

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

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 katıldır. Malzemeler insanlık tarihinde her zaman önemli bir rol oynamış ve tarih çağlarının bir çoğu o dönemde geliştirilen ve kullanılan malzemelere atfen verilmiştir (Cilali 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 bağıntılar araştırmak, bu şekilde geliştirilen temel ilkeler ve kavramlar ışığında uygulamada kullanılan malzeme türlerini sınıflara ayırarak özelliklerini incelemektir.

1.1. Malzeme Türleri

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

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozitler
- Yarı İletkenler

Metaller

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

- Kristal yapıdadırlar.
- Dayanımları yüksektir.
- Kolay şekillendirilebilirler
- Toklukları yüksektir, yani kırılgan değildir.

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

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

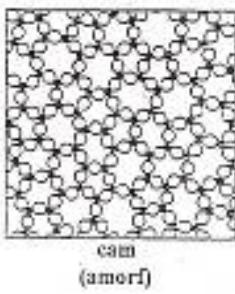
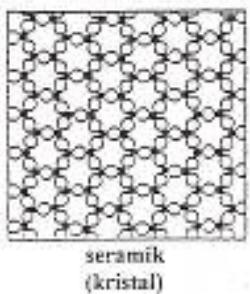
- Demir Esaslı Metal ve Alaşımları (dökme demir ve çelikler)
- Demir Dışı Metal ve Alaşımları (alüminyum, magnezyum, bakır, titanyum, nikel, çinko ve合金ları ...)

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 kırılgandır ve kolay şekillendirilemez. Seramik malzemeler alanında bu malzemelerin gevrekliklerinin giderilmesine ve kırılma tokluklarının arttırılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktır ve kırılgan 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 – ısiya dayanıklı refrakter malzeme olarak kullanılır (soba, ocak ve fırnlarda)
- 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 aralarsındaki 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 'nın 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 kırılgandırlar.
- Çekme dayanımları düşük, basma dayanımları yüksektir.
- Kimyasal tarafsızlık (inert) gibi önemli özellikler vardır.
- Saydam türleri vardır.
- Seramiklerden farklı olarak yüksek sıcaklıkta yumusatılarak veya eritilerek şekillendirilebilirler.

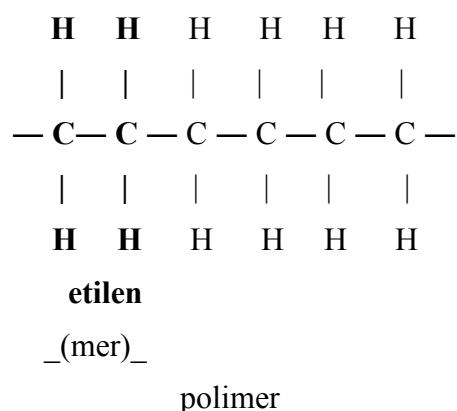
Bazı cam türleri şekillendirme işlemleri sonrası camsı durumdan kristal duruma geçirilebilirler. **Seramik cam** olarak adlandırılan bu malzemeye camsı durumda kolaylıkla biçim verildikten sonra, kristalleştirilerek seramiklerin üstün mekanik özellikleri kazandırılır.

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, **merlerin** birleşerek uzun bir zincir oluşturulması (**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:

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

Bazı sınırlamalara rağmen plastik malzemeler yaygın olarak kullanılırlar. Son yıllarda bu malzemelerin dayanımlarının

ve rijitliklerinin artırılmasına yönelik birçok gelişme sağlanmıştır ve dolayısıyla mühendislik uygulamalarında kullanımını 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.

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

Örnekler:

CTP: Cam takviyeli plastik – plastik malzeme cam lifleri ile takviye edilerek dayanım ve rijitlik kazandırılır (fiberglass).

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, transistorler gibi elemanların üretiminde kullanılır. Silisyum ve germanyum en yaygın kullanılan yarı iletkenlerdir

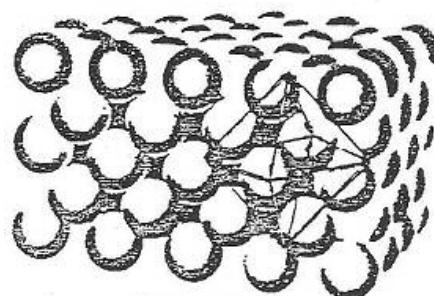
Atomsal bağlar bakımından yapılan sınıflandırmada bu malzemeler yukarıdaki dört gruba da girmez. Yarıiletkenlerde kimyasal bileşimin hassas kontrolü ile elektronik özellikler kontrol edilebilir. Bu malzemeler ve geliştirilen yeni teknolojiler sayesinde çok küçük boyutlarda elektronik devreler elde etmek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

1.2. Yapı Özellik İlişkileri

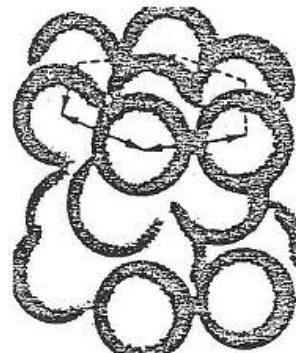
Değişik malzemelerin kendilerine has özellik ve davranışları ile bunlar arasındaki farkları anlamak için bu malzemelerin atomsal ölçekteki iç yapılarını tanımk çok önemlidir. Bu sayede her malzeme grubuna ait karakteristik özelliklerin, atomsal veya mikroskopik ölçekteki yapısal özellik ve mekanizmalardan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



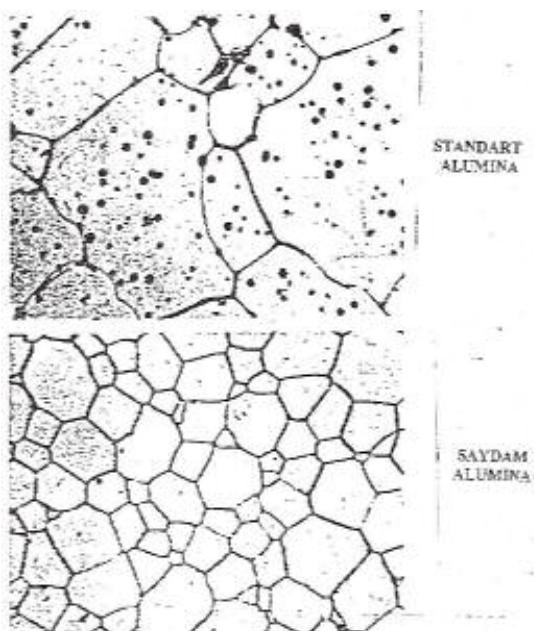
Alüminyum



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 saçılıcağından malzeme saydam değildir. Sadece % 0,3 gözeneklilik bulunması bile malzemeyi opak yapar. Uygun katkılar 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

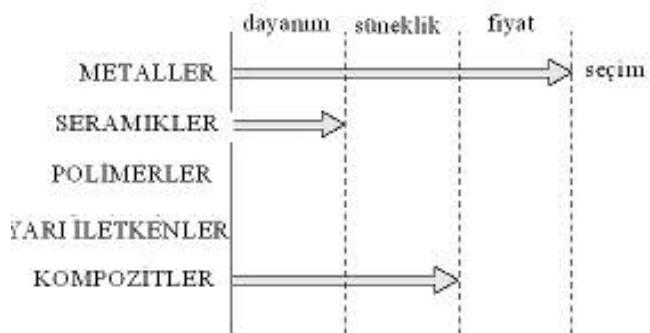
Mühendislik uygulamaları için on binlerce malzeme içinden en uygun seçimin yapılması gerekmektedir. Bu tür bir seçimde önce kullanılacak malzemenin hangi gruptan (metal, plastik, seramik v.s) olacağına karar verilmeli, daha sonra bu gruba giren malzemeler arasında en uygunu seçilmelidir. Bu seçim sırasında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

ÖRNEK

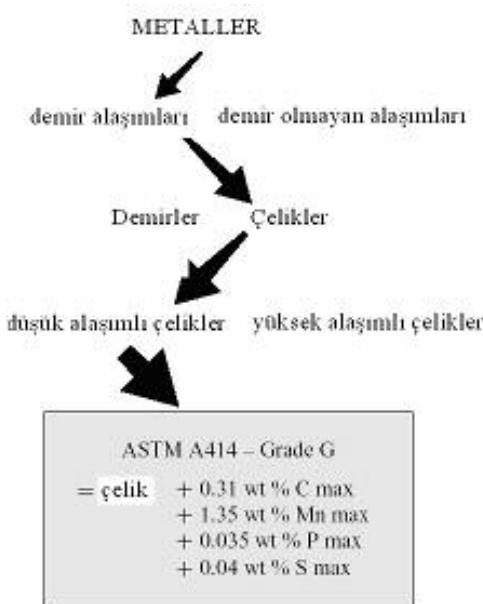
İçinde 14 MPa basıncında gaz bulunacak bir gaz tüpünü için malzeme seçelim.

Aradığımız 3 özellik vardır:
Dayanım, sümeklik ve fiyat.

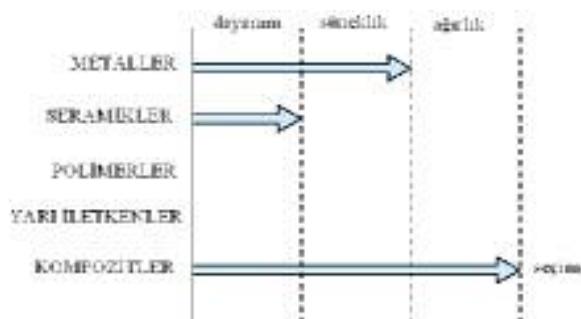
- a. Dayanım bakımından metaller, seramikler ve kompozitler seçilebilir.
- b. Ancak malzemenin kırılabilir olmasını istemediğimizden seramik malzeme kullanamayız ve bu durumda 2 seçenek kalır..
- c. Fiyat açısından baktığımız zaman ise kompozitlerin yüksek fiyatından dolayı metal tercih edilir.



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.



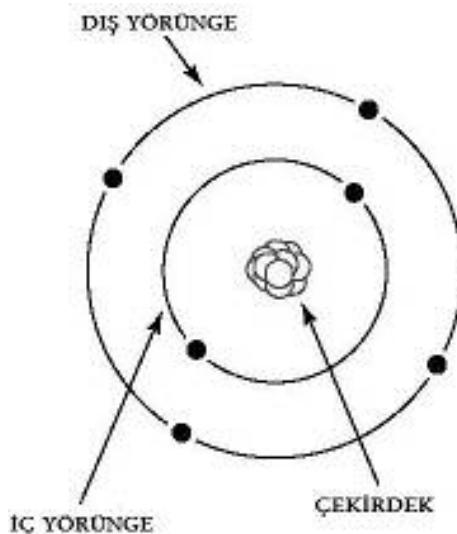
Hangi kompozitin kullanılacağı ise aşağıdaki şekilde belirlenir:



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)



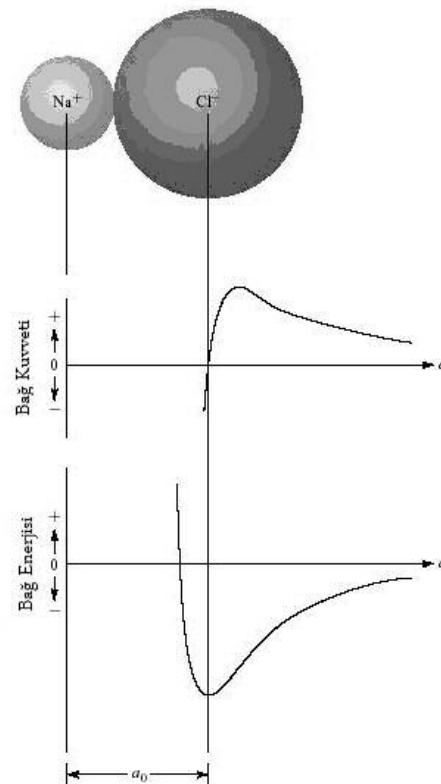
2.1. Atomun Yapısı

- Elektronlar bir çekirdek etrafında yörüngelerde bulunurlar.
- Cekirdekte protonlar ve nötronlar vardır.
- Proton ve nötronlar 1.66×10^{-24} gr ağırlığındadır. Bu ağırlık bir birim (gram-atom) olarak kabul edilir ve çekirdek küteleri bu birimle ölçülür.
- Bir gram nötron veya protonda **Avogadro sayısı** kadar tanecik vardır: $6.02214199 \times 10^{23}$
- Cekirdekte 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 küteleri 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

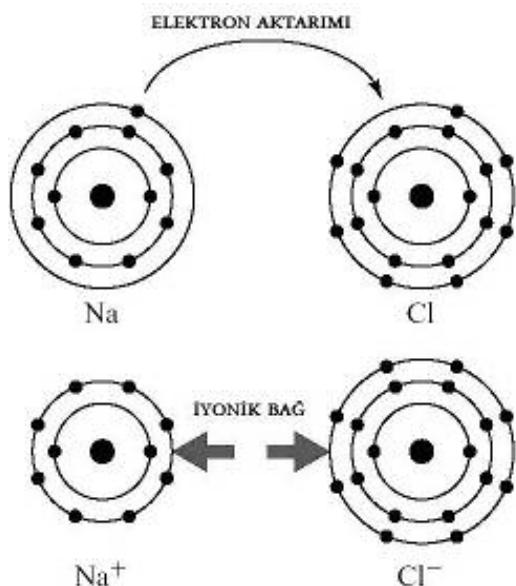
Bağ enerjisi iki atomu birbirinden ayırmak için sarf edilmesi gereken enerjidir. "Kuvvet – yol" eğrisinin altındaki alan eşittir. Kuvvet eğrisi enerji eğrisinin türevidir. Kuvvetin sıfıra eşit olduğu atomlararası çekme ve itme kuvvetlerinin eşit olduğu denge konumudur ve aynı zamanda enerji eğrisinin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



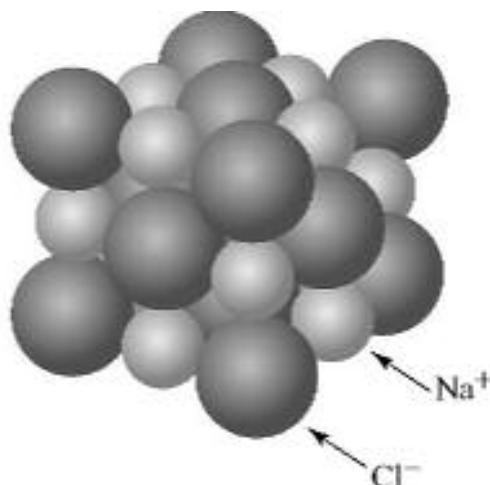
Komşu atomlar arasındaki bağlar en dış yörüngedeki (valans) elektronlarının aktarılması veya ortak kullanımı ile gerçekleşir, yani atomların bağlanması aslında elektronik bir olaydır. Bunun dışında elektron aktarımı veya paylaşımı olmayan (mesela dipol oluşturan moleküllerin ters elektriksel yüklü uçlarının 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 ilemezler, ancak sıvı çözeltiler içinde bu iyonlar hareket edebildiklerinden bir elektrolit oluşur.

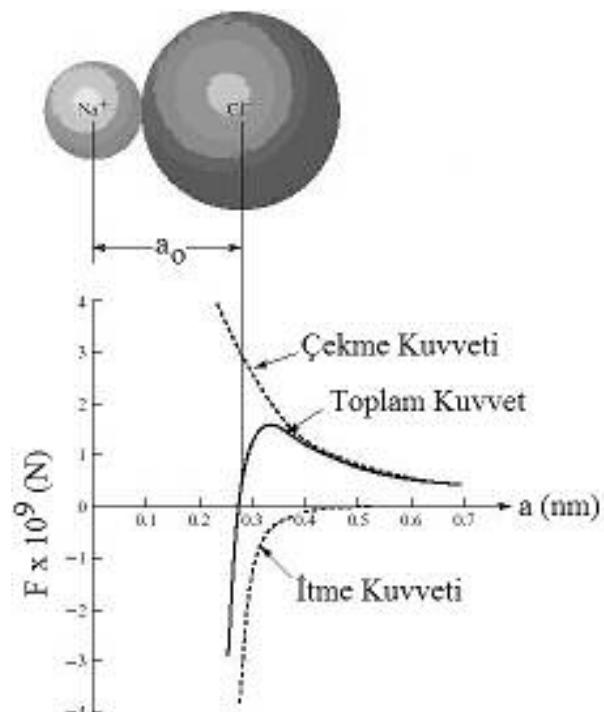


İyonik bağa sahip malzemeler, içinde (+) ve (-) atomların belirli bir düzen içerisinde yerlestiği bir kristal yapı oluşturabilirler. Örneğin NaCl molekülünde, bir elektron klora aktarılır ve sodyum katyonu ile klor ionu ortaya çıkar. Bu iki ters yükün birbirini çekmesi ile bağ oluşur. Bu bağ yöne bağlı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



Atomlararası Kuvvetler

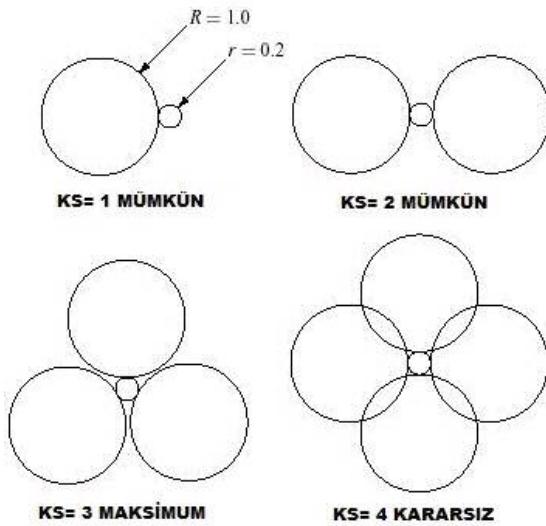
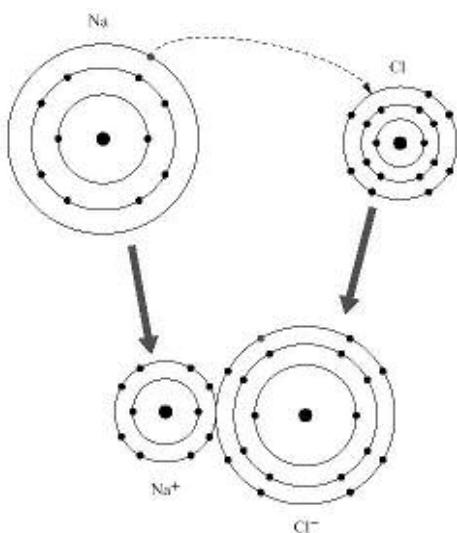
Çekme ve itme kuvvetlerinin eşit olduğu atomlar arası uzaklık, denge konumudur.



a_0 denge konumu her iki iyonun yarıçaplarının toplamına eşittir.

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

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

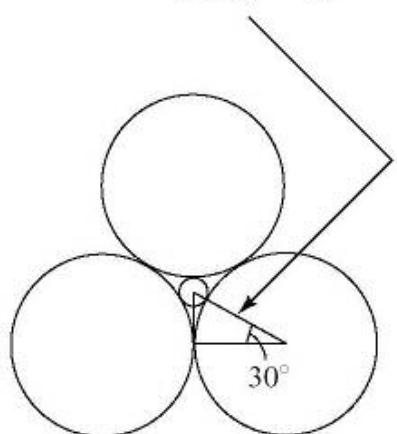


Koordinasyon Sayısı (KS)

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.

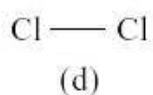
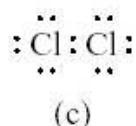
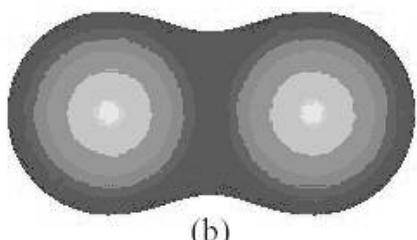
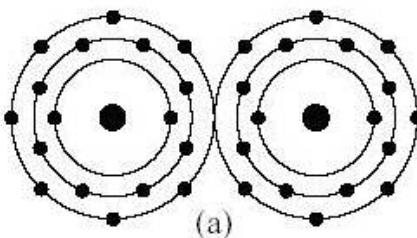
$$\cos 30^\circ = 0.866 = \frac{R}{r + R} \rightarrow \frac{r}{R} = 0.155$$



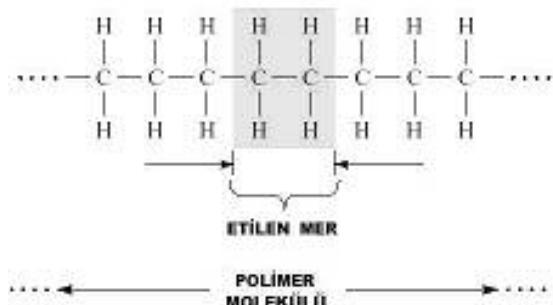
KS = 3 için minimum r/D oranının hesabı

Kovalent Bağ

Kovalent (valans elektronlarını ortak kullanan) anlamına gelir. İyonik bağdan farklı olarak yöne bağlıdır. Atomlar kendi aralarında bağ oluştururken elektron alışverişinde bulunmayıp elektronlarını ortaklaşa kullanırlar.



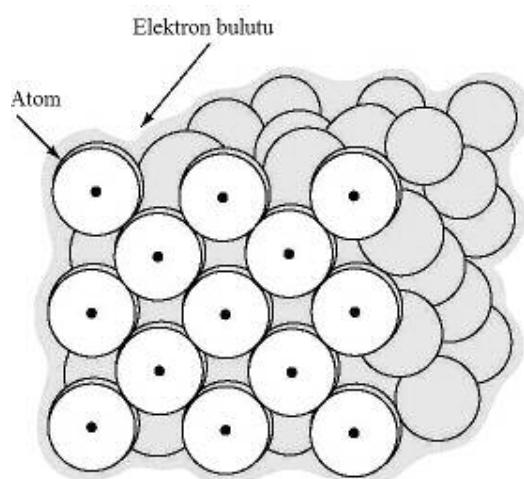
KLOR GAZI MOLEKÜLÜ



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

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 !)



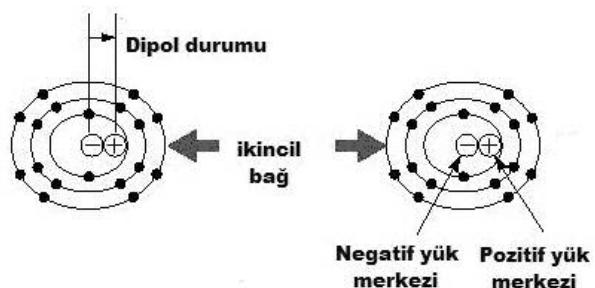
Elektronlar hareket edebildiklerinden metaller elektriği iletebilirler. İstiflenme geometrisi iyonik bağda olduğu gibi sık, koordinasyonu sayısı yüksektir, $KS = 8 - 12$.

VanDerWaals veya İkincil Bağlar

Burada elektron aktarımı veya paylaşımı yoktur ve ters işaretli elektrik yüklerine sahip yapı taşlarının iyonsal 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 karşılaşıldığında çok daha zayıftır.

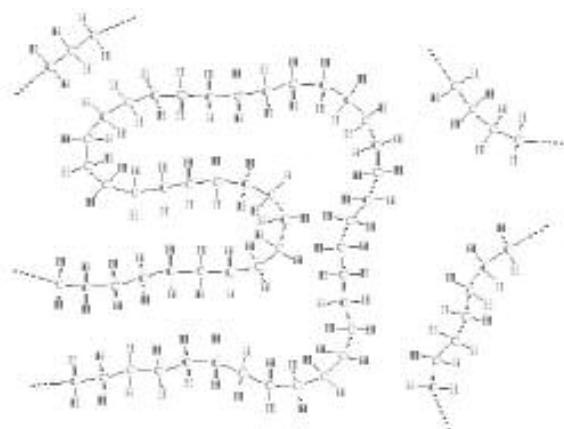
Bu tip bağlar geçici veya kalıcı dipollü olmak üzere ikiye ayrılabilir.

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 güclü olur. Buna en iyi örnek su moleküldür.

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

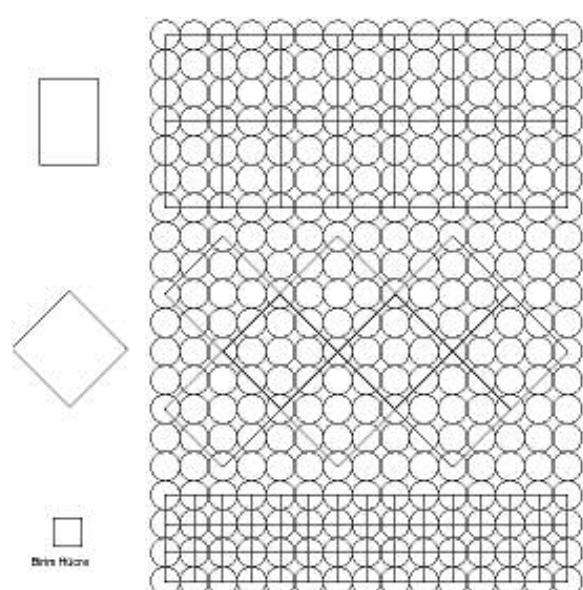
Atomlar üç boyutlu bir düzene göre dizilirler. Kristal yapı (kristal kafes) olarak adlandırılan bu yapı türü metallerde, seramiklerde, seramik camlarda ve bazı polimerlerde görülür. Polimerlerin molekül yapıları karmaşık olduğundan, bu malzemelerde kristalleşme, ancak yerel ve hacim olarak en çok %50 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		$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Oktorombik		$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Rombihedrik		$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Hekzagonal		$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Monoklinik		$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Trikliniğ		$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

Bu birim hücrelere atomların istiflenışı bakımından da farklı seçenekler vardır. Örneğin kübik kristal için:

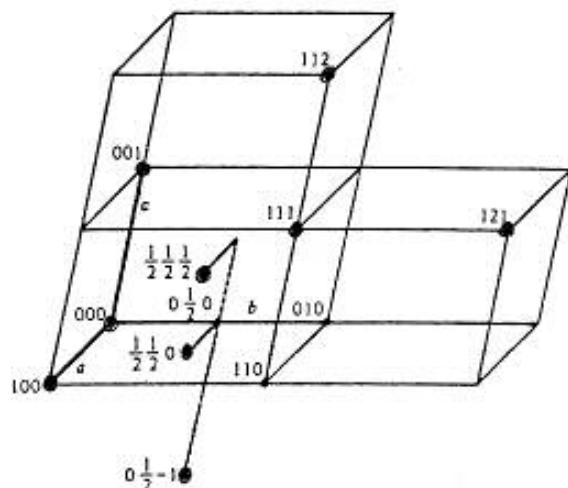


3.1. Miller İndisleri

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

Kafes Noktaları

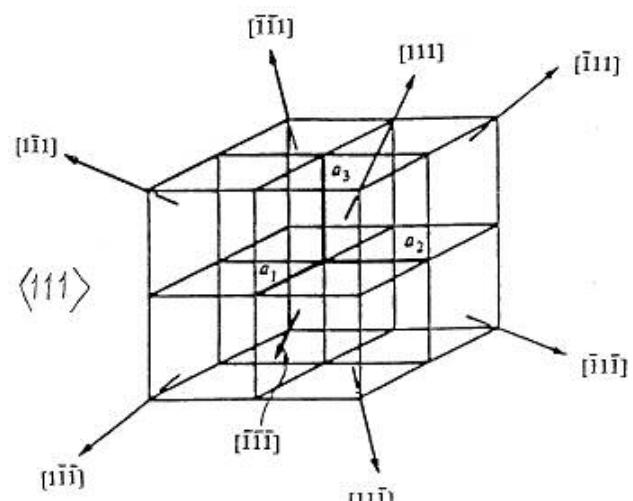
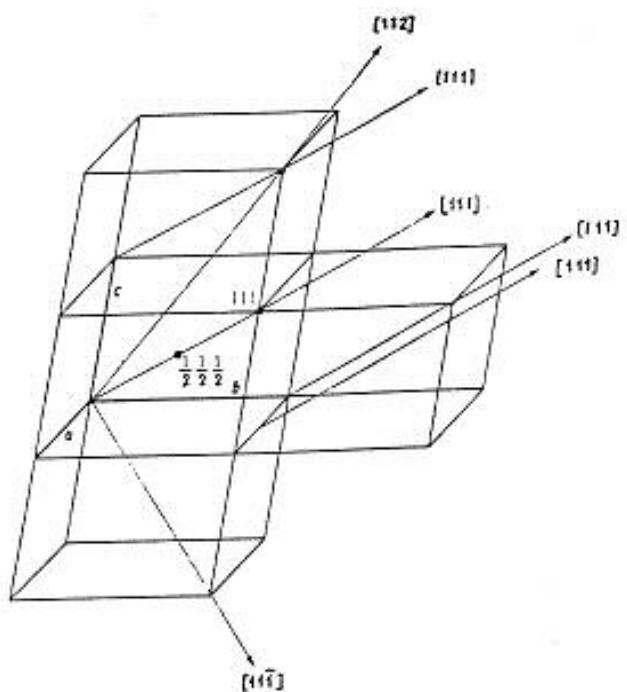
Eksen takımının başlangıcı olarak herhangi bir atom alınabilir. Kafes noktalarının konumları, birim hücrenin kenar uzunlukları birim kabul ederek bunların katları olarak verilir.



Kafes Doğrultuları:

Paralel doğrultular için tek bir indis kullanılır; bu doğrultuların indisinin belirlenmesinde, bu doğrultular arasında 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 virgüsüz olarak konur. Negatif konumlar, sayılar üzerindeki (-) işaretini ile gösterilir.

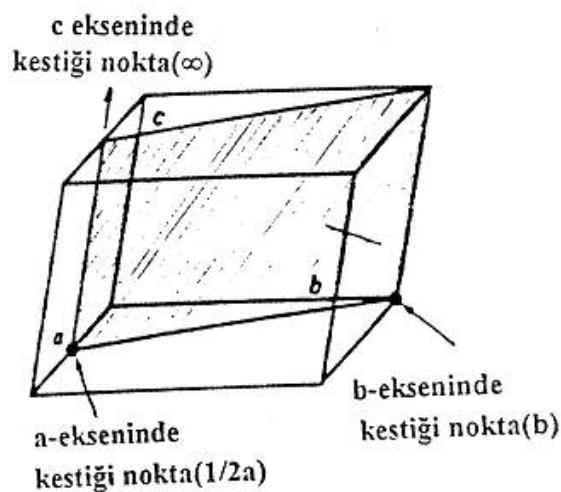
Kafes içinde birçok doğrultu kristallografik olarak eşdeğerdir, örneğin hacim diyagonalleri. Atom dizilişi bakımından aynı olan bu doğrultular bir aile olarak kabul edilir ve açılı parantez ile gösterilir.



Kafes düzlemleri:

Düzlem indisleri şu şekilde saptanır:

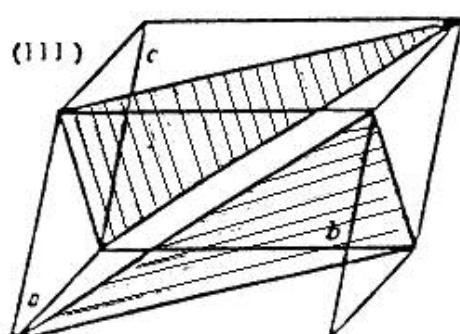
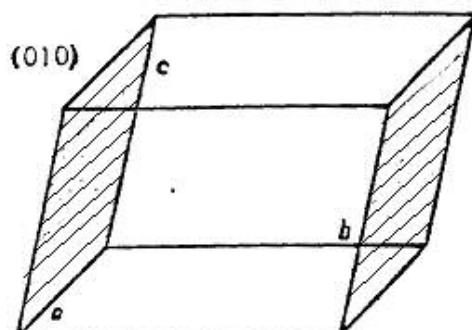
- Düzlemin eksen sisteminin başlangıcından geçmesi durumunda en yakın paralel düzlem alınır.
- Düzlemin koordinat eksenlerini kestiği noktalar belirlenir.
- Bu değerlerin tersi alınır, orantılı en küçük tam sayılar bulunur.
- Bulunan sayılar normal parantezde virgüsüz olarak ifade edilir.
- Negatif sayılar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



Miller indisleri (hkl):

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

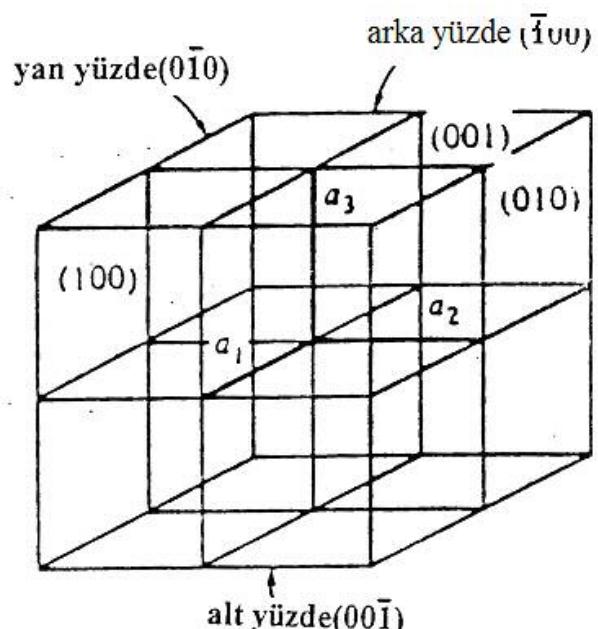
$\rightarrow (210)$



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.

Atomsal 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).

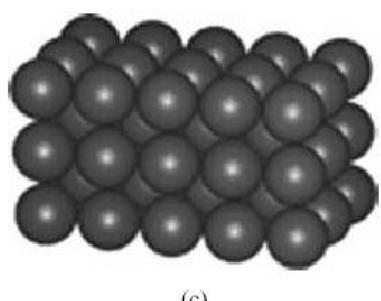
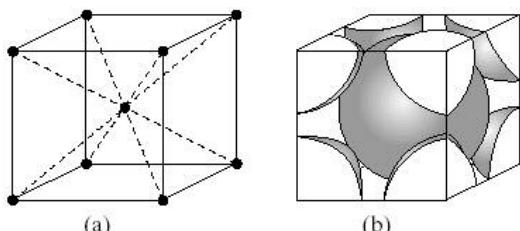
YAPI	KS	ADF	BAZI ÖRNEKLER
Basit kübik	6	0.52	-
Hacim merkezli kübik	8	0.68	$\alpha\text{-Fe}$, Ti, W...
Yüzey merkezli kübik	12	0.74	$\gamma\text{-Fe}$, Cu, Al, ...
Hekzagonal sıkı paket	12	0.74	Zn, Be, ...

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: $\alpha\text{-Fe}$, 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 varsayılar, sonra birim hücredeki atomların toplam hacmi birim hücre hacmine bölünür. Buna göre HMK'nın atomsal dolgu faktörü;

$$\text{ADF} = [\text{(Atom Sayısı/Hücre)} \times \text{(Bir Atomun Hacmi)}] / [\text{Birim Hücrenin Hacmi}]$$

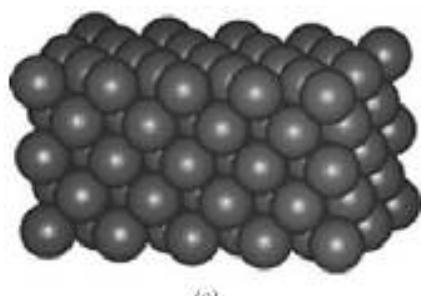
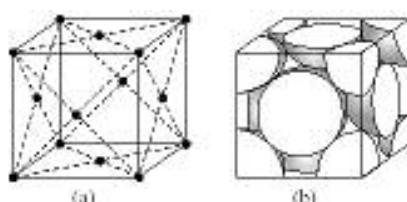
$$\text{ADF} = [2 \times 4\pi R^3 / 3] / a^3 = [2 \times 4\pi R^3 / 3] / [4R / \sqrt{3}]^3 = 0,68$$

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

Cr, $\alpha\text{-Fe}$, V, W, hacim merkezli kübik yapıya sahip metallerden bazilarıdır.

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: $1+8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$
Örnek Metaller: $\gamma\text{-Fe}$, Al, Hf, Cu, Ag, Pt

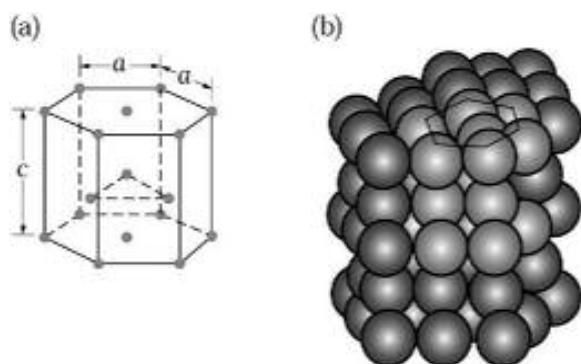
Birim hücrenin bir kenarı a , bir atomun yarıçapı da R olarak alınırsa a 'nın R cinsinden ifadesi

$a = 4R / \sqrt{2}$ dir. YMK'nın atomsal dolgu faktörü 0,74 tür. $ADF = [4x4\pi R^3 / 3] / a^3 = 0,74$

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 yapılarına göre daha karmaşıktır. Köşelerde $4x1/12=1/3$ ve $4x1/6=2/3$ 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.

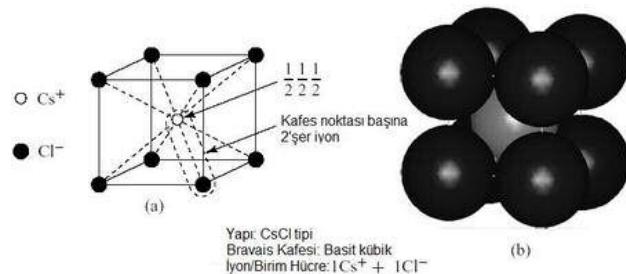
3.3. Seramiklerin Kristal Yapıları

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

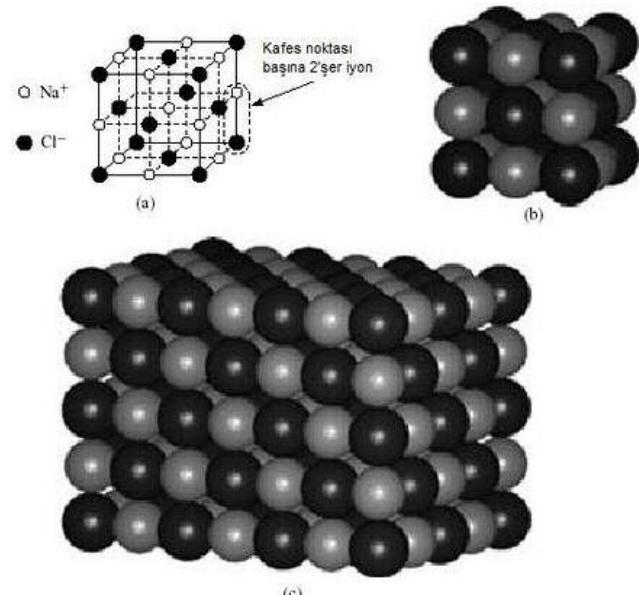
MX Formüllü Seramikler

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 yapıpura 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 yerlesirler.



M_2X_3 Formüllü Seramikler

SiO_2 , VO_2 , ThO_2 ve TiO_2 bu yapıya sahip tipik metallerdir.

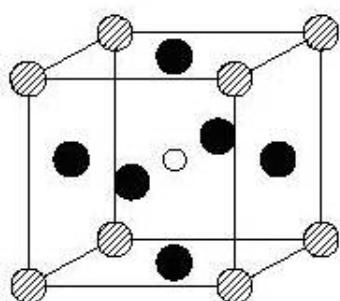
SiO_2 Yapısı: Silika veya SiO_2 mühendislikte yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Yeryüzünde ham madde olarak bolca mevcuttur. Karmaşık bir yüzey merkezli kübik yapıdadır.

M_2X_3 Formüllü Seramikler

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

$M^I M^{II} X_3$ Formüllü Seramikler

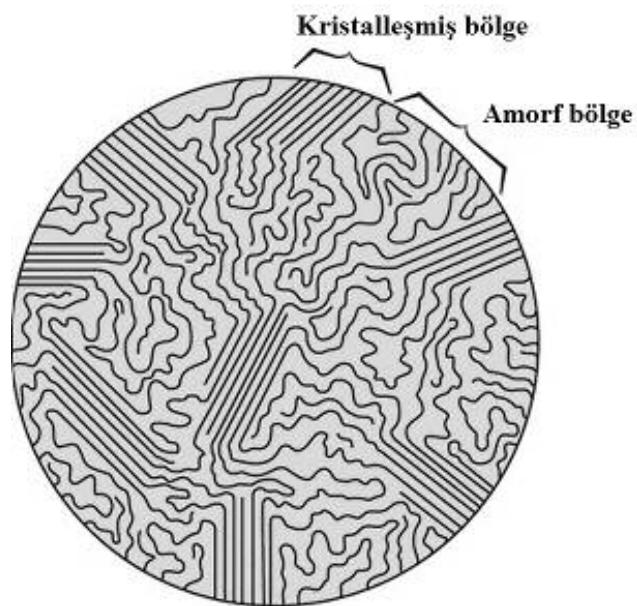
$CaTiO_3$ Yapısı: Basit kübik, yüzey merkezli kübik ve hacim merkezli kübik yapının kombinasyonundan oluşmaktadır. Köşelerde Ca^{2+} , yüzey merkezlerinde O^{2-} ve hacim merkezlerinde Ti^{4+} iyonları bulunmaktadır. Her kafes noktasında ve birim hücre başına 5'er iyon bulunmaktadır (bir Ca^{2+} , bir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

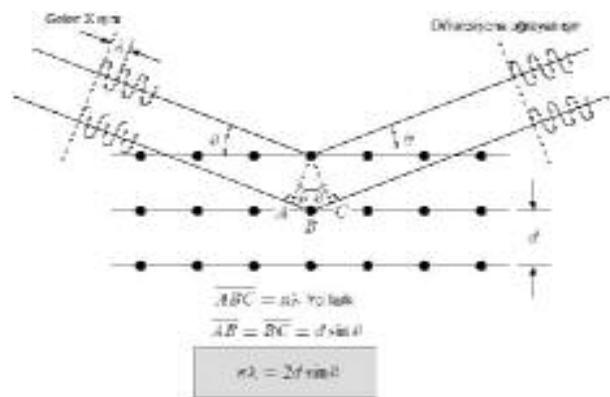


3.5. X-Işını Difraksiyonu

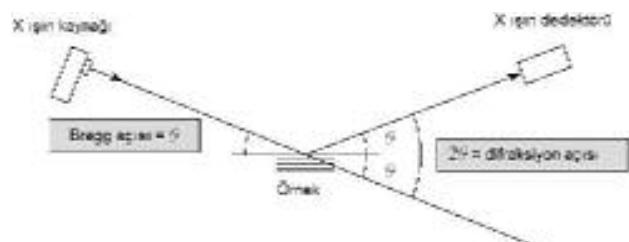
X ışınları yardımı ile, bir kristalde atom düzlemleri arasındaki etkileşim ve malzemenin kafes parametreleri belirlenebilir. X- ışınları difraksiyonu tekniği ile aynı zamanda bilinmeyen malzemelerin tanımlanması veya kafes yapıları belirlenebilir.

X ışınlarının rastladiği 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 yansımaya denklemi olarak

anılan $n\lambda = 2ds\sin\theta$ 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.

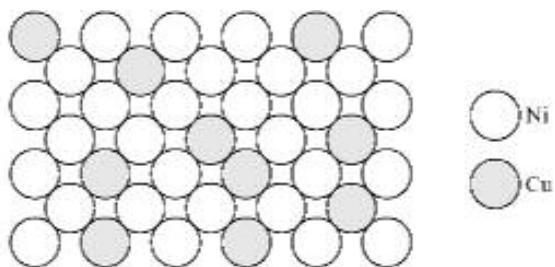
4.1. Noktasal (0-boyutlu)Kusurlar

4.1.1. Katı Çözelti (Kimyasal Kusur)

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

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

Örnek: Nikel metal kafesinin içinde bakır metalinin çözünmesi.

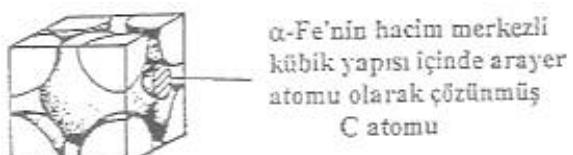


Bu tip bir katı çözeltinin her oranda oluşabilmesi (tam çözünürlük) için Hume-Rothery Kurallarının sağlanması gereklidir:

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

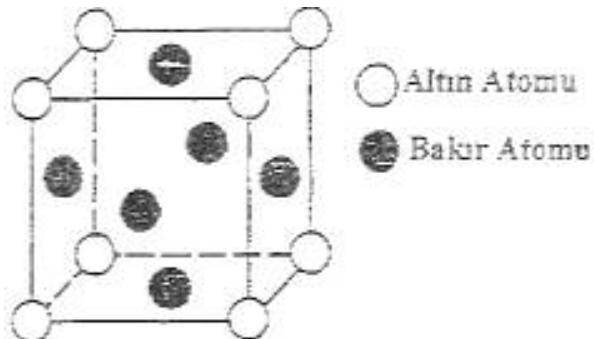
Ara yer katı çözeltisi: Metal kafesindeki boşluklara farklı atomların yerleşmesidir. Bunun için atom çiftleri arasındaki farkın büyük olması lazımdır.

Örnek: Fe-kafesinde C atomları



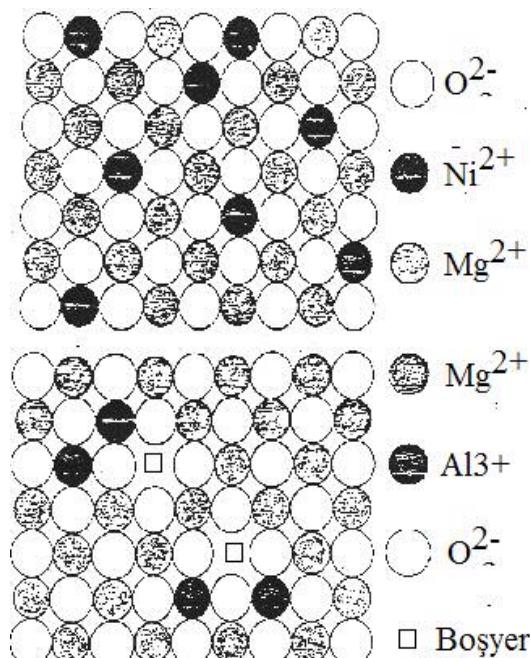
Düzenli Katı Çözeltiler: Bazı katı çözeltilerde düzenli istiflenme görülebilir (birim hacimdeki atomların karışım oranlarının sabit ve kafes içindeki yerlerinin belirli olması).

Örnek: AuCu₃ çözeltisi

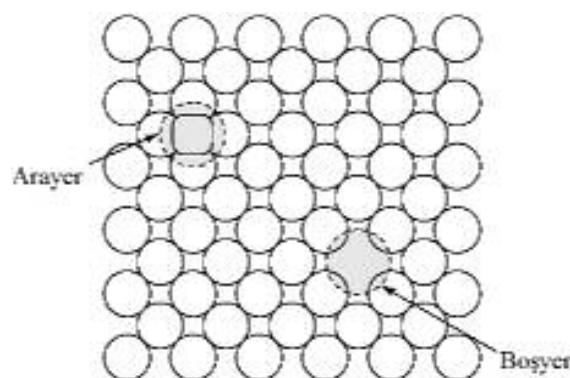


Metal dışı kristal kafeslerde katı çözelti oluşumunda (örneğin seramiklerde) katı çözelti oluşması için (özellikle iyonik bağlı kafeslerde) bir koşul vardır ve çözeltiye yeni atomların girmesi durumunda da toplam elektriksel yükün nötr olması gereklidir. Kafese giren atomun elektriksel yükünün diğer 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 olmasının gereken yerde, atomun eksikliğiidir.

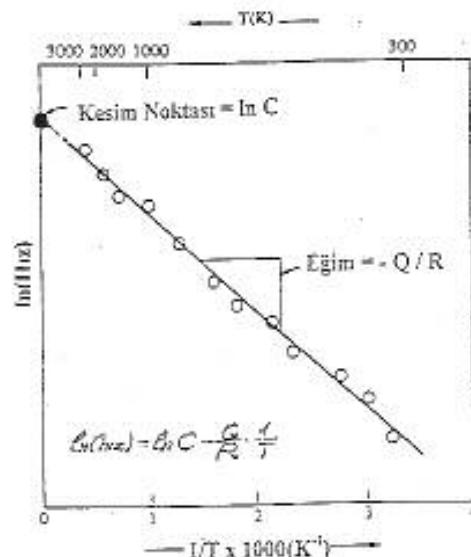
Ara yer kusuru: Atom olmaması gereken yerde fazladan bir atomun bulunmasıdır.

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

$$\text{Hız} = C \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

C: sabit
R: üniversal gaz sabitesi
T: mutlak sıcaklık

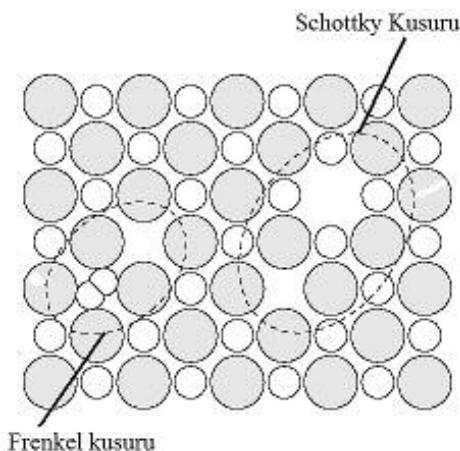
Arrhenius tipi denklem:



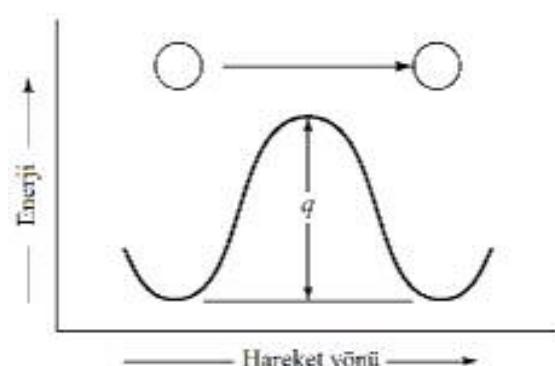
4.1.3. Frenkel ve Schottky Kusurları

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

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



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



Örneğin:

$P = \text{Gazlarda ortalama enerjiden } \Delta E \text{ kadar daha fazla enerjiye sahip bir moleküle rastlama olasılığı şu şekilde ifade edilebilir:}$

4.1.4 Noktasal Kusurların Isıl Etkilerle Oluşumu

Malzemenin sıcaklığı arttıkça enerjisi ve atomlarının denge konumları etrafında

(Maxwell-Boltzman Dağılımı)

$$H_{iz} = C \cdot e^{-\frac{q}{kT}}$$

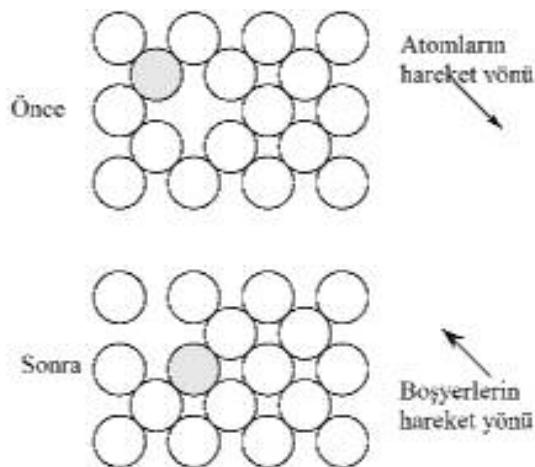
$$P \sim e^{-\frac{AE}{kT}}$$

$$k = \frac{R}{N_A} \quad \text{Boltzman sabitesi}$$

$$q = \frac{Q}{N_A} \quad \begin{matrix} \text{Birim atom (moleküll)} \\ \text{boşluk aktivasyon enerjisi} \end{matrix}$$

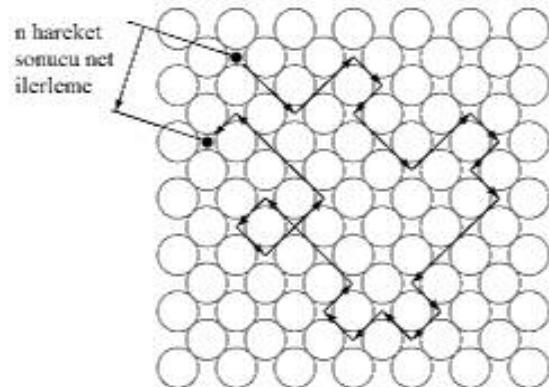
Yani malzeme sıcaklığı arttıkça atomlarının hareket hızını ve yüksek enerjili atom bulunma ihtimalini, dolayısıyla kusur oluşma şansını artırılmış oluruz. Bir kusurun oluşması için atomun gerekli eşik enerjisini aşması gereklidir. Nokta kusurları bu tür ısıl titreşimler sonucu ortaya çıkarlar.

Nokta Kusurları ve Katı Halde Yayınma: Kristal kafesleri içinde de yayılma (atomların yer değiştirmeleri) söz konudur ve bunun için kafeste boş yer olması önemlidir. Örneğin, metallerdeki noktasal kusurlar malzeme içinde atom yayılmalarını 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 gerçekleştirilebilir (demir+karbon=çelik). Mühendislikte bazı parçaların yüzeyinin sert (aşınmaya dayanıklı), iç kısımların ise az karbonlu

(daha tok) olmasını istenebilir (örneğin diş çarkları). 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 diş yüzeyine istenilen miktar ve derinlikte yayınmasını sağlanabilir. Böylece diş çarkın dış yüzeyin istenilen yüksek sertlikte, iç kısımlarının ise daha tok olması sağlanabilir.

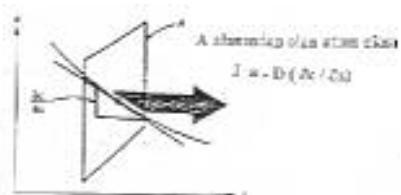
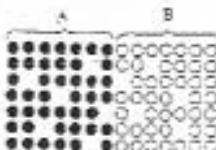


Yayınma (Fick) Kanunları:

1. Fick Kanunu

$$\dot{J}_z = -D \frac{\partial c}{\partial z}$$

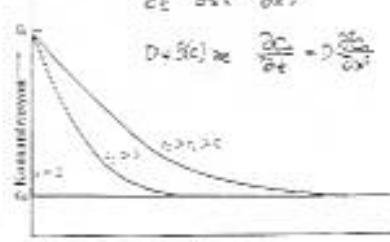
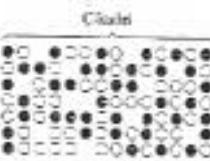
D: Yayınma katsayı



2. Fick Kanunu

$$\frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (D \frac{\partial c}{\partial z})$$

$$D + \beta(c) \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}$$

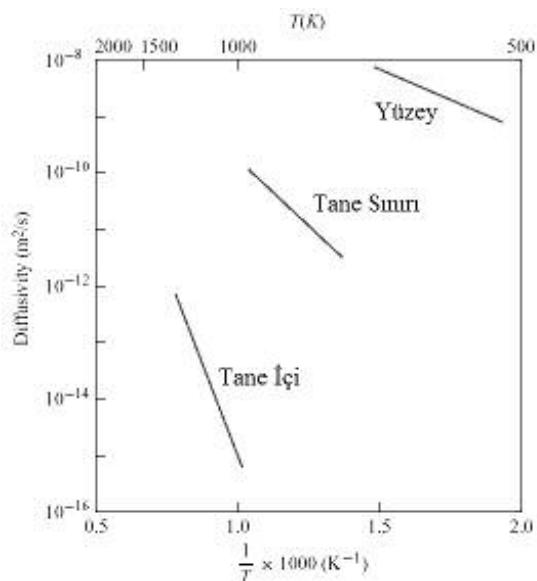


Fick kanunları difüzyon kurallarını verir. Bu denklemlerdeki difüzyon katsayısı sabit olmayıp aşağıdaki formüle göre sıcaklıkla artar. D_0 , çözgen ve çözünen atomların cinsine bağlı olan bir sabit bir değerdir.

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

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

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



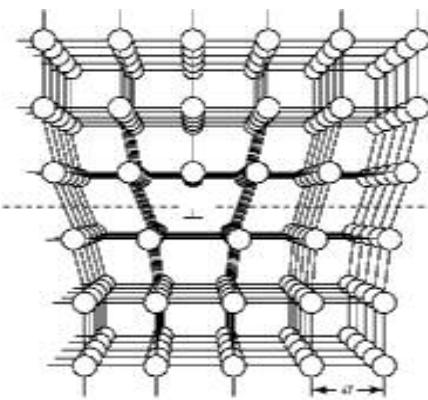
4.2. Çizgisel (1-boyutlu) Kusurlar

4.2.1. Dislokasyonlar

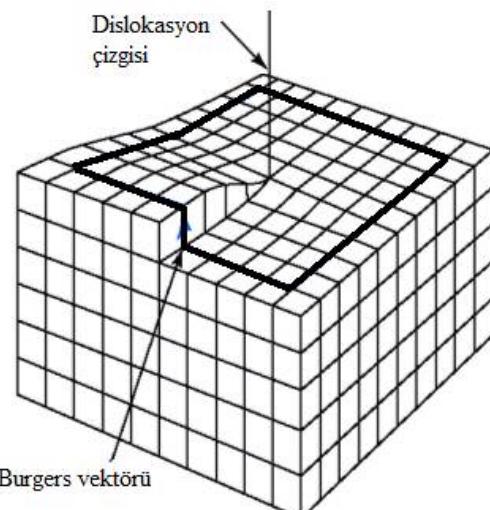
Dislokasyonlar kristal kafes içindeki çizgisel kusurlardır. İki tür dislokasyon vardır:

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.

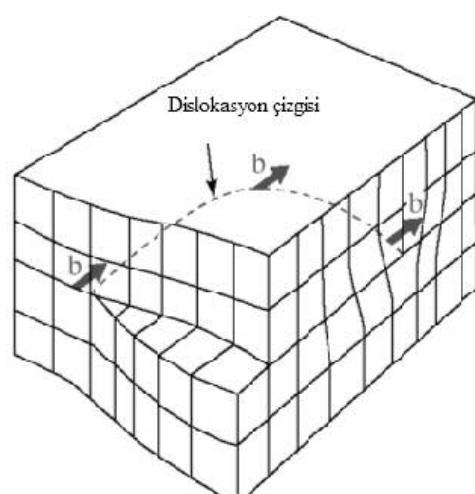


Kenar Dislokasyonu

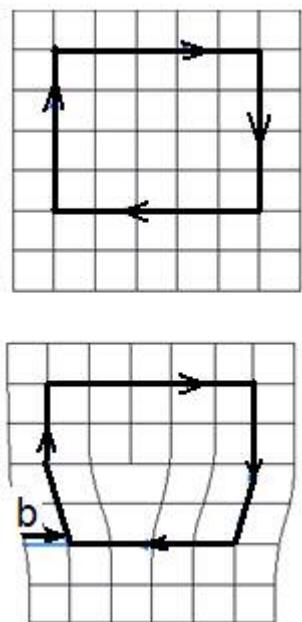


Vida dislokasyonu

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

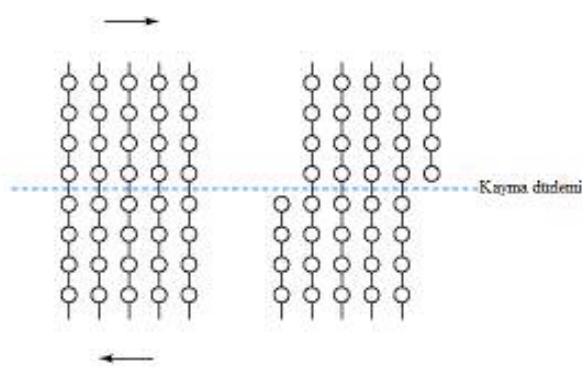


Bir dislokasyonu **Burgers Vektörü** karakterize eder. Dislokasyon çizgisini kapsayacak şekilde bir atomdan başlayıp saat yönünde aynı adımlarla önce yukarı, sonra sağa, daha sonra aşağı ve en son olarak sola doğru hareket ederiz. Bitişten başlangıca doğru bir vektör çizdiğimizde ortaya çıkan vektör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



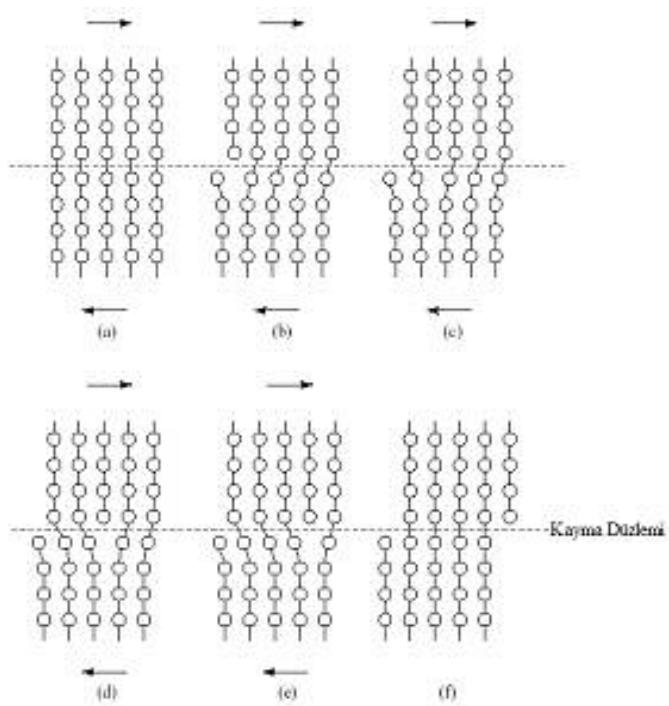
Kenar dislokasyonu için Burgers vektörü

Dislokasyonlar ve Plastik Şekil Değişimi



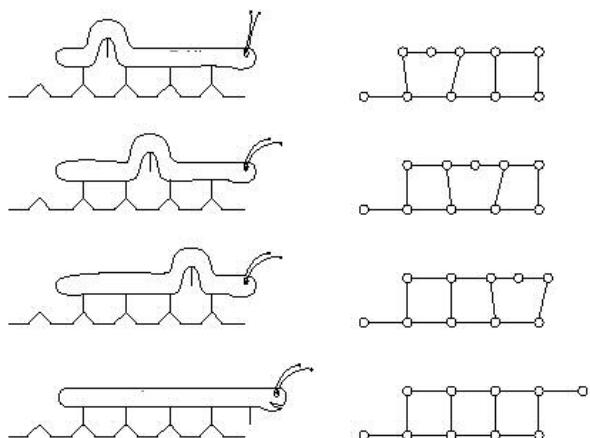
Kristal kafeste kalıcı (plastik) şekil değişimi için kafesin bir bölümünün, komşu atomlarla bağlarını koparıp kayma düzlemi boyunca ötelenmesi gerekir. Bunun için hesaplanan teorik kuvvetler

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



Dolayısıyla kristal yapılarında 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 olduğunu açıklamaya yardım 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 çalışmaktadır. Dislokasyon hareketini zorlaştıran değişik engeller sözkonusudur: **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 çarptımasına 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 davranışının dislokasyon hareketleri ile kolaylıkla açıklanabilir:

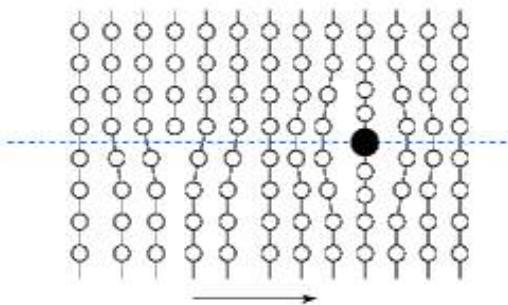
Soğuk şekil vermede pekleşme

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

arkasından gelenler ile birlikte bu bölgelerde bir dislokasyon yığılması oluşturur. Artan zorlama ile birlikte yeni dislokasyonları oluştur, sayıları gittikçe artan dislokasyonlar birbirilerini de engellemeye başlarlar. Yani malzemeyi kalıcı şekil değiştirmek için gereken gerilmenin sürekli arttırılması gereklidir. 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 gireceğiinden, dislokasyon hareketi zorlaşır ve malzemenin akma dayanımı artar.



Dislokasyonun hareket etmek istediği yön

Yüksek sıcaklıklarda pekleşme olmaması

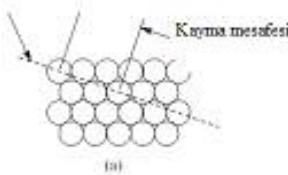
Yüksek sıcaklıklarda atom hareketliliği ve yayılma artacağından, kalıcı şekil değiştirme sonrası bozulan ve çok sayıda kusur içeren kristallerde atomlar yeniden düzenlenebilir (yeniden kristalleşme) ve dislokasyon yoğunluğu düşeceğinden pekleşmenin etkisi ortadan kalkar.

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.

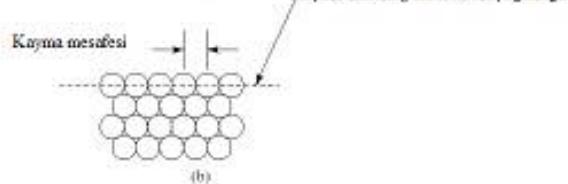
Kayma Sistemleri

Kayma düzleme (düşük atom yoğunluğu)



(a)

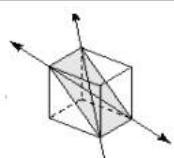
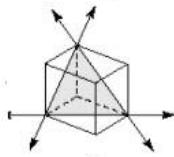
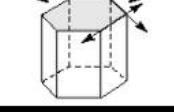
Kıyma düzleme (yüksek atom yoğunluğu)



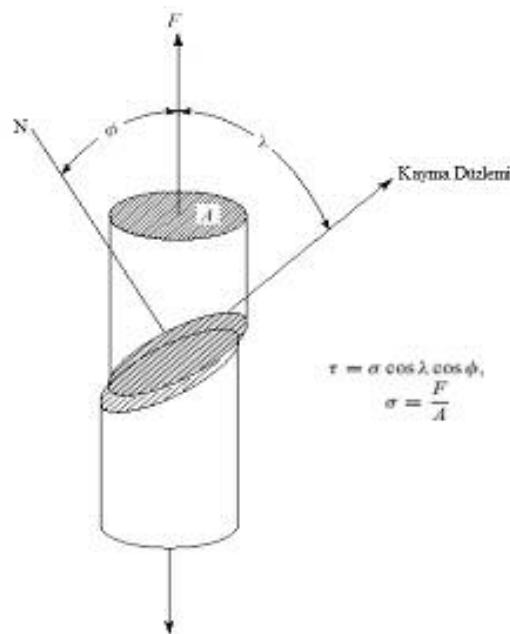
(b)

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.

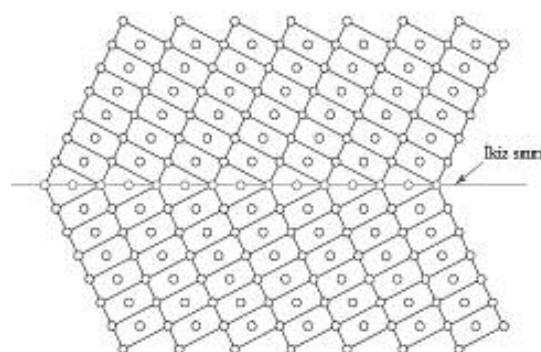
Kristal Yapı	Kayma Düzlemi	Kayma Doğrultusu	Birim Hücre Geometrisi	Kayma Sistemi Sayısı
HMK α -Fe, Mo	$\{110\}$	$<\bar{1}11>$		$6 \times 2 = 12$
YMK Al, Cu	$\{111\}$	$<\bar{1}\bar{1}0>$		$4 \times 3 = 12$
SDH Cd, Mg	(0001)	$<\bar{2}0>$		$1 \times 3 = 3$

Kritik kayma gerilmesi bileşeni

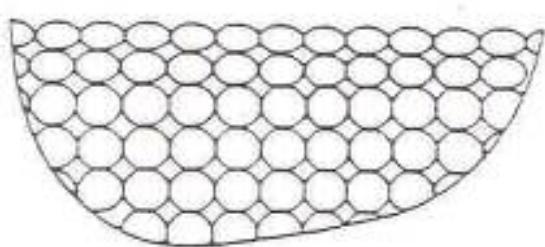


Dislokasyon hareketleri için kayma gerilmesinin etkimesi gereklidir. Tek eksenli zorlamalarda dahi (çekme, basma gibi) parça içindeki değişik kesit ve doğrultularda kayma gerilmeleri oluşur (τ) ve bu değer yukarıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir. Göründüğü gibi en büyük kayma gerilmesi çekme doğrultusu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

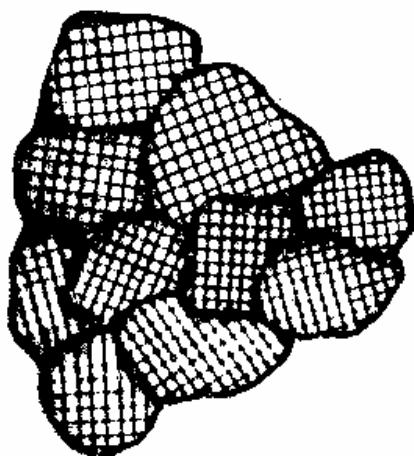
4.3. Düzlemsel (2 boyutlu) Kusurlar



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



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

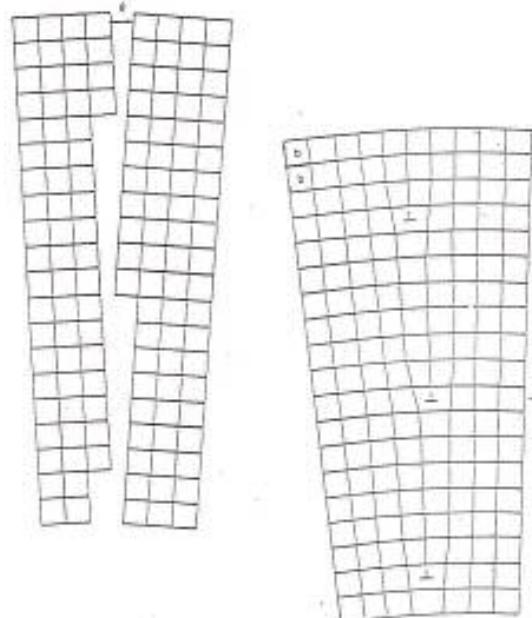


Tane sınırları: Mühendislik malzemelerinin yapıları tek bir kristalden oluşmaz. Bu malzemelerde yapıları aynı olduğu halde uzay içindeki konumları birbirinden farklı olan kristal parçacıkları (taneler) bulunur. Özel olarak üretilen tek kristaller dışında, normal malzemeler çok tanelidir. Bu nedenle tek 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.

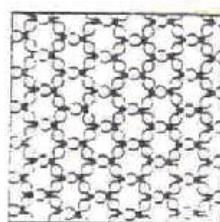
Küçük açılı tane sınırları



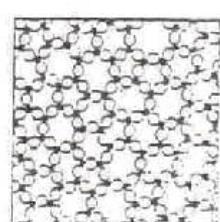
Küçük açılı tane sınırları, bitişik kafesler arasında küçük bir yönlenme bozukluğunun oluşturduğu bir dislokasyon sırasıdır. Kenar dislokasyonları tarafından oluşturulan küçük açılı tane sınırları eğik sınırlar, vida dislokasyonunun neden olduğu sınırlar ise burkulma sınırları olarak adlandırılır.

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 yararlanılır 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 tarafında 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 etkileyeceden bunları belirlemek ve izlemek mümkün olur. Transmisyon electron mikroskobunda kullanılan örnekler çok ince olmalıdır. 10-20nm (100 atom kalınlığı) kadar ince örnekler özel yöntemlerle hazırlanabilir.



Transmisyon elektron mikroskobu

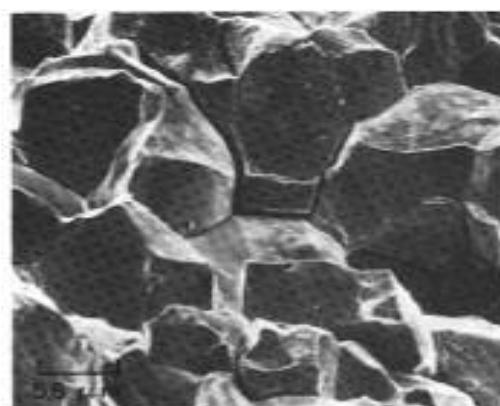
Tarayıcı Elektron Mikroskobu

Tarayıcı elektron mikroskobunda malzemenin inceltimesine gerek yoktur ve elektron ışınlarının malzemenin yüzeyinden yansımaları incelenir. Elektron ışını incelenenek yüzeye odaklanır ve yüzeyini taramaya başlar. ışının 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 faydalananarak saçılan dalga boylarını belirleyerek incelediğimiz malzeme yüzeyindeki elementleri bulabiliriz. Tarayıcı elektron mikroskobu ile malzeme yüzeyinin topografik görüntüsü de incelenebilir ve mikroskopun ayırma gücü 10nm mertebesindedir.



Tarayıcı elektron mikroskobu



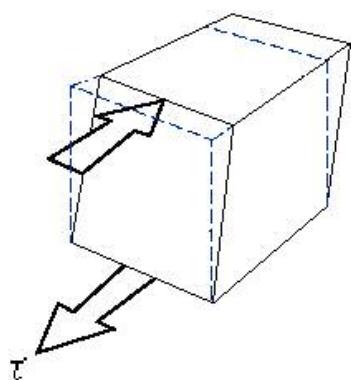
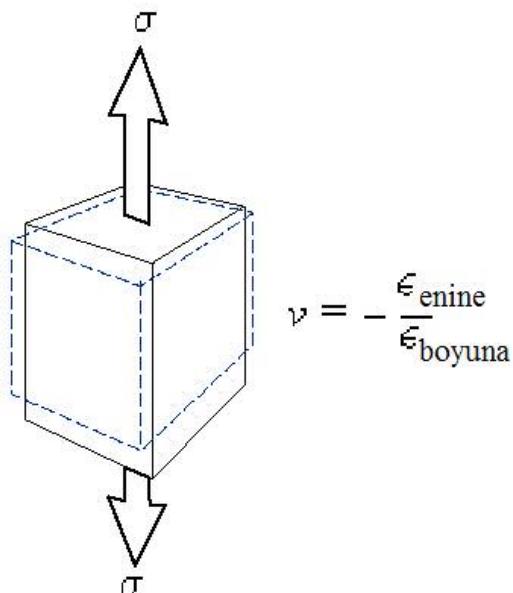
Bir metalde kırık yüzeyi

5. Mekanik Özellikler

Malzemelerin uygulanan mekanik zorlamalara altındaki davranışları, 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 davranışını ile özellikleri hakkında çok önemli bilgiler içerir.

5.1. Gerilme-Şekil Değiştirme Tanımları



Normal ve kayma gerilmeleri

Gerilme:

Herhangi bir kesitte birim alana düşen kuvvette **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 büyülüklük 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.

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

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

Kayma gerilmeleri nedeniyle oluşan açısal şekil değişimi ise boyutsuz bir büyülüklük 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.

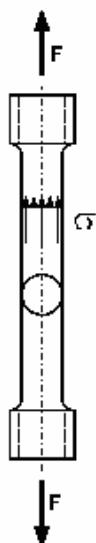
$$E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \text{ (bak çekme eğrisi)}$$

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

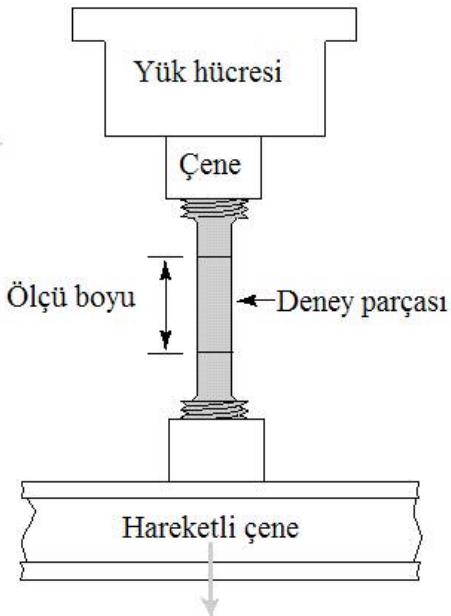
Yukarıda anılan üç elastiklik büyüğünü (**E**, **G** ve **v**) birbirinden bağımsız değildir ve aralarında aşağıda verilen bağlantı vardır, yani ikisinin bilinmesi durumunda üçüncüsü hesaplanabilir.

$$E = 2.(1+v)$$

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 yapılması 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 uniform 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

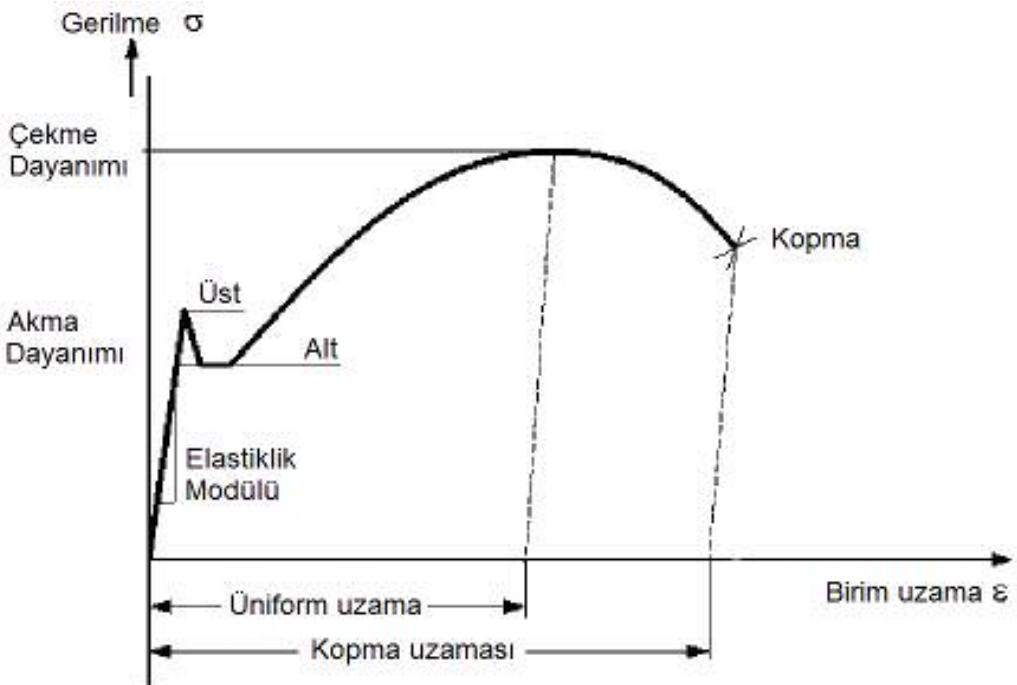
$$\sigma = \frac{F}{S_e} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right].$$

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 hesaplanması sırasında deney başlangıcındaki kesit büyüğü ve başlangıçtaki ölçü boyunun kullanılması ile elde edilen bu değerlere **mühendislik gerilmesi** ve **mühendislik birin uzaması** adı verilir. Deney sırasında 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 ilerde daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

Cekme 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 başladıkten sonra kuvvetin boşaltılması ile elastik şekil değişiminin geri döndüğü ancak kalıcı birim uzamaların kaldığı görülür.

Cekme 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.

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

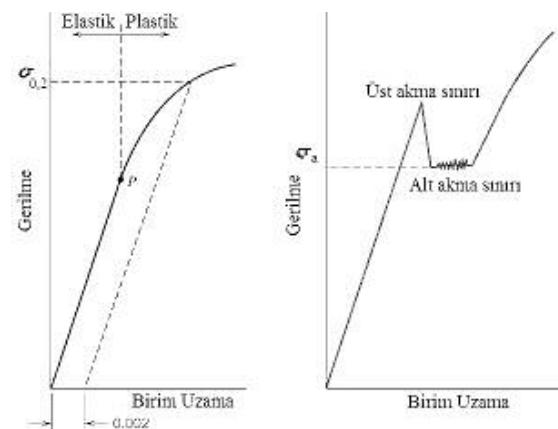
Bu değer atomlar arasındaki bağ kuvveti ve kafes yapısı ile ilgilidir. Eğri ne kadar dik olursa malzeme o kadar rijit, ne kadar yatık olursa o kadar esnek olur.

Poisson Oranı v

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

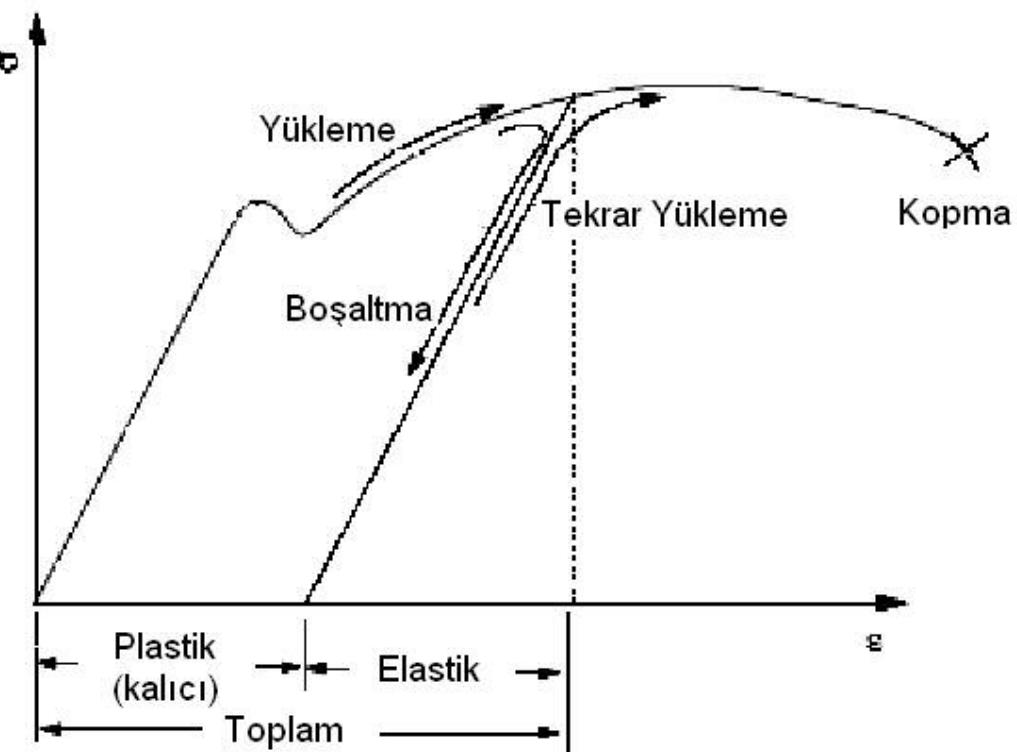
$$v = -\frac{\epsilon_{\text{enine}}}{\epsilon_{\text{boyuna}}}$$

oranı **Poisson oranı** olarak adlandırılır.



Elastiklik Sınırı σ_e

Bu değer malzemede elastiklik bölgesinin sona erdiği ve kalıcı şekil değişiminin başladığı gerilme değeridir. Bu değerin 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 olduğu (mesela %0,2) gerilme değeri akma dayanımı $\sigma_{0,2}$ olarak kullanılır. Bu değer elastiklik sınırlarından çok daha kolay belirlenebilir. Bazı özel durumlar için % 0,2'den farklı değerler kullanılabilir. Örneğin yüksek sıcaklıklarda ve plastik malzemelerde % 1 alınabilir.

Akma dislokasyonlarının hareketiyle başlar. Akma dayanımı, malzemenin kalıcı şekil değiştirmeden çıkışabilecek 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 sınırlarıyla alt akma sınırı arasında dalgalanmanın nedeni, başlangıçta kafeste bulunan ara yer atomlarının dislokasyon cephesindeki boşluklara yerleşmesi ve dislokasyonların ilk hareketini güçlendirmesidir. 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 malzemedede belirgin akma tekrar ortaya çıkar.

Kalıcı Şekil Değişimi ve Pekleşme:

Akma sınırlarından sonra kalıcı şekil değişimi başlar. Kalıcı şekil değişimi sürdürükçe, şekil değişiminin devam etmesi için gerilmenin artırılması gerektiği görülmektedir. Bunun nedeni örneğin metatsel 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 yüklemeye 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_c

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

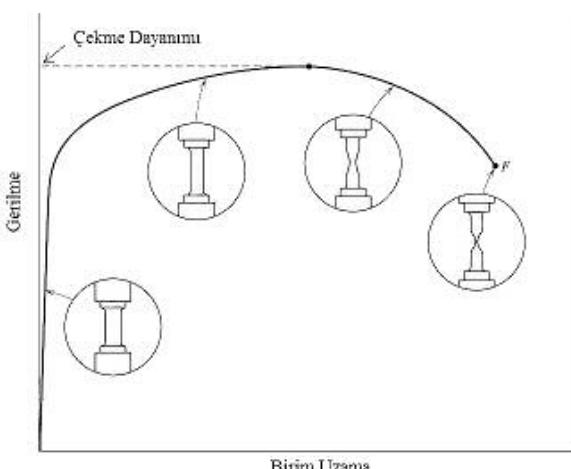
$$\sigma_c = F_m / S_o$$

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

Uniform Uzama Yüzdesi

Deney parçasında yerel büzülme başlayanın kadar (max. Kuvvet noktası) gerçekleşen uzama miktarıdır. Buraya kadar uzama üniformdur, yani parçada boy uzar, kesit üniform olarak daralar, ancak biçim korunur. Uzamanın üniform olmasını sağlayan, yani yerel büzülmeyi deneyin en başlangıcında başlamasını engelleyen pekleşme olayıdır, yani şekil değiştiren malzemenin dayanımın 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.

Uniform 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 ulaşılmasından sonra şekil değişimi devam eder ve sonunda kopma olur. 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 sonrasında en büyük kalıcı kesit değişimini başlangıç kesetine So oranıdır.

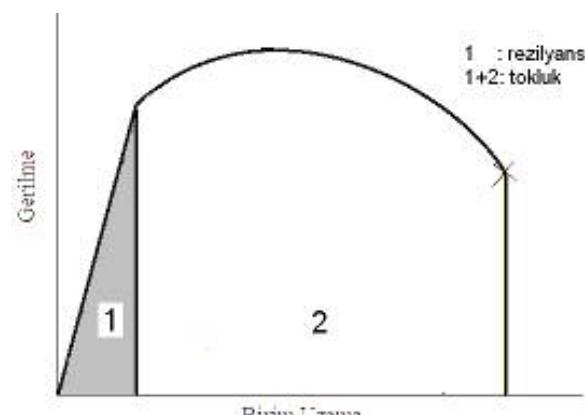
$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%]$$

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

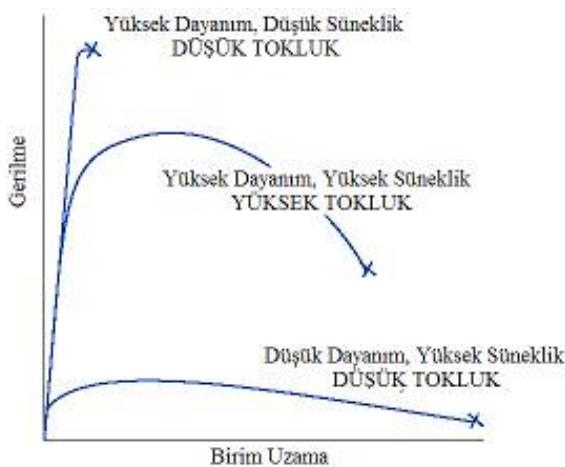
Rezilyans ve Tokluk:

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.

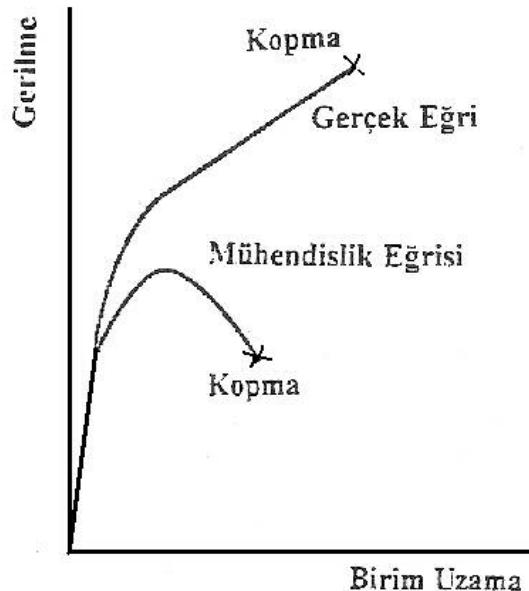
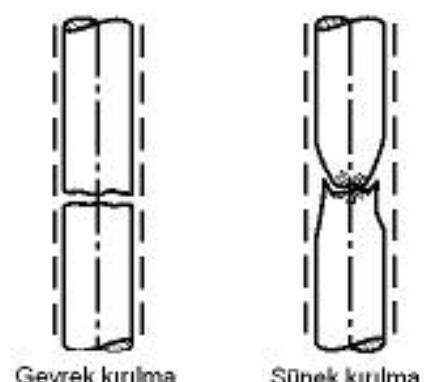


Süreklik / Tokluk

Bir malzemenin kalıcı şekil değiştirme kabiliyetine ise **süreklik** denir ve bu özellik için kopma uzaması ve kopma bütünlüğü ölçüt olarak kullanılabilir. **Tokluk** için ise malzemenin kopması için harcanması gereken enerji bir ölçütür, sürekli yanında malzemenin dayanımı da tokluk için belirleyicidir.

Gevrek – Sürek Kırılma

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



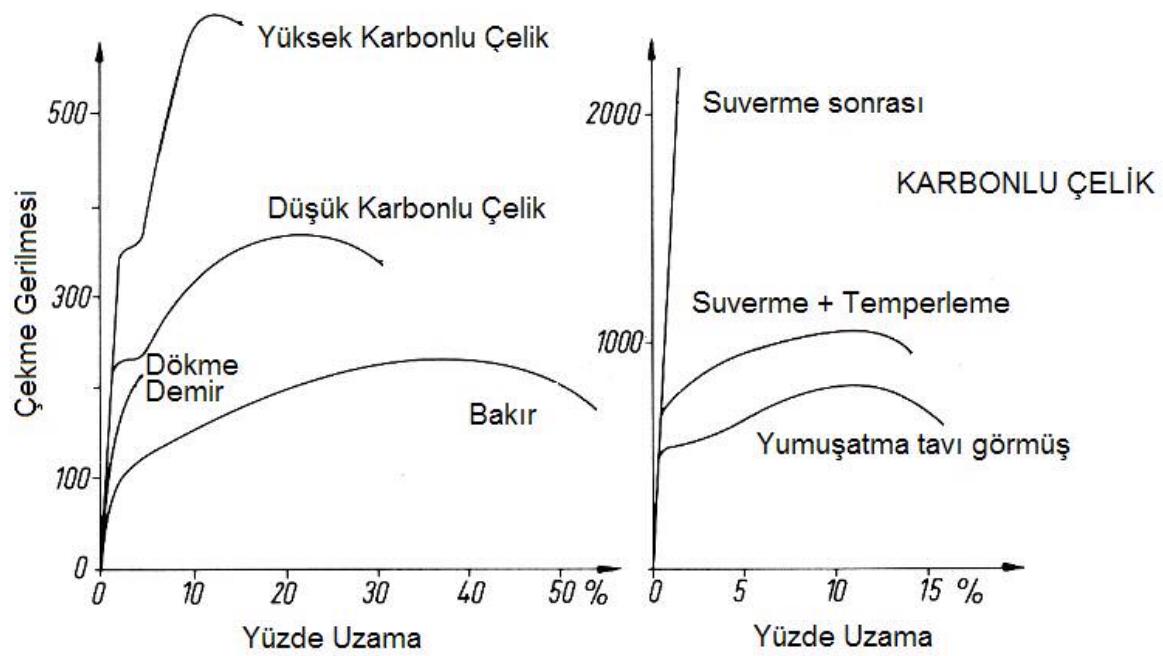
Gerçek Gerilme – Birim uzama eğrisi

Mühendislik gerilme ve **birim şekil değiştirme** değerleri, deney sırasında kaydedilen kuvvet F ve uzamaların AL başlangıç kesiti So ve ilk ölçü boyuna Lo bölünmesi ile hesaplanmıştır, yani kesit ve boy değişimleri dikkate alınmamıştır. Birçok uygulamada sadece küçük şekil değişimleri söz konusu olduğundan çoğu kaz 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 saptanmış özellikleri verilmektedir.



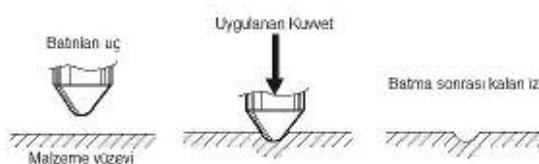
Bazı malzemelerin mekanik özelliklerini

	Elastiklik Modülü (GPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
Orta karbonlu çelik	200	600	750	17
Alaşaklı 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 cisim 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.

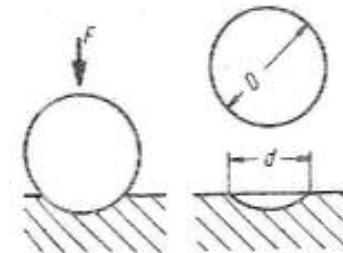
Ölçülen sertlik değerleri sadece karşılaştırma sayılarıdır, yani elde edilen değerler tasarımlarda doğrudan kullanılamaz. Ancak bu deney, kolay yapılabildiği ve sadece küçük bir iz bırakarak malzemenin dayanımı ve aşınma davranışını hakkında bilgi sağladığı için özellikle kalite kontrolde yaygın olarak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



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

Brinell Deneyi:

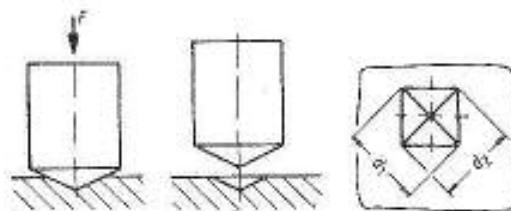
D çapında bir çelik bilya, bu çapa uygun olarak seçilmiş bir F kuvveti ile malzemenin yüzeyine bastırılır. Standart kuvvet ve bilya çapları ($1,25 - 10$ mm) seçilerek malzemeye uygun deney koşulları belirlenir. Ancak farklı bilya çapı ve bastırma kuvveti ile yapılan deneylerde sonuçlar arasında bazı farklılıklar 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. Iz yüzeyi alanının belirlenmesi için iz çapının optik olarak ölçülmesi gereklidir 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 genişdir. Çok küçük kuvvetlerle ve mikroskop altında çalışarak malzeme iç yapısındaki 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.

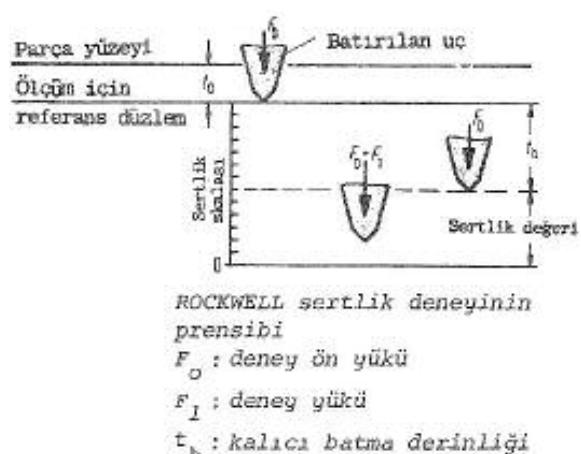
Bu yöntemin üstünlüğü, ölçülen sertliğin deneyde uygulanan kuvvetten bağımsız olmasıdır. Ancak çok küçük yüklerde elastiklik payı artar, dolayısıyla sertlik değeri biraz yüksek çıkar.

Deney	Batıcı uç	Iz geometrisi	Kuvvet	Sertlik formülü
Brinell	Bilve		P	$BHN = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers	Elmas Piramit		P	$VHN = 1.72P/d_1^2$
Knoop	Elmas Piramit		P	$KHN = 14.2P/t^2$
Rockwell	A C D } Elmas Koni B F } 1/16 bilya G } 1/8 Bilya	 t $D/t = 7.11$ $d/t = 4.00$	60 kg 150 kg 100 kg 100 kg 60 kg 150 kg 100 kg 60 kg	$R_A = 100 - 500t$ $R_C = R_D = 100 - 500t$ $R_B = 130 - 500t$ $R_F = R_G = 130 - 500t$ $R_E = R_H = 130 - 500t$

Rockwell Deneyi:

Bu yöntemde diğerlerinden farklı olarak iz yüzeyi değil, iz derinliği ölçülür. Dolayısıyla batırılan ucun oluşturduğu izin kalıcı batma derinliğini, hassas olarak ölçüerek sertlik değeri doğrudan belirlenebilir. Iz üzerinde optik ölçümlerin yapılması gerekmeden 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 ölçüerek 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.

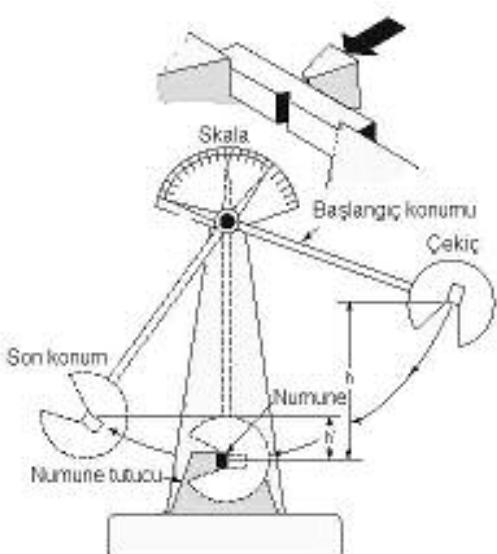
Sertlik - Çekme Dayanımı ilişkisi

Sertlik değeri malzemenin kalıcı şekil değiştirmeye olan direncinin bir ölçüyü 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 Çelği	235	750
Az Alaşımı Çelik	220	800
410 Paslanmaz Çelik	250	800
Sfero Dolome Demir	167	461
Alüminyum Alaşımı	40	150
Bronz	165	652
Monel	110-150	579

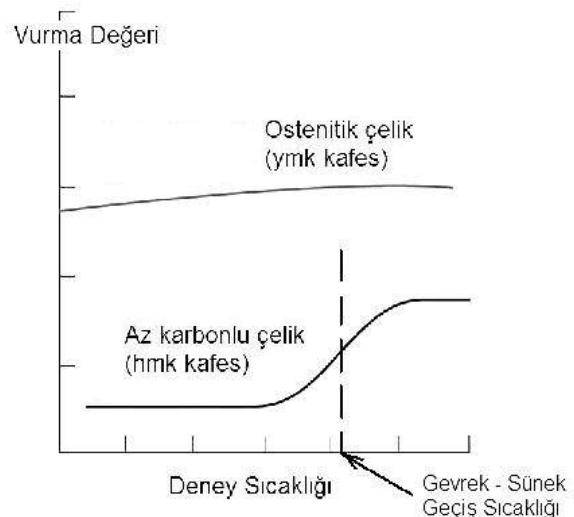
5.4. Vurma (Çentik Darbe) Deneyi

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 çekici yardımıyla kırılır ve çekicin 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.

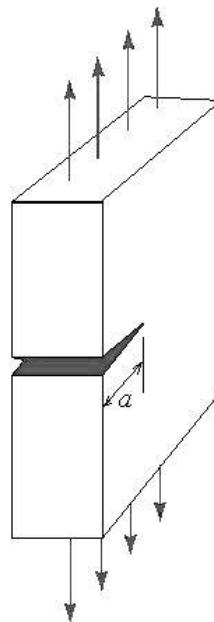


Gevrek-Sünek Geçiş Sıcaklığı

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 davranışına başlar. Bu sıcaklığın belirlenmesi için en uygun yöntem değişik sıcaklıklarda vurma deneyi yaparak şekildeki eğriye bakılmalıdır.



5.5. Kırılma Mekanığı



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 düzeylerdedir ve çatlağın oluşması ile büyümesi büyük bir hızla olur. Aniden ortaya çıkan bu kırılma türü çok tehliklidir. Özellikle tokluğu düşük yüksek dayanımlı metaller, seramikler ve

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

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

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

Kırılma Mekaniğinin 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 büyülügün **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 mekaniği 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:

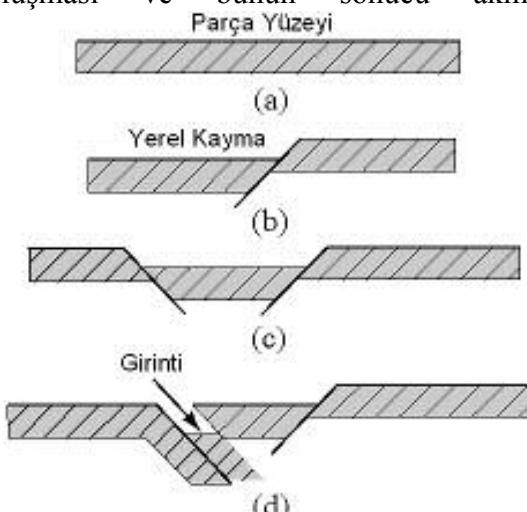
- Gerilme belirli ise çatlak boyunun kritik değerden küçük olması veya
- Çatlak boyu belirli ise gerilmenin kritik gerilmeden daha küçük olması gereklidir.

Malzemenin kırılma tokluğu K_{lc} değeri önemli bir özelliktir ve standartlarla belirlenen deneyler yardımıyla belirlenir. (K_{lc} 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 çatlığı oluşturulur. Daha sonra deney parçası çekmeye zorlanarak bu çatlağın gevrek kırılması için gerekli gerilme değeri bulunarak malzemenin kırılma tokluğu hesaplanır.

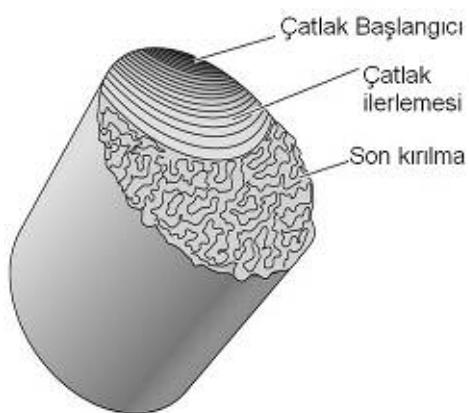
5.6. Yorulma

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 çoğunuğu yorulma kırılmalarıdır.

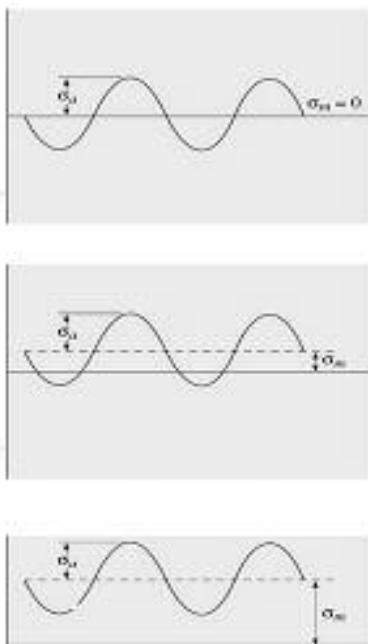
Yorulma hasarının oluşumunda iki farklı evre söz konusudur: Çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi. Çatlağın başlangıcı genellikle içyapıda veya yüzeyde bulunan çok küçük bir kusurda (iyapıda kalıntı, yüzeyde çentik, çizik vs) gerilme yiğilmesi oluşması ve bunun sonucu akma



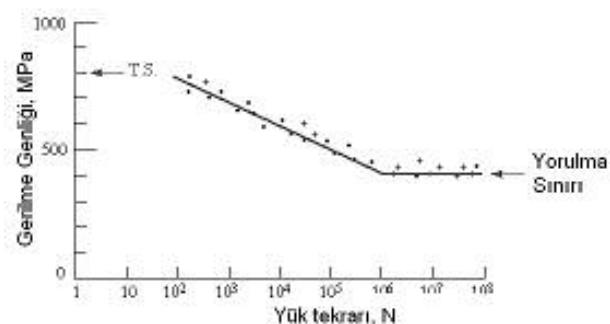
dayanımının yerel olarak aşılması ile ortaya çıkar. Yerel kaymaların bulunduğu bu bölgede yön değiştiren şekil değişimleri yüzeyde girinti ve çıkışılara, bir süre sonra da bir mikroçatlak oluşumuna neden olur. Bu mikroçatlak adım adım ilerleyerek bir makro çatlak oluşturur ve bu çatlak yeterli büyülüğe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



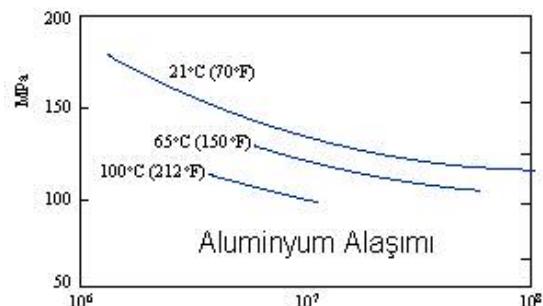
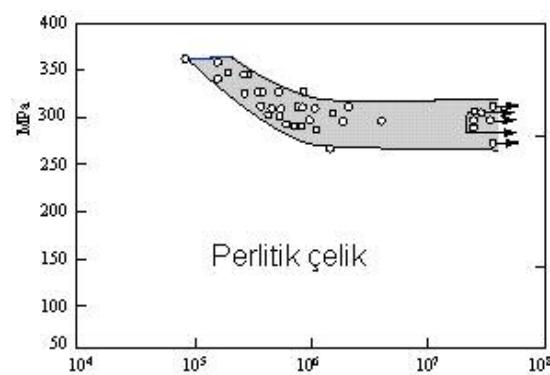
Bir yorulma kırığının karakteristik yüzeyi, üstteki şekilde görülmektedir. Çatlaşın ilerlediği bölgede yayılan dalgalara benzeyen çizgiler dikkati çekmektedir. Bu çizgiler, farklı çatlak ilerleme koşullarına tekabül eden bölgeleri ayırır ve duraklama çizgileri olarak adlandırılır. Duraklama çizgileri yardımıyla çatlaşın 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 yardımcıla 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.



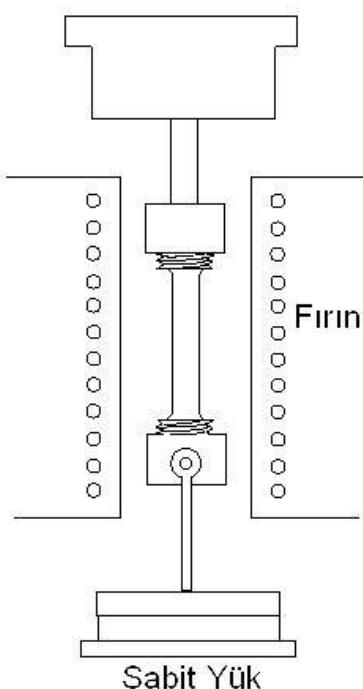
Wöhler eğrisi bazı malzemeler için (örneğin çeliklerde) bir asimtota yaklaşır, yani belirli bir gerilme genliğinin altında kalındığı sürece yorulma hasarı oluşmaz, yani malzeme sonsuz ömürlü olur. Metallerin ise birçoğunda bu asimtot görülmez (örneğin alüminyum alaşımlarında).



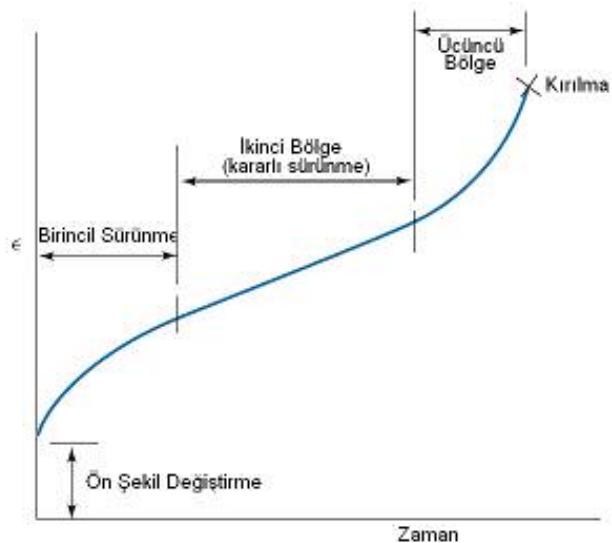
5.7. Sürünme ve Gerilme Gevşemesi

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 sürünenme eğrisi olarak çizilir.



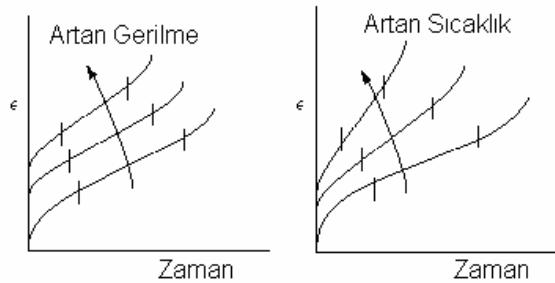
İlk yüklemede, gerilmenin etkisiyle ϵ_0 kadar bir ön şekil değişimi görülür. Daha sonra, sabit altında malzemenin boyu sürekli olarak artar. Eğrilede 3 farklı bölge dikkati çekmektedir:

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

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

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

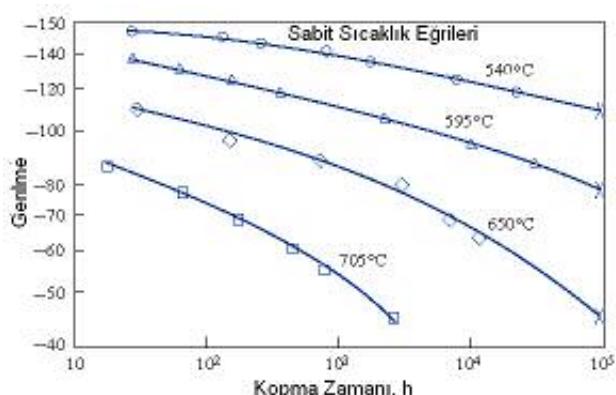
$$\dot{\epsilon}_k = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \exp - \frac{Q}{RT}$$



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

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

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



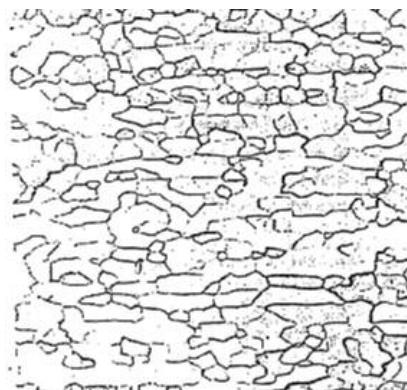
6. Faz Diagramları

6.1. Faz Kanunu

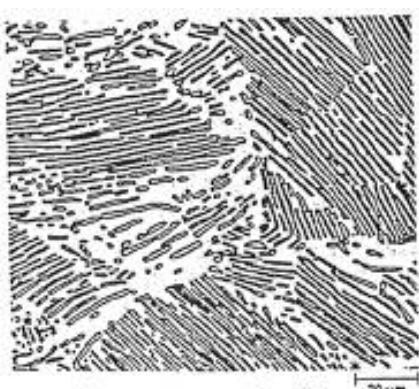
Bir madde bağ kuvvetleri etkisi altında en düşük enerjili denge konumunda bulunan atomlar grubundan oluşur. Koşullar değişirse enerji içeriği değişir, denge bozulur, atomlar daha düşük enerji gerektiren başka bir denge konumuna geçerek değişik biçimde dizilir ve sonuçta yeni bir faz oluşur.

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合金larında aynı anda birden fazla katı faz mevcut olabilir.

Bileşen: Bir合金ını oluşturan kimyasal elementlere o合金ının bileşenleri adı verilir. Faz içindeki bileşenlerin derişikliği genellikle ağırlık yüzdesi olarak verilir.



Tek fazlı içyapı (sağ molibden)



İki fazlı içyapı (perlit)

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

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

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

$$S = B - F + 2$$

B: Bileşen Sayısı

F: Faz Sayısı

S: Serbestlik derecesi

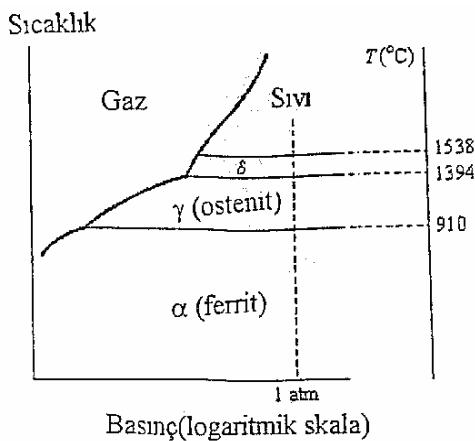
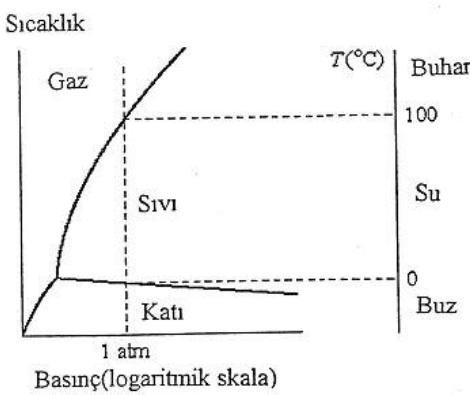
Teknikte genelde atmosfer basıncında çalışıldığından, basıncın sabit olması durumunda Gibbs Faz Kanununda serbestlik derecesinin sayısı 1 azalır (1 atm sabit basınçta)

$$S = B - F + 1$$

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 yardımcı ile belirli bir malzemede sisteminde sıcaklık ve bileşime bağlı olarak oluşacak fazların türleri, bileşimleri ve miktarları hatta iç yapılar da belirlenebilir.

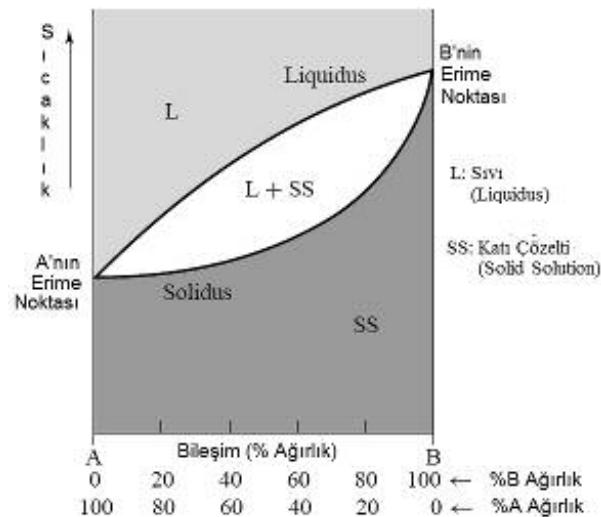
Tek bileşenli, yani derişikliğin sabit olduğu saf su için faz diyagramı aşağıda verilmektedir, bu diyagramda sıcaklık ve basınçla bağlı olarak fiziksel durum değişimleri görülmektedir. Benzer şekilde saf demire ait faz diyagramı da verilmiştir.



Faz diaigramları yardımıyla bir maddeye ait faz durumları, sıcaklık T , basınç p ve derişiklik c 'ye bağlı olarak belirlenebilir. Malzeme biliminde en yaygın olarak yararlanılan faz diaigramları, sabit atmosfer basıncı için alaşımやら ait ikili faz diaigramlarıdır ($B=2$, $p=st.$). İki bileşenli olan faz diaigramlarında yatay eksende bileşim (derişiklik), düşey eksende ise sıcaklık bulunmaktadır. Bu diaigramlar, verilen her sıcaklık ve bileşim için denge durumundaki fazlarını gösterirler.

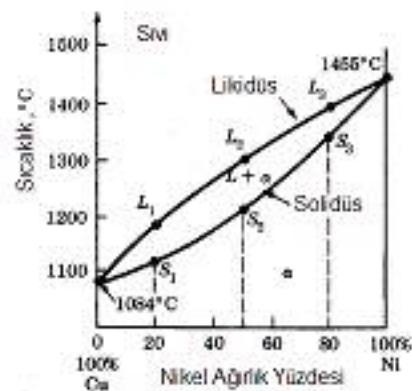
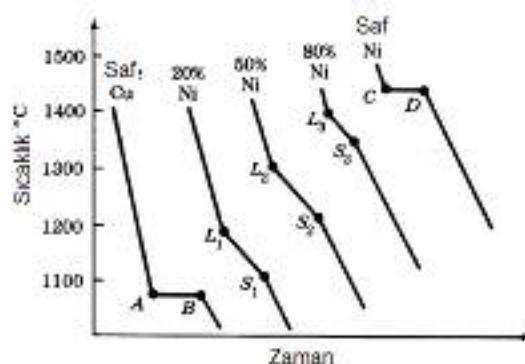
İkili Diaframımlara Örnekler:

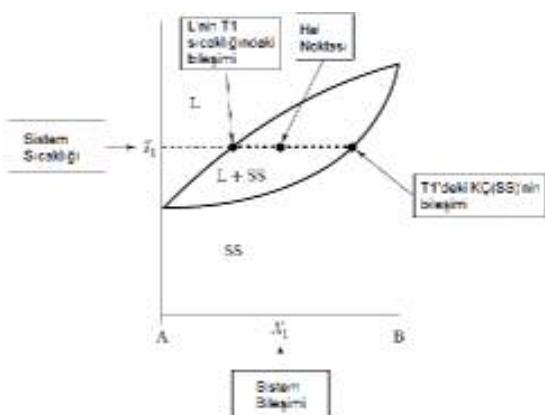
a) Katı Durumda Tam Çözünürlük: Diaframda görüldüğü A ve B bileşenleri sürekli olarak, yani her oranda tek fazlı bir yapı (SS katı çözeltisi) oluşturmaktadır. Yani düşük sıcaklıklarda her iki atom ortak bir kafes içinde birbiri içinde her oranda çözünmektedirler (tam çözünürlük). Bunun dışında yüksek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



Tam çözünürlük, alaşımやら 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 gereklidir (bak. 4.1).

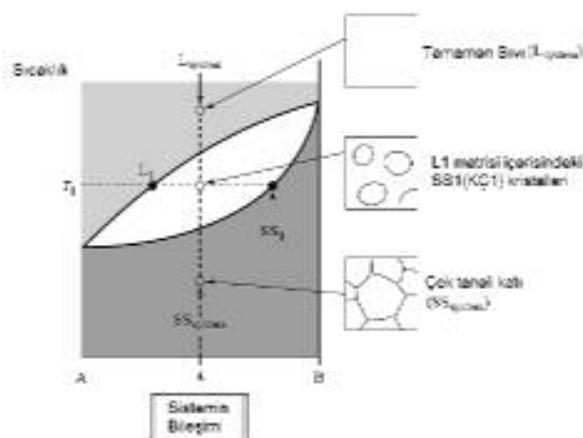
Bu tür faz diaigramları soğuma diaigramları yardımı ile elde edilirler. Birbirini içinde katı durumda tam olarak çözünen iki bileşenli bir sistem olan Cu-Ni sisteminin faz diagramının elde edilişi aşağıda görülmektedir.



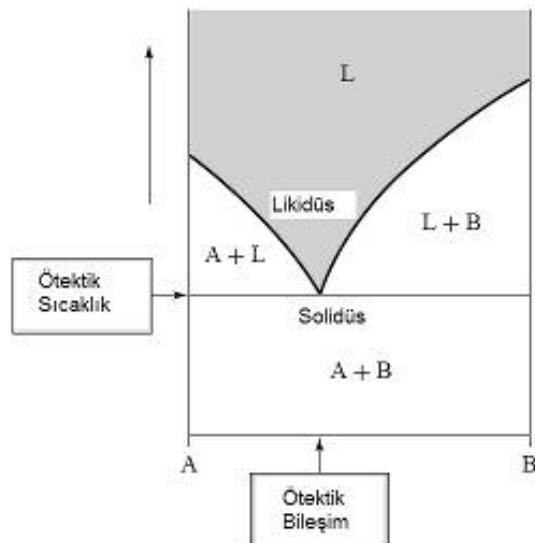


Faz diyagramları yardımıyla iki fazın birlikte bulunduğu bölgede belirli bir sıcaklıktaki fazların derişikliklerini bulmak mümkündür. Yukarıdaki diyagramda da gösterildiği gibi, önce iki fazlı bölgede likidüs ve solidüs eğrilerini kesecek şekilde bir doğru çizilir (bağ çizgisi). Bu yatayın, eğrileri 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 iç yapısının oluşumu incelenmiştir. Atomların amorf düzende bulunduğu sıvı faz soğumaya başladığında sıvı içinde kristaller çekirdeklenmeye ve taneler oluşmaya başlar (K_c1). Soğutulma işlemine devam edildiğinde ve solidüs eğrisine ulaşıldığı anda katılışma tamamlanmış ve taneli bir yapı ortaya çıkmış olur.



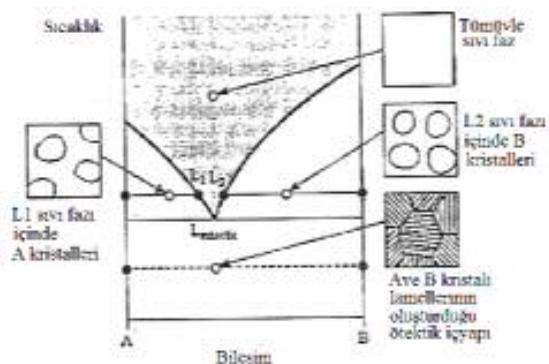
b) Çözünmezlik Durumunda Ötektik Reaksiyon



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

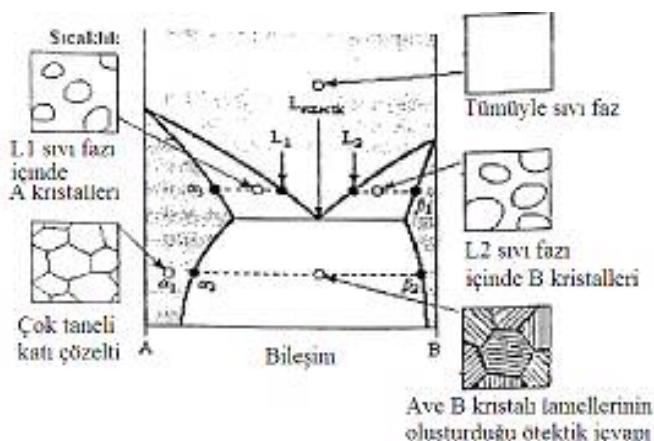
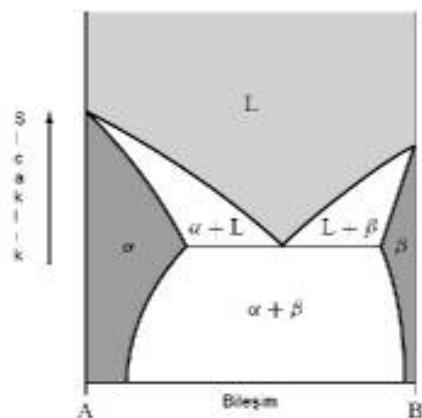
Diyagrama adını veren ötektik nokta, soğuma sırasında sıvı fazın sabit sıcaklıkta iki katı faza dönüştüğü noktadır. Bu noktanın sıcaklığına ötektik sıcaklık, bu bileşimine de ötektik bileşim denir. Her iki fazın bir arada olması nedeniyle, ötektik iç yapıları ince taneli iç yapılardır ve fazlar sıkı istiflenmiş olarak yan yana bulunurlar. Örneğin bir fazın içinde diğerı kürecik veya lamel şeklinde dağılabilir. Bu tür iç yapıların 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 katılışır.



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 diyagramının hali görülmektedir. Burada α -fazı, A atomunca zengin olup içinde belirli bir miktar B atomu bulunan bir katı çözeltidir. β -fazı ise, B atomunca zengin olup içinde belirli bir miktar A atomu çözmemiştir.



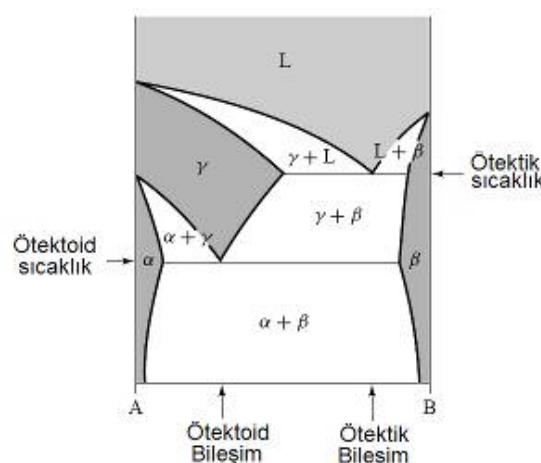
Diyagramda görüldüğü gibi ötektik bileşimde ve sıvı fazdan soğutularak elde edilen içyapı, tam çözünmezlik durumundan farklı değildir. Ancak bu noktanın sağına ya da soluna gittiğimizde sıvı içinde yukarıda da anlatıldığı gibi birincil kristalleşmeler olduğu görülür. Bazı bileşimlerde ötektik reaksiyon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

Teknik bakımdan önemli bazı ötektik (veya yakın ötektik) alaşımalar

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

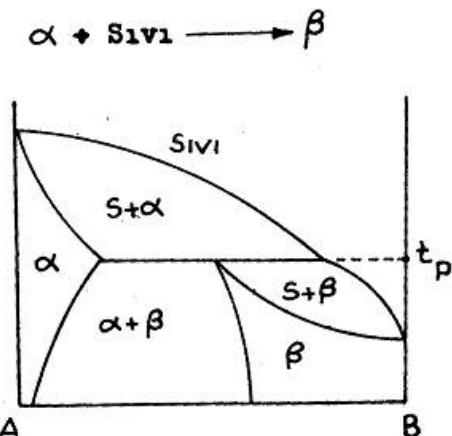
d) Ötektilid Reaksiyon

Ötektik reaksiyona benzer şekildedir; burada bir katı çözelti sabit sıcaklıkta iki farklı faza ayırmaktadır.(Ötektilikte sıvı faz, iki katı faza ayırtır)



e) Peritektik Reaksiyon

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

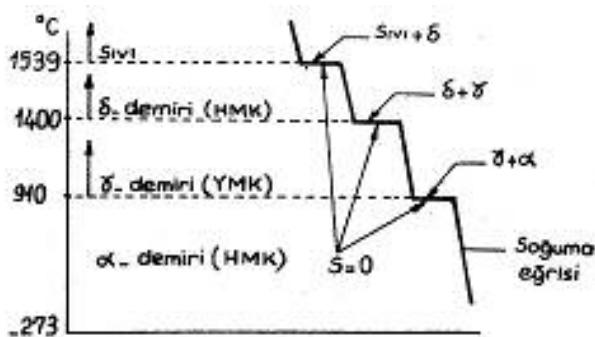


f) Peritektoid Reaksiyon

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.

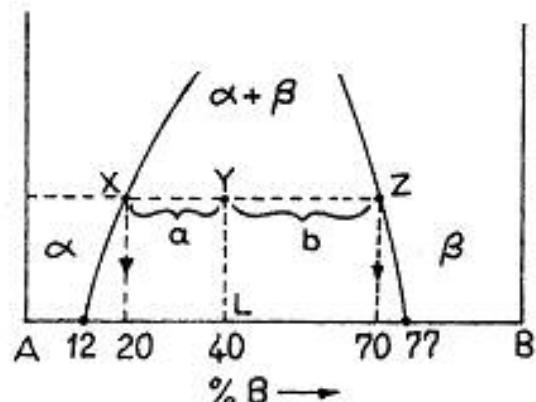


Fazların ağırlık oranının hesaplanması (Kaldırıcı Kuralı):

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

- Hangi fazların bulunduğu,
- Fazların bileşimleri ve

• Fazların ağırlık oranları.

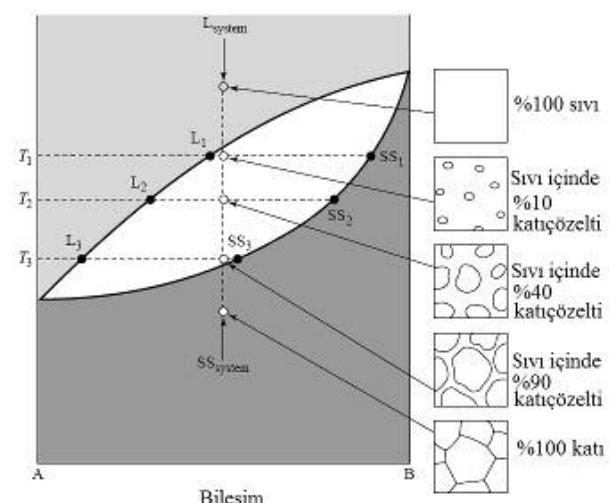


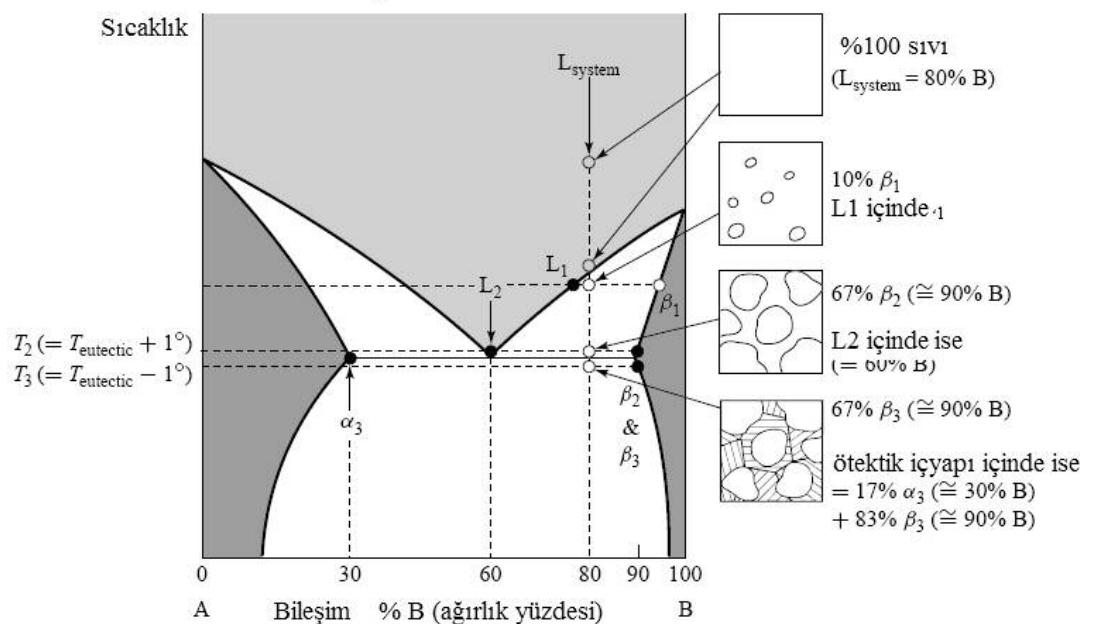
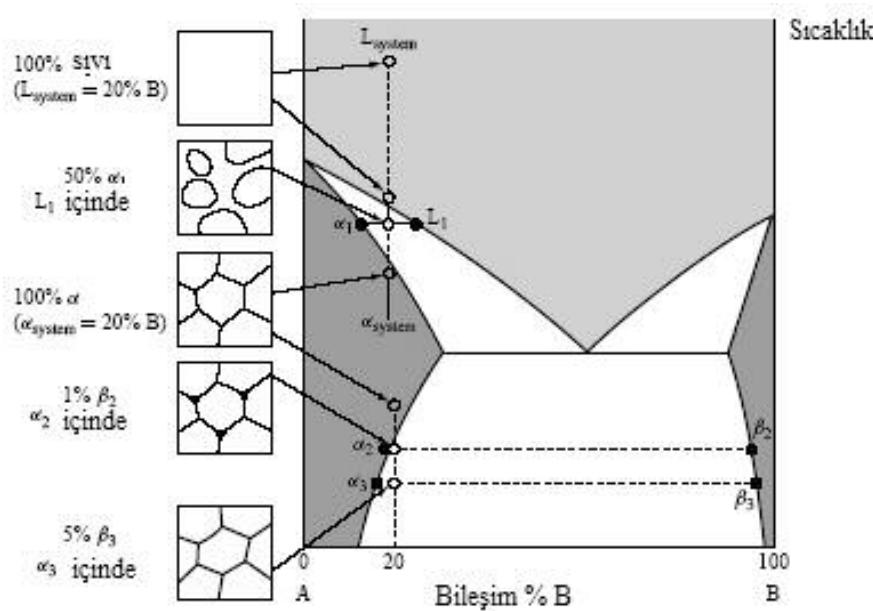
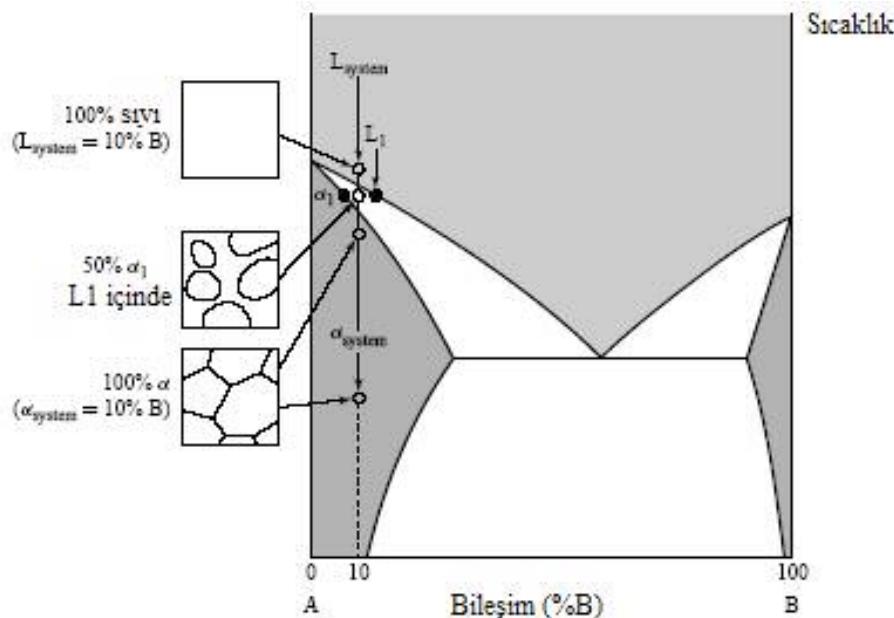
Örneğin yukarıdaki diyagramda verilen sıcaklık ve bileşim (% 40 B) için bağı çizilirse, α ve β fazları bulunmaktadır. Bağı çizgisinin iki ucundan inilen düşeyler bu fazların bileşimlerini vermektedir (%20 ve 77). Bu fazların ağırlık yüzdeleri ise kaldırıcı kuralı ile kolaylıkla hesaplanır (Kaldırıcı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

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

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

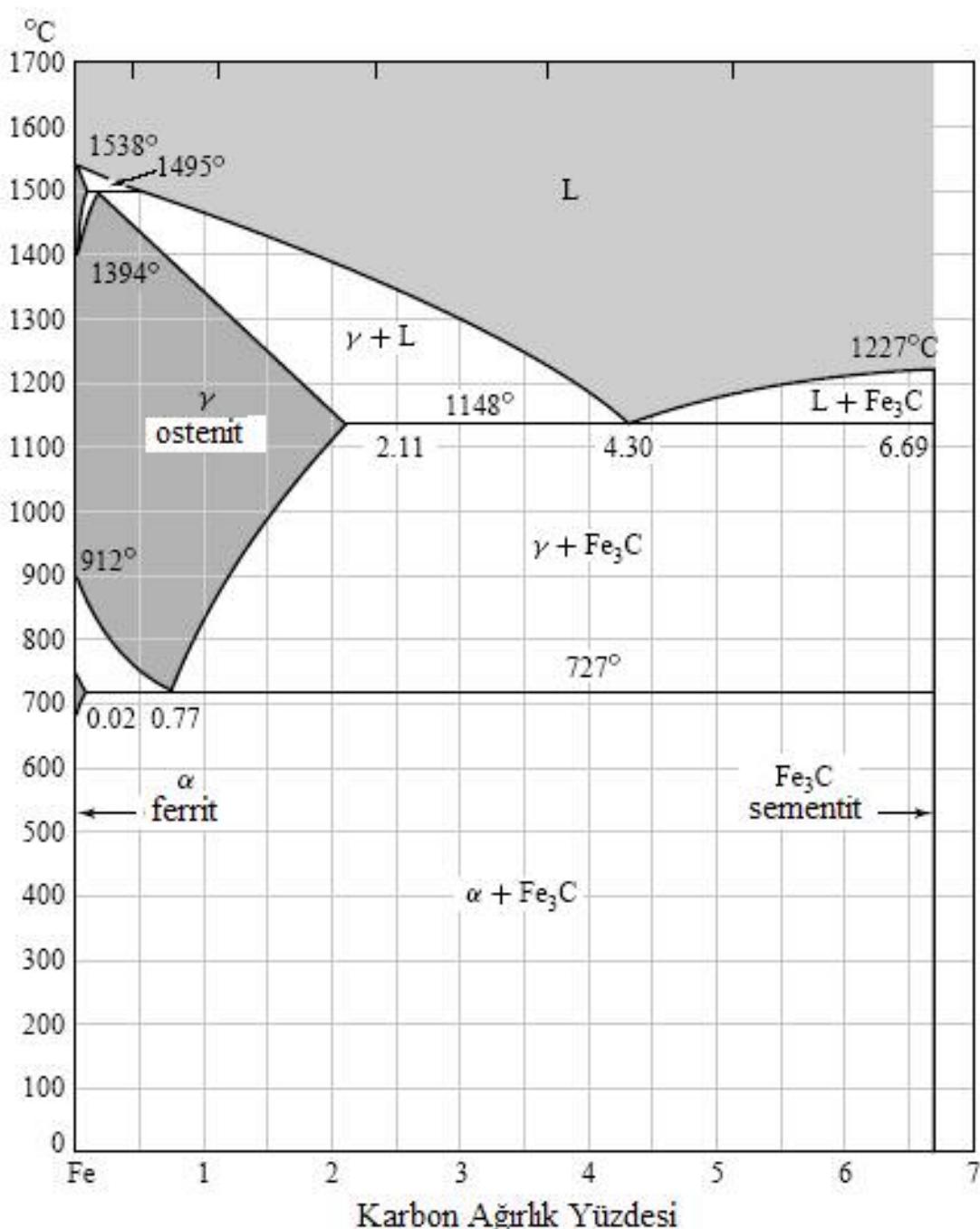
İç yapılarının oluşumuna örnekler (yavaş soğuma):





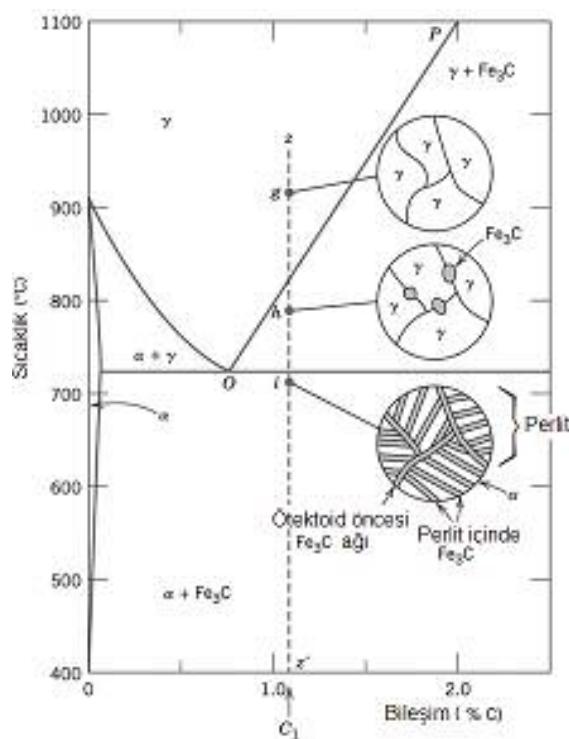
Bazı Önemli İkili Faz Diyagramları:

Fe – Fe₃C Sistemi

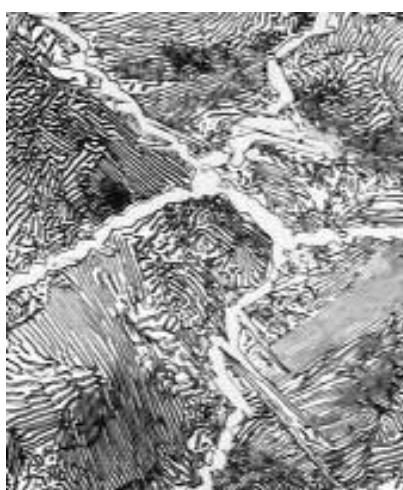


Demir-Karbon alaşımları mühendislikte yaygın olarak kullanılan çelikler ve dökme demir malzemelerin esasını oluşturur. %2'nin altında karbon içeren alaşımlar çelik, %2'nin üstünde karbon içeren malzemeler ise dökme demirlerdir.

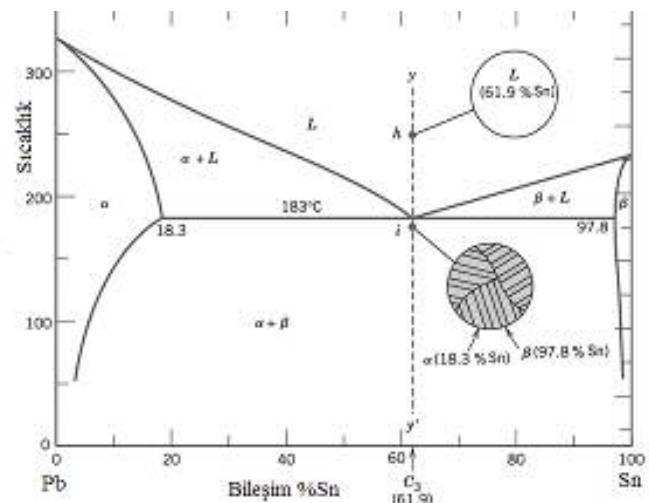
Çeliklerin iç yapısındaki karbon, teknikte geçerli soğuma hızlarında ayrı bir faz olarak değil, demir karbür (sementit) içinde bulunur. Bu nedenle yukarıdaki diyagram Fe-Fe₃C olarak verilmiştir.



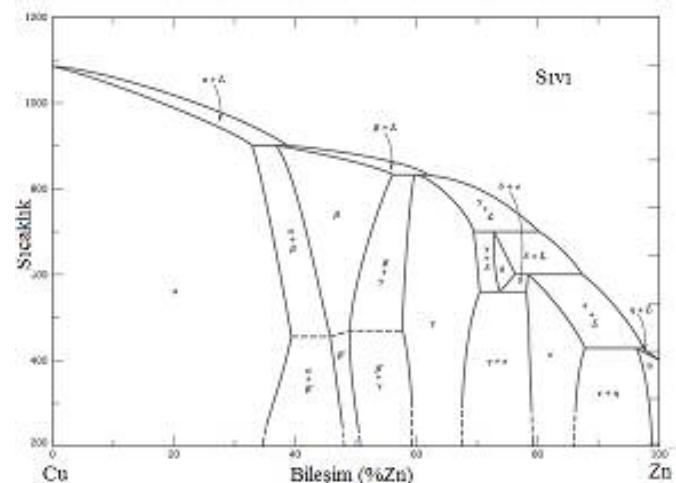
Bu diyagram yardımıyla, bileşiminde %1,1 C bulunan bir çeliğin iç yapısının nasıl saptanacağı bir örnek olarak yukarıda gösterilmektedir. Sıvıdan katılaşarak %100 ostenit (g) olarak oluşan iç yapısından, sıcaklık düştükçe (h) tane sınırlarında sementit ayırmaktadır, ağ şeklinde tane sınırlarında ayıran bu sementitin dışında iç yapısında ostenit bulunmaktadır. Ötektoid sıcaklığının hemen üstünde ötektoid bileşime sahip olan ostenit, ötektoid dönüşümün tamamlanmasından sonra perlite (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)



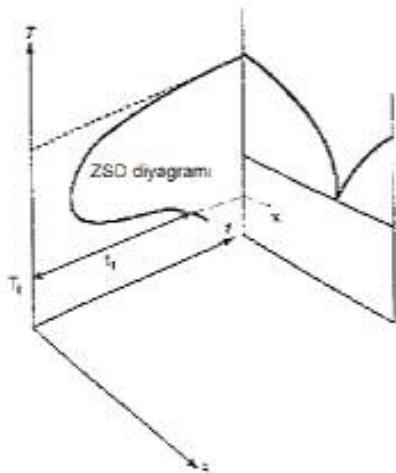
7. Kinetik ve Isıl İşlemler

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

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 iç yapılara 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).

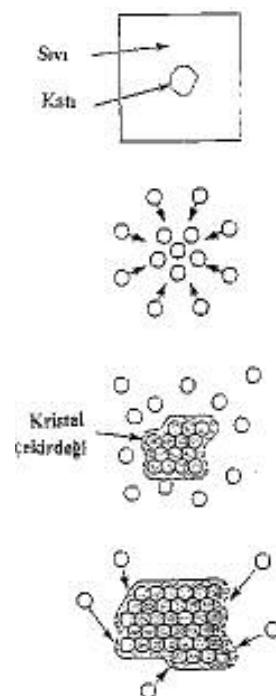
Zaman- Üçüncü Boyut:



Örneğin; yukarıdaki 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 gerçekleşmektektir. Bu nedenle eğrinin ortasında bir burun oluşmaktadır. Bu eğrinin neden bu şekilde olduğunu açıklamak için bazı temel kinetik kuralların bilinmesi gereklidir.

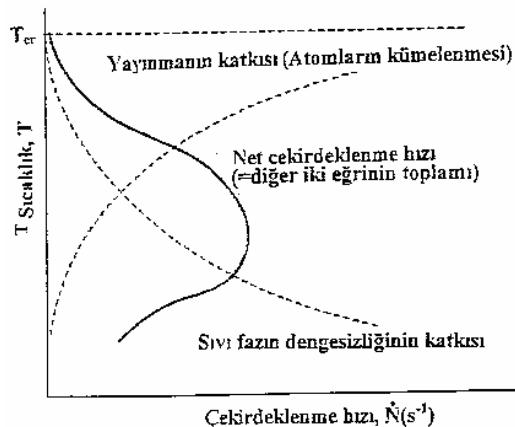
Faz Dönüşümü:



Katılışmada Çekirdeklenme ve Büyüme Aşamaları

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

Çekirdeklenme Hızı:



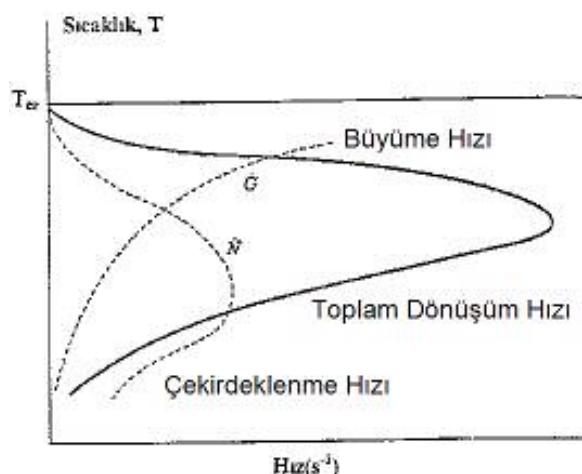
Sıvı içinde katı faz çekirdeklerinin oluşmasını etkileyen en önemli etken sıcaklıktır. Sıcaklık, faz diyagramı ile belirli olan likidüs sıcaklığının altına indiğinde, atomlar katı fazaya ait kristal oluşturmak isterler ve bu "katılışma isteği" sıcaklık düştükçe artar. Yani sıcaklık düştükçe sıvı fazın 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.

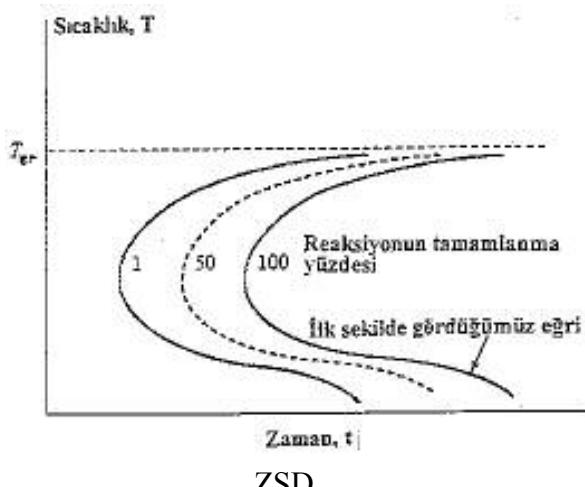
Bu iki etki yukarıda grafik olarak gösterilmiştir ve bunların toplanması sonucu ortaya çıkan net çekirdeklenme hızının belirli bir **optimum** sıcaklıkta en yüksek olduğu görülmektedir.

Büyüme Hızı

Oluşan bu çekirdeklerin büyümesi için de atomların yayılması gereklidir ve büyümeye hızı yüksek sıcaklıklarda daha yüksektir. Bu şekilde büyuyen çekirdekler taneleri oluşturarak tüm sıvı katılır. Toplam dönüşüm hızını, çekirdeklenme ve büyümeye hızları belirler

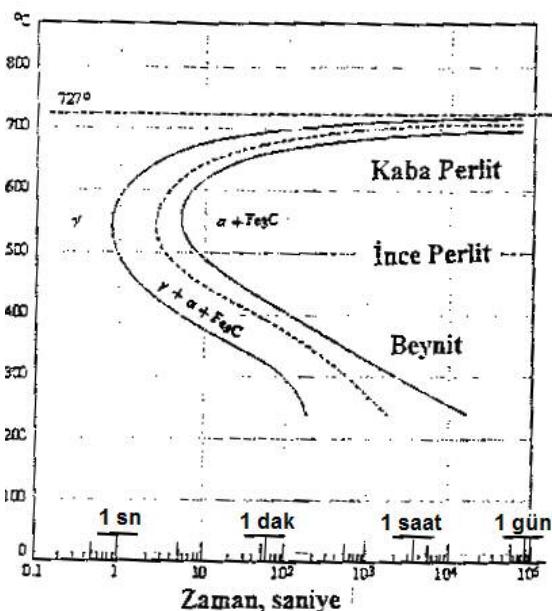


Katılışma reaksiyonu için ZSD diyagramı



Yayınmalı Dönüşümler

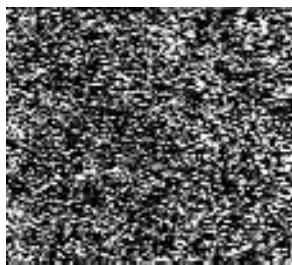
Belirli bir sıcaklıkta faz diyagramında görülen bir fazın oluşması için belirli bir süreye ihtiyaç vardır. Ayrıca dönüşümün gerçekleştiği sıcaklık oluşan iç yapıyı da belirleyici rol oynar ve farklı sıcaklıklarda farklı iç yapılar ortaya çıkabilir. Ostenit – Perlit (γ -Fe – Fe₃C) ötektoid dönüşümü buna bir örnektir. Ötektoid bileşimdeki bir çelik için bu dönüşüm ait ZSD-diyagramı aşağıda verilmektedir. 600 – 700 C arası dönüşümlerde kaba perlit, 600 – 400C arası ince perlit, 400C'nin altında ise beynit iç yapıları olmaktadır. 400 C'nin altında oluşan beynit, ferrit ve sementitin lamel oluşturmadan birlikte bulunduğu ince taneli bir mikroyapıdır.



Ötektoit Çeliğin ZSD-Diyagramı



Yavaş Soğuma >> Kaba Perlit



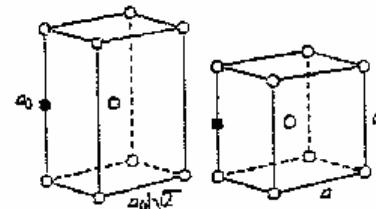
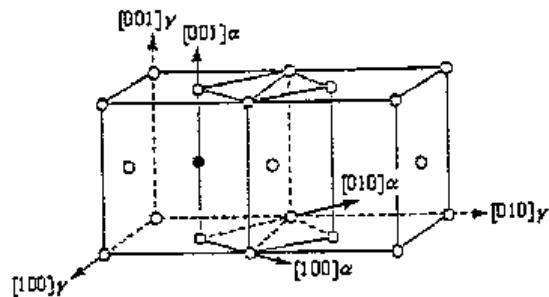
Beynit: Ostenit ve
sementitin
en ince yapısı

Yayınmasız Dönüşümler (Martenzitik)

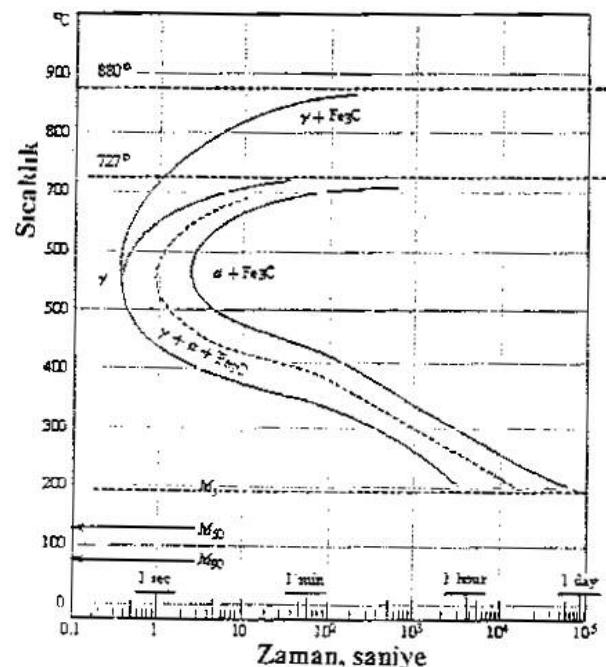
Soğuma hızı, faz değişimi için mevcut süreleri belirler ve bu hız yüksek olursa denge fazlarının oluşumu daha gerçekleşmeyebilir.

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.

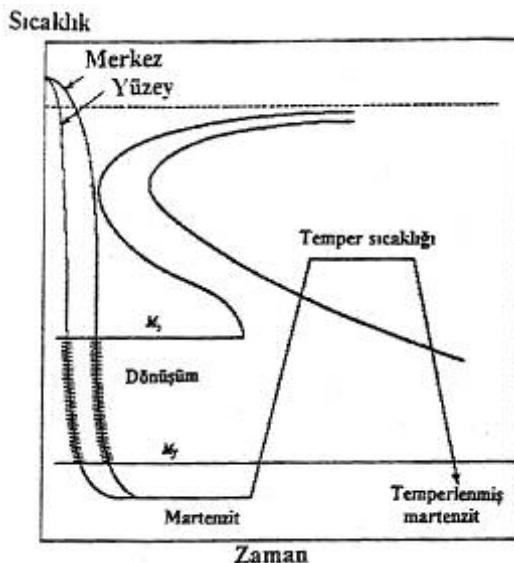
Ancak kafeste karbonun arayer atomu olarak bulunması durumunda, ymk kristal yapının merkezine yerleşmiş olan karbon arayer atomu, hmk yapıya dönüşümde, hmk tetragonal yapının bir kenarında kalır ve eğer başka konumlara yayılacak zamanı bulamaz ise, tetragonal kafesin kübik kafese dönüşmesini engeller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



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

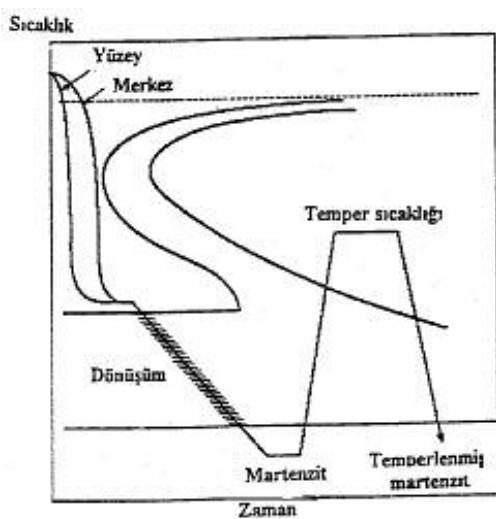


Ötektodüstü Çeliğin ZSD-Diyagramı

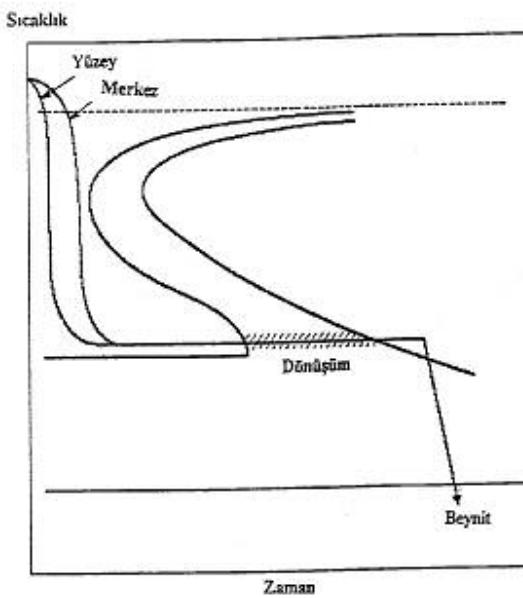


7.1. Çeliklerin İslıl İşlemi

Suverme ve Temperleme: Martenzit dayanımı yüksek, ancak buna karşın çok gevrek ve kırılgan bir fazdır. Temperleme işlemi ile, suverme sonrası oluşan martenzitik iç yapıya sahip çelik daha az kırılgan ve tok yapılabilir. Temperleme ötektoid dönüşüm sıcaklığının altında uygulanan bir ısıl işlemidir. Şekilde görüldüğü gibi çeliğe önce ostenit sıcaklığından martezite dönüşeceğin hızda suverilir. Daha sonra ötektoid sıcaklığın altında bir sıcaklıkta tutularak temperlenerek çelik iç yapısındaki 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 farklılıklarını ve yüksek iç gerilmeler oluşur ve bunlar çatlaklırlara neden olabilir. Örneğin suvermede merkez ile yüzey arasındaki sıcaklık farkı çok yüksektir. Yüzey daha düşük sıcaklıkta olacağı için daha fazla büzülmek ister, merkez ile büzülme farkından dolayı yüzeyde çekme gerilmeleri ortaya çıkar. Sonuç olarak yüzeydeki iç yapı gevrek bir martenzit ise, suverme çatlaklıları 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 çatlamaların olması söz konusu değildir.



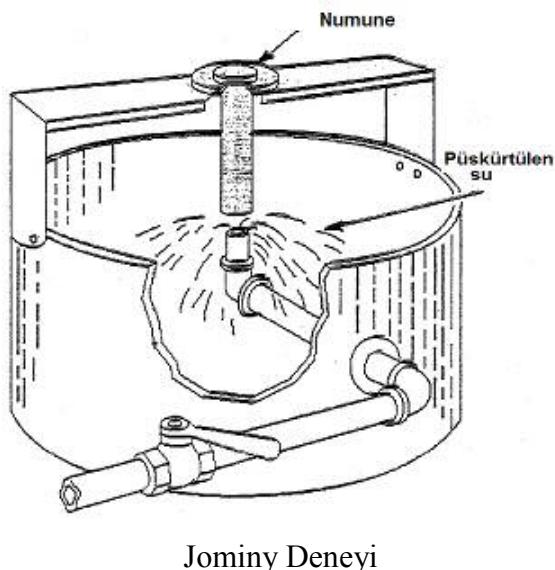
Ostemperleme: Karbon çeliklerinde beynit yapısı elde etmek için yapılan bir ısıl işlemidir. İşlem bazı çeliklerde topluk ve sünekliği artırmak için, su verme ve temperleme yerine kullanılır. Çelik önce ostenit hale getirilir daha sonra martenzit dönüşüm sıcaklığının hemen üstündeki bir sıcaklıkta sabit sıcaklıkta tutulur (örneğin ermiş 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.

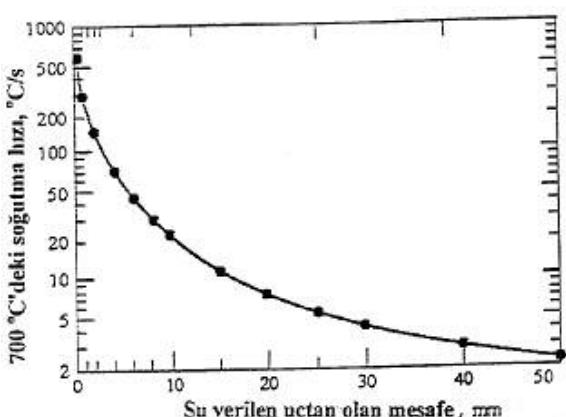
Sertleşme kabiliyeti Jominy Deneyi:

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.

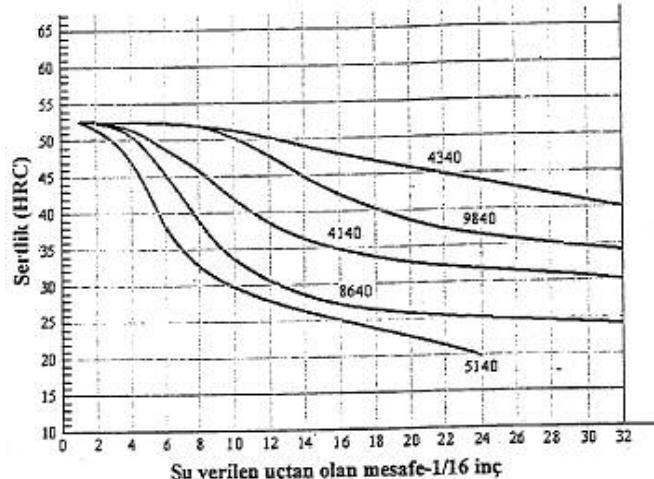


Jominy Deneyi



Jominy Deneyi soğuma hızının değişimi Jominy Deneyinde numune içindeki soğuma hızı, su püskürtme ucundan uzaklığı bağlı olarak değişir. Deney sonrasında numune yüzeyi taşlanır, su

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

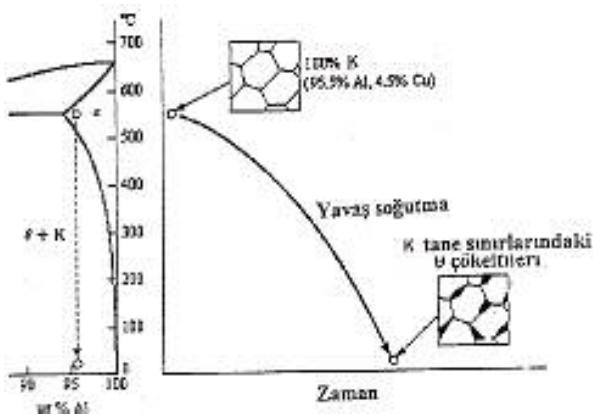


Değişik çelikler için Jominy Deneyi Sonuçları

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 uzaklaşıkça 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 kavamlardır.

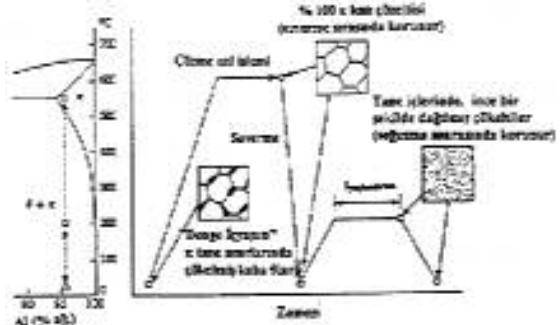
7.2. Çökelme Serleşmesi (Yaşlandırma).

Bu ısıl işlemde dayanımı yüksek olan bir ikinci faz, iç yapıcıda küçük parçacıklar halinde çökeltılır. Çökelen parçacıklar dislokasyon hareketlerine engel olarak malzemenin dayanımı artırır. Çökelme serleşmesinin uygulanabilmesi için, bir faz içinde ikinci fazı oluşturacak alaşım elementinin çözünürlüğünün sıcaklık düştükçe azalması gereklidir.



Örneğin yukarıda verilen Cu-Al faz diyagramında, aluminyumca 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 çökeltmek ve bu şekilde dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanım artıları sağlamak mümkündür. Bunun için aşağıdaki çökelme (yaşlandırma) ıslı işlemi yapılabilir.



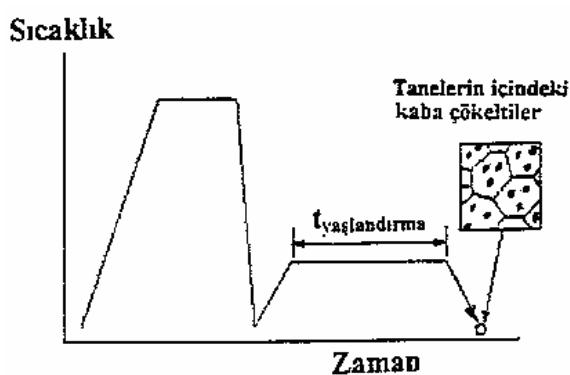
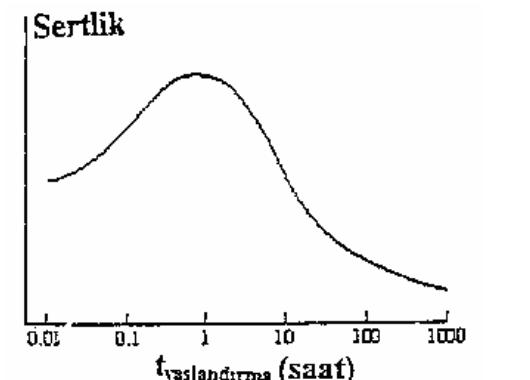
Çökelme sertleşmesi üç temel basamağı:

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

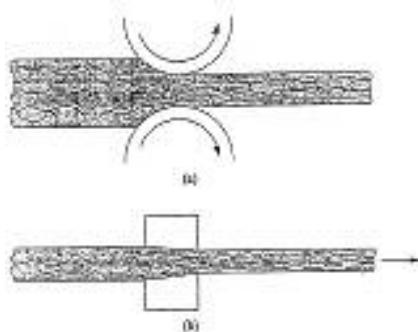
Su verme: Malzeme hızla oda sıcaklığına soğutulur, soğutma ortamı genellikle sudur. Yayınma imkanı bulamadığı için kendi fazını oluşturamayan Cu atomları, katı çözelti içinde aşırı doymuş olarak kalır.

Yaşlandırma: Aşırı doymuş bu yapıya, uygun sıcaklık ve süreler ıslı işlemi uygulanarak ve θ fazının ince dağılmış olarak çökelmesi sağlanır.

Aşırı Yaşlanma: Çökelme (yaşlandırma) işleminde tutma süresi ile sertliğin değişimi aşağıda görülmektedir. Grafigin 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 deform olur, dislokasyon yoğunluğu ve kafes kusurları artar. Malzeme pekleşir, dayanımı artar, ve süneklikçi düşer.

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

Tavlama sırasında sıcaklığa bağlı olarak;

- Toparlanma veya
- Yeniden kristalleşme görülür.

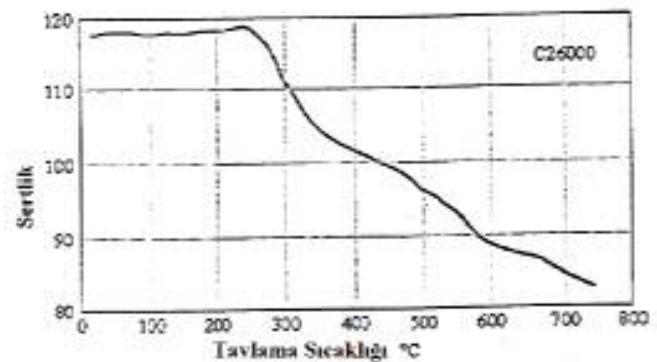
Toparlanma: Çok yüksek sıcaklıklara çıkılmayan toparlanma sırasında dislokasyonlar ve diğer kusurlar küçük ötelenmeler ile daha uygun konumlara hareket ederler. Sertlik az da olsa düşer, süneklik biraz artar ve ancak en belirgin etki elektrik iletkenliğinin artmasıdır (kafes içinde elektronların hareketi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

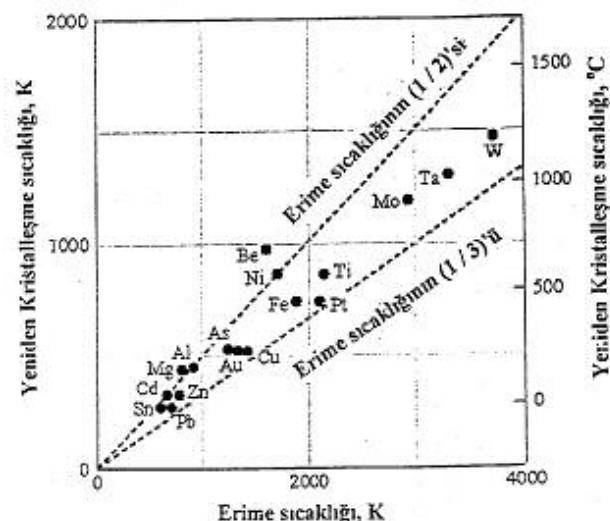
Yeniden kristalleşmenin mümkün olabilmesi için:

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

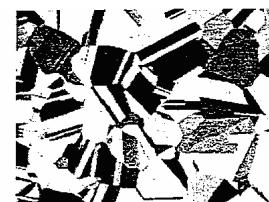
Yeniden kristalleşmeye etki eden faktörler: Metalin daha önceki biçim değiştirme miktarı, sıcaklık, zaman, başlangıçtaki tane büyüklüğü, alaşımın bileşimidir. Malzemenin önceden gördüğü şekil değiştirme miktarı arttıkça yeniden kristalleşme için gerekli sıcaklık düşer ve çok sayıda noktadan çekirdeklenme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



Tavlama sıcaklığının artışı ile malzemede soğuk şekil verme sonrası oluşan pekleşmenin etkisi azalır. Sertliğin hızla düşüğü 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 irileştiğçe 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 esasıdır. 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:

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

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

Alaşımama ile çeliklerin **kullanım özelliklerinin** (Dayanım, Süreklik, 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, Nitürlenebilirlik 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 (Tufali alınmış)

Fe13 ve Fe14 Derin çekme kalitesinde sac

Teneke,

Galvaniz sac,

Gemi sacları vb...

b. İslah Çelikleri

Su verme / temperleme işlemleri ile özelliklerini düzeltenebilir çeliklerdir. Basit karbonlu veya alaşımı türleri vardır.

c. Sementasyon Çelikleri

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

d. Nitrürasyon Çelikleri

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

e. Otomat Çelikleri

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

f. Paslanmaz Çelikler:

Alaşım elementi olarak yüksek oranda Cr ve Ni içeren pahali 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 **martenzitik** 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 alaşımı 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 topluklarını 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 çeliklerdir.

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 Alaşımı 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 ısıl / mekanik işlemlerle geliştirilir. Bu mazemeler özellikle otomotiv sektöründe sac kaporta malzemesi olarak kullanılır. Yüksek dayanımlar hafif tasarımlara imkan sağlar, ayrıca imalat kolaylığından dolayı 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 yaşalandırma. Günümüzde birçok stratejik uygulama için (örneğin askeri amaçlı) gerekli çeliklerdir.

s. Süperalasımlar:

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 alaşımlarındır. 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)

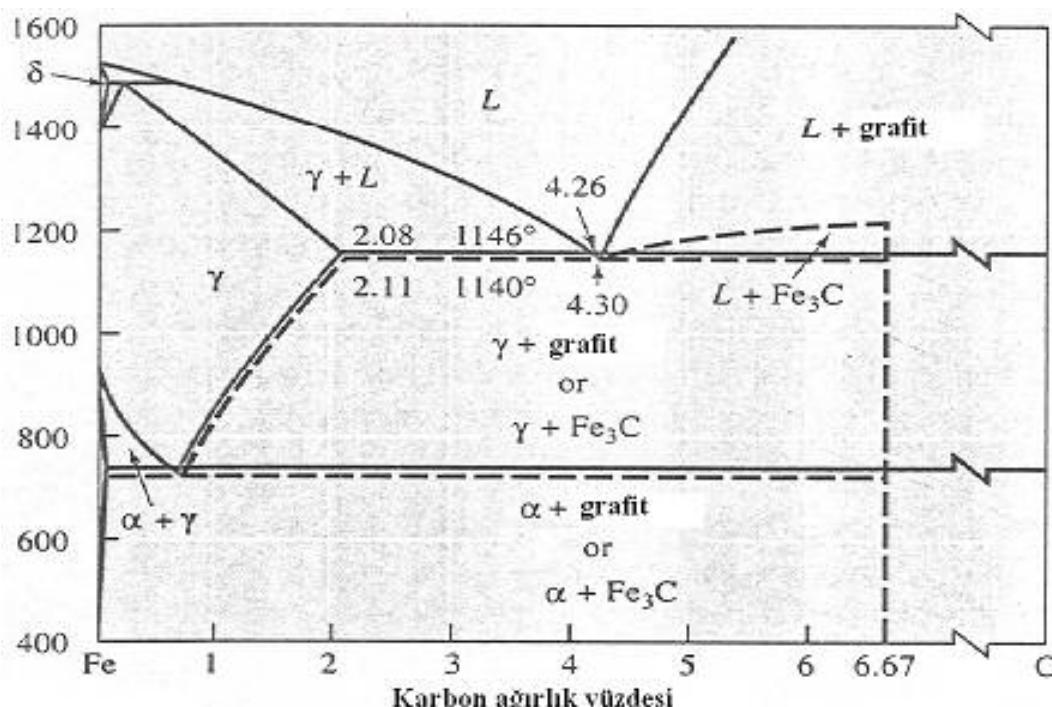
Dökme Demir Türleri:

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

a. Beyaz Dökme Demir

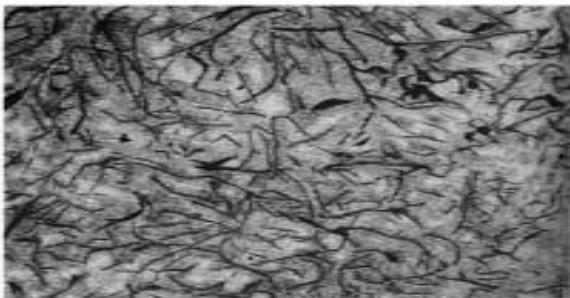


Yüksek hızda soğuma neticesi tüm karbon iç yapısında sementit içinde bulunur, grafit fazı yoktur. Beyaz dökme demirin bu şekilde adlandırılmasının nedeni kırılma yüzeyinin beyaz veya parlak kristalsi bir yapıda olmasıdır. Beyaz dökme demirler



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

b. Lamel Grafitli (Kır) Dökme Demir



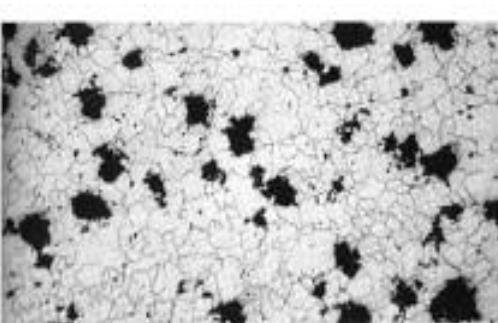
Karbon iççiyapıda lamel şeklinde grafit fazı içinde bulunur. Koşullara bağlı olarak karbonun bir kısmı perlit içinde de (segmentit olarak) bulunabilir:

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

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

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

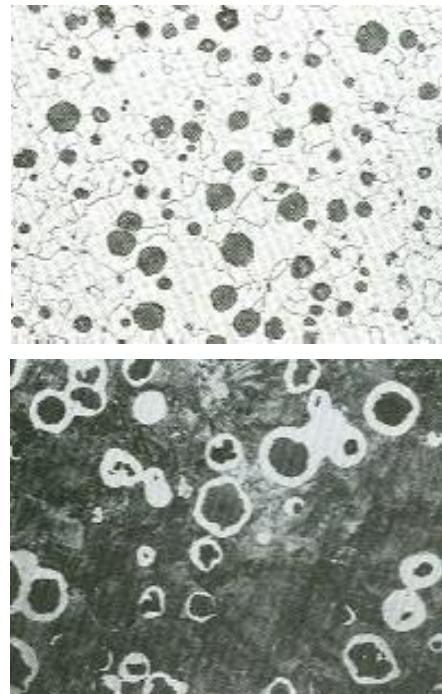
c. Temper Dökme Demir



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

içindedir. Temper dökme demiri elde etmek için beyaz dökme demirler yüksek sıcaklıkta ve uzun süreli bir ısıl işleme tabi tutularak segmentit içindeki karbonun küçük parçacıklar halinde grafite ayırmaması sağlanır. Ferritik ve perlilik 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 Perlilik 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 katılışma sırasında grafitler küresel olarak oluştugundan, 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 süneklik sıcak işlenebilirlik ve sertleşebilirlik gibi çeliğe benzer özellikleri de vardır. Kullanım özellikleri bakımından en gelişmiş dökme demir türü olarak kabul edilirler.

Dökme Demir Türleri, Sembollerı ve Kullanım Yerleri

DD Türü	Kullanım Yerleri
Beyaz DD	Öğüticüler, 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, kranc milleri, yüksek dayanımlı otomotiv parçaları..

- 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.
- Aluminyum合金alarında değişik dayanım artırma yöntemleri seçilebilir, ancak en etkin dayanım artırma yöntemi, çökeltme sertleşmesidir (yaşlandırma).

8.2. Demirdışı Metal ve Alaşımları

Bazı metal alaşımları ve bunların çelikler ile karşılaştırılması (bağıl)

Metal	Yoğunluk g/cm ³	Max.Çekme Dayanımı MPa	Bağıl Özgül Dayanım	Bağıl 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
Titanium	4.51	1100	1,2	40
Çelikler	~7.87	1400	1	1

8.2.1. Aluminyum ve Alaşımları

- Yoğunluğu $2,7\text{ g/cm}^3$ tür. Çelikten sonra kullanım alanı en yaygın olan metalsele mühendislik malzemesidir ve hafifliği nedeniyle özellikle uçak uzay sanayinde tercih edilir.
- Elastiklik modülü 70 GPa '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 malzemeye taşır.

Aluminyum ve Alaşımlarında Dayanım Artırma Mekanizmları

Malzeme	Çekme Dayanımı [MPa]	Akıma Dayanımı [MPa]	% Uzama	% Dayanım Oranı
Saf Aluminyum	45	18	60	1
Ticari Saf Aluminyum	91	35	45	2.0
Sıcak Şekillendirilmiş	168	154	15	8.8
Cökeltme Sertleşmeli	588	510	11	29.2

Aluminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır.

Dövme Alaşımları

1xx.x	Ticari saflıkta Al	Yaşlandırma yapılamaz
2xx.x	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Yağlandırmalıdır
3xx.x	Al-Mn	Yaşlandırma yapılamaz
4xx.x	Al-Si ve Al-Mg-Si	Magnezyum varsa yağlandırmalıdır
5xx.x	Al-Mg	Yaşlandırma yapılamaz
6xx.x	Al-Mg-Si	Yağlandırmalıdır
7xx.x	Al-Mg-Zn	Yağlandırmalıdır
8xx.x	Al-Li, Sn, Zr, veya B	Yağlandırmalıdır

Döküm Alaşımları

1xx.x	Ticari saflıkta Al	Yaşlandırma yapılamaz
2xx.x	Al-Cu	Yağlandırmalıdır
3xx.x	Al-S-Cu veya Al-Mg-Si	Bazılan yaşlandırma bilir
4xx.x	Al-S	Yaşlandırma yapılmaz
5xx.x	Al-Mg	Yaşlandırma yapılamaz
7xx.x	Al-Mg-Zn	Yağlandırmalıdır
8xx.x	Al-Si	Yağlandırmalıdır

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

ALUMINYUM ve ALAŞIMLARINDA TEMPER GÖSTERİMLERİ

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

Bakır ve Alaşimlarında Dayanımı Artırma Mekanizmları

Malzeme	Çekme Dayanımı [MPa]	Akma Dayanımı [MPa]	% Uzama	Dayanım Artırma Mekanizması
Saf Cu, tavlanmış	210	32	60	Yok
Ticari saf bakır, iri taneli	225	70	55	Katı Çözelti
Ticari saf bakır, ince taneli	240	77	55	Tane incelmesi
Ticari saf Cu, %70 soğ.şek.değ.	400	371	4	Pekleme
Tavlanmış Cu - %35 Zn	330	105	52	Katı Çözelti
Tavlanmış Cu - %10 Sn	462	196	68	Katı Çözelti
Soğ.Şek. Değ. Cu - %35 Zn	585	441	3	Katı Çözelti + Pekleme
Yaşlandırmış Cu - %2 Be	1330	1225	4	Yaşlandırma

8.2.2. Magnezyum ve Alaşımları

- Yoğunluğu sadece $1,74 \text{ g/cm}^3$ 'dir. Hafifliğin önemli olduğu yerlerde kullanılır.
- Elastiklik Modülü düşüktür (45 GPa) Yaygın kullanılan mühendislik malzemeleri arasındaki rıjitliği 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 imalatta ve kullanımda sorunlar yaratır.
- Tuzlu sulu ortamlar dışında korozyona dayanıklıdır.

8.2.3. Bakır ve Alaşımları

- Yoğunluğu yüksektir, $8,9 \text{ g/cm}^3$.
- Elektrik ve ısı iletkenliği mükemmel bir malzemedir
- Diğer demirdışı metallere 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阿拉şımlarında elde edilir.

En Önemli Bakır Alaşımları:

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

8.2.4. Diğerleri

Berilyum ve Alaşımları

- Yoğunluğu sadece $1,85 \text{ g/cm}^3$ 'dir.
- Elastiklik Modülü 280 GPa (çelikten yüksek !)
- Rıjilik 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合金 elementlerinden biridir.
- YMK kafese sahip olduğundan kolay şekillendirilebilir
- Monel olarak adlandırılan Ni+Cu阿拉şımları, korozyon dayanımı çok yüksek malzemelerdir.
- Süperalaşımların ana合金 elementlerinden biridir.

Kobalt ve Alaşımları

- Aşınmaya ve vucut 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.

Cinko ve Alaşımları

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

Kurşun ve Alaşımları

- Erime sıcaklığı düşüktür, oda sıcaklığında yeniden kristalleşir.
- Yüksek yoğunlukludur ve ışın geçirgenliği düşün 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

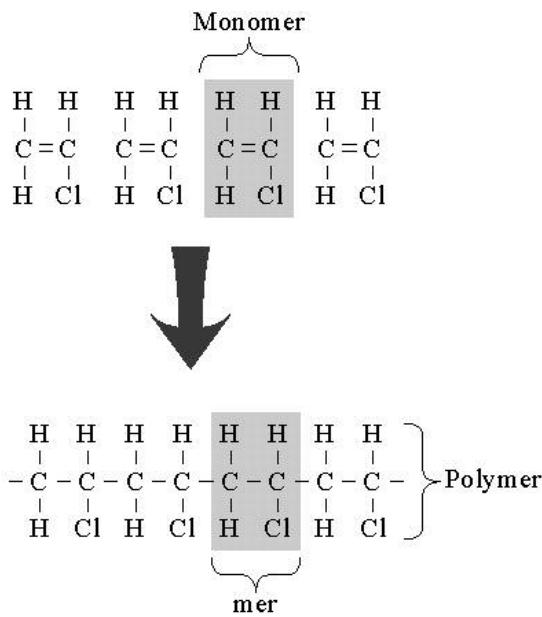
- Molibden, Niyobyum, Renyum, Tantal, Volfram...
- Çok yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybetmeyen malzemelerdir.
- Yüksek sıcaklıklarda süper alaşımlardan daha dayanıklıdır.
- Metalik malzemelerin pahalı olduğu veya kullanılmadığı yerlerde tercih edilir.

Kıymetli Metaller

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

9. Polimerler

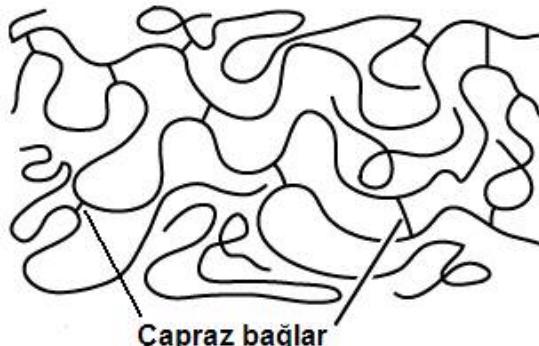
Küçük molekül birimlerinin (mer) uzun zincirler halinde birleşerek oluşturduğu zincir moleküllerinden (polimer), ikincil veya çapraz bağlarla birbirlerine bağlanarak oluşturduğu malzemelerdir.



Merlerin birleşmesi ile polimerlerin oluşumu

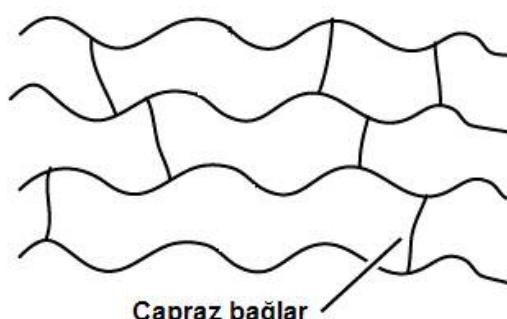
- Mühendislik uygulamaları için daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen türleri geliştirilmiştir.

Termosetler: Molekül zincirleri çapraz bağlarla bağlanmış ve riyit 3 boyutlu bir yapı ortaya çıkmıştır.

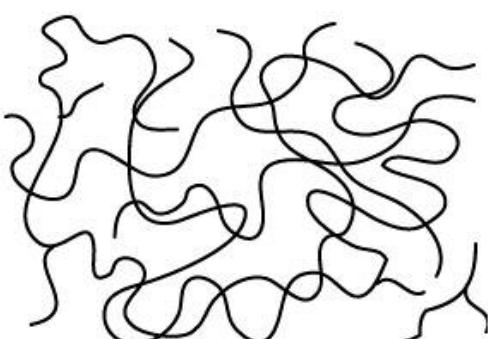


- Çapraz bağlanma tamamlandıktan sonra malzeme riyitlik kazanır ve bu işlem geri çevrilemez.
- Yüksek sıcaklıklarda yumuşama ve erime olmaz, malzeme yanar.
- Geri kazanılması çok güçtür.

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



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



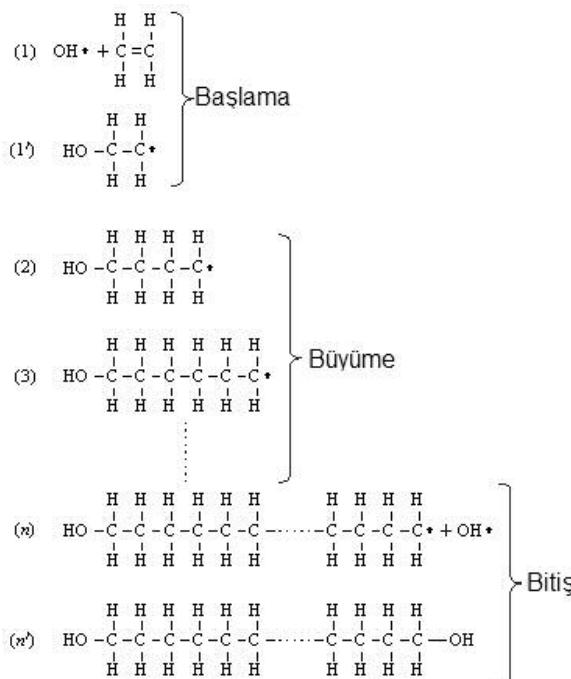
- VanderWaals bağları yaklaşık 100°C da zayıflar ve malzeme yumuşar.
- Kolaylıkla şekil verilebilir.
- Geri kazanılarak tekrar kullanılabilir.

9.2. Polimerizasyon

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

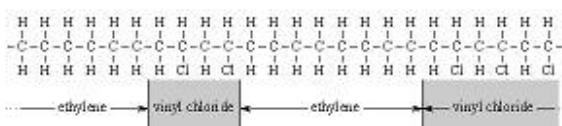
Polymerizasyon reaksiyonları iki türlü olabilir: Ekleme Polymerizasyonu, Yoğuşma Polymerizasyonu (polikondenzasyon)

Ekleme Polymerizasyonu: Bu tip polymerizasyonlarda molekülün çift bağı açılır ve herhangi bir yan ürün olmadan iki ayrı bağ bağı oluşturur.



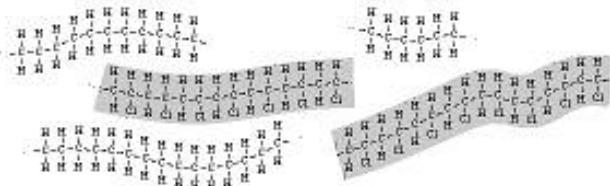
Polietilende Ekleme polymerizasyonu
(OH-serbest radikalı)

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.



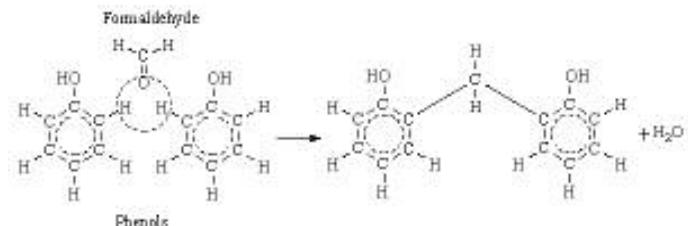
Etilen / vinil-klorür kopolimeri

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

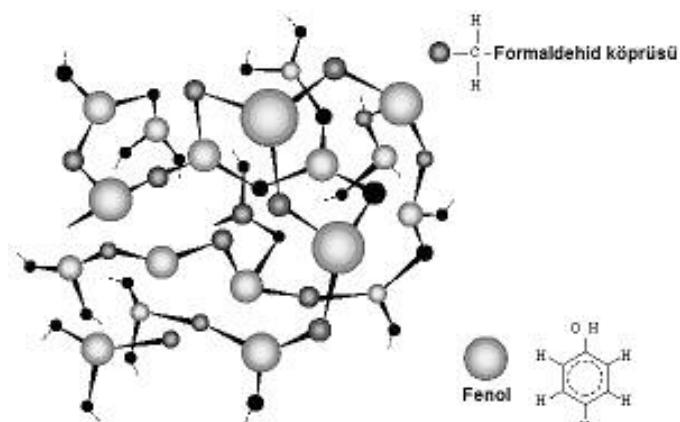


Etilen ve vinil-klorit karışımı

Yoğuşma Polymerizasyonu (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

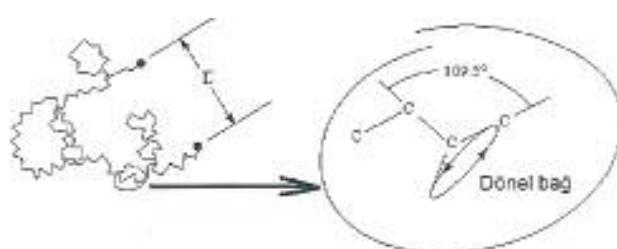
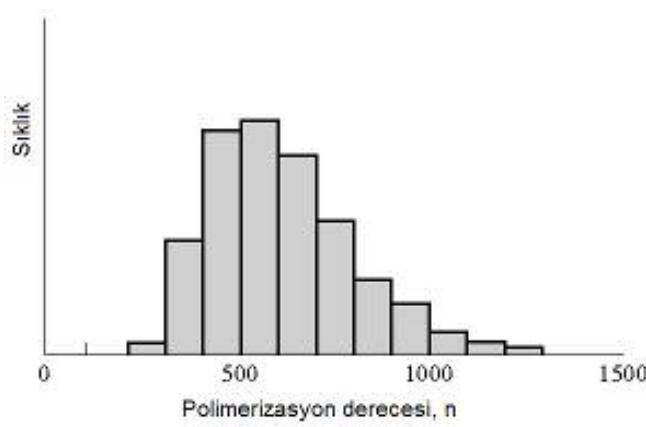
Polimerizasyon derecesi, n:

$$-(\text{C}_2\text{H}_4)_n-$$

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 rıjilik artar. Polimerizasyon derecesi dolaylı olarak vizkozite veya ışık saçılması ile de ölçülebilir. Bir polimerde molekül uzunluklarının dağılımı aşağıdaki şekildedir.

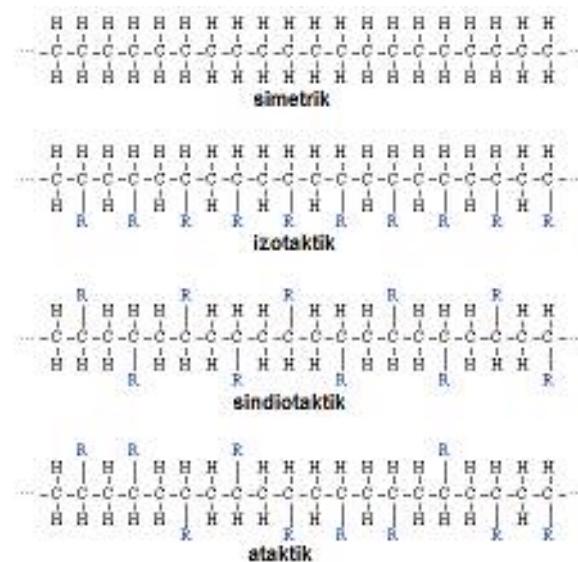


Polimerizasyon derecesinin etkileri:

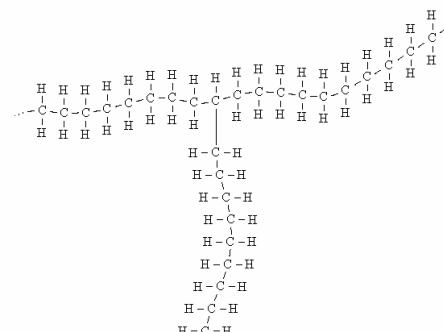
- Polimerizasyon arttıkça rıjilik ve akma dayanımı artar
- Molekül yapısı karmaşıklaştıkça yüksek sıcaklık dayanımı ve erime noktası yükselir
- Molekül yapısı karmaşıklaştıkça kristalleşme oranı düşer.
- Molekül zincirleri arası zayıf vanderWaals bağları çapraz bağlar ile güçlendirilebilir.

Molekül zincirlerinin değişik yapıları:

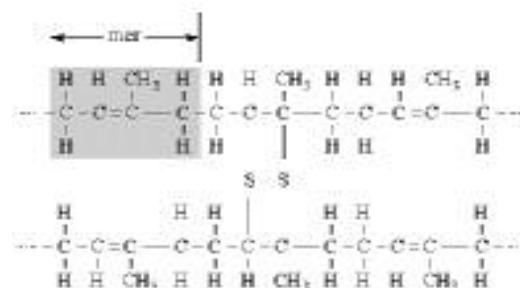
Değişik Atom Düzenleri:



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

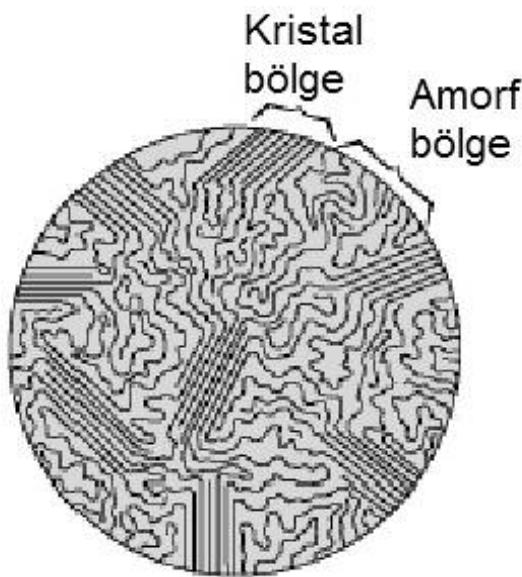


Çapraz Bağlanma: Komşu zincirler çapraz bağ görevi yapan bir molekül veya atom yardımıyla bağlanır. Böylece zincirlerin kayma hareketleri önlenir. Çapraz bağlanmanın olması için zincirde polimerizasyon sonunda doymamış C atomlarının bulunması gereklidir ve bağlama bu noktalarda gerçekleşir.



Çapraz bağlı (vulkanize) lastik

Polimerlerde Kristalleşme:



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

Polimer Katkıları

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

Yumuşatıcı: Düşük molekül ağırlıklı bir polimer ile karıştırılır.

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

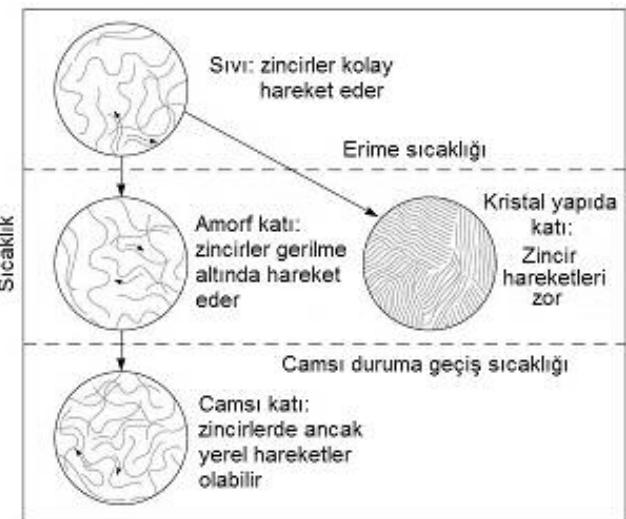
Takviyeler: Polyesterin cam lifler ile takviye edilmesi gibi.....

Stabilizatör: Zamanla özelliklerin olumsuz yönde değişimini (oksidasyon, ısıl, ultraviyole vs etkilerle) önler

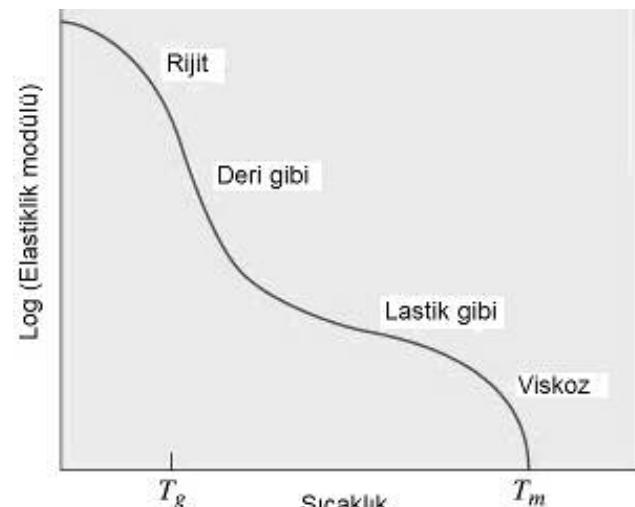
Ayrıca alev geciktirici ve renklendiricilerden yararlanılır.

9.4. Termoplast Polimerlerin Mekanik Davranışı

Sıcaklığın yapı ve özelliklere etkisi

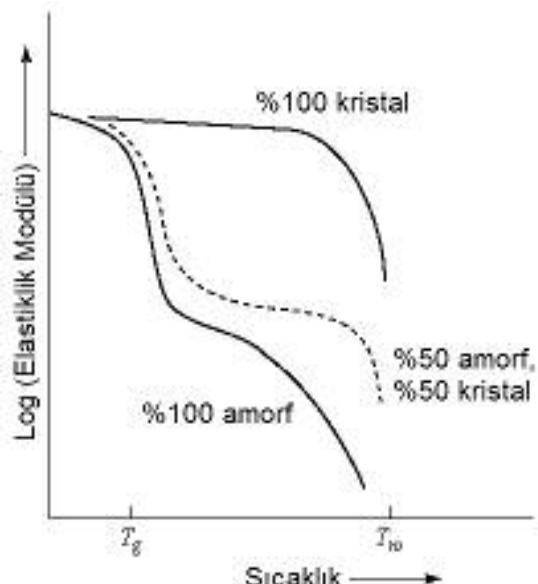


Viskoelastik Şekil Değişimi

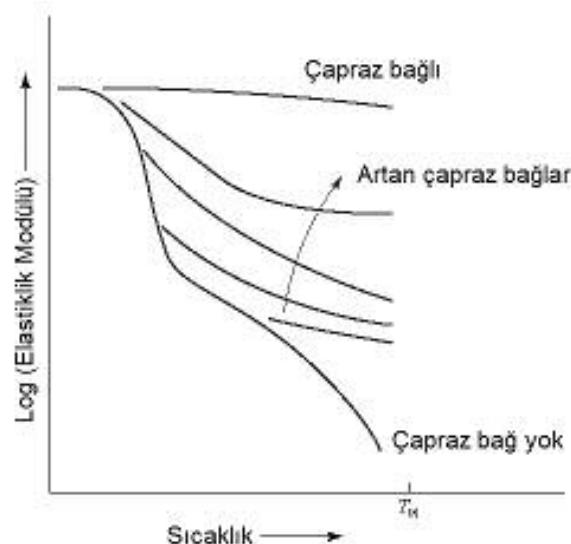


Bir termoplastikte (%50 kristalleşmiş) elastiklik modülünün sıcaklıkla değişimi (T_g geçiş sıcaklığı, T_m erime sıcaklığı)

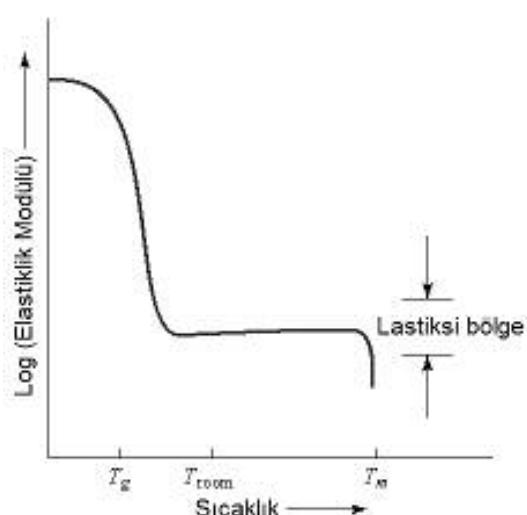
Polimerlerde Çekme Eğrisi



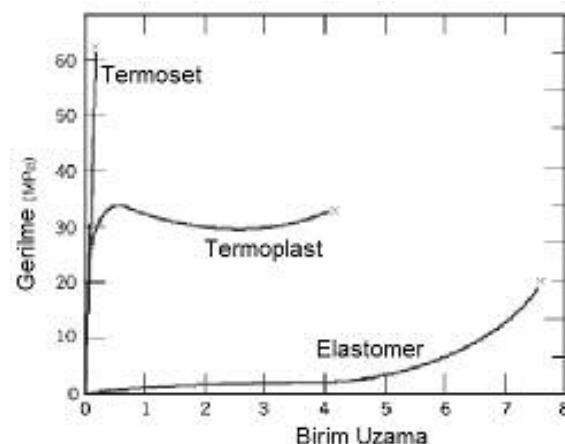
Termoplastiklerde kristalleşme ile mekanik davranışlarının değişimi



Artan çapraz bağların rijitliğe etkisi



Elastomerlerde lastiksi bölge genişştir

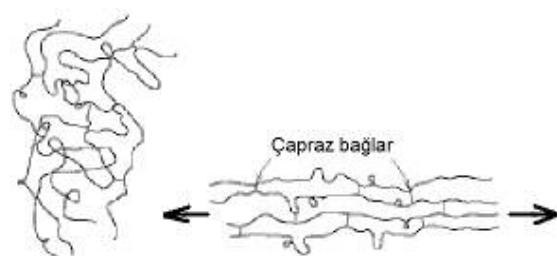


Termosetlererde çapraz bağlar bulunduğu için zincirler üç boyutlu bir rijit bir ağ oluşturur; zincirler hareket edemez ve sünneklik çok düşüktür. Malzemenin rijitliği ve dayanımı yüksektir.

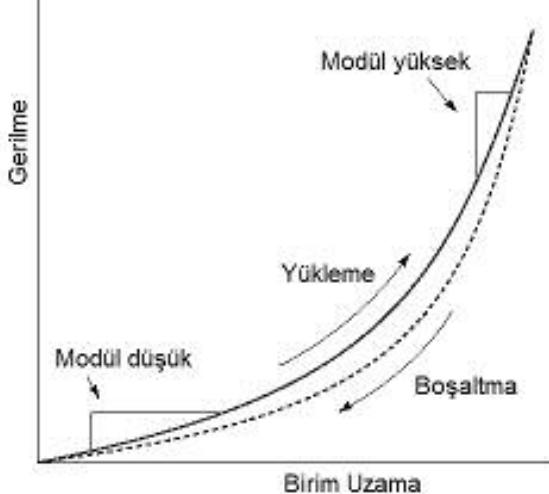
Termoplastiklerde ise akma sınırına kadar elastik şekil değişimi görülür, bu noktadan sonra molekül zincirlerinin birbiri üzerinde kayması ile plastik şekil değişimi başlar. Zincirler birbiri üzerinde kayar ve polimer zincirleri çekme doğrultusunda düzenlenirler.

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

Elastomerlerin Şekil Değişimi



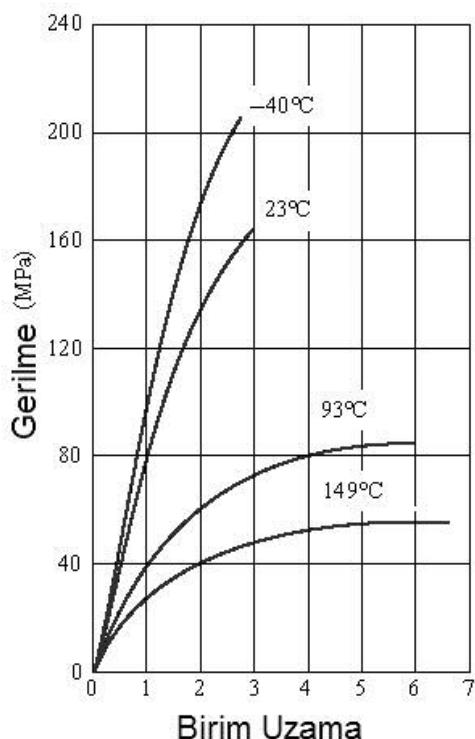
Elastomerler kopma olmadan %100'e kadar uzama kapasitesine sahiptirler. Şekilde görüldüğü gibi çekme gerilmeleri altında molekül zincirleri açılmaktadır ve gerilme kalktığında çapraz bağlar sayesinde eski konumlarına dönmektedirler.



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

Elastomerlerde zincir moleküller açıldıktıça ve çekme doğrultusunda düzenlenendikçe, zincirlerin daha fazla açılmasına devam etmesi güçleşir ve malzemenin rıjitliği (elastiklik modülü) artar. Yani malzeme doğrusal olmayan (Hooke kanununa uymayan) bir elastik davranış 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,
- Süreklik artmaktadır.

Yayın Kullanılan Polimerlere Örnekler

POLIMER	MER	BAZI KULLANIM YERİ
Termoplastikler		
Polietilen (PE)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & = \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	Ambalaj filmleri, hortum, ev eşyaları, şişeler
Polivinilklorür (PVC)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - \text{Cl} \\ \\ \text{H} \end{array}$	Boru, yer kaplamaları
Polipropilen (PP)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - \text{CH}_3 \\ \\ \text{H} \end{array}$	Boru, levha
Polistiren (PS)	$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	Ambalaj ve yalıtım köpükleri
Naylon	$\left[\begin{array}{c} \text{H} & \text{O} & \text{H} \\ & & \\ -\text{N} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} \right]_n$	Elyaf, halat, makina parçaları
Polietilentereftalat (PET)	$\begin{array}{c} \text{O} & \text{O} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{C} & \text{C} & \text{O}-\text{C} & \text{O}-\text{C} \\ & & & \\ \text{O} & \text{O} & \text{H} & \text{H} \end{array}$	Makina parçaları, pervaneler
Polikarbonat	$\begin{array}{c} \text{O} & \text{O} & \text{CH}_3 & \text{O} \\ & & & \\ \text{O} & \text{O} & \text{C}_6\text{H}_4 & \text{O} \\ & & & \\ \text{O} & \text{O} & \text{CH}_3 & \text{O} \end{array}$	Elyaf, fotoğraf filmleri, içecek kapları
Termosetler		
Feniformaldehid (Bakalit)	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2 \end{array}$	Elektrik donanımları
Polyester	$\begin{array}{c} \text{O} & \text{O} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{O} & \text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{O} & \text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{O} & \text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \end{array}$	Cam Takviyeli Kompozitler Kaplamaları
Epoksi	$\begin{array}{c} \text{O} & \text{O} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ \text{O} & \text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{O} & \text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{O} & \text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \end{array}$	Yapıstırıcı, Kompozit matrisi Elektrik donanımları
Elastomerler		
Izopren (lastik)	$\begin{array}{c} \text{CH}_2 & \text{CH}_2 \\ & \\ \text{C} & \text{C} \\ & \\ \text{CH}_2 & \text{CH}_2 \end{array}$	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	63	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 özellikler:

- Genellikle bir metal ile ametalin bileşigidir; bağlar tamamen iyoniktir veya iyonik ile kovalent kombinasyonu karakterindedir.
- Dislokasyon gibi herhangi bir kalıcı şekil değiştirme mekanizması olmadığı için sert ve çok gevrektdir.
- Genellikle elektrik ve ısıl yalıtkandır
- 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

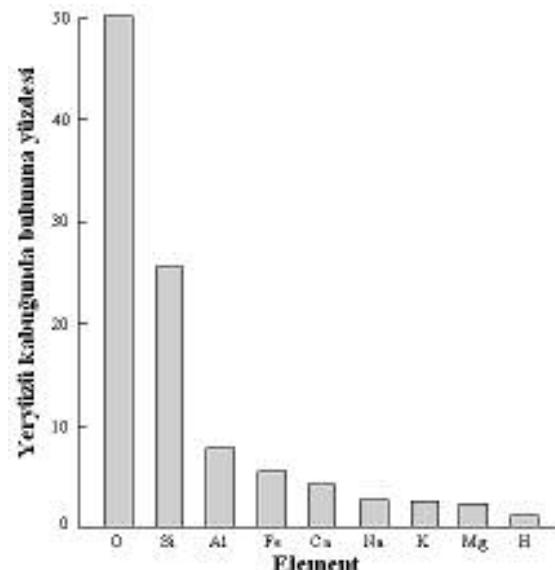
10.1 Seramikler

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 kabığında bulunan elementler

Silikat Esaslı Bazı Seramiklerin Bileşimleri

Seramik	Bileşim (ağ. %)					Diğer
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	
Silika refrakter	96					4
Ateş tuğası	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:

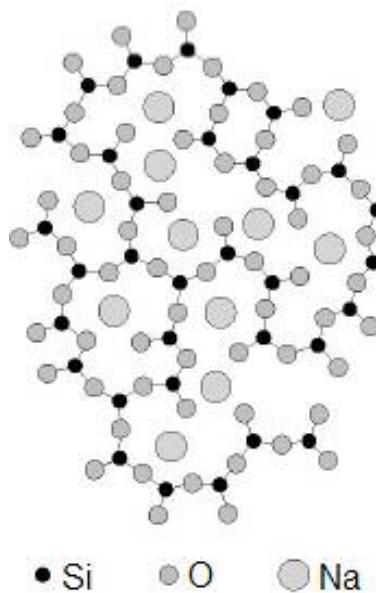
Silisyum karbür (ısıtma elemanı, aşındırıcı), silisyum nitrür (kesme takımı) bu gruba giren malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

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 davranışları; bu halde aşırı soğutulmuş sıvı olarak düşünülebilirler.

Silikat esaslı camlar, Si ve O elementlerinin yerkabığında çokça

bulunması dolayısıyla maliyet açısından avantajlıdır. Ağ oluşturan silikat içine eklenen diğer katyonlar, tetrahedral ağı kesintiye uğratırlar 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 ağın bir parçası olurlar.



Cam Bileşimindeki Değişik Oksitler

Ağ yapıcları	Ağ'a katılanlar	Ağ'ı kesintiye uğratılanlar
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 Tipi	Bileşim (wt %)									
	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	MgO	CaO	ZnO	PbO	
Vitray silika	100									
Bor Camı	76	13	4	3	1					1
Pencere Camı	72		1	14	8	4				1
Cam Kapılar	73		2	14	10					1
Cam elyaf	34	8	13		22		17		42	1
Emaye	34	3	4							

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		

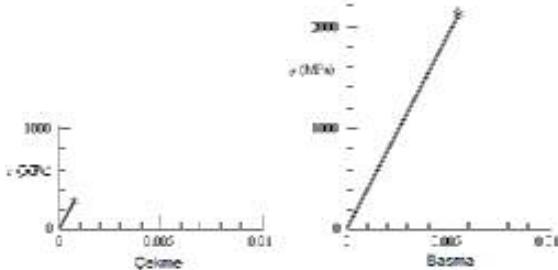
10.3 Cam - Seramikler

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.

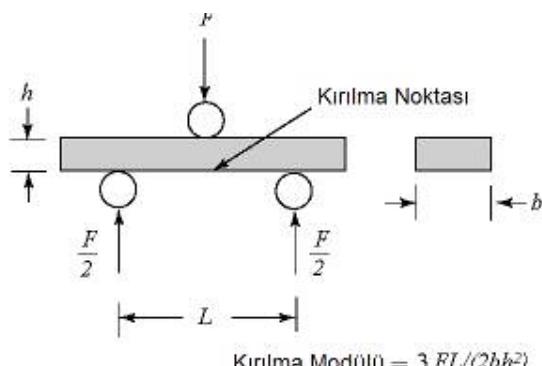
10.4 Mekanik Özellikler

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.



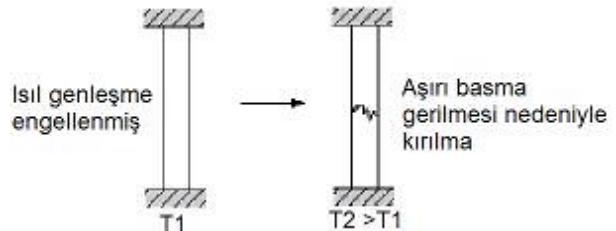
10.5 Isıl Şok

Seramiklerin yüksek sıcaklık kararlılıklarını ve ısı yalıtkanlıklarını yüksektir. Bu nedenle yüksek işletme sıcaklığında çalışan uygulamalarda: örneğin fırın ve ocaklıarda, 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 farklılıklarını nedeniyle

yüksek gerilmeler ortaya çıkar ve isıl şok hasarı meydana gelir.



Isıl Genleşmenin Sınırlanması Nedeniyle Oluşan Isıl Şok

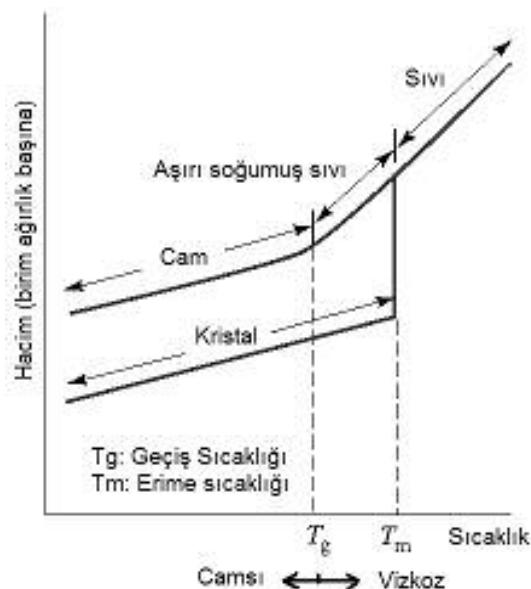


Isıl Yayınmanın Sınırlı Olması Nedeniyle Oluşan Isıl Şok

10.6 Camların Viskoz Şekil Değişimi

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

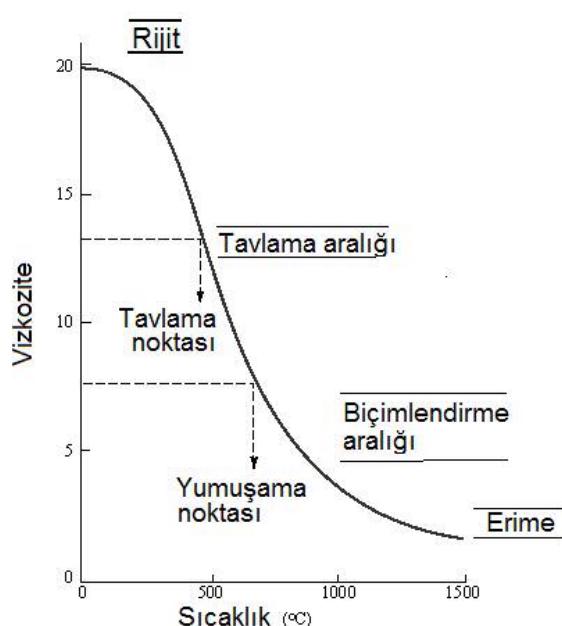
Amorf camlar düşük sıcaklıklarda aşırı soğumuş sıvılar olarak düşünülebilirler. Geçiş sıcaklığının (T_g) altında rıjit ve gevrek bir katı gibi davranışları; geçiş sıcaklığının üstünde ise yumuşak viskoz bir malzemeye dönüsen cama kolaylıkla şekil verilebilir. Erime sıcaklığının üstünde ise cam, artık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



Seramik ve camlarda sıcaklıkla hacmin değişimi izlenerek yapısal dönüşümler belirlenebilir

Viskozite (η):

Kristal olmayan vizkoz bir malzemenin şekil değişimine karşı direnci vizkozite (η) olarak adlandırılır. Düşük vizkoziteli malzemeler kolay akarlar. Camların viskozitesi sıcaklıkla değişir ve malzeme davranışlarının farklı olduğu değişik bölgeler ortaya çıkar.



Camlarda viskozitenin sıcaklıkla değişimi

Camlara uygulanan işlemler:

Tavlama:

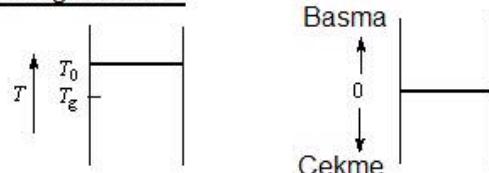
Hızlı soğuma sırasında sıcaklık dengesizliklerinden kaynaklanan iç gerilmeleri giderir

Sekillendirme yumuşama sıcaklığının üzerinde yapılır.

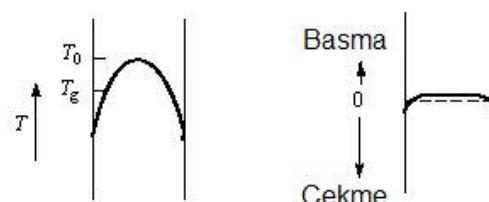
Temperleme:

Cam yüzeyinde basma iç gerilmeleri oluşturarak, malzemeyi çat�ak oluşumuna karşı duyarsız hale getiren bir ısıl işlemidir.

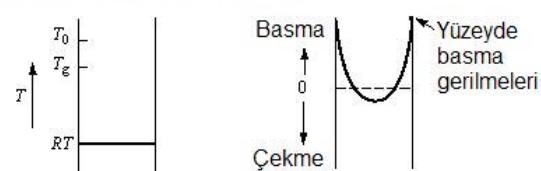
a. T_g üzerinde



b. Yüzeyin hava akımı ile T_g altına soğutulması



c. Oda sıcaklığına yavaş soğuma



Temperlenmiş cam imalinde sıcaklık ve gerilme profilleri

Malzeme camsı duruma geçiş sıcaklığının üzerine ısıtılır; daha sonra yüzeyi hava akımında veya yağ banyosunda hızla soğutulur.

Parçanın iç ve dış kısımları arasındaki sıcaklık farkları ortaya çıkar. Daha soğuk olan dış yüzey büzülmek ister, ancak hala sıcak olan sıcak iç kısmı bunu engellemek ister ve sonuçta, dış yüzeyde çekme, iç kısımda basma iç gerilmeleri oluşur.

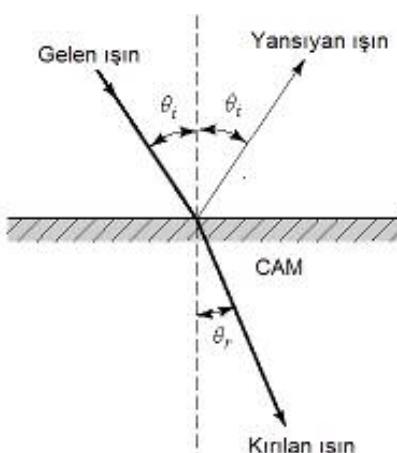
Soğumanın bu ilk evrelerinde hala yumuşak olan iç kısımda etkiyen basma gerilmeleri sonucu viskoz akış mekanizması ile şekil değişimi (kısalmaya) gerçekleşir ve iki bölge arasındaki dış kısmın önceden bütünlmesinden kaynaklanan boy farkları dengelenir.

Soğuma devam ettiğinde bu kez soğuyan iç bölgeler bütünlmeye çalışır, ancak bu oda sıcaklığına önceden soğumuş ve katı durumda bulunan dış yüzey buna engel olmaya çalışır. Yani dış kısım iç kısım bütünlmesini engellemek (onu eski boyunda tutmak) için iç kısma çekme gerilmeleri uygular; iç kısım ise bütünlmeye çalışırken dış kısmında kendisiyle birlikte boyunun kısalmasını sağlamak için dış kısma basma gerilemeleri 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 yansıma, kırma, yutma, geçirme gibi özellikler) mekanik özelliklerden daha önemlidir. Örneğin birçok optik uygulamada (pencere camları, mercekler gibi) kullanılan camlar, bu gruba giren malzemelerdendir.



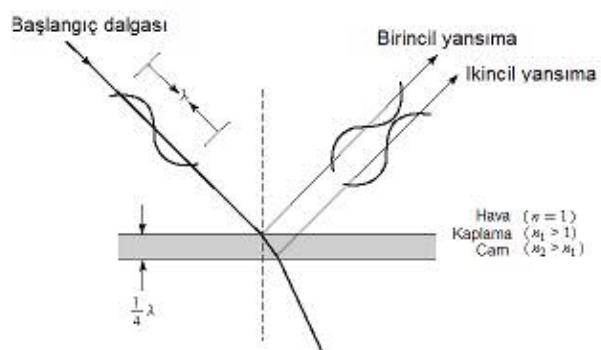
Kırılma ve Yansıma

İşik, bir ortamdan diğerine geçerken kırılmaya ve yansımaya uğrar. Işığın düşüğü düzlemin normali ile gelen ve yansayan ışığın yaptığı açılar eşittir; ancak kırılmaya oluşan açı gelme açısından kırılma indisine bağlı olarak büyük veya küçük olabilir. Kırılma indisini, malzemeye özgü bir özellikir; kırılma indisleri büyük olan malzeme, ışığı normale yaklaştırarak kırar.

Her malzemenin kırılma indisleri

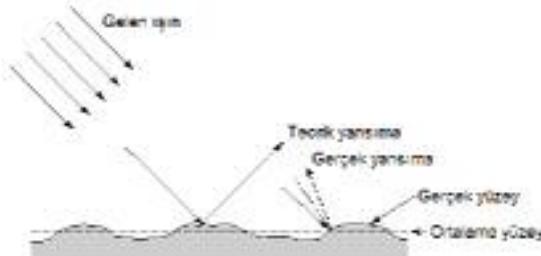
$$n = v_{\text{vakum}}/v_{\text{faz}} = \sin\theta_i / \sin\theta_r$$

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



Yansımıyı azaltmak için yüzey kaplaması kullanımı

Yansımıyı azaltan yüzey kaplamaları: Mikroskop merceklerinde ve gözlük camlarında uygulanır. Örneğin $\frac{1}{4} \lambda$ kalınlığında bir kaplama yansımıyı azaltır. Kaplama malzemesinin kırılma indisleri, fazların indislerinin arasındadır, kaplananın üst ve alt yüzeyinden yansayan birincil ve ikincil yansımıma ışınlarının girişimi sonucu yansımıya yok edilmiş olur. Sonuçta yansımıya azalır, ancak kırılıp geçen ışının güçlendiği söylemeyemez.

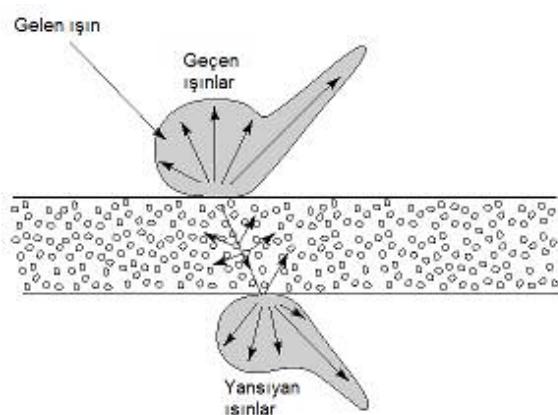


Yüzey pürüzlüğünün yansımaya etkisi

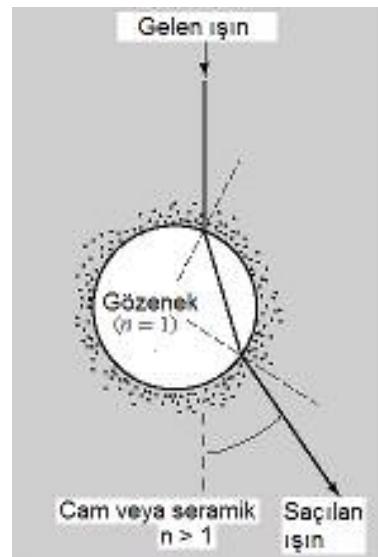
Yüzey pürüzünün yansımaya etkisi:
Ortalama yüzey ile gerçek yüzeyin paralel olmaması pürüzlük oluşturur. Ortalama yüzey dışındaki gerçek yansımalar sonucu oluşan dağınık yansımaya, yüzey pürüzlüğü ile artar.

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 saçılımayı etkilemezler. Dalga boyuna yakın tanecikler veya gözenekler saçılımayı maksimuma yaklaştırır. Saydamlığı önleyen gözenekler ve tanecikler saçılma merkezleri olarak da adlandırılırlar.



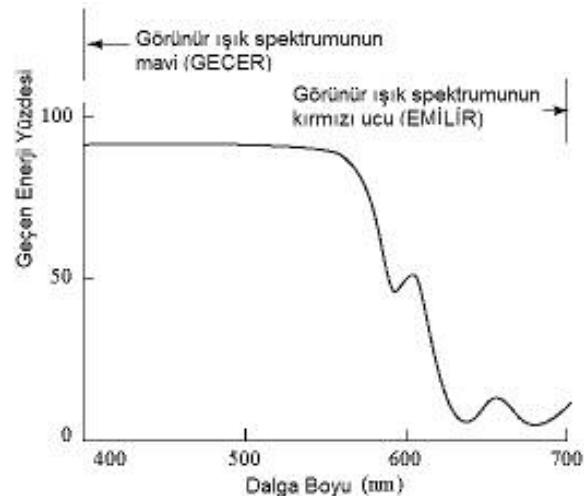
Yarısaydam bir cam levhadan ışığın yansımıası ve geçiş'i



Bir gözenekte ışığın saçılması

Renk oluşumu:

Bu durum belirli dalga boyalarının malzeme tarafından emilmesi ile ilgilidir. Yansıyan veya geçen farklı işinlerin değişik dalga boyadaki "karışımı" gözümüz tarafından algılanarak renk oluşur. Beyaz ışık görünür spektrumdaki tüm dalga boyalarındaki işinlerin karışımıdır. Ancak kırmızı dalga boyunun çok emilmesi bir durum ortaya çıkarsa, mavi ışık ön plana çıkar ve maviye yakın bir renk algılaması olur. Cama uygun iyonlar katılarak, belirli dalga boyalarının 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, ısıl kararlılık gibi özellikler, malzemenin kullanım özelliklerini; 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 sünük olduklarından dolayı kolay iken, dayanımlarının düşük olması dezavantaj oluşturur. Seramiklerin ısıl kararlılıkları iyidir, fakat biçimlendirme, birleştirme gibi imalat özellikleri genelde kötüdür. Tüm özellikler dikkate alındığında, metallerin özellikleri en uygunudur, 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 malzemedede toplamak, veya yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeye 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, balıkçılık içine saman lifleri katılarak yapılan ve asırlardır kullanılan bir yapı malzemesi türüdür. Saman katılarak kerpiçin

tokluğunu, yani parçalanması için gereken enerjiyi artırır.

- **Elektrik iletkenliği:** Enerji nakil hatlarında elektrik tellerinin dayanımlarının yüksek, iletkenliğinin de iyi olması gerekir. Bunun için dışı bakır (alternatif akım yüzeyden ilettilir), içi ise dayanımı yüksek çelikten meydana gelen teller üretilebilir.
- **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合金larının (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:

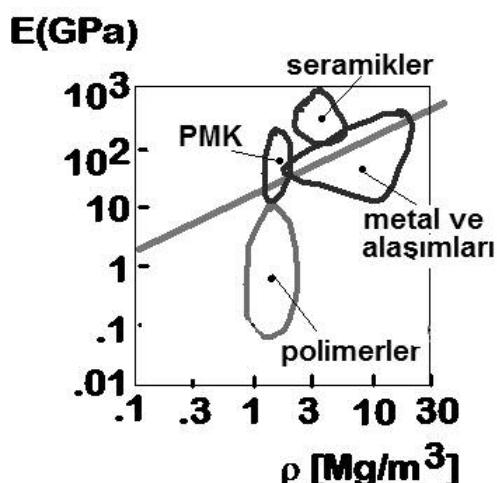
- dış zorlamaları takviye malzemelerine aktarır,
- onları darbelerden ve ortam etkisinden korur,
- bazı durumlarda malzemenin tokluğunu artırır (örneğin, matrisin metal olması tokluk sağlar).

Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer Matrisli Kompozitlerde polimer matrise takviye tıpalarak 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	



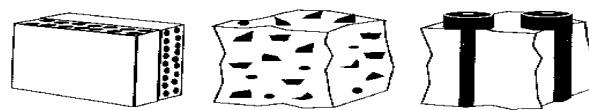
Metal Matrisli Kompozitler

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

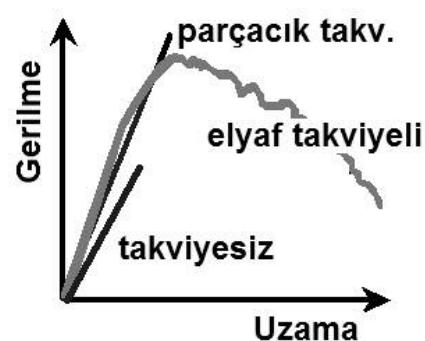
Çok yüksek sıcaklıklar için uygundur, dayanımları yüksektir ancak gevrek malzemelerdir. Seramiklerde genellikle elyaf takviye katılarak tokluk artırılmaya çalışılır (kerpiç örneği).

Kompozitler takviye türüne göre de sınıflanabilir:

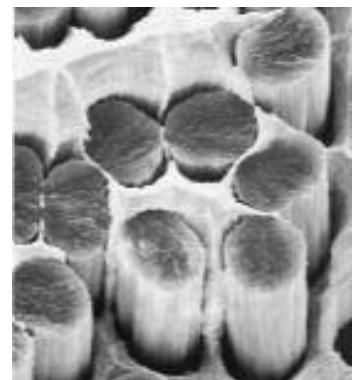


Takviye, matrisin özellikle mekanik özelliklerini geliştirir.

- Elyaf Takviyeli Kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler

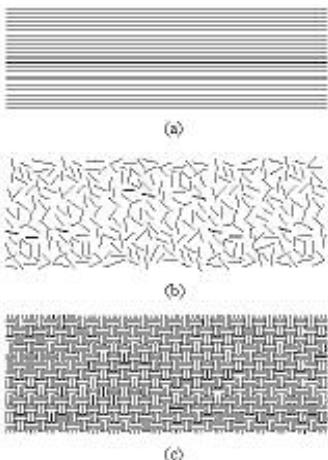


Elyaf Takviyeli Kompozitler (ETK)

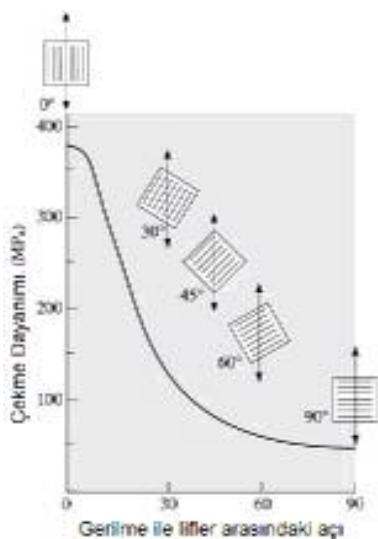


Bu tür kompozitlerde, matristen dayanım bakımından önemli bir bekleni yoktur. Matris lifleri yerinde tutar, ortam etkilerinden korur ve kuvvetleri liflere ileter; kuvvet ise tümüyle elyaf tarafından taşınır. Dayanımı ve rıjitliği yüksek olan elyaf lifleri takviye olarak kullanılır. Kuvvet tümüyle elyaf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

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



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



Elyafın yönlendirilerek kullanılması halinde özellikler yön 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 modulu 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 malzemeden. (Örneğin; aluminyum matrisli bir kompozit yapılacaksas, yüksek sıcaklıklarda aluminyumu eritip içine takviyeyi koymak lazımdır. Bu nedenle matris için yüksek sıcaklıklara dayanabilecek bir malzeme uygun olur. Bu tür kullanıcılar için bor uygundur, ancak diğer elyaf çeşitlerine öre çok daha pahalıdır.

Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Bazı Malzemeler ile Karşılaştırılması

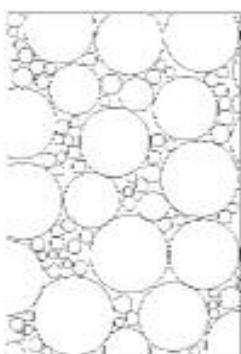


MALZEME	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Day. (Mpa)	Elast. Mod. (Gpa)	Özgül Çekme Day. (Mpa)	Özgül Elast. Mod. (Gpa)
Alaşimsız çelik	7,9	400	203	58	26
Aluminyum	2,8	84	71	30	25
Al alaşımı 2024	2,8	247	69	88	25
SiC(parç.)- Al KM	2,8	500	90	179	32
Ahşap (kayın)	0,7	110	13	157	1
Kemik	1,8	38	26	75	14
Plastik Malzeme	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

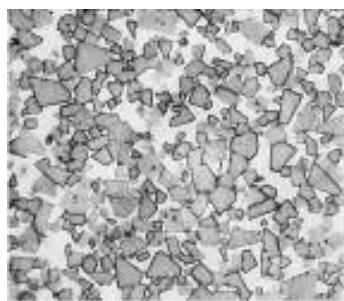
Parçacık Takviyeli Kompozitler

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

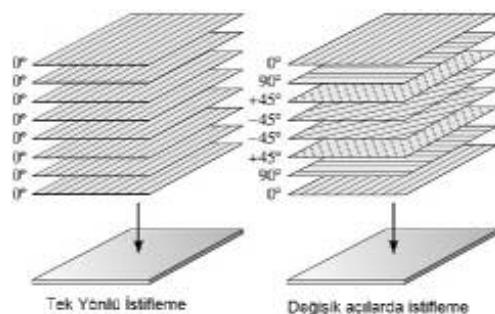


Sermet: WC/Co, Sert wolfram karbür parçacıklarının, topluğu yüksek kobalt matris içinde bulunduğu kesici uçlar.

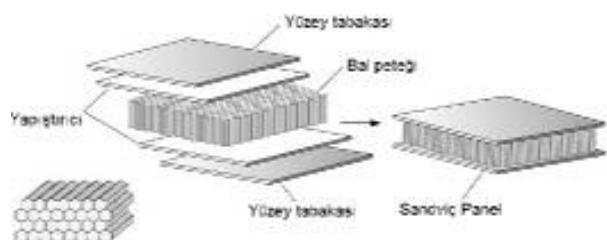
b. Küçük Parçacık Takviyeli:

Genellikle metal matrisli malzemelerde kullanılır. Kuvvetler matris tarafından taşınır. Parçacıklar dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanımı artırırlar. 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:

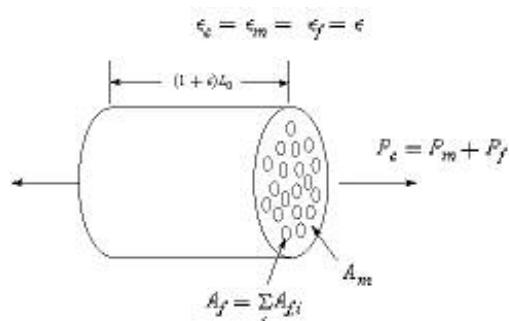
ETK malzemelerin özellikleri, homojen ve izotrop (örneğin metaller gibi) malzemelerden çok farklıdır. Bu malzemelerde, malzemeyi oluşturan bileşenlerin özellikleri (elyaf ve matrisin) ve bunların geometrik düzeni belirleyicidir. Elyaf ve matris özellikleri verildiğinde malzemenin yeni mekanik özelliklerini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

ETK'ların özelliklerine etki eden faktörlerin başlıcaları şunlardır:

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

Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitlerde Elastik Modülün Bulunması:

Takviye Doğrultusunda Yükleme



Sürekli elyafları 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

$$v_m = A_m / A_c \quad v_e = A_e / A_c$$

$$v_m + v_e = 1$$

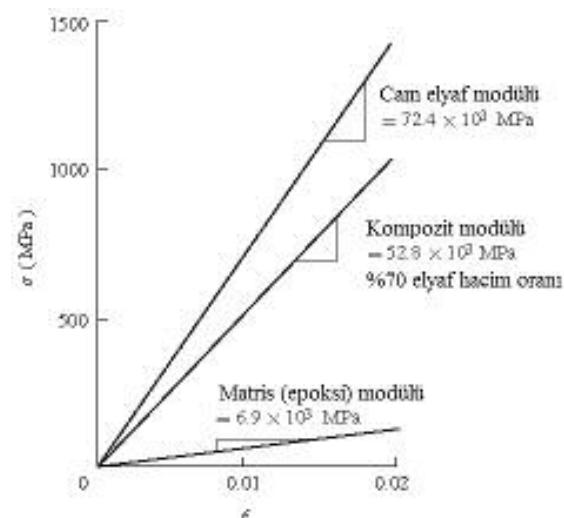
eşitlikleri geçerlidir. Dolayısıyla yukarıdaki denklemi A_c 'ye ve birim uzama değerine bölersek

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

bulunur ve gerekli kısaltma düzenlemeler ile

$$E_c = v_m E_m + v_e E_f$$

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.



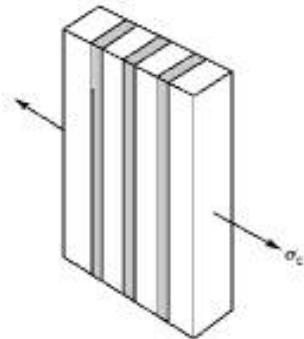
Burada dikkat edilmesi gereken, bulunan E değeri malzemenin takviye doğrultusundaki elastiklik modülü olduğudur. Bu denklemde geçerli olması için: takviye sürekli olmalı ve elyaf matris bağı tam olmalıdır.

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

$$E_c = \sum v_i \cdot \ddot{\sigma}_i$$

Burada v_i i bileşeninin hacim oranı, $\ddot{\sigma}_i$ ise i bileşeninin özelliğidir. Örneğin kompozitler için yoğunluk da bu şekilde hesaplanabilir.

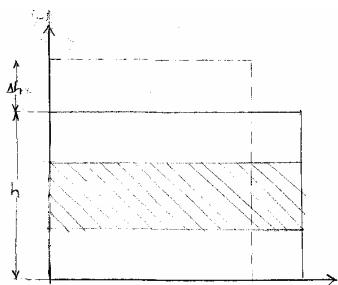
Takviye Doğrultusuna Dik Yükleme



Sürekli elyafları 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 (es gerilme durumu). Kompozitin uzaması ise elyaf ve matrisin uzamalarının toplamıdır. İşlem yaparken kolaylık sağlama açısından toplam lif alanına sahip tek bir lif varmış gibi düşünülebilir



Bu durumda malzemenin uzaması

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

olar. Öte yandan

$$\Delta h_c = \varepsilon_c \cdot h_c,$$

$$\Delta h_m = \varepsilon_m \cdot h_m,$$

$$\Delta h_f = \varepsilon_f \cdot h_f$$

olduğundan

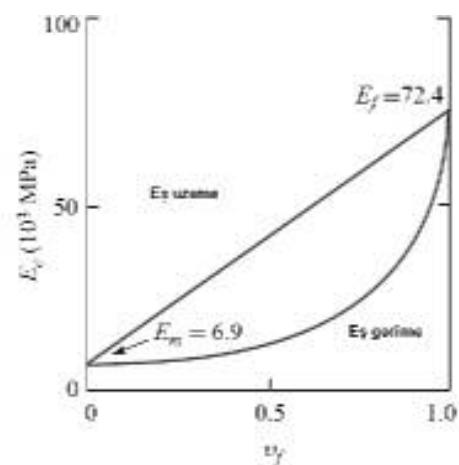
$$\varepsilon_c \cdot h_c = \varepsilon_m \cdot h_m + \varepsilon_f \cdot h_f \cdot v_f$$

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

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 elyafların elastiklik modülüne katkısı eş gerilme durumundakinden daha ciddidir.

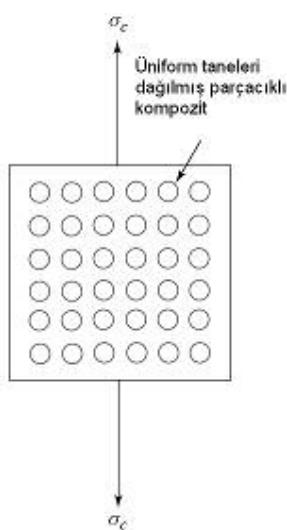


Bu denklemde herhangi bir diğer kompozit özelliği için genel ifadesi aşağıdaki şekildedir:

$$E_c = \sum (v_i / \ddot{\sigma}_i)$$

Burada v_i : i bileşeninin hacim oranı, $\ddot{\sigma}_i$ ise i bileşeninin özelliğidir.

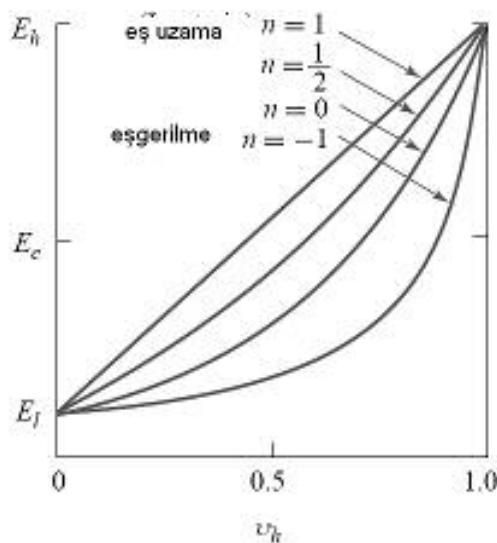
Taneleri Üniform Dağılmış Parçacıklı Bir Kompozit



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

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

Denklemdeki 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 $n=\frac{1}{2}$ alınır. Aslında bunlar bize kesin sonuç vermemekle beraber malzeme hakkında fikir sahibi olmamızı sağlar.

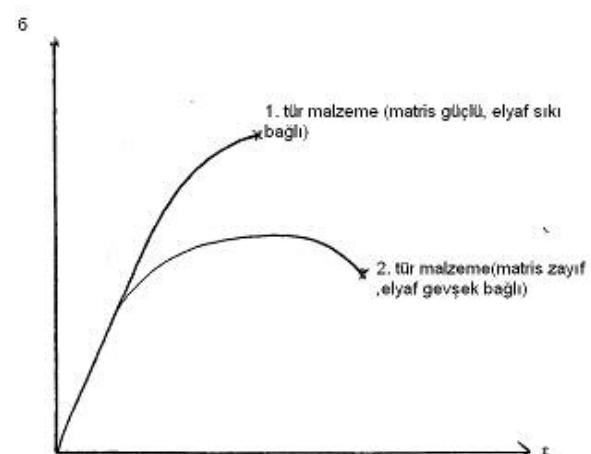
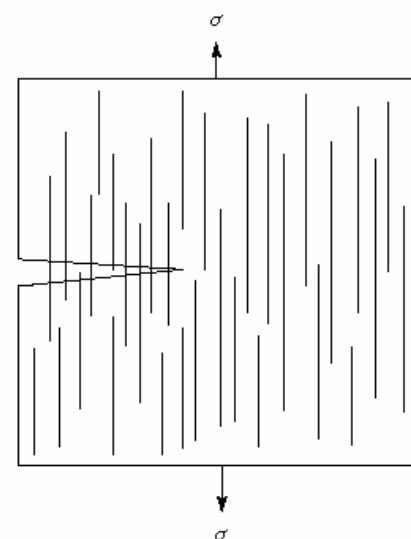


Takviye-Matris Arayüzeyinin Dayanımı:

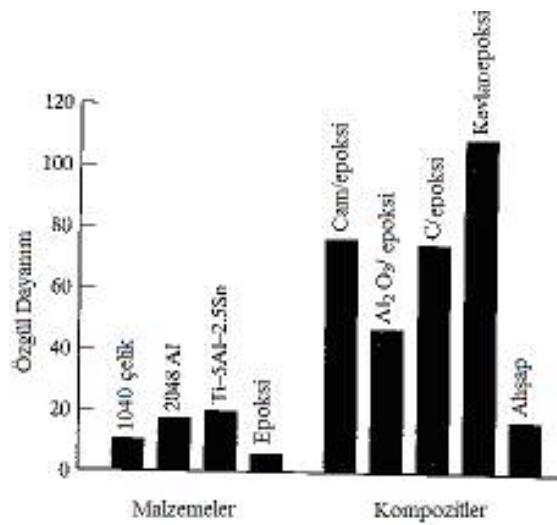
Bir kompozitte hasar oluşumu aşağıdaki biçimlerde olur:

1) Matris takviye arabacı güçlü ise kırılma birlikte olur, malzeme rijit ve gevrektilir. irilir

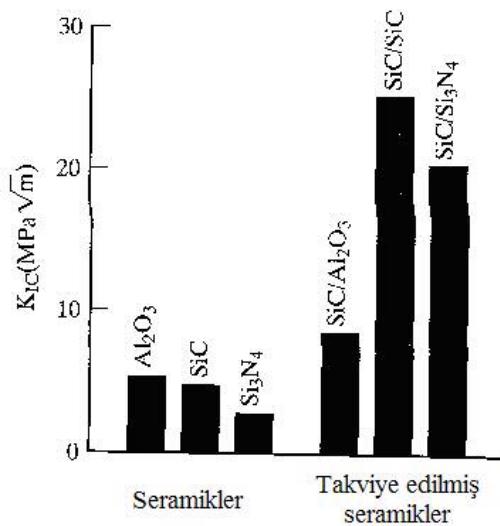
2) Ara yüzey bağı zayıf ise matris kırılır, tam hasar oluşumu için liflerin matristen çekilmesi gereklidir. Malzemenin tok olması için liflerin matrise çok sıkı bağlı olmaması gereklidir, bu durumda liflerin çekilmesi için sürtünmeye karşı enerji harcanacaktır.



BAZI KARSILAŞTIRMALAR:



Kompozit malzemelerin özgül dayanımlarının klasik malzemelerle karşılaştırılması



Seramik matrislerde süreksız elyaf takviyesi ile toplukta önemli artışlar sağlanır.

12. Ortamın Etkileri

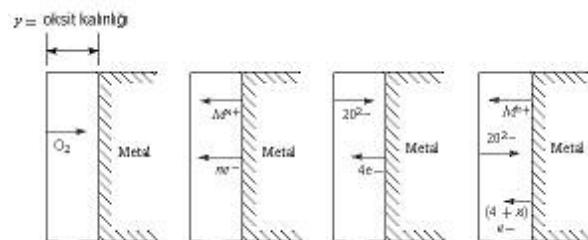
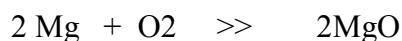
12.1. Korozyon

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

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

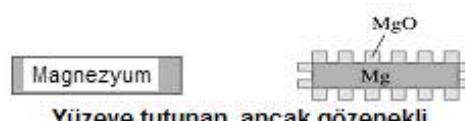
M = Oksitin molekül ağırlığı

d = Metalin özgül ağırlığı

m = Metalin atom ağırlığı

D = Oksit içindeki metal atomu sayısı

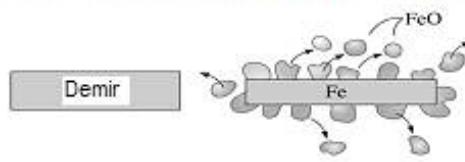
Bu değer 1'den küçük ise gözenekli bir oksit tabakası, çok büyük ise yüzeye tutunamayan ve dökülen bir oksit tabakası oluşur. Her iki durumda da oksit tabakası koruyucu değildir. Yüzeye tutunan koruyucu oksit tabakalarında P-B oranı genellikle 1 ile 2 değerleri arasındadır.



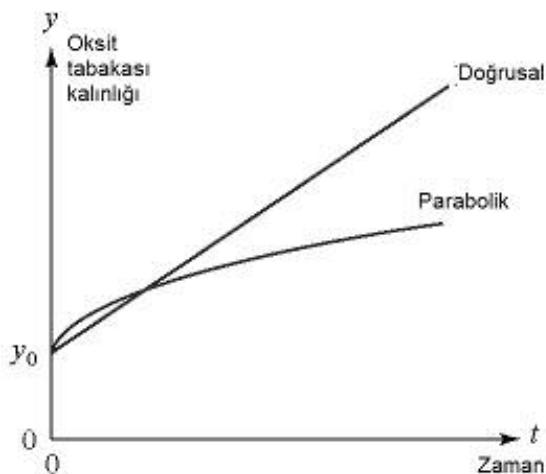
Yüzeye tutunan, ancak gözenekli



Yüzeye tutunan, gözeneksiz ve koruyucu



Yüzeye tutunmayan ve dökülen



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

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

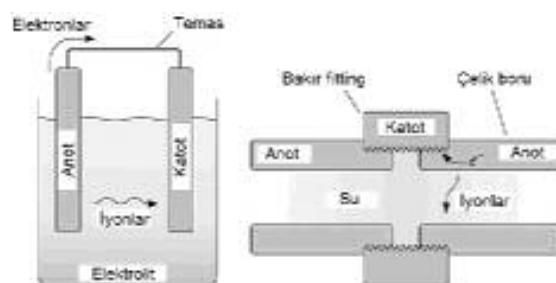
$$y_1 = c_1 \cdot t + c_2$$

- Parabolik karakter (koruma özelliği iyi)

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

12.1.2 Elektrokimyasal Korozyon

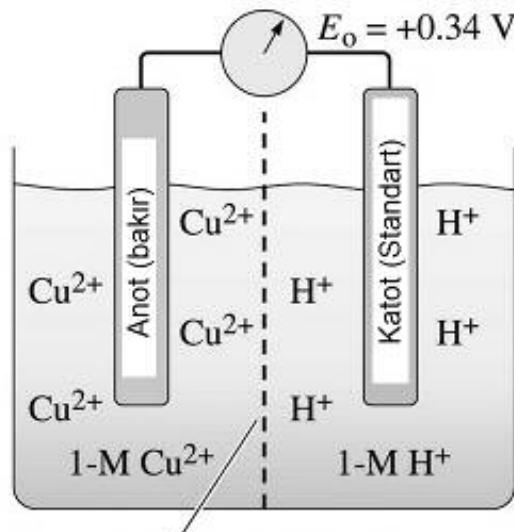
Elektrokimyasal korozyonda konum olarak **farklı yerlerde oluşan iki reaksiyon** vardır (anot ve katot). Elektrokimyasal korozyonun her iki kimyasal reaksiyonunda da **elektrik yüklerinin karşılıklı değişimini** zorluludur. Bu değişim metallerde elektron iletimi yoluyla olur, metalin dışında ise akım 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

çökeller (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 elektrod gerilimini aşağıda görülen yarı pil hücresi ile ölçülebilir. Eğer E_0 sıfırdan büyük ise bakır standart elektroduna göre katodiktir.



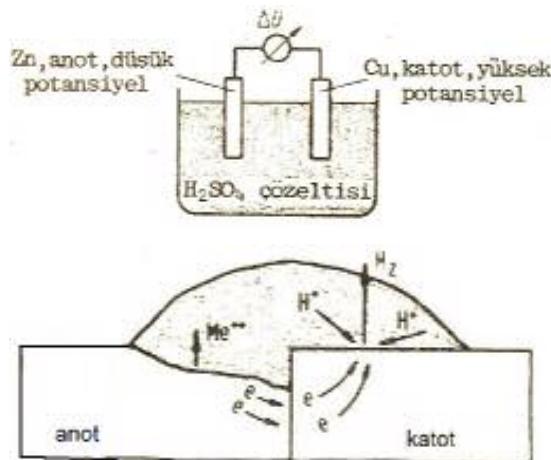
Aradaki membran elektrolitlerin karışmasını öner, ancak elektrik yükü geçebilir.

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
Asal Olmayan Anodik	H ₂ -H ⁺	0.000
	Pb-Pb ²⁺	-0.126
	Sn-Sn ²⁺	-0.136
	Ni-Ni ²⁺	-0.250
	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

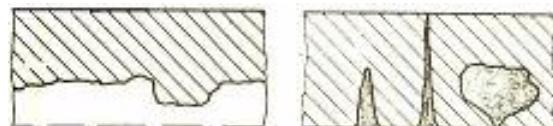
Farklı elektrokimyasal gerilim değerine sahip metallerin yan yana getirilmesi ve bir elektrolit üzerinden teması halinde bir korozyon pili (galvanik hücre) oluşur. Bu metallerden göreceli olarak asal olmayan metal anot olarak elektrolite metal iyonları verir.

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, katota bir şey olmaz.



12.2 Korozyon Türleri

Biçimsel Sınıflama



Genel korozyon: Tüm yüzeye etkindir, üniform ve yavaş ilerler. Korozyonun neden olduğu maddelerden ötürü kolaylıkla fark edilerek önlem alınabilir.

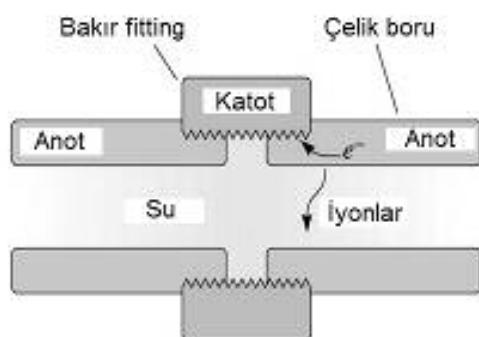
Noktasal korozyon: Yerel çukurlar oluşur veya yüzeyin altı oyulur. Zor fark edilir; oluşacak hasar, korozyon hasarının kendisinden çok daha ağırdir.



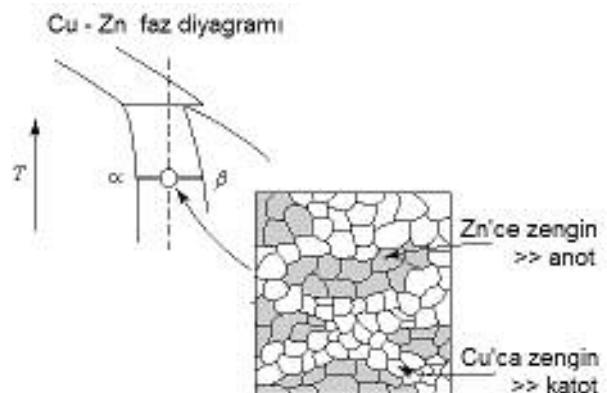
Korozyon çatlığı: Mekanik zorlamalar altında çatlak uçlarında. En tehlikeli korozyon biçimi olup, noktasal korozyon gibi çok zor fark edilir. Tanelerarası ve taneleriçi olabilir.

Elektrokimyasal Korozyon Türleri

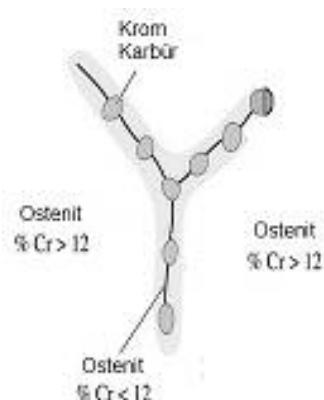
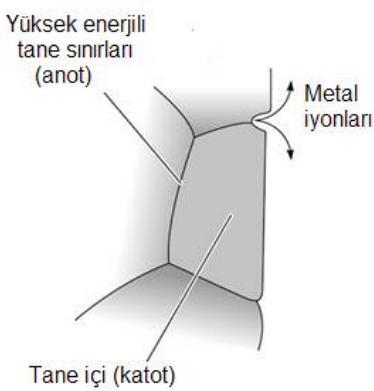
Temas korozyonu: Farklı malzemeler teması sonucu ortaya çıkar. Cıvata ile bunun bağlılığı ana malzemelerin farklı olması gibi gibi, makro temas pili.



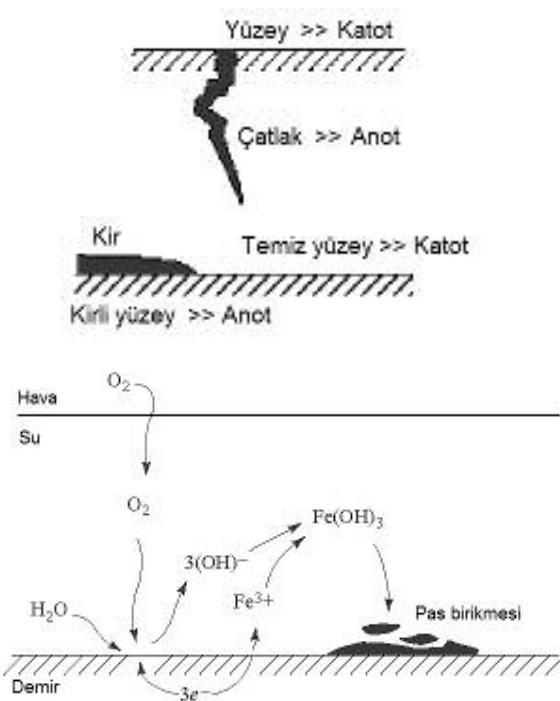
Bu tür temas pilleri (galvanik hücreler) mikroskopik düzeyde de oluşabilir. Örneğin farklı iç yapı bileşenlerinin bulunması (alfa-beta pirinci), tane sınırının tane içinden farklı olması (tanelerarası korozyon) gibi..



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



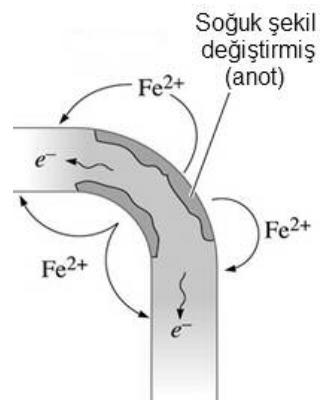
Oksijen Derişikliği Pili: Elektrolit içindeki oksijen girişinin çeşitli bölgelerde farklı olması nedeniyle oluşan havalandırma pili nedeniyle korozyon oluşabilir. Örnekler:



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



Şekil değiştirme farklılıklarını nedeniyle oluşan elektrokorozyon, örneğin bükülülmüş 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.

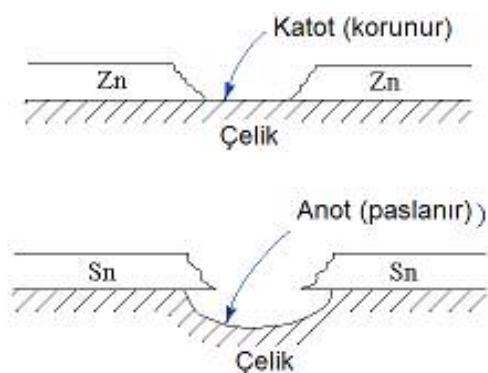
12.3 Korozyondan Korunma

Korozyondan korunmak için değişik yöntemler uygulanabilir:

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

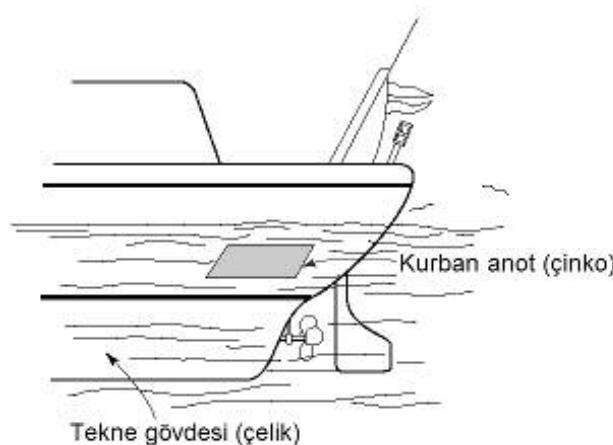
12.3.1. Aktif korunma

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

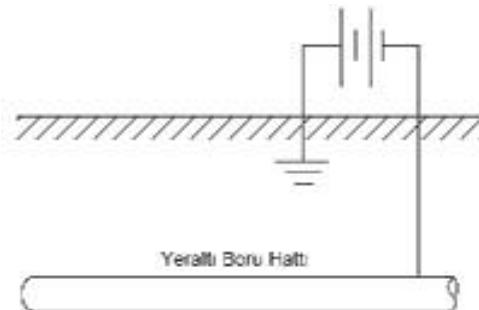


Çinko ve kalay kaplı çeliklerin korozyonu

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 altında 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: İnhibitor denilen kimyasal maddeler eklenebilir, kapalı devre sistemlerde akışkan oksijence fakirleştirilebilir.. Kalorifer suyuna iyon hareketini yavaşlatan tuzlar katmak bu yönteme örnek olarak verilebilir.

Korunacak metalden elektroliti uzak tutan her türlü önlem anlaşıılır. 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 davranış eğilimi vardır (örneğin soğuk şekil değiştirilmiş bölgeler). Homojenleştirme, yeniden kristalleşme, gerilme giderme tava ısıl işlemlerle bu **gerilmeleri gidermek** korozyonu azaltır.

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

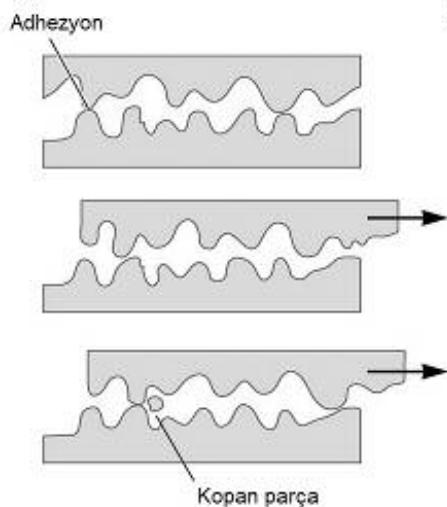
12.2. Aşınma

Değişik aşınma türleri vardır:

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma
- Erozyon
- Kavitasyon

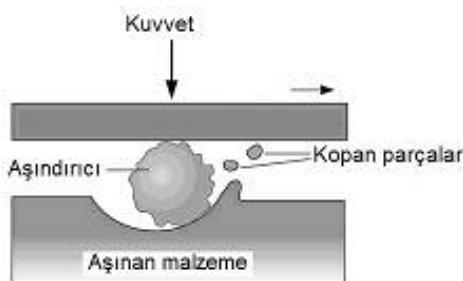
Adhezif aşınma

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



Abrazif aşınma

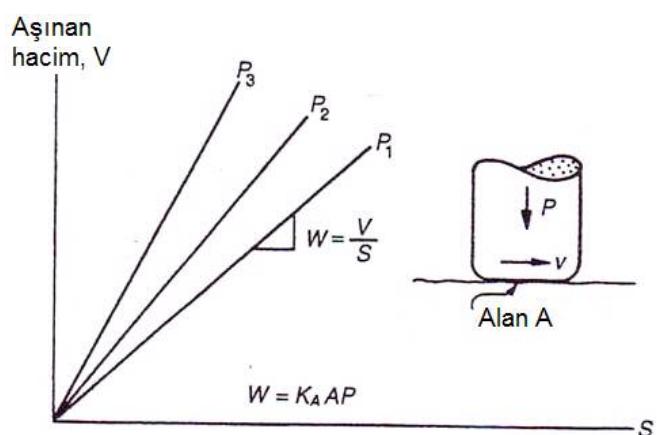
Bu tür aşınmadada araya giren aşındırıcı sert parçacıklar vardır. Bu durumdan imalatta da yararlanılır (taşlama, zımparalama vb.)



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 katsayısidır.

13. Elektriksel ve Manyetik Özellikler

13.1. İletkenlik

Malzemeler içindeki elektrik iletimi, uygulanan bir elektriksel alanın etkisiyle malzeme içindeki yük taşıyıcılarının hareketleri ile oluşur. Elektronlar, elektron boşlukları, anyon (-) ve katyonlar (+) başlıca yük taşıyıcılarındır. 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 alanıdir (cm^2). Bu değerin tersi olan σ değeri ise özgül iletkenlik olarak tanımlanır ($\sigma = 1 / \rho$; $\text{ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) Özgül iletkenlik ve özgül direnç malzemenin ayırt edici özelliklerindendir.

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

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

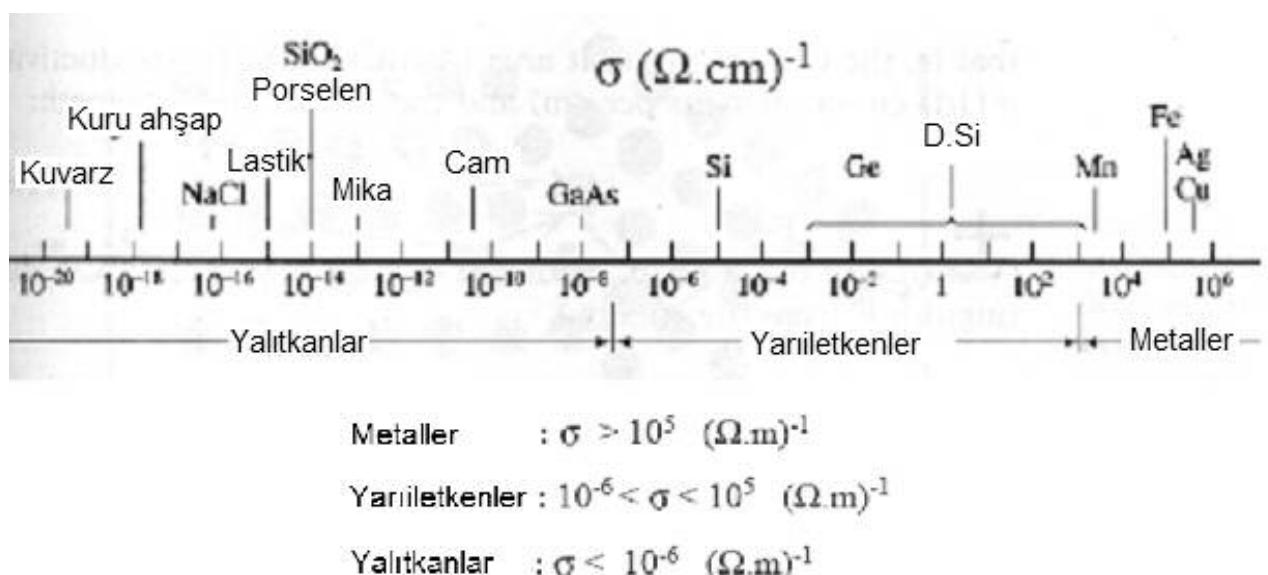
n : yük taşıyıcı sayısı

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 sayica boldur, daha çok taşıyıcının hızı ve taşıyıcıların engellerle karşılaşıp karşılaşmadığı önemlidir. Yalıtkanlarda ve yarıiletkenlerde ise taşıyıcı sayısı az olduğundan sayıları önem kazanmaktadır.

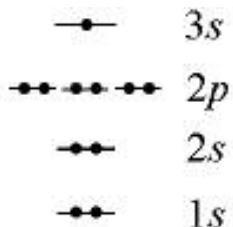
Metallerde taşıyıcı eleman elektronlardır. Yarı iletkenlerde ise elektronlar ve elektronların oluşturduğu boşluklar elektrik iletimine katkıda bulunur. Taşıyıcıların hızı atomik bağ, kafes kusurlarına, mikro yapıya, iyonik bileşenlere ve difüzyon oranına bağlıdır. Bütün bu etkilerden dolayı malzemeler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



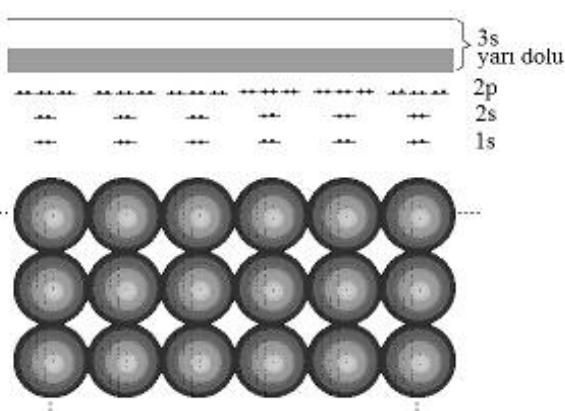
Enerji Bantları Modeli

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).

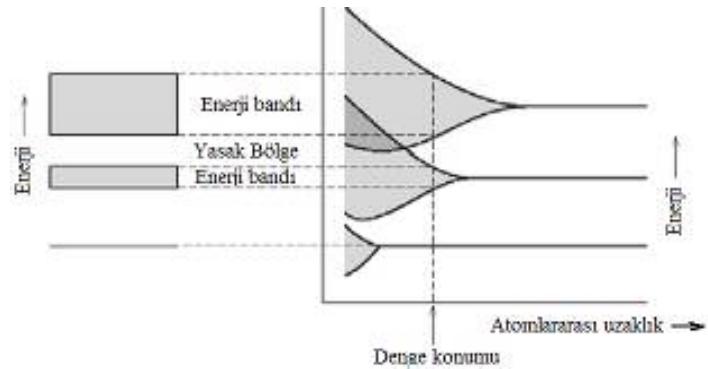
Atomlar bir katı içinde yan yana bulunduklarında, aralarındaki uzaklığı bağlı olarak birbirleri ile girişimde bulunurlar ve tek atom için belirlenmiş enerji seviyesinde değil, birbirine çok yakın enerji seviyesinin yer aldığı belirli enerji bantları içine yerleşirler. İletkenlik için en dış bantlar önem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



Tek bir sodyum atomunun enerji seviyeleri



Sodtum kristalinde 3s enerji seviyesi yarı dolu bir bant şeklinde oluşmuş



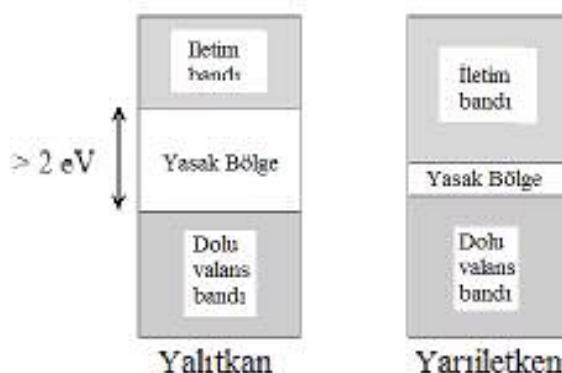
Enerji bantlarının atomlararası uzaklık ile değişimi

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 iletişim bandıdır.

Bu bantlar arasında elektronların bulunamayacağı yasak enerji seviyeleri bulunabilir.

Yalıtkan ve Yarıiletkenler

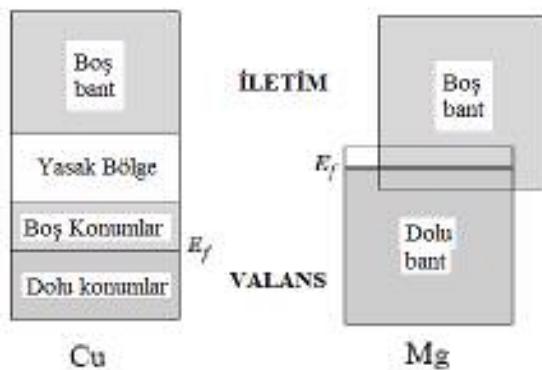


Elektrik iletkenliği, yani bir elektronun serbest hale gelerek hareket edebilmesi için bulunduğu düzeyin üzerinde boş bir enerji seviyesine yükseltilmesi gereklidir. Yarı iletkenlerde ve yalıtkanlarda valans bandı tam doludur, boş üst seviyeler yoktur; yani daha fazla elektron alamaz, dolayısıyla iletim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

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

sıcaklıklarda ısıl aktivasyondan ile sağlanabilir. Yarıiletkenlerde bu atlama oda sıcaklıklarında dahi mümkün olabilir; bir elektronun iletim bandına atlaması halinde valans bandında geriye bir boşluk (arti 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 çıkararak iletimi sağlayabilirler.



İletkenlik ve atomsal bağın ilgisi:

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

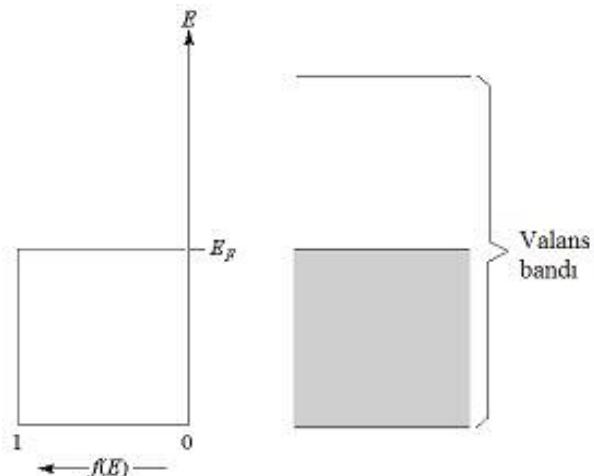
Yarıiletkenler: Genellikle zayıf kovalent bağlar

İletkenler: Elektronların serbestçe hareket edebildiği metaller

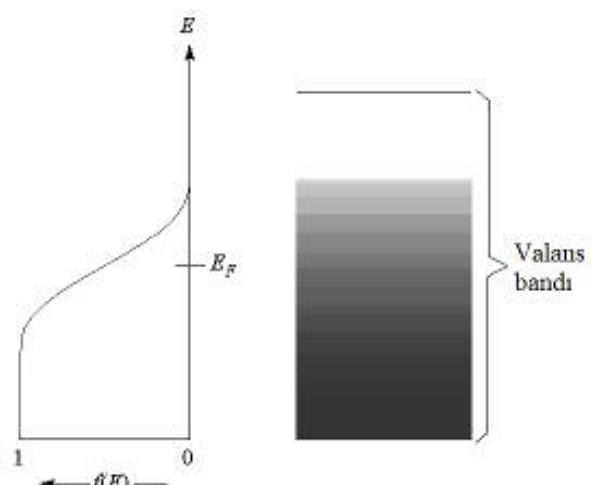
Fermi enerjisi

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

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

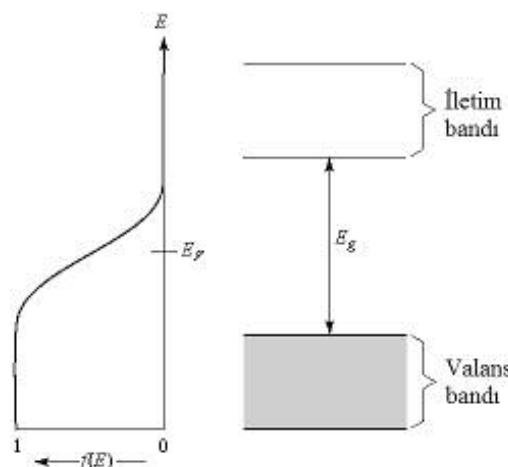


0 K sıcaklığında yarı dolu bir valans bandında enerji seviyeleri (E_F : Fermi enerjisi)



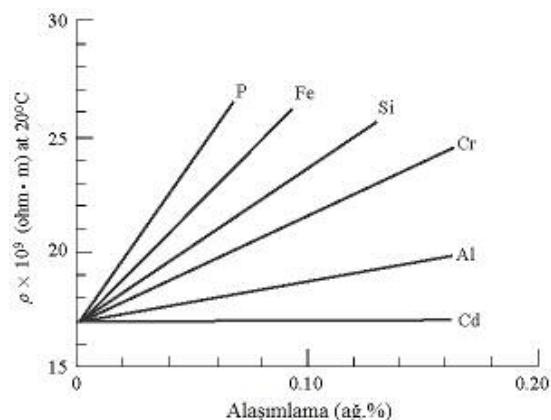
$T > 0$ K için yarı dolu bir valans bandında enerji seviyeleri

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



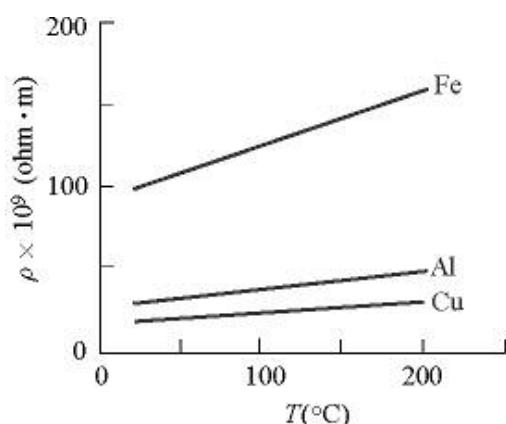
İletkenliğe etki eden değişik faktörler:

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 katışıkların birer kafes kusuru olarak elektron hareketliliğini düşürmesidir.



Az miktarda katılan elementlerin bakırın özgül direncine etkisi

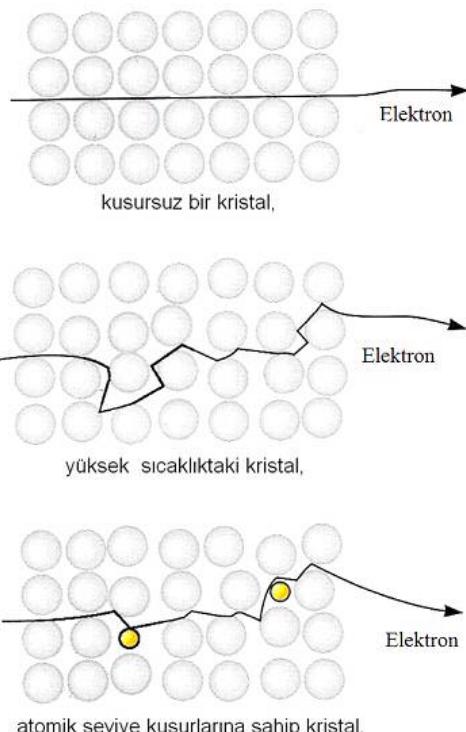
Ayrıca soğuk şekil değiştirerek pekleşmiş malzemede dislokasyon yoğunluğu yüksektir ve bu kafes kusurları direncin artmasına neden olurlar.



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

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

os: oda sıcaklığı



Bazı İletken Malzemeler:

Gümüş: Çok iyidir, ancak pahalıdır

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

Aluminyum: Hafifliğin önemli olduğu yerlerde kullanılır

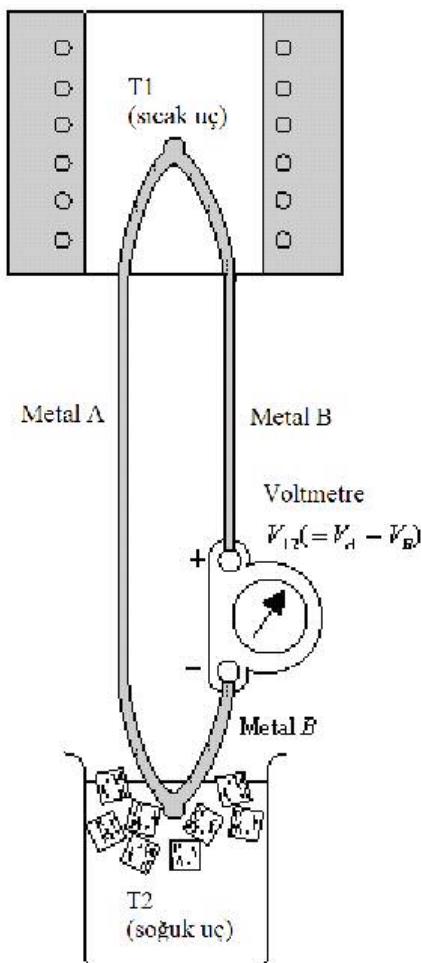
Isıtma elemanları: Yüksek özgül dirence sahiplerdir, Ni-Cr alaşımları

13.2. Isıl Çiftler (Termokupl – termoeleman)

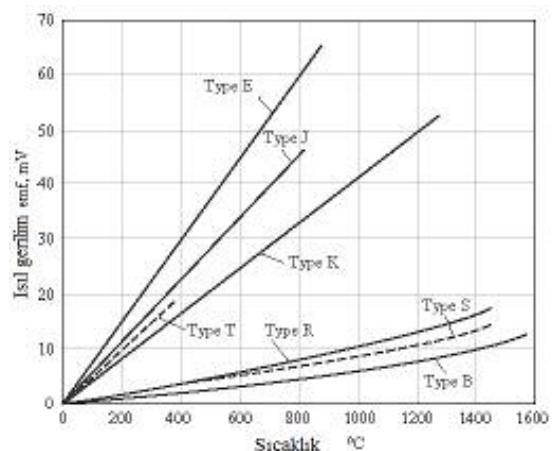
Fermi enerji seviyesi sıcaklığa duyarlıdır, yani iletken bir telin sıcak ucunda soğuk ucuna göre daha yüksek enerji seviyelerinde elektronlar bulunur ve bu elektronlar karşı uca giderek, sıcak uç (+), soğuk uç ise (-) yüklü olur. Bu tür duyarlılığı farklı olan iki malzemeden (A ve B metalleri) oluşturulan 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 tellerden oluşan bir ısıl çift (termokupl) kullanırız. Çünkü farklı tellerin ısıl duyarlılığı de farklıdır.



A ve B metallerinden oluşan bir ısıl Çift



Bazı ısıl çiftlerde oluşan gerilimin sıcaklıkla değişimi

Yayın Olarak Kullanılan ısıl Çift (termokupl) sistemleri

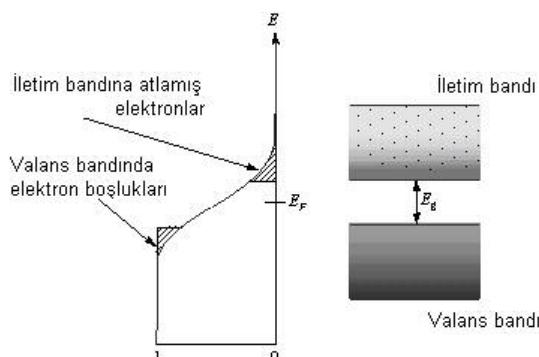
Type	Common name	Positive element ^a	Negative element ^a	Recommended service environments ^b	Max. temp. (°C)
B	Platinum-alkaline/platinum-sodium	90 Pt-10 Rh	94 Pt-6 Ru	Oxidizing Reducing Inert	1700
E	Chromel-alumel	90 Ni-9 Cr	44 Ni-55 Cr	Oxidizing	870
J	Invarconstantan	Fe	44 Ni-55 Cr	Oxidizing Reducing	760
K	Chromel-alumel	90 Ni-9 Cr	94 Ni-Al-Mn-Pt-Si-Co	Oxidizing	1260
R	Platinum/platina-sodium	97 Pt-3 Rh	Pt	Oxidizing Reducing Inert	1480
S	Platinum/platinum-sodium	90 Pt-10 Rh	Pt	Oxidizing Reducing Inert	1480
T	Copper-constantan	Cu	44 Ni-55 Cr	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 peryodik sıralımın 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 ısıl ve benzer etkilerle elektronlar iletim bandına geçebilirler.



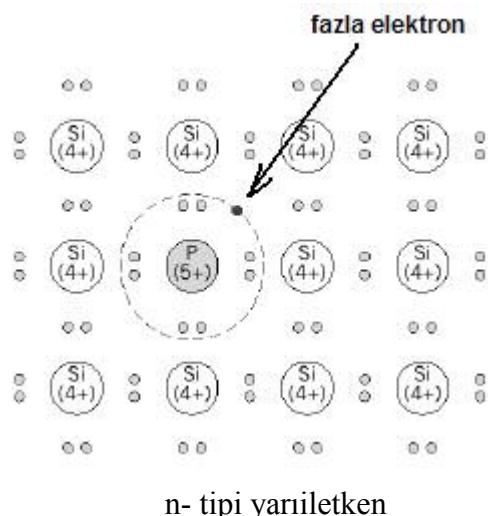
İletim bandına geçen bir elektron valans bandında bir boşluk (arti yük) bırakır. Elektron ve boşlukların sayısı aynıdır. Bir elektriksel alan uygulanırsa elektronlar ve boşluklar ters yönde hareket ederek iletme katkıda bulunurlar.

Örneğin Si'da oda sıcaklığında ($E_g=1,1\text{eV}$) 10^{13} atomdan sadece bir tanesi iletim bandına geçer. Sıcaklık arttıkça has yarıiletkenlerde iletkenlik artar (normal metallerin tersine!).

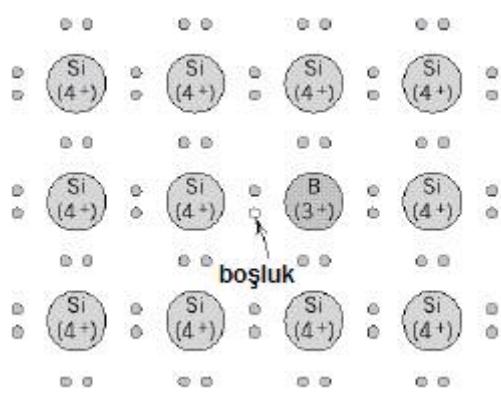
Katkılı Yarıiletkenler:

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 implantasyon 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.



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



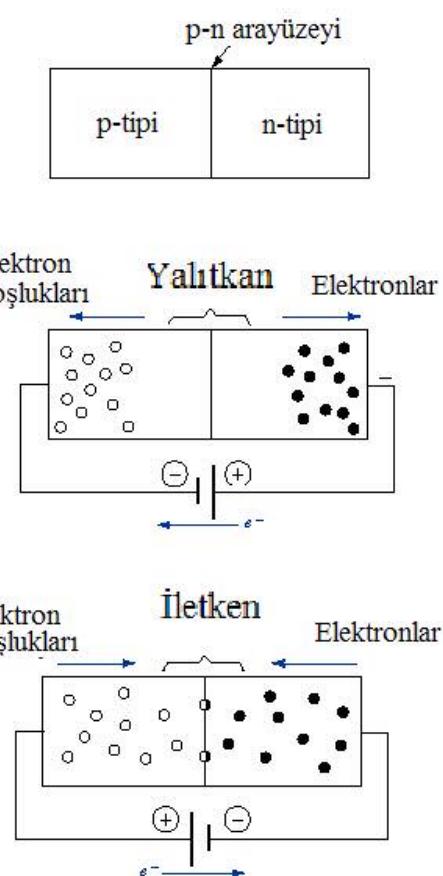
III A	IV A	V A
13 Al	14 Si	15 P

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



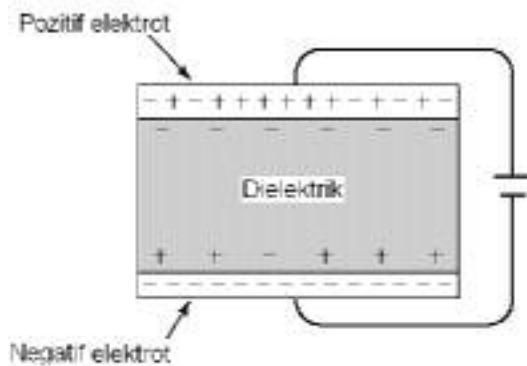
Bir p-n diyodunda uygulanan gerilimin yönüne bağlı olarak, arayüzey iletken veya yalıtkan olur. Yani p-n diyodu sadece bir yönde akım geçmesine izin verir.

13.3. Dielektrik Malzemeler

Kapasitörler

Kapasitorde elektronların kutuplanarak elektriksel yükü elektrik alanın içerisinde depolayabilme özelliklerinden faydalananır. 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 kapasitorun sığası $C = Q / V$, gerilim birimi başına depolayabildiği yük miktarıdır.

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



İki paralel iletken plaka $+Q, -Q$ ile yüklenirse, plakalar arasında bir elektrik alanı oluşur. Paralel plakalı kapasitor 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 ($8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}^2$), ϵ_r ise malzemenin bağlı dielektrik sabitidir.

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

olar. Bir malzemenin üzerinde yük depolayabilme yeteneği dielektrik (yalıtkanlık) sabiti ϵ adı verilen katsayı ile ölçülür ve bu katsayı her malzemedede farklı değer alır. Hesaplama kolaylığı açısından her malzemenin dielektrik katsayısı, boşluğun dielektrik katsayısına göre oranlanır ve ortaya çıkan yeni katsayıya bağlı 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.

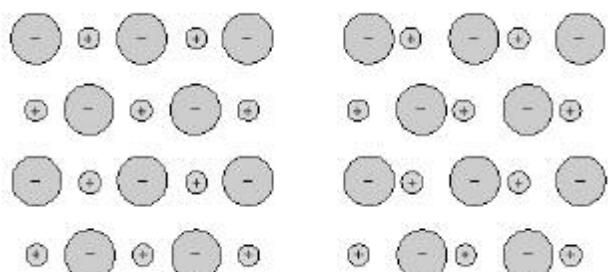
Elektrik alan içinde olan malzeme yapısındaki düzenleme **polarizasyon** olarak adlandırılır ve kapasitorun elektrik yük yoğunluğunun artmasını nedenidir.

Polarizasyon mekanizmaları (dipol oluşumu/vönenme)

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 yönlere öteler.



Moleküler polarizasyon: Bazı malzemeler kalıcı elektrik dipollere sahiptir (H_2O gibi). Elektrik alan olmadan dipoller rastgele dağılır, uygulanırsa yönlendirirler.

Dielektrik dayanım

Cocuk yüksek elektrik alanları uygulanırsa ($>10^8$ 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.

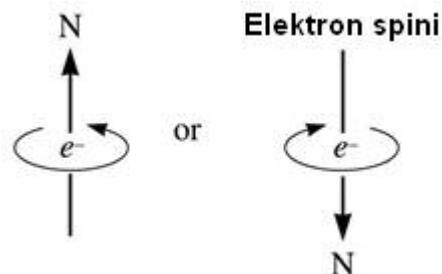
Piezoelektriklik

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 uygandığında 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.

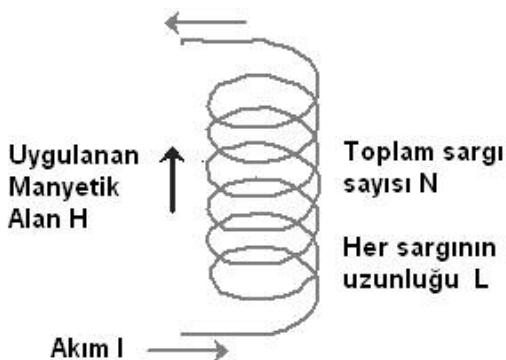
Bu malzemelere örnek olarak baryum titanat $BaTiO_3$, kurşun zirconat $PbZrO_3$, kuvarz gösterebilir.

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 yöringedeki 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 bulunduğuundan, manyetiklik açısından farklı özelliklere sahiptirler ve nitekim bu kutup çiftleri yönlenderek makro düzeyde bir manyetik moment yaratabilirler.

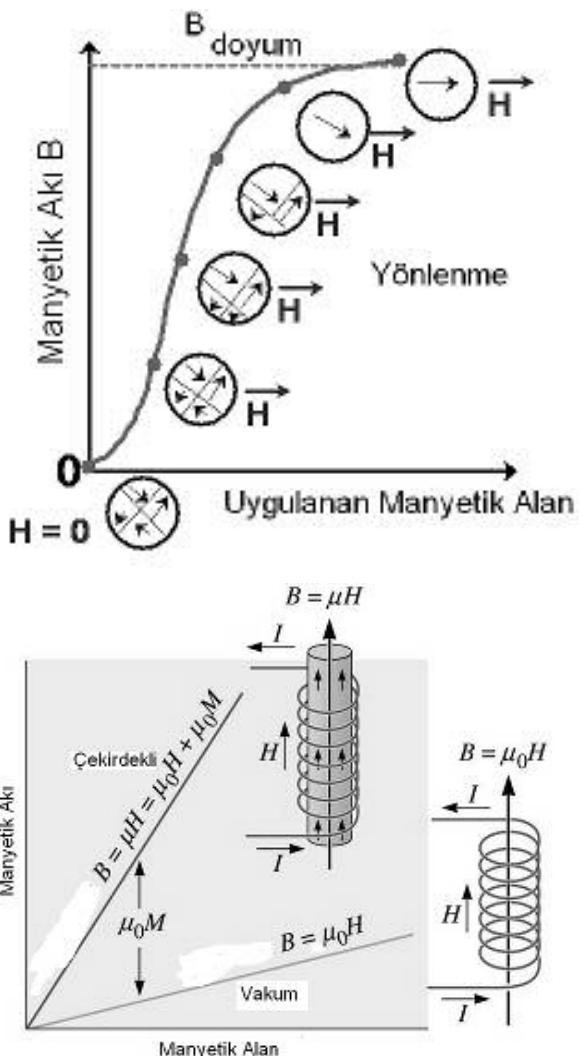


İçinden akım geçen bir iletkenin çevrasında manyetik alan oluşur. Bir bobinde bu manyetik alanın şiddeti

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

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.

$$B = \mu_0 H$$



Uygulanan manyetik alan etkisi ile malzeme içindeki kutup çiftleri yönlenerek 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 sınıflanabilir:

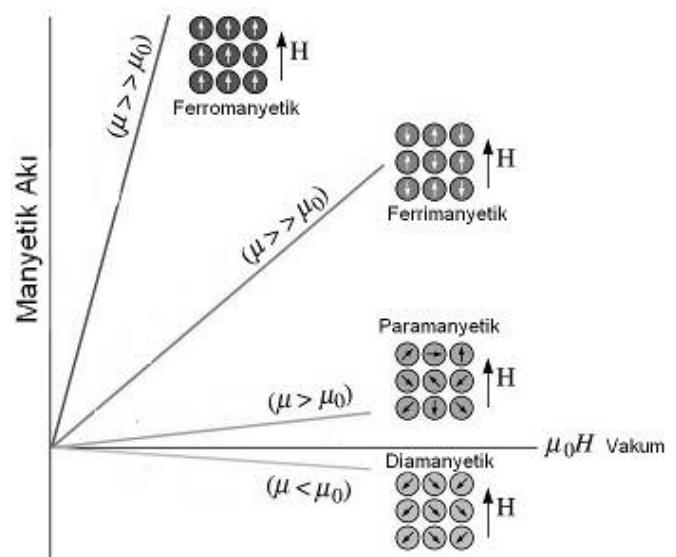
Diamanyetik Malzemeler: Valans altı düzeyleri tam doludur. Uygulanan alan mevcut elektronlarla etkileşerek zayıflar. Bu tür malzemeler Cu, Ag, Zn vs.

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

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

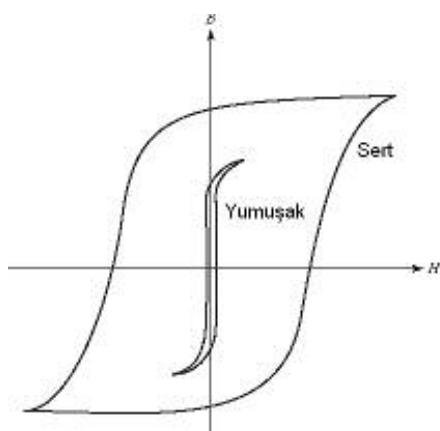
kutup çiftleri dönerken yönlenirler. Paralel hale gelerek manyetik akımı çok yükseltirler. Manyetik alan kalkınca tekrar dağıtık hale gelir. Bazı malzemelerde ise bu yönlenme kalıcı olur, bunlara sert manyetik malzemeler denir.

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



Histerizis içinde kalan alan çevrim boyunca kaybolan enerjidir.

ısınmasına neden olur. Ayrıca kutup çiftleri dönerken bağ boyları değişir ve bir vinlama 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).

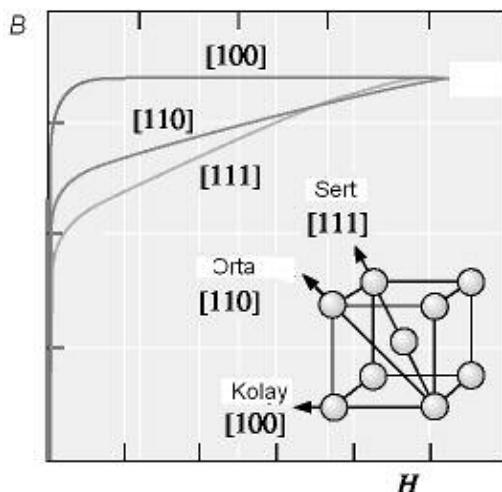
Sert Manyetik Malzemeler: Histerisiz kaybı büyktür, manyetik alan kaldırılsa dahi kalıcı manyetiklik vardır, (Mıknatıslar, AlNiCo alaşımaları)

Manyetikliğine Etki Eden Faktörler:

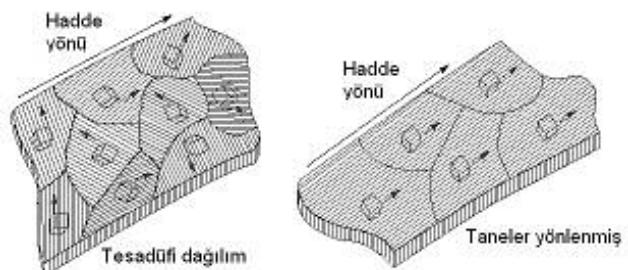
Kutup çiftleri yönlenmiş bir mıknatısta, sıcaklık arttıkça kutuplar rastgele yönlenmeye başlar. Kalıcı manyetiklik azalır ve belir bir sıcaklıkta kaybolur (Curie sıcaklığı).

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

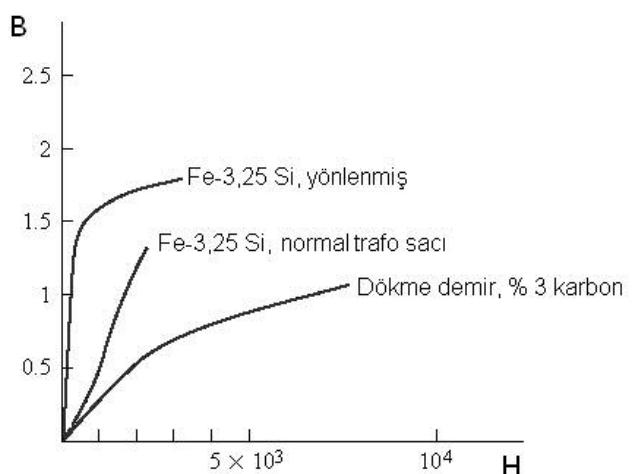
Manyetik yönlenme kristallografik doğrultuya da bağlıdır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi hmk demir kafesinde malzeme [100] doğrultusunda en yumuşaktır, yani bu doğrultuda yönlenmiş bir malzemede histeris kayipları en azdır.



Enerji kayiplarını azaltmak amacıyla trafo yapımında kullanılmak üzere, taneleri yönlenmiş çelik saçlar geliştirilmiştir.



Taneleri yönlenmiş trafo saçları



Bazı demir esaslı malzemelerin manyetiklik özellikleri