Piezoelektriklik

Bazı seramik malzemelerde, dış kuvvetlerin uygulanması ile oluşan şekil değişimi sonucu bir polarizasyon ve elektrik alan ortaya çıkar. Bunun tersi de olabilir, yani bu malzemelere gerilim uygulandığında şekil değişiklikleri ortaya çıkar.

Piezo elektrik malzemeler olarak adlandırılan bu malzemeler yardımıyla, mekanik biçim değişiklikleri elektrik sinyallerine (mikrofonlar, uzama ölçer, sonar sensörler) veya elektrik sinyalleri mekanik biçim değişikliklerine dönüştürülebilir

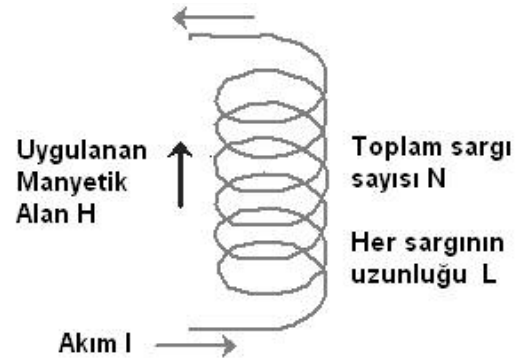
Bu malzemelere örnek olarak baryum titanat BaTiO₃, kurşun zirconat PbZrO₃, kuvarz gösterebilir.

13.4. Manyetiklik



Atomlar yörüngelerinde dönerken, her elektron çifti, bir manyetik kutup çifti oluşturur. Aynı enerji seviyesinde spinleri ters olan iki elektron olduğundan, bu alanlar birbirini yok eder. Dış yörüngedeki valans elektronları ise girişim halinde oldukları için manyetik kutuplar rastgele yönlendiğinden toplam etkileri ihmal edilebilir.

Ancak atomda dolmamış bir valans altı düzeyi varsa, burada bulunan tek atomun kutup çifti atomun manyetik davranışını belirler. Tranzisyon elemanlarında (Fe, Ni vs) dolmamış enerji düzeyleri bulunduğu için manyetiklik açısından farklı özelliklere sahiptirler ve nitekim bu kutup çiftleri yönlendirilerek makro düzeyde bir manyetik moment yaratabilirler.

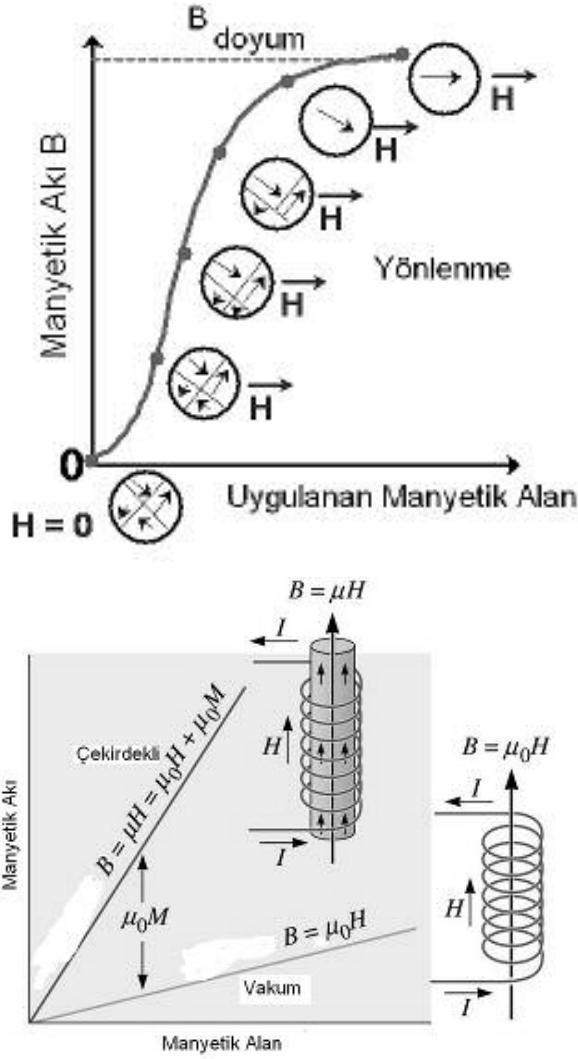


İçinden akım geçen bir iletkenin çevresinde manyetik alan oluşur. Bir bobinde bu manyetik alanın şiddeti

$$H = 0,4 \pi n I / L$$

olarak ifade edilir. Bobin içine manyetiklik özelliği olan bir malzeme yerleştirilirse alan şiddeti artar. Manyetik akı hem uygulanan alan şiddetine, hem de bu malzemeye bağlıdır.

$$B = \mu \cdot H$$



Uygulanan manyetik alan etkisi ile malzeme içindeki kutup çiftleri yönlendirilerek manyetik akı belirli bir doyum seviyesine kadar artar. μ malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğidir ve boşluktaki değeri 1'dir. Demir için bu değer yaklaşık 5000'dir.

Malzemeler manyetik alana gösterdiği tepkilere göre sınıflandırılabilir:

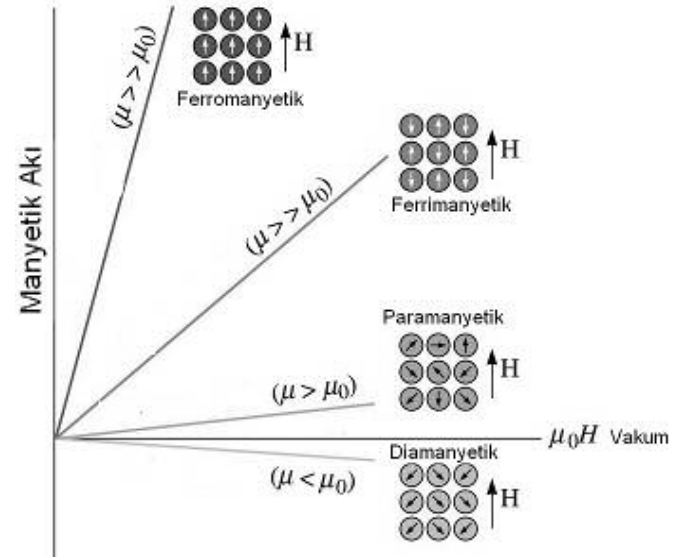
Diamanyetik Malzemeler: Valans altı düzeyleri tam doludur. Uygulanan alan mevcut elektronlarla etkileşerek zayıflar. Bu tür malzemeler Cu, Ag, Zn vs.

Paramanyetik Malzemeler: Dolmamış valans altı enerji düzeyleri vardır. Mevcut manyetik kuvvet çiftleri rastgele dağınıktır. Net bir manyetiklik zayıftır, Al, Ti gibi.

Ferromanyetik Malzemeler: Bu malzemelerin manyetik geçirgenliği çok büyüktür. Dolmamış enerji seviyelerindeki

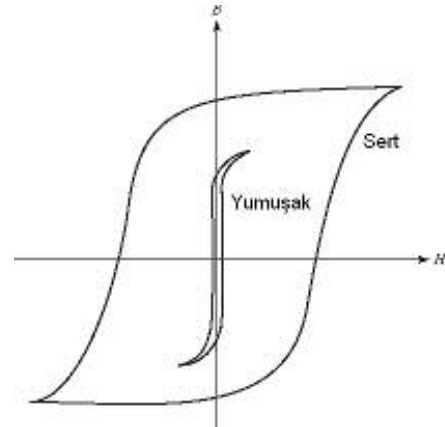
kutup çiftleri dönerek yönlendirilir. Paralel hale gelerek manyetik akıyı çok yükseltirler. Manyetik alan kalkınca tekrar dağınık hale gelir. Bazı malzemelerde ise bu yönlendirme kalıcı olur, bunlara sert manyetik malzemeler denir.

Ferrimanyetik Malzemeler: Bazı karmaşık seramiklerde farklı manyetik momentlere sahiptir ve ters yönde paralel dizilmiştir. Manyetik alan etkisiyle az da olsa ferromanyetiklere benzer davranışlar gösterirler.



Malzeme Alan etkileşimi – Histerizis

Manyetik alan yön değiştirirse kutup çiftleri yön değiştirirler. Bazı malzemelerde bu sırada çok enerji harcanır, iç sürtünmeler malzemenin



Histeriz içinde kalan alan çevrim boyunca kaybolan enerjidir.

ısınınca neden olur. Ayrıca kutup çiftleri dönerken bağ boyları değişir ve bir vınlama duyulur (magnetostriksiyon).

Malzemeler sert ve yumuşak manyetik malzemeler olmak üzere ikiye ayrılır.

Yumuşak Manyetik Malzemeler: Histerisiz kaybı çok az Trafolar, (transformatörlerde kullanılır, örneğin %3 civarında Sil içeren trafo saçları).

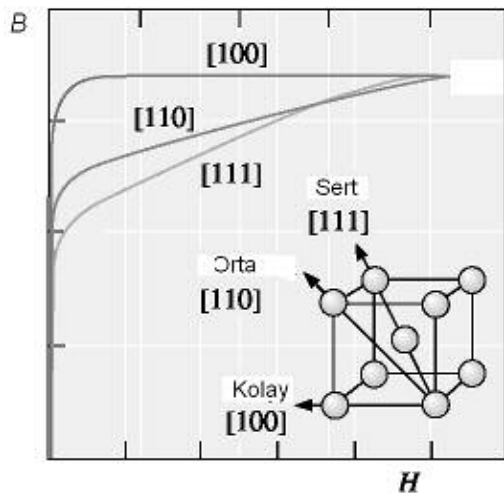
Sert Manyetik Malzemeler: Histerisiz kaybı büyüktür, manyetik alan kaldırılrsa dahi kalıcı manyetikliklik vardır, (Mıknatıslar, AlNiCo alaşımları)

Manyetikliğe Etki Eden Faktörler:

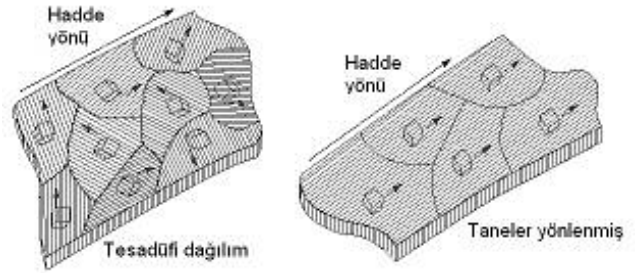
Kutup çiftleri yönlenmiş bir mıknatısta, sıcaklık arttıkça kutuplar rastgele yönlenmeye başlar. Kalıcı manyetiklik azalır ve belir bir sıcaklıkta kaybolur (Curie sıcaklığı).

Metal içindeki kafes kusurları (mesela dislokasyonlar) kutup çiftlerinin dönmesini güçleştirir. Saf ve tavlanmış demir en yumuşak malzemedir.

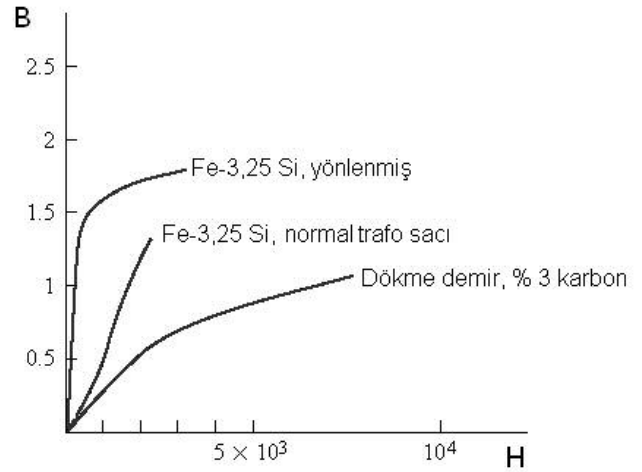
Manyetik yönlenme kristallografik doğrultuya da bağlıdır. Aşağıdaki şekilden görüldüğü gibi hmk demir kafesinde malzeme [100] doğrultusunda en yumuşaktır, yani bu doğrultuda yönlenmiş bir malzemede histerisiz kayıpları en azdır.



Enerji kayıplarını azaltmak amacı ile trafo yapımında kullanılmak üzere, taneleri yönlenmiş çelik saçlar geliştirilmiştir.



Taneleri yönlenmiş trafo saçları



Bazı demir esaslı malzemelerin manyetiklik özellikleri

14. İngilizce Malzeme Terimleri

A

abrasive wear	abrazif aşınma
activation energy	aktivasyon enerjisi
addition polymerization	ekleme polimerizasyonu
additive	katkı
adhesive wear	adezif aşınma
age hardening	yaşlanma sertleşmesi
aggregate	parçacık
aggregate composite	parçacıklı kompozit
alloy	alaşım
aluminum alloy	alüminyum alaşımı
amorphous	amorf
anion	negatif iyon, anyon
anisotropic	anizotropik
annealing	tavlama
anode	anot
anodic reaction	anot reaksiyonu
aqueous corrosion	sulu korozyon
Arrhenius equation	Arrhenius eşitliği
atactic	ataktik düzen
atomic mass	atom kütlesi
atomic number	atom numarası
atomic packing factor	atomsal dolgu faktörü
atomic radius	atom yarıçapı
austempering	ostemperleme
austenite	ostenit
austenitic stainless steel	ostenitik paslanmaz çelik
Avogadro's number	Avogadro sayısı

B

bainite	beynit
binary diagram	ikili diyagram
blend	harman (karışım)
body-centered cubic	hacim merkezli kübik
bond angle	bağ açısı
bond length	bağ uzunluğu
bonding energy	bağ enerjisi
bonding force	bağ kuvveti
borosilicate glass	borsilikat camı
Bragg angle	Bragg açısı
Braggs law	Bragg kanunu
branching	dallanma
Brinell hardness number	Brinell sertlik sayısı
brittle	gevrek
brittle fracture	gevrek kırılma
Burgers vector	Burgers vektörü

C

carbon steel	karbon çeliği
cast iron	dökme demir
cathode	katot
cathodic reaction	katot reaksiyonu
cation	pozitif iyon
cavitation	kavitasyon
cement	çimento
ceramic	seramik
ceramic-matrix composite	seramik matrisli kompozit
chain growth	zincir büyümesi
Charpy test	Charpy deneyi
clay	kil
coherent interface	bağdaşık arayüzey
cold working	soğuk şekillendirme
colorant	renklendirici
component	bileşen
composite	kompozit
concentration gradient	konsantrasyon gradyeni
concrete	beton
condensation polymerization	yoğuşma polimerizasyonu
conductor	iletken
continuous fiber	sürekli elyaf
coordination number	koordinasyon sayısı
copolymer	kopolimer
copper alloy	bakır alaşımı
corrosive wear	korozif aşınma
coulombic attraction	koloumb çekimi
covalent bond	kovalent bağ
creep	sürünme
creep curve	sürünme eğrisi
critical resolved shear stress	kritik kayma gerilmesi bileşeni
cross-linking	çapraz bağ
crystal (Bravais) lattice	kristal (Bravais) kafesi
crystal system	kristal sistemi
crystalline	kristal yapılı
crystalline ceramic	kristal yapılı seramik
cubic	kübik
cubic close packed	kübik sıkı düzen

D

degree of polymerization	polimerleşme derecesi
degrees of freedom	serbestlik derecesi
diffraction angle	difraksiyon açısı
diffraction geometry	difraksiyon geometrisi
diffractometer	difraktometre
diffusion coefficient	yayınma katsayısı
diffusional transformation	yayınımlı dönüşüm
diffusionless transformation	yayınımsız dönüşüm
dipole	dipol

dislocation
dislocation climb
dispersion-strengthened metal
double bond
ductile
ductile iron
ductile-brittle transition temp.
ductility
dynamic modulus of elasticity

E

edge dislocation
effective dynamic modulus
E-glass
elastic deformation
elastomer
electrochemical cell
electromotive force series
electron
electron cloud
electron density
electron gas
electron orbital
electron sharing
electron transfer
electronic ceramic
electroplating
element
enamel
energy level
engineering polymer
engineering strain
engineering stress
erosion
eutectic composition
eutectic diagram
eutectic reaction
eutectic temperature
eutectoid diagram

F

face-centered cubic
family of directions
family of planes
fatigue curve
fatigue strength (endurance limit)
ferritic stainless steel
ferrous alloy
fiberglass
fiber-reinforced composite

dislokasyon
dislokasyon tırmanması
dispersiyonla sertleştirilmiş metal
çift bağ
sünek
sfero dökme demir
gevrek - sünek geçiş sıcaklığı
süneklik
dinamik elastiklik modülü

kenar dislokasyonu
effektif dinamik modülü
E-camı
elastik deformasyon
elastomer
elektrokimyasal pil
elektromotif seri
elektron
elektron bulutu
elektron yoğunluğu
elektron gazı
elektron yörüngesi
elektron paylaşımı
elektron iletimi
elektronik seramik
elektrolitik kaplama
element
emaye
enerji seviyesi
mühendislik polimeri
mühendislik birim uzaması
mühendislik gerilmesi
erozyon
ötektik bileşim
ötektik diyagram
ötektik reaksiyon
ötektik sıcaklık
ötektoid diyagram

yüzey merkezli kübik
doğrultu ailesi
düzlem ailesi
yorulma eğrisi
yorulma dayanımı (yorulma sınırı)
ferritik paslanmaz çelik
demir esaslı alaşım
fiberglas (cam elyaf)
elyaf takviyeli kompozit

Fick's first and second law
fillers
flame retardant
flexural modulus
flexural strength
fracture mechanics
fracture toughness
free radical
Frenkel defect

G

gage length
galvanic corrosion
galvanic protection
galvanic series
galvanization
galvanized steel
gaseous reduction
Gaussian error function
Gibbs phase rule
glass
glass transition temperature
glass-ceramic
glaze
grain
grain boundary
grain boundary diffusion
grain boundary dislocation
grain growth
grain-size number
gram-atom
gray cast iron
Griffith crack model
Guinier-Preston zone

H

half-cell reaction
hardenability
hardness
hardwood
heat treatment
hexagonal
hexagonal close packed
high-alloy steel
high-strength low-alloy steel
Hooke's law
Hume-Rothery rules
hydrogen embrittlement
hypereutectic
hypereutectoid

1. ve 2. Fick Kanunu
dolgu maddeleri
alev geciktirici
eğilme modülü
eğilme dayanımı
kırılma mekaniği
kırılma tokluğu
serbest radikal
Frenkel kusuru

ölçü boyu
galvanik korozyon
galvanik koruma
galvanik seri
galvaniz kaplama
çinko kaplı (galvanizli) çelik
gazlı indirgenme
Gauss hata fonksiyonu
Gibbs faz kuralı
cam
camsı duruma geçiş sıcaklığı
cam-seramik
sır
tane
tane sınırı
tane sınırı yayınımlı
tane sınırı dislokasyonu
tane irileşmesi
tane büyüklüğü numarası
gram atom
kır dökme demir
Griffith çatlak modeli
Guinier-preston bölgesi

yarım pil reaksiyonu
sertleşme kabiliyeti
sertlik
sert ahşap
ısıtıl işlem
hexagonal
hexagonal sıkı düzen
yüksek alaşımlı çelik
yük. dayanımlı düşük alaşımlı çelik
Hooke kanunu
Hume-Rothery kuralları
hidrojen gevrekliği
ötektik üstü
ötektoid üstü

hypoeutectic
hypoeutectoid
hysteresis

ötektik altı
ötektoid altı
histerisiz

I

inhibitor
insulator
interfacial strength
interstitial solid solution
intermediate compound
interplanar spacing
ion
ionic bond
ionic concentration cell
ionic radius
isostrain
isostress
isotactic
isotope

inhibitör
yalıtkan
arayüzey mukavemeti
arayer katı çözeltisi
ara bileşik
düzlemlerarası mesafe
iyon
iyonik bağ
iyonik konsantrasyon pili
iyonik yarıçap
eş uzama
eş gerilme
izotaktik düzen
izotop

J

Jominy end-quench test

Jominy-uçtan su verme deneyi

K

kaolinite
kinetics

kaolinit
kinetik

L

laminar
lattice constant
lattice direction
lattice parameter
lattice plane
lattice point
lattice position
lattice translation
lead alloy
leathery
lever rule
linear expansion coefficient
linear defect
linear density
linear growth rate law
linear molecular structure
liquidus
longitudinal cell
long-range order
low-alloy steel
lower yield point

tabakalı
kafes sabiti
kafes doğrultusu
kafes parametresi
kafes düzlemi
kafes noktası
kafes pozisyonu
kafes ötelenmesi
kurşun alaşımları
deri gibi
kaldıraç kuralı
doğrusal ısı genleşme katsayısı
doğrusal hata
doğrusal yoğunluk
doğrusal büyüme hızı yasası
lineer molekül yapısı
likidüs
uzunlamasına hücre
uzun mesafe düzeni
düşük alaşımlı çelik
alt akma noktası

M

magnesium alloy
magnetic ceramic
malleable iron
martempering
martensite
martensitic stainless steel
martensitic transformation
mass balance
materials selection
matrix
Maxwell-Boltzman distribution
mechanical stress
melting point
melting range
mer
metallic
metallic bond
metal-matrix composite
metastable
microstructural development
Miller indices
Miller-Bravais indices
mixed dislocation
mixed-bond character
modulus of elasticity
modulus of elasticity in bending
modulus of rigidity
modulus of rupture
mole
molecular length
molecular weight
molecule
monomer

N

network copolymer
network former
network modifier
network molecular structure
neutron
nickel alloy
nickel-aluminum superalloy
noble
noncrystalline
nonferrous alloy
nonoxide ceramic
nonsilicate glass
nonsilicate oxide ceramic
nuclear ceramic

magnezyum alaşıımı
manyetik seramik
temper dökme demir
martemperleme
martenzit
martenzitik paslanmaz çelik
martenzitik dönüşüm
kütle dengesi
malzeme seçimi
matris
Maxell-Boltman dağılımı
mekanik gerilme
erime noktası
erime aralığı
mer
metalsel
metalik bağ
metal matrisli kompozit
yarıkararlı
mikroyapısal gelişim
Miller indisleri
Miller-Bravais indisleri
karışık dislokasyon
karışık bağ karakteri
elastiklik modülü
eğmede elastiklik modülü
rijitlik modülü
kopma modülü
mol
molekül uzunluğu
molekül ağırlığı
molekül
monomer

ağ kopolimer
ağ oluşturuıcı
ağ deęiřtiricisi
ağ molekül yapısı
nötron
nikel alaşıımı
Ni-Al süper alaşıımı
asal
kristal yapıda olmayan
demirdışı alaşıım
oksit olmayan seramik
silikat olmayan cam
silikat olmayan oksit seramik
nükleer seramik

nucleation
nucleus

çekirdeklenme
çekirdek

O

octahedral position
ordered solid solution
overaging
oxidation
oxide
oxide glass
oxygen concentration cell

oktahedral pozisyon
düzenli katı çözelti
aşırı yaşlanma
oksitlenme
oksit
oksit camı
oksijen konsantrasyon pili

P

parabolic growth rate law
partially stabilized zirconia
particulate composite
pearlite
periodic table
peritectic diagram
peritectic reaction
permanent dipole
phase
phase field
pigment
Pilling-Bedworth ratio
planar defect
planar density
plastic
plastic (permanent) deformation
plasticizer
point defect
Poisson's ratio
polar molecule
polyethylene
polyfunctional
polymer
polymer-matrix composite
portland cement
pottery
precipitation hardening
primary bond
primary stage
primitive
property
protective coating
proton
pure oxide

parabolik büyüme hızı yasası
kısmi stabilize edilmiş ZrO_2
parçacıklı kompozit
perlit
periyodik cetvel
peritektik diyagram
peritektik reaksiyon
kalıcı dipol
faz
faz alanı
pigment
Pilling-Bedworth oranı
düzlemsel hata
düzlemsel yoğunluk
plastik
plastik (kalıcı) deformasyon
plastikleştirici
noktasal hata
Poisson oranı
polar molekül
polietilen
çok fonksiyonlu
polimer
polimer matrisli kompozit
portland çimento
çömlek
çökme sertleşmesi
birincil bağ
birinci aşama
ilkel
özellik
koruyucu kaplama
proton
saf oksit

Q

quasicrystal

kristal benzeri

R

radial cell

radyal hücre

radiation

radyasyon

random solid solution

rasgele katı çözelti

rapidly solidified alloy

hızlı katılaşmış alaşım

recovery

toparlanma

recrystallization temperature

yeniden kristalleşme sıcaklığı

recrystallization

yeniden kristalleşme

reflection rules

yansıma kanunları

refractory

refrakter, yüksek sıcaklığa dayanıklı

reinforcement

takviye malzemesi

repulsive force

itme kuvveti

resolved shear stress

kayma gerilmesi bileşeni

rigid

rijit

Rockwell hardness

Rockwell sertliği

rubbery

lastik gibi

rusting

paslanma

S

sacrificial anode

kurban anot

scanning electron microscope

tarama elektron mikroskobu

Schottky defect

Schottky kusuru

screw dislocation

vida dislokasyonu

secondary bond

ikincil bağ

self-diffusion

özyayınım

semiconductor

yarı iletken

shear modulus

kayma modülü

shear strain

kayma birim şekil değişimi

shear stress

kayma gerilmesi

short-range order

kısa mesafe düzeni

silica

silisyum dioksit

silicate

silikat

silicon

silisyum

sintering

sinterleme

slip system

kayma sistemi

soda-lime-silica glass

klasik cam

sodium chloride

soydum klorür

softening point

yumuşama noktası

softwood

yumuşak ahşap

solid solution

katı çözelti

solidus

solidüs

solute

çözünen

solution hardening

katı çözelti sertleştirme

solution treatment

çözüldürme işlemi

solvent

çözen

spalling

pul pul dökülme

specific strength

özgül dayanım

stabilizer
stainless steel
state
static fatigue
steel
strain hardening
strength-to-weight ratio
stress cell
stress relaxation
structural material
substitutional solid solution
superallloy
surface
surface analysis
surface diffusion
surface fatigue wear
syndiotactic

T

tempered glass
tempered martensite
tempering
tensile strength
termal vibration
tetrahedral
theoretical critical shear stress
thermal activation
thermal conductivity
thermal shock
thermoplastic
thermoplastic elastomer
thermosetting
tie line
titanium alloy
tool steel
toughness
transformation toughening
transmission electron microscope
TTT diagram
twin boundary

U

unit cell
upper yield point

V

vacancy
vacancy migration
valence electron
van der Waals bond

stabilizatör
paslanmaz çelik
hal
statik yorulma
çelik
pekleşme
dayanım/ağırlık oranı
gerilme pili
gerilme giderme
yapı malzemesi
yerelan katı çözeltisi
süper alaşım
yüzey
yüzey analizi
yüzey yayınımlı
yüzey yorulma aşınması
sindiyotaktik düzen

temperlenmiş cam
temperlenmiş martenzit
temperleme
çekme dayanımı
ısıt titreşim
tetrahedral
teorik kritik kayma gerilmesi
ısıt aktivasyon
ısı iletkenliği
ısıt şok
termoplastik
termoplastik elastomer
termoset
bağ çizgisi
titanyum alaşımları
takım çeliği
tokluk
dönüşümle toklaşma
transmisyon elektron mikroskopu
ZSD (TTT) diyagramı
ikiz sınırı

birim hücre
üst akma noktası

boş yer
boşluk hareketi
valans elektronu
van der Waals bağı

viscoelastic deformation
viscosity
viscous deformation
viscous
vitreous silica
volume (bulk) diffusion

vizkoelastik deformasyon
viskozite
viskoz deformasyon
viskoz
camsı silika
hacim yayılımı

W

wear
wear coefficient
whisker
white cast iron
whiteware
wood
working range
woven fabric
wrought alloy

aşınma
aşınma katsayısı
whisker (kılcal kristal)
beyaz dökme demir
porselen
ahşap
çalışma aralığı
dokuma kumaş
dövme alaşım

X

x-ray diffraction

x- ışını difraksiyonu

Y

yield point
yield strength
Young's modulus

akma noktası
akma dayanımı
Young modülü

Z

zinc alloys

çinko alaşımları

Yararlanılan Kaynaklar

1. Shackelford, **Introduction to Materials Science for Engineers**, McMillan, 1992.
2. Bargel&Schulze (çev.Güleç&Aran), **Malzeme Bilgisi**, İTÜ Yayını 1995.
3. Askeland&Phule, **The Science and Engineering of Materials**, Thomson, 2006.
4. Callister Jr., **Materials Science and Engineering**, John Wiley & Sons, 2000.
5. Ş.Güleç, **Malzeme Ders Notları**, İTÜ Makina Fakültesi, 1985.
6. K.Onaran, **Malzeme Bilimi**, Bilim Teknik Yayınevi, 1993.