

# **METALİK MALZEMELERE UYGULANAN MEKANİK DENEYLER**

**(Ders Notları)**

**Hazırlayan  
Prof. Dr. Gençğa Pürçek**

**Trabzon, 2014**

## Giriş

Belirli bir uygulama alanı için malzeme seçimi o malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olduğundan, bu özelliklerin ölçülmesinde kullanılan standart deneyleri tanımak ve bu deneylerden elde edilen sonuçları değişik parametrelere bağlı olarak değerlendirmek büyük önem taşır. Bir malzemenin statik yüklere dayanma kapasitesi çekme ve basma deneyleri ile belirlenir. Kalıcı şekil değiştirmelere karşı direnç hakkında bilgi statik deneyler ile sağlanabilir. Bir malzemenin çizilmeye ve aşınmaya karşı direnci ise sertlik nedeniyle ile belirlenebilir. Darbe deneyi malzemenin darbe şeklindeki zorlanmalara dayanımını belirlemek için kullanılır. Bu deneyler değişik sıcaklıklarda yapılarak bir malzemenin sünek-gevrek geçiş sıcaklıkları belirlenebilir. Yorulma deneyi ile bir malzemenin değişken ve tekrarlı zorlanmalar altındaki davranışları ve bu etkiler altındaki faydalı ömrü belirlenebilir. Sürünme deneyleri, malzemenin yüksek sıcaklıkta uzun süreli yüklemeler altındaki davranışlarının belirlenmesi amacıyla uygulanır.

Bu ders notu içerik itibariyle mekanik deneylerle sınırlı olsa da, bu deneylerin ortaya çıkardığı malzemenin mekanik davranışları da ele alınmış ve neden –sonuç ilişkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde, metalik malzemelere uygulanan temel mekanik deneyler ve mekanik davranışlar belli bir sıra dahilinde incelenmiştir.

### 1. Çekme Deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mukavemeti hakkında esas tasarım bilgilerini belirlemek ve malzemeleri özelliklerine göre sınıflandırmak amacıyla yapılır. Çekme deneyi, standartlara göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir çekme hızında ve sabit sıcaklıkta koparıncaya kadar çekilmesidir. Deney sırasında, standartlara göre hazırlanan çekme numunesine uygulanan kuvvet ya da gerilme ile meydana gelen uzama değerleri kaydedilir.

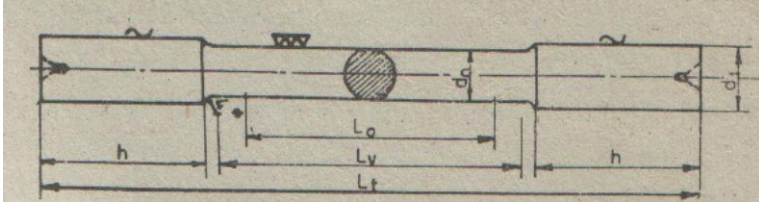
Çekme deneyi sonucunda numunenin temsil ettiği malzemeye ait aşağıdaki temel mekanik özellikler belirlenebilir:

- Akma gerilmesi (Yield stress)
- Çekme gerilmesi (Tensile stress)
- Kopma uzaması (Elongation to failure)
- Kesit daralması (Reduction in cross-section)
- Tokluk (Toughness)
- Elastisite modülü (Elastic modulus)
- Rezilyans (Resilience)

#### 1.1. Çekme Numuneleri

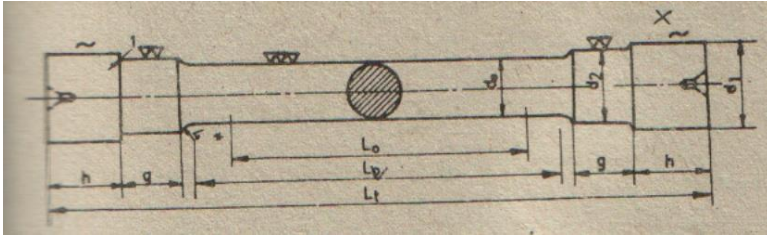
Çekme deneyine tabi tutulacak numuneler, temsil ettiği malzemenin tüm özelliklerini taşımalıdır. Bu nedenle, numunenin alındığı bölgenin, alınış ve hazırlanış şeklinin büyük önemi vardır. Numune hazırlanırken, temsil ettiği malzeme özelliklerinde herhangi bir değişiklik oluşmamasına dikkat edilmelidir. Üretim sırasında aşırı sıcaklık oluşumu önlenmeli, ayrıca deformasyondan kaynaklanan etkilerde elimine edilmelidir. Çekme deneyine tabi tutulacak numunenin şekil ve boyutları standartlarda belirtilmiştir. Bu nedenle deney sonuçlarının güvenilirliği ve karşılaştırılabilir olması açısından deneyler standartlara göre hazırlanmış numuneler ile yapılmalıdır. Aşağıda standartlara uygun, dairesel ve diktörtgen kesitli numunelerin şekil ve boyutları verilmiştir. Alınacak malzemeye göre çekme

numunesinin kesiti, dairesel, kare, dikdörtgen ve halka şeklinde ve hatta bazı durumlarda özel profil şeklinde olabilir. Türk standartları, TS 138-A'da çekme numunelerini şekil ve boyutlarına göre standartlaştırmıştır. Aşağıdaki şekilde standartta verilen numuneler gösterilmiştir.



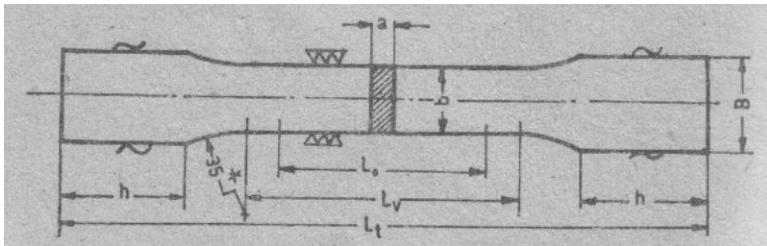
$d_0$  = Numune Çapı  
 $d_1$  = Baş Kısımının Çapı =  $1,2 d_0$   
 $L_v$  = İnceltilmiş Kısımın Çapı =  $L_0 + d_0$   
 $L_0$  = Ölçü Uzunluğu =  $5 d_0$   
 $L_t$  = Toplam Uzunluk  
 $h$  = Baş Kısımının Uzunluğu

(a)



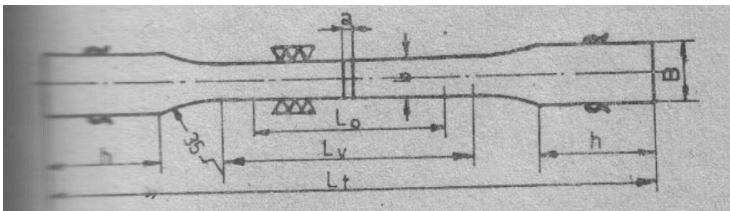
$d_0$  = Numune Çapı  
 $d_2$  = Basamak Kısımının Çapı =  $1,2 d_0$   
 $d_1$  = Baş Kısımının Çapı =  $1,75 d_0$   
 $L_v$  = İnceltilmiş Kısımın Çapı =  $L_0 + d_0$   
 $L_0$  = Ölçü Uzunluğu =  $5 d_0$   
 $L_t$  = Toplam Uzunluk  
 $h$  = Basamak Kısımının Uzunluğu =  $d_0$   
 $h$  = Baş Kısımının Uzunluğu =  $d_0 + 5$  mm

(b)



$a$  = Numune kalınlığı  
 $b$  = Ölçü uzunluğu için ölçü genişliği  
 $B$  = Baş kısmının genişliği:  $1.2b + 3$   
 $L_v$  = Daraltılmış kısmın uzunluğu:  $L_0 + b$   
 $L_0$  = Ölçü Uzunluğu:  $5.65.A_0^{1/2}$   
 $L_t$  = Toplam Uzunluk  
 $g$  = Baş Kısımının Uzunluğu:  $2b + 10$  mm

(c)



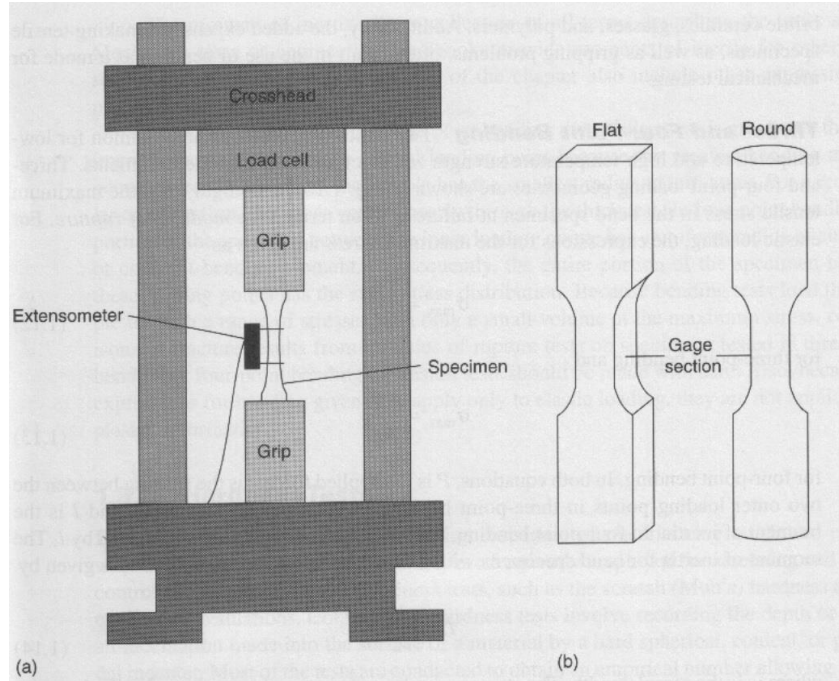
$a$  = Numune kalınlığı ( $0.15\text{mm} < a < 5\text{mm}$ )  
 $b$  = Ölçü uzunluğu için ölçü genişliği ( $15-20$  mm)  
 $B$  = Baş kısmının genişliği  
 $L_v$  = Daraltılmış kısmın uzunluğu:  $L_0 + b$

$$L_0 = \text{Ölçü Uzunluğu: } 5.65.A_0^{1/2}$$
$$L_t = \text{Toplam Uzunluk}$$
$$h = \text{Baş Kısımının Uzunluğu (en az 50 mm)}$$

Şekil 1.1. Standart çekme numuneleri ve boyutları: (a) Dairesel kesitli, silindirik başlı, (b) dairese kesitli, basamaklı, (c) dikdörtgen kesitli (kalın yassı malzemeler), (d) dikdörtgen kesitli (ince yassı sac malzemeler).

## 1.2. Çekme makinesi

Günümüzde çok gelişmiş, üniversal çekme-basma deneyi makineleri mevcuttur. Bu makineler hidrolik ve elektronik sistemlerle donatılmış ve değişik yükleme kapasitelerine sahiptir. Ayrıca, uygulanan yük ve meydana gelen uzama değerleri bilgisayarlar yardımıyla anında çizdirilebilmektedir. Bu makinelerde numune boyunda meydana gelen uzama, kontak tipi uzama ölçerlerin (ekstansometer) yanında son yıllarda geliştirilen non-kontak video uzama ölçerler (video ekstansometer) ile belirlenmektedir. Üniversal bir çekme makinesi Şekil 1.2'de de gösterildiği gibi temelde iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, deneyin gerçekleştirildiği elektro mekanik sistem, diğeri ise alına verilerin işlendiği ve sonuçların elde edildiği veri işleme sistemidir. Elektromekanik sistem ise, numunelerin yerleştirildiği çeneler, uygulanan yükün algılandığı yük hücresi, meydana gelen uzamanın ölçüldüğü uzama ölçer (ekstansometre) ve hareketin sağlandığı mekanik sistemlerden oluşmaktadır. Veri işleme sistemi ise modern makinelerde bilgisayarlar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde gelişmiş yazılımlar sayesinde, çekme deneyi ile elde edilebilecek bütün veriler toplanıp işlenebilmektedir.



Şekil. 1.2. (a) Bir üniversal çekme-basma deney makinesi ve (b) çekme numunesi örnekleri [Bowman]

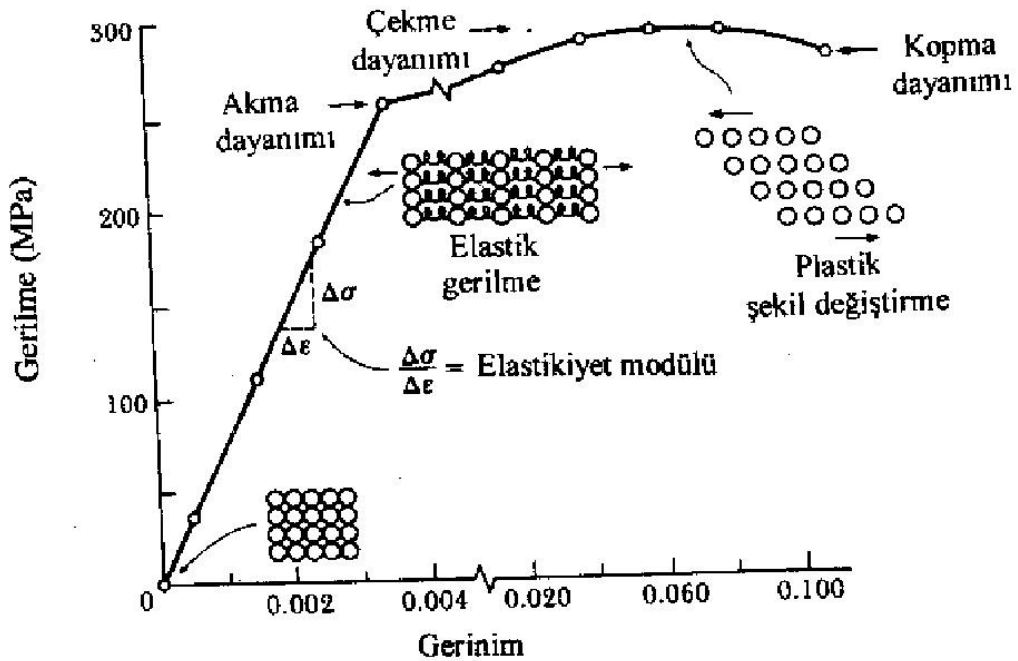
### 1.3. Çekme deneyinden elde edilen veriler ve bu verilerin değerlendirilmesi

#### 1.3.1. Mühendislik gerilme-uzama diyagramları (Engineering stress-strain diagrams)

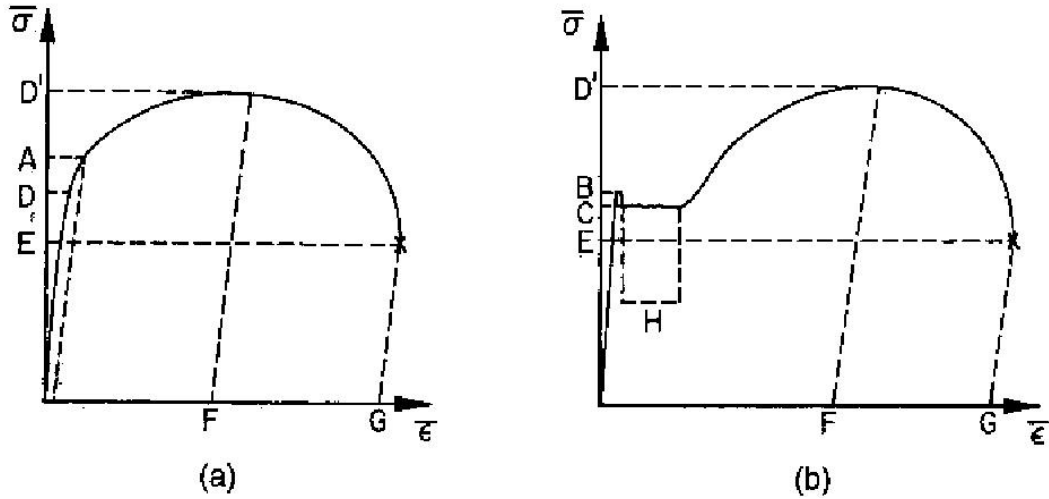
Şekil 1.3’de çekme deneyi sonucunda elde edilen tipik gerilme-uzama diyagramları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, gerilme-uzama diyagramını üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar, elastik deformasyon bölgesi, homojen plastik deformasyon bölgesi ve homojen olmayan plastik deformasyon bölgesidir. Elastik deformasyon bölgesinde gerilme-uzama eğrisi lineer bir değişim gösterir. Yani artan gerilme ile birlikte % uzama değeri de orantılı olarak artar. Bu aralıkta uygulanan gerilme kaldırılırsa yüzde uzama değeri sıfıra iner. Yani numune üzerinde kalıcı şekil değişimi oluşmaz. Bu bölgede “Hooke Kanunu ( $\sigma=E.e$ )” geçerli olup doğrunun eğimi malzemenin “Elastisite Modülünü” verir.

Uygulanan gerilme elastik bölgenin dışına çıktığında, malzeme plastik şekil değişimine uğramaya başlar ve homojen deformasyon bölgesine girer. Bu bölgede uygulanan gerilmeyle beraber harekete geçen dislokasyonlar kaymayı meydana getirir ve malzeme kalıcı olarak şekil değiştirir. Bu bölgede malzeme üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında, elastik şekil değişimi ortadan kalkarken, kaymanın neden olduğu plastik şekil değişimi ise kalıcıdır. Kaymanın başladığı nokta elastik ve plastik davranışı ayıran noktadır.

Çekme işlemine devam edildiğinde, öyle bir noktaya gelinir ki, malzemede plastik kararsızlık oluşur ve numunenin ölçü boyundaki herhangi bir noktada kesit büzölmeye başlar ve numune boyun verir. Bundan sonra kesit daralması nedeniyle deformasyon daha az bir kuvvetle devam eder ve bu bölge sonunda numune kırılır.



Şekil 1.3. Tipik bir gerilme-uzama eğrisi [Erdoğan]



Şekil 1.4. (a) Belirgin akma noktası göstermeyen ve (b) belirgin akma noktası gösteren malzemelerin gerilme-uzama eğrileri.

Çekme deney sonuçlarını daha iyi yorumlayabilmek için gerilme-uzama diyagramını yakından incelemek ve meydana gelen mekanizmaları iyi bilmek gerekir.

#### a) Elastik şekil değiştirme ve bu bölgede geçerli olan büyüklükler

Elastik deformasyon bölgesinde malzeme çok küçük yükler altındadır ve yük kaldırıldığında malzeme ilk şekline geri döner. Elastik deformasyon esnasında atomlar aralarındaki bağı koparmadan hareket ederler ve bu yer değiştirme miktarı uygulanan gerilme ile orantılıdır.

Gerilme/deformasyon oranı=sabit

Bu ilişki *Hooke Kanunu* olarak tanımlanır. Bu denklemdeki sabit malzemenin elastisite modülüdür. Elastisite modülü, malzemenin rijitliği ile ilgili bir değer olup, bu değer özellikle inşaat mühendisliğinde çok önemlidir. Elastisite modülü de gerilmeler gibi aynı birimler cinsinden ifade edilir. Hooke ilişkisi sadece deformasyon miktarının çok küçük olması halinde uygulanabilir ki bu değer kristal yapı malzemeler için %1'in altındadır.

*Hooke Kanunu:*  $\sigma = E \cdot e$

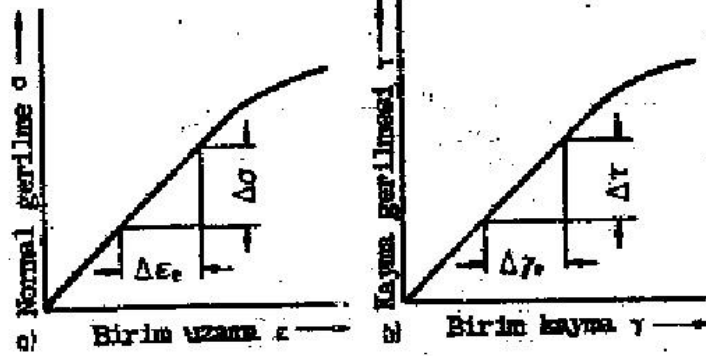
E: Elastisite modülü ( $\text{kg/mm}^2$  veya  $\text{N/mm}^2$ )  
 $\sigma$ : Uygulanan gerilme ( $\text{kg/mm}^2$  veya  $\text{N/mm}^2$ )  
 e: Elastik şekil değişimi

Kayma gerilmesi ile elastik birim kayma arasında ise,

$G=\Delta\tau/\Delta\gamma$  şeklinde bir ilişki vardır. Burada, G kayma elastisite modülü,  $\tau$  kayma gerilmesi ve  $\gamma$  ise elastik birim kayma şekil değişimi olarak alınmaktadır.

$$\sigma=E.e \text{ ve } \tau=G.\gamma$$

Birim uzama ve birim kayma boyutsuz büyüklükler olduklarından elastisite ve kayma modüllerinin birimi gerilmenininki ile aynıdır. Bu büyüklükler malzemenin yay katsayısı olarak da düşünülebilir.



Şekil 1.5. Elastisite ve kayma modüllerinin belirlenmesi

Elastisite modülü atomlar arası bağ kuvvetini temsil eder ve malzemenin rijitliğinin bir sonucudur. Bağ enerjisi yüksek olan malzemelerin elastisite modülü ve ergime sıcaklığı da yüksek olur. Elastisite modülü ne kadar büyükse malzemenin elastik uzaması da o ölçüde düşüktür. Aşağıdaki tabloda bazı malzemelerin elastisite modülü ve Poisson sayısı verilmiştir.

Tablo 1. 1. Bazı malzemelerin Elastisite ve kayma modülü ile Poisson oranları

Malzeme	Elastisite Modülü (E) [GPa]	Kayma modülü (G) [GPa]	Poisson Oranı (ν)
Alüminyum	69	25	0.33
Pirinç	97	37	0.34
Bakır	110	46	0.34
Magnezyum	45	17	0.29
Nikel	207	76	0.31
Çelik	207	83	0.30
Titanyum	107	45	0.34
Tungsten	407	160	0.28

**TABLE 1.2 Approximate Elastic Properties of Various Materials (and Dilute Alloys) at Room Temperature**

Material	Young's modulus, E (GPa)	Shear modulus, $\mu$ (GPa)	Poisson's ratio, $\nu$
Aluminum and aluminum alloys	69–72	24–26	0.35
Copper and copper alloys	125–135	47–50	0.34
Irons and steels	205–215	80–84	0.29
Stainless steels	190–200	75–78	0.33
Titanium and titanium alloys	115	42–44	0.32
Aluminum oxide	380–390	155–165	0.25
Silicon carbide	440–460	195–200	0.14
Glass	70–90	28–32	0.27
Polyethylene (PE)	0.2–2	*	0.4
Polymethylmethacrylate (PMMA)	2–3	*	0.4
Polystyrene (PS)	2–4	*	0.35
Bone**	5–30	3–8	0.25–0.5
Tendon**	0.8–1.5	—	—

\*These values are typically about one-third of Young's modulus.

\*\*Bone and tendon are not only strongly anisotropic, but the stiffness also varies with type, position, and moisture content.

[Bowman]

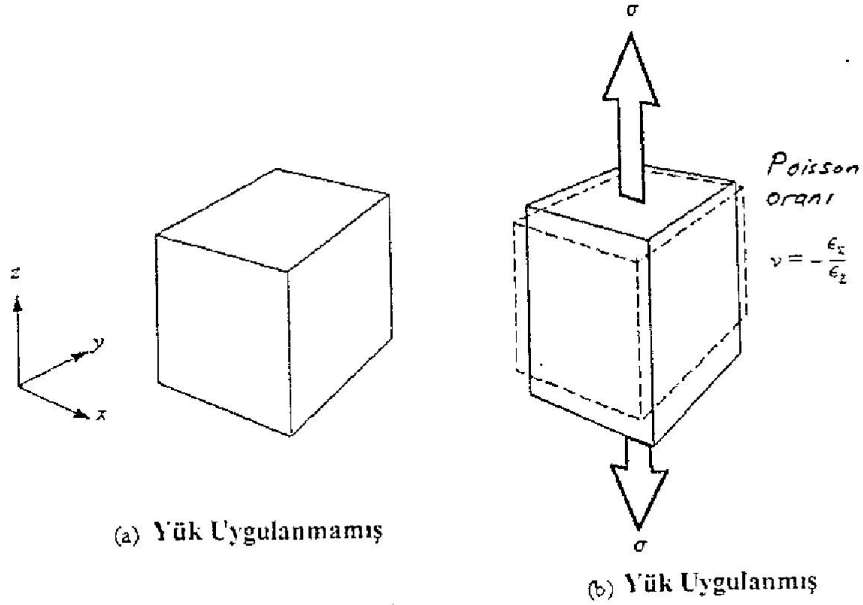
Elastisite modülü başlıca, *kimyasal bileşim, soğuk deformasyon miktarı ve sıcaklıkla* değişir. Ayrıca yapı kusurları ve ferromanyetik özellikler de elastisite modülüne etki eder:

- Alaşım ilavesi ile eğer ergime noktası yükseliyorsa bu durumda elastisite modülünün de yükseleceği söylenebilir.
- Elastisite modülü anizotropik özellik gösteren malzemelerde veya soğuk deforme olmuş malzemelerde farklı kristalografik doğrultularda farklı değerler alabilir.
- Elastisite modülünün değeri artan sıcaklıkla azalır. Genellikle bu azalma ergime sıcaklığının yarısına kadar doğrusaldır. Bu noktadan sonra azalma artar. Ergime sıcaklığına yaklaşıldığında atomlar arası çekim kuvveti olmadığından, elastisite modülünün değeri sıfıra yaklaşır.
- Malzemenin dayanımının elastisite modülü üzerinde bir etkisi yoktur. Örneğin, sertleştirilmiş aynı bileşime sahip çeliğin sert ve yumuşak hallerinde aynı elastiklik modülü geçerlidir.

Elastisite modülünün sabit kaldığı doğrusal elastikliğin yanında kır dökme demirde olduğu gibi ender de olsa doğrusal olmayan elastik davranışlar görülür. Böyle malzemeler için Hooke kanunu geçerli değildir. Bu durumda elastisite modülü gerilme ve dolayısıyla birim şekil değişimine bağlıdır.

Tek eksenli gerilme altındaki bir malzeme gerilmeye dik doğrultuda da şekil değiştirmek zorundadır. Tek yönde çekme, bu yöne dik yönlerde basma deformasyonuna neden olur. Diğer bir ifade ile  $\epsilon_x = \epsilon_y$  olup işareti (-) dir.





Şekil 1.6. Poisson oranının belirlenmesi

$$\nu = -\frac{\epsilon_{enine}}{\epsilon_{boyuna}}, \quad \nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

Poisson oranının değeri metalik malzemelerde 0.25-0.32 arasında değişmekte, ancak çoğunlukla 0.30 değerini almaktadır.

Elastik büyüklükler arasında aşağıdaki bağıntının geçerli olduğu söylenebilir.

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) G \approx 2,6 \cdot G$$

## b) Plastik şekil değişimi bölgesi

### • Homojen deformasyon bölgesi

Malzemeye akma dayanımının üzerinde bir gerilme uygulanması durumunda plastik yani geri dönüşsüz şekil değişimi başlamış olur. Bu durumda dislokasyonlar harekete geçerek kayma mekanizmasını çalıştırır ve plastik şekil değişimi başlar. Bu bölgede şekil değişimi devam ederken bazı mekanizmalar sayesinde yeni dislokasyonlar meydana gelir ve uygulanan deformasyon ile beraber dislokasyon yoğunluğu da artar. Yoğunlaşan dislokasyonlar gerek kendileriyle ve gerekse başka engellerle (boşluk, ara yer atomu, çökelti, tane sınırı vb.) etkileşerek, hareketleri daha güç gerçekleştirmeye başlar. Diğer bir değişle daha ileriki hareketi için daha yüksek gerilmeye ihtiyaç duyulur. Buna “*deformasyon sertleşmesi*” (strain hardening or work hardening) veya “*pekleşme*” adı verilir. Bu nedenle homojen deformasyon bölgesinde gerilme-birim şekil değişimi eğrisi artan deformasyon miktarı ile birlikte sürekli olarak yükselir.

Deney sırasında numune sürekli uzadığı için hacim sabitliğine göre kesit sürekli olarak azalır. Kesit daralması uygulanan kuvvetin azalmasını, oluşan pekleşme ise artmasını gerekli kılmaktadır. Bu bölgede pekleşme etkisi kesit daralma etkisinden daha etkili olduğu için gerilme sürekli artar. Ancak artış oranı giderek azalır ve öyle bir noktaya gelinir ki, burada kesit daralması ile pekleşme etkisi birbirini dengeler. Bu noktada elde edilen gerilme değeri o malzemenin dayanabilecek olduğu maksimum gerilme değerini (çekme gerilmesi) verir.

- **Homojen olmayan deformasyon bölgesi**

Gerilmenin pik yaptığı nokta geçildiğinde, kesit pekleşmeye oranla çok büyük bir hızla daralmaya başlar ve numunede *boyun verme (necking)* olayı meydana gelir. Boyun vermenin başladığı noktaya plastik kararsızlık noktası denir ve bu nokta maksimum gerilmeyi yani çekme dayanımını verir. Tepe noktasından sonra numune sadece boyun bölgesinde yerel olarak deforme olur. Boyun bölgesindeki kesitin sürekli azalması, uygulanan yükte düşmeye neden olur ve diyagram aşağı döner. Bu olay deney numunesinin kopmasıyla son bulur. Kopmanın meydana geldiği gerilme değeri ise “*kopma mukavemeti*” olarak alınır.

### 2.3.1.1. Çekme deneyi ile elde edilen temel büyüklükler

#### a) Elastik bölgeden ölçülen büyüklükler

- *Elastisite modülü (E)*: Çekme diyagramının elastik bölgesindeki doğrunun eğimi Elastisite Modülü veya Young Modülü’nü verir.

$$E = \sigma / \epsilon$$

- *Kayma modülü*

$$G = \tau / \gamma$$

- *Poisson oranı (ν)*

$$\nu = -\epsilon_x / \epsilon_z = -\epsilon_y / \epsilon_z$$

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) G \approx 2,6 \cdot G$$

- *Orantı sınırı*: Çekme diyagramında Hooke yasasının, yani  $\sigma = E \cdot \epsilon$  bağıntısının geçerli olduğu doğrusal kısmı sınırlayan gerilme değeridir. Başka bir deyişle, uygulanan gerilmenin elde edilen uzama ile orantılı olarak değiştiği, yani aralarında bir orantı katsayısının (E) bulunduğu bölgenin sınırına karşılık gelen gerilme değeridir.
- *Elastiklik sınırı*: Malzemeye uygulanan kuvvet kaldırıldığı zaman plastik uzamanın görülmediği veya yalnız elastik şekil değişiminin meydana geldiği en yüksek gerilme değeridir. Hassas olarak belirlenen bu sınırın orantı sınırından daha yüksek olmasına karşın, uygulamalarda genellikle elastik sınır orantı sınırına eşit kabul edilebilir.
- *Rezilyans*: Bir malzemenin elastik olarak şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimi yapan kuvvetin kalkmasıyla geri vermesi özelliğine rezilyans denir. Rezilyans, rezilyans modülü ile ölçülür ve çekme eğrisinin elastik sınıra kadar olan kısmı altında kalan alandır.

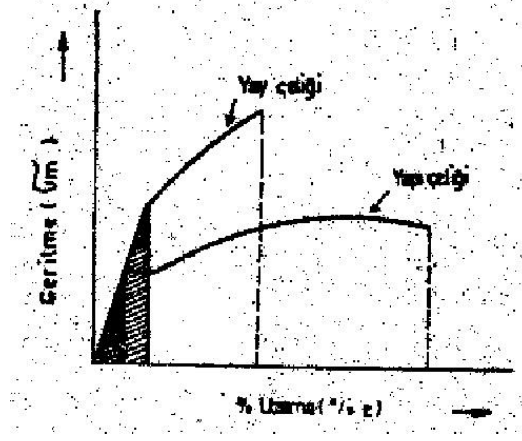
$$\text{Rezilyans modülü (U}_R\text{)} = \sigma_a \cdot \epsilon / 2 = \sigma_a^2 / 2E$$

$\sigma_a$  = Malzemenin akma gerilmesi

$\epsilon$  = Elastik uzama oranı

E =Elastisite modülü

Yukarıdaki bağıntıdan da görüleceği gibi, yüksek akma gerilmesine ve düşük elastisite modülüne sahip malzemeler (örneğin yay çelikleri) yüksek rezilyans modülüne sahiptir. Aşağıdaki şekilde orta karbonlu bir çelik ile yay çeliğinin rezilyans modüllerini veren bölgeler gösterilmiştir. Buna göre akma dayanımı yüksek olan yay çeliğinin rezilyansı da yüksektir.



Şekil 1.7. Orta karbonlu bir yapı çeliği ile bir yay çeliğinin çekme diyagramlarının karşılaştırılması.

#### b) Plastik bölgede ölçülen büyüklükler

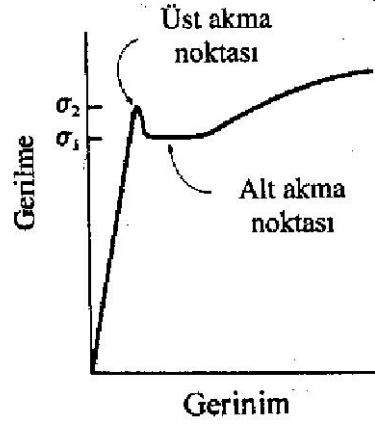
• **Akma gerilmesi ( $\sigma_a$ ):** akma dayanımı, kaymanın fark edilir ve etkili olduğu durumdaki gerilmedir. Düşük karbonlu çelikler gibi belirli bir şekilde akma gösteren malzemelerde akma gerilmesi akma yükünün ( $F_{akma}$ ) numunenin orijinal kesit alanına bölünmesi ile bulunur. Bu tür malzemelerde kuvvetin ilk kez sabit kaldığı veya düşmeye başladığı gerilme, akma sınırı olarak alınır. Önemli bir gerilme düşüşü varsa o zaman alt ve üst diye ayırt edilen iki akma sınırı söz konusudur. Alt akma sınırı süreksizliklerin sona erdiği en küçük gerilmedir. Bu tip bir değişim daha çok ara yer atomu içeren malzemelerde görülür. Küçük ara yer atomları bu bölgede dislokasyonların etrafında kümeleşerek kaymayı engeller ve akma noktasını yükseltir (üst akma noktası). Kayma olayı başladıktan sonra dislokasyonlar küçük atom kümelerinden uzaklaşır ve daha düşük gerilme seviyelerinde (alt akma noktası) hızlı hareket etmeye devam eder. Bu bölge homojen olmayan deformasyonlarla birlikte başlar ve gözle görülen Lüders bantları şeklinde bütün gövdeye yayılır. Bu konu ileride daha detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Bu tip gerilme-uzama davranışı sergileyen malzemelerde akma dayanımı kolaylıkla belirlenir.

$$\text{Akma gerilmesi } (\sigma_a) = F_a / A_0 \quad [\text{kg/mm}^2 \text{ veya } \text{N/mm}^2]$$

$$A_0 = \pi d_0^2 / 4$$

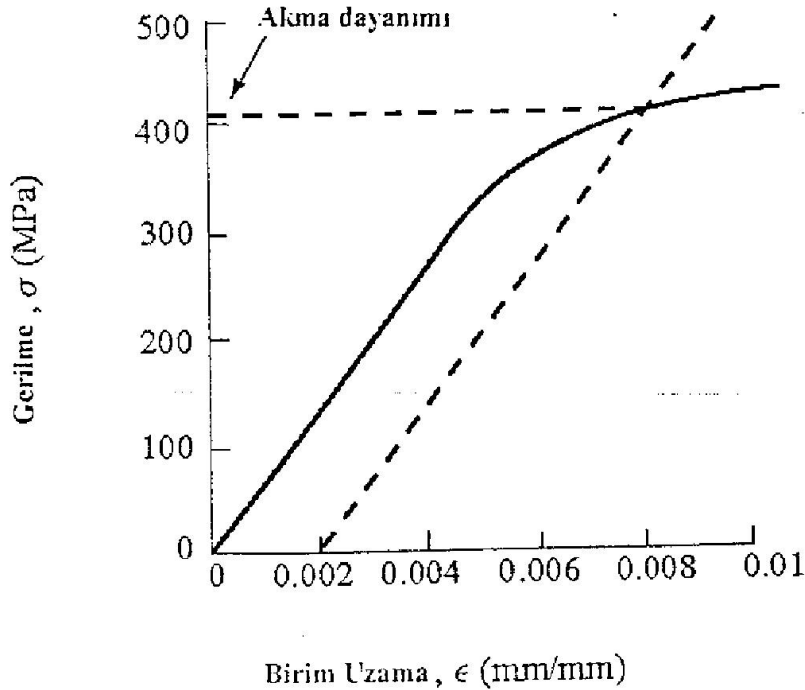
$A_0$ : Deformasyon öncesi (orijinal) kesit alanı ( $\text{mm}^2$ )

$F_a$ : Akmaya neden olan kuvvet (kg veya N)



Şekil 1.8. Belirgin akma noktası gösteren malzemelerde akma dayanımının belirlenmesi.

Mühendislik malzemelerin çoğu bariz bir şekilde akma noktası göstermez. Bu durumda akma gerilmesi ise, mühendislik çekme diyagramı üzerinden, %0,2 kalıcı bir deformasyona neden olan kuvvetin numunenin orijinal kesit alanına bölünmesiyle bulunur. Söz konusu kuvvetin belirlenmesi için, %0.2 kalıcı şekil değişimi noktası belirlenir ve bu noktadan gerilme-şekil değişimi eğrisinin elastik kısmına bir paralel çizilir. Bu paralelin gerilme-uzama eğrisini kestiği noktaya karşılık gelen gerilme değeri o malzemenin akma dayanımı olarak alınır.



Şekil 1.9. Belirgin akma noktası göstermeyen malzemelerin akma gerilmesinin belirlenmesi.

$$\sigma_{a,0.2} = F_{a,0.2}/A_0$$

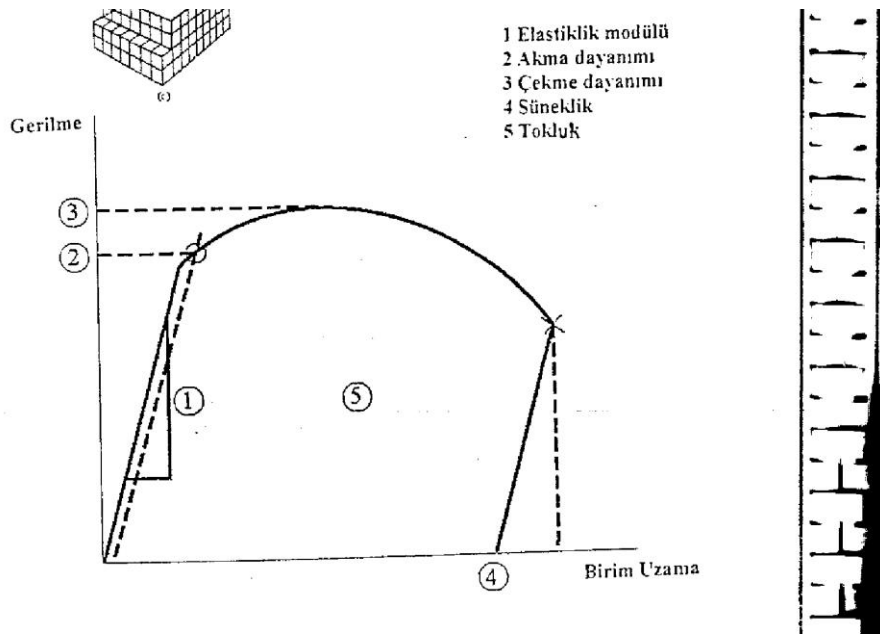
Akma dayanımı, mühendislik malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Dizayn mühendisliğinde, akma mukavemeti müsaade edilebilen maksimum sınırdır. Akma mukavemetinin üzerindeki değerler ise malzeme şekillendirme işlemlerinde kullanılır.

Kullanım esnasında, uygulanan kuvvete dayanabilecek parçalar tasarlanıyorsa, parçanın plastik olarak şekil değiştirmedeğinden emin olunmalıdır. Motor içindeki krank milleri belirlenmiş şekillerinin dışında şekil değişimine uğratıldıklarında kullanılamazlar. Bu nedenle bu tür yük taşıyıcı parçaların yapımında yüksek akma dayanımlı malzemeler tercih edilmeli veya uygulanan kuvvetin akma dayanımının altında gerilme sağlaması için büyük kesitli parçalar kullanılmalıdır. Diğer taraftan, şekillendirme veya şekil değiştirme işlemi gerektiren uygulamalarda, uygulanan gerilme malzemenin akma dayanımının üzerinde olmalıdır. Bu tür uygulamalarda ise çok yüksek akma noktasına sahip malzemeler pek tercih edilmez.

- **Çekme gerilmesi ( $\sigma_c$ ):** Bir malzemenin kopmadan dayanabileceği maksimum gerilmeye maksimum çekme gerilmesi veya çekme dayanımı denir. Bu gerilme değeri numuneye uygulanan maksimum yükün ( $F_c$ ) orijinal kesit alanına ( $A_0$ ) bölünmesiyle bulunur.

$$\text{Çekme gerilmesi } (\sigma_c) = F_c / A_0 \text{ [kg/mm}^2 \text{ veya N/mm}^2\text{]}$$

Malzemenin süneklik değerleri yanında, akma dayanımının çekme dayanımına oranı ( $\sigma_a / \sigma_c$ ) da malzemenin şekillendirilme kabiliyetini gösteren önemli bir büyüklük olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu oran iyi şekillendirilebilen yumuşak çelikte yaklaşık 0.66 iken, söz konusu özelliğin çok yetersiz olduğu malzemelerde (örneğin sertleştirilmiş çelikler) 1'e yakındır.



Şekil 1.10. Çekme gerilmesinin belirlenmesi.

- **Kopma uzaması:** Kopma uzaması, numunede ortaya çıkan toplam uzama miktarının numunenin orijinal ölçü uzunluğuna oranı olarak tanımlanır.

$$\text{Kopma uzaması (\%)} = \Delta L / L_0 \times 100 = L_k - L_0 / L_0 \times 100$$

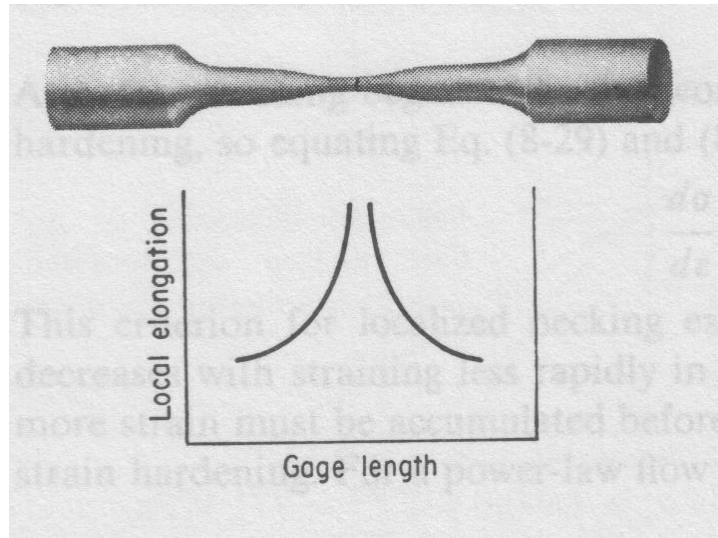
Maksimum yüklemeye kadar numunenin boyunun uzaması homojendir. Başka bir deyişle bu bölgede numune kesiti homojen olarak daralır. Bu noktadan sonra ise boyun teşekkülü (numune kesitinin bir bölgede hızlı bir şekilde küçülmesi) başlar ve bundan sonraki deformasyon numunenin uzunluğu boyunca üniform değildir. Bu nedenle, üniform uzama

oranının belirlenmesi de sonuçların irdelenmesi açısından önemlidir. Üiform uzama yüzdesi, en büyük kuvvetin ( $F_c$ ) oluşturduğu orantısız uzamanın başlangıç ölçü boyuna bölünmesi ile elde edilir.

$$\text{Üiform uzama (\%)} = \Delta L_u / L_0 \times 100 = L_c - L_0 / L_0 \times 100$$

Pekleşmenin kesit daralmasına göre daha etkili oluşu ve sürekli yük artışına neden olan bu davranışın sona ermesiyle, uzama ve enine daralma deney parçasının sadece bir bölümünde devam eder. Büzülme denilen bu yerel kesit daralması sırasında kuvvet ve bunun başlangıç kesit alanına bölünmesiyle elde edilen anma gerilmesi düşer. Üiform uzama yüzdesi büzülmesiz şekillendirilebilme için bir sınır değer olduğundan üretim açısından önemlidir.

Çekme deney numunesinde homojen deformasyon bölgesinden sonra meydana gelen uzama miktarı numunenin ölçü uzunluğu boyunca değişir. Aşağıdaki şekilde, boyun verme bölgesinin tam ortasında (en ince kesit) en büyük uzamanın gerçekleştiği gözlenmektedir.



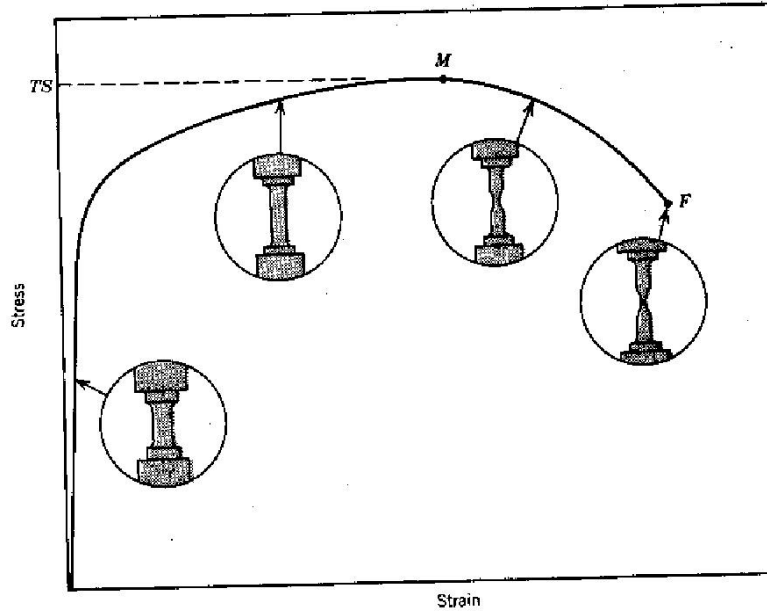
Şekil 1.11. Çekme deney numunesinde meydana gelen bölgesel uzama [Dieter]

• **Kesit daralması (%):** Kesit daralması, numunenin koptuktan sonraki kesit alanındaki daralmanın, başlangıçtaki orijinal kesit alanına oranının % olarak ifadesidir.

$$\text{Kesit daralması (\%)} = \Delta A_k / A_0 \times 100 = A_0 - A_k / A_0 \times 100$$

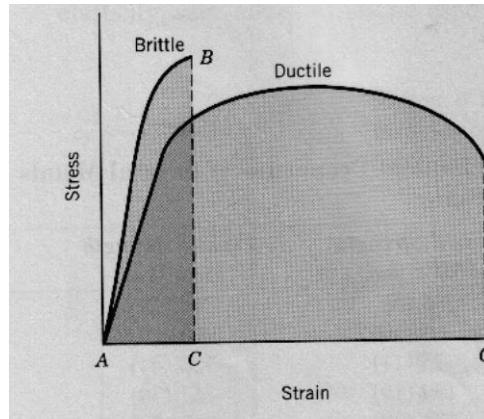
$A_k$ : Numunenin kopma bölgesinin kesit alanı

Yüzde uzama ve yüzde kesit daralması malzemenin sünekliği hakkında genel bir fikir elde edilmesini sağlar. Bu değerleri yüksek olan malzemelerin deformasyon kabiliyetlerinin de iyi olduğu anlaşılır. Öte yandan süneklik, hem tasarımcı hem de imalatçı için önemlidir. Bir parçanın tasarımcısı en azından belirli bir süneklik sergileyen malzemeyi tercih eder. Böylece uygulanan kuvvet çok yüksek olsa bile parça kırılmadan önce şekil değiştirebilir. İmalatçı için sünek malzemeler gereklidir. Böylece karmaşık biçimler, işlenme sırasında kopma ve/veya kırılma olmaksızın elde edilebilir.



Şekil 1.12. Kesit daralmasının gerilme-uzama diyagramı üzerinde şematik gösterimi

- **Tokluk:** Bir malzemenin plastik deformasyon sırasında enerji absorbe etme özelliğine tokluk denir. Çekme eğrisi altında kalan alan çekme işini verir ve bu değer tokluğun bir ölçüsüdür. Aşağıdaki şekilde tokluğu yüksek ve düşük iki malzemenin çekme diyagramı verilmiştir. Bu malzemelerden yüksek karbonlu yay çeliğinin akma ve çekme mukavemeti orta karbonlu yapı çeliğinin akma ve çekme mukavemetinden çok daha yüksektir. Ancak, yapı çeliğinin toplam % uzama miktarı daha fazla yani, sünekliği daha iyidir. Yapı çeliği için çekme diyagramı altındaki alan daha büyük olduğundan, yapı çeliği yay çeliğine göre daha tok bir malzemedir. Buna göre tokluk, mukavemet ve sünekliğin her ikisini de içine alan bir özelliktir.



Şekil 1.12. Gevrek ve sünek (tok) iki malzemedeki tokluğun gösterimi

Tablo 1.2. Bazı mühendislik malzemelerinin oda sıcaklığındaki bazı temel mekanik özellikleri [Bowman]

**TABLE 1.3 Typical Deformation Properties of Various Materials at Room Temperature**

Material	Yield stress (MPa)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Strain hardening exponent, $n$
Aluminum alloys	80–600	10–20	10–30	0.1–0.25
Copper alloys	100–800	5–29	10–60	0.5
Iron alloys and steels	200–1800	10–50	15–60	0.1–0.2
Stainless steels	250–600	20–50	10–40	0.4–0.6
Titanium alloys	200–1200	5–15	20–30	*
Aluminum oxide	5000	≈0	≈0	*
Silicon carbide	10,000	≈0	≈0	*
Glass	3000–4000	≈0	≈0	*
Polyethylenes (PE)	5–50	50–1000	–	**
Polymethylmethacrylate (PMMA)	20–50	3–6	–	**
Polystyrene (PS)	30–80	1–3	–	**

\*These materials fail without plastic deformation in tension. Given values are for compression.

\*\*The stress-strain behavior does not normally fit Eq. 1.25.

### 1.3.2. Gerçek gerilme-gerçek uzama diyagramı (true stress-true strain diagram)

Çekme deneyi sırasında, numunenin kesiti sürekli olarak azalır ve bu nedenle numuneye etki eden gerçek gerilme değerleri mühendislik gerilme değerine göre farklılık gösterir. Mühendislik gerilmesinin hesabında, çekme kuvveti her seferinde numunenin orijinal kesit alanına bölüdüğü için bu fark ortaya çıkmaktadır. Gerçek gerilme, hesaplandığı andaki çekme kuvvetinin o andaki parça kesitine bölünmesiyle bulunur. Ayrıca, çekme deneyi sırasında deney parçasında deformasyonun homojen olmaması nedeniyle, mühendislik birim şekil değişimi ölçü boyuna bağlı ( $l_0$ ) olarak değişmektedir. Bu nedenle, mühendislik birim şekil değişiminden farklı olarak gerçek birim şekil değişimi tanımlanmıştır. Gerçek birim şekil değişimi ise her an için uzayan boya göre bulunur. Dolayısıyla elde edilen mühendislik ve gerçek birim şekil değişimleri birbirinden farklıdır. Aşağıda, gerçek ve mühendislik gerilme-birim şekil değişimini gösteren eğriler bir arada verilmiştir

Aşağıdaki şekilden görüldüğü gibi, gerçek çekme diyagramı mühendislik çekme diyagramı gibi bir maksimumdan geçmez. Gerçek çekme eğrisinin eğimi (pekleşme hızı veya pekleşme derecesi),  $d\sigma/d\varepsilon$ , gerçek gerilme değerine eşit olduğu anda ( $d\sigma/d\varepsilon = \sigma_g$ ) çekme gerilmesi de maksimum değerini almaktadır.

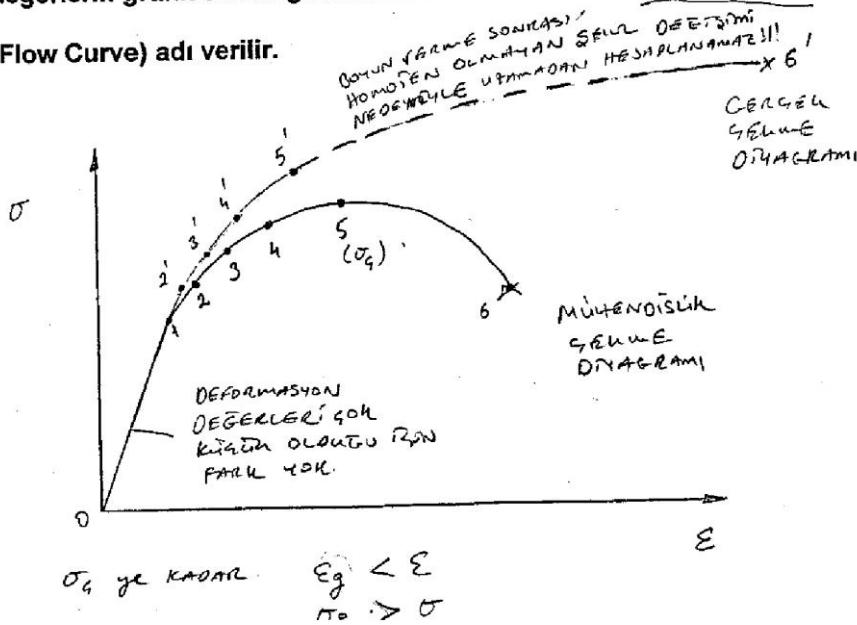
Bu sonuç, fiziksel bakımdan pekleşme nedeniyle gerilme artışının, kesit küçülmesi nedeniyle gerilmedeki düşmeyi engellediğini gösterir. Çekme deneyi sırasında, çekme gerilmesinin etki ettiği kesit sürekli olarak azalmaktadır. Eğer kesit azalması olmasa, çekme gerilmesi plastik alanda pekleşmeye bağlı olarak sürekli bir şekilde artacaktır. Buna karşılık, eğer pekleşme olmasa kesit küçülmesi nedeniyle çekme gerilmesinin düşmesi gerekecekti. Çekme gerilmesinin maksimum olduğu noktaya kadar, pekleşme nedeniyle gerilmedeki artış, kesit küçülmesi nedeniyle gerilmedeki düşüşten fazladır. Çekme diyagramları incelenirse plastik alanda pekleşme derecesinin sürekli olarak küçüldüğü görülür. Pekleşme derecesinin küçülmesi ise, pekleşme nedeniyle gerilmenin yükseltilmesi gereğini azaltır. Sonuçta, çekme



kuvvetinin maksimum olduğu noktada  $d\sigma/d\varepsilon = \sigma_g$  elde edilir. Şekil değişiminin daha da artması plastik dengesizliğe yol açar, deney çubuğu büzölmeye başlar ve bu bölgede yoğunlaşan şekil değiştirme sonunda parça kopar. Bununla beraber, tüm çekme deneyi boyunca, dolayısıyla maksimum noktadan sonra da pekleşme devam ettiği için gerçek çekme diyagramı mühendislik çekme diyagramı gibi bir maksimumdan geçmez ve gerçek gerilme kopma anına kadar artar.

### değerlerin grafik olarak gösterilmesine malzemelerin AKMA EĞRİSİ

(Flow Curve) adı verilir.



Şekil 1.12. Mühendislik ve gerçek gerilme-şekil değişimini gösteren diyagramlar.

Tasarım mühendisliğinde mühendislik değerlerini kullanmak yeterli olurken, büyük şekil değişimlerin söz konusu olduğu metal şekillendirme işlemlerinin analizinde ise mutlaka gerçek değerler kullanılmalıdır.

Gerçek gerilme ( $\sigma_g$ ) =  $F_i/A_i$

Gerçek birim şekil değişimi ( $\varepsilon$ ),  $d\varepsilon = dL_i/L$ ,

$$\varepsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL_i}{L} = \ln L_i/L_0$$

$F_i$ : Herhangi bir  $i$  noktasındaki çekme kuvveti

$A_i$ :  $F_i$  kuvvetinin tatbik edildiği herhangi bir  $i$  noktasındaki numune kesit alanı

$L_i$ : Herhangi bir  $i$  noktasındaki numune boyu

Çekme deneyi sırasında hacmin değişmediği kabulünden yola çıkılarak, mühendislik ve gerçek değerler arasında bazı ilişkiler kurulabilir. Nitekim, yoğunluk ölçümleri, plastik deformasyon sırasında numunenin hacminde %0.1'den daha küçük olan ve ihmal edilebilecek mertebede değişimler olduğunu göstermiştir. Bu durumda, mühendislik değerlerin bilinmesi durumunda gerçek değerler saptanabilmektedir.

$$V_i = V_0 \text{ ve } V_i = A_i L_i = A_0 L_0$$

$V_0$ : Orijinal (deformasyon öncesi) numune hacmi  
 $V_i$ : Deformasyonun herhangi bir  $i$  anındaki numune hacmi

$$V_0 = V_i = A_0 L_0 = A_i L_i \text{ veya } L_i / L_0 = A_0 / A_i$$

$$e = \Delta L / L_0 = L_i - L_0 / L_0 = L_i / L_0 - 1 \text{ ve } L_i / L_0 = 1 + e$$

$$\epsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L} = \ln L_i / L_0$$

$L_i / L_0 = 1 + e$  eşitliği gerçek uzama bağıntısında yerine konursa,

$$\epsilon = \ln L_i / L_0 = \ln(1 + e)$$

Öte yandan,

$$V_0 = V_i = A_0 L_0 = A_i L_i \text{ veya } A_i = A_0 L_0 / L_i$$

$$\sigma_g = F_i / A_i = F_i / A_0 \cdot L_i / L_0 = \sigma_m \cdot L_i / L_0 \text{ ve } L_i / L_0 = 1 + e$$

$$\sigma_g = \sigma_m (1 + e)$$

Gerçek birim şekil değiştirmeyi kullanmanın diğer bir faydalı yanı, her kademedeki birim şekil değiştirmelerin toplamının, toplam birim şekil değiştirmeye eşit olmasıdır. Diğer bir deyişle, gerçek birim şekil değiştirme toplanabilir özelliğe sahiptir, fakat mühendislik birim şekil değiştirme için bu özellik söz konusu değildir.

Gerçek gerilme-gerçek birim şekil değişimi eğrisine genellikle *plastik akış eğrisi* (*akma eğrisi*) denir. Çünkü bu eğri, belirli bir deformasyon oranı için metalin plastik olarak akışını sağlayacak gerekli gerilmeleri belirtmektedir. Metallerin akma eğrisi genellikle *Holloman Bağıntısı* olarak bilinen üstel bir ifade ile temsil edilmektedir. Bu bağıntı plastik deformasyonun başladığı akma noktası ile boyun vermenin başladığı homojen deformasyon bölgesinde geçerli olup, bu bölgenin dışında kullanılmamalıdır. Ayrıca metallerin ilk akma mukavemetini belirlemek amacıyla da bu bağıntının kullanılmasından kaçınılmalıdır.

Bu bağıntı matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sigma_g = K \cdot \epsilon^n$$

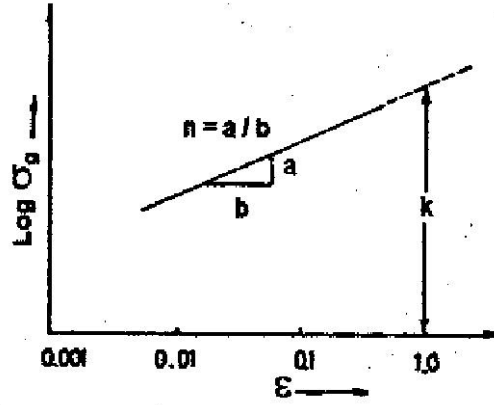
Burada;

$n$ : Deformasyon sertleşme üssü (strain hardening exponent)

$K$ : Mukavemet katsayısı

Yukarıdaki eşitliğin her iki tarafının da logaritması alınır,

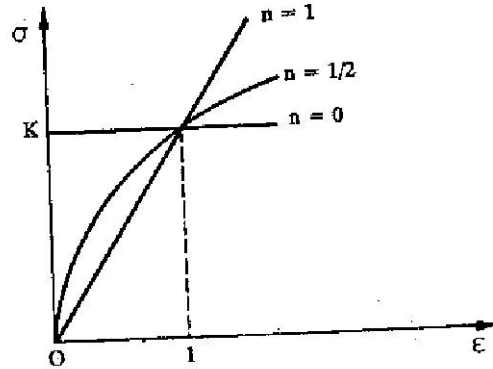
$\ln \sigma_g = \ln K + n \cdot \ln \epsilon$  olur. Bu ise logaritmik skalada bir doğru denklemi ( $y = a + b \cdot x$ ) verir.



Şekil 1.13. Deformasyon sertleşme üssü (n) ve K değerlerinin tayini

Elde edilen doğrunun eğimi direk olarak deformasyon sertleşme üssü n değerini verirken, gerçek birim şekil değişimini 1 yapan gerilme değeri de dayanım sabiti olarak K değerini verir. Metalik malzemelerde n değeri,

$0 < n < 0.45$  arasında değerler almaktadır.



Şekil 1.14. n değerinin değişimi

n değeri, malzemenin deformasyon sertleşmesine uğrama ve deformasyondan dolayı dayanımı artırma kabiliyetini belirlemektedir. Malzemede pekleşmenin olmadığı durumlarda (sıcak deformasyon şartlarında) n değeri sıfıra yaklaşır. Bir çok mühendislik malzemesi için bu değer 0.15 ile 0.25 arasındadır. Deformasyon sertleşme üssü arttıkça üniform birim şekil değişim miktarı da artmaktadır. Dayanım sabiti K ise doğrudan malzemenin dayanımı hakkında fikir vermektedir. Diğer bir değişle K değerinin yüksek olması durumunda malzemenin dayanımının yüksek olduğu anlaşılır.

K ve n değerleri malzeme sabitleridir. Ancak, gerçekte bu değerler örneğin mikroyapısı ısıtılarak değiştirilebilen malzemeler için tek bir değer değildir. Örneğin, %0.2 C içeren bir çelikten hazırlanan iki parçadan biri tavllanmış, diğeri de ostenitleştirilip yağda su verilmiş ise bu iki çelik parçanın K ve n değerleri birbirinden farklıdır. Benzer olarak çözeltiye alınmış ve yaşlandırılmış 2024 alüminyum alaşımının K ve n değerleri aşırı yaşlanmış olanlardan farklıdır. Aşağıda çeşitli malzemelerin K ve n değerleri verilmiştir. Deformasyon sertleşmesi üssü (n) sıcaklıktan etkilenen bir malzeme özelliğidir. Sıcaklığın

yükselmesi n değerinin düşmesine neden olur. Ayrıca n değeri deformasyon hızı yükseldikçe küçülür.

Tablo 1. 2. Tavlanmış durumdaki çeşitli malzemelerin oda sıcaklığındaki deformasyon sertleşmesi üssü (n) ve mukavemet katsayısı (K) değerleri

Malzeme	n	K [MPa]
1008 çeliği (%0.08C)	0.25	600
1015 çeliği (%0.15C)	0.18	620
1045 çeliği (%0.45C)	0.12	950
302 paslanmaz çelik	0.3	1300
410 paslanmaz çelik	0.1	960
Bakır	0.33	450
Pirinç (Cu-30Zn)	0.41	500
Pirinç (Cu-40Zn)	0.5	800
1100 Alüminyum	0.25	140
2017 Alüminyum	0.15	380
5052 Alüminyum	0.13	210
7075 alüminyum	0.17	400

Gerilme-birim şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi veren  $\sigma_g = K \cdot \epsilon^n$  bağıntısı, homojen plastik deformasyon bölgesi için geçerli olup,  $\epsilon=0$  değeri için  $\sigma_g=0$  değerini vermektedir. Bu nedenle Holloman denklemine akma gerilmesi ( $\sigma_a$ ) ilave edilerek bulunan ve çok sık kullanılan *Ludwig* denklemi,

$$\sigma_g = \sigma_a + K \epsilon^n$$

şeklinde ifade edilir.

Homojen deformasyon bölgesinde, deformasyon sertleşme üssü (n) her zaman sabit bir tek bir değere eşit olmayabilir. Özellikle çok küçük ve çok büyük şekil değişimlerinde farklı n değerlerinin olduğu,  $\sigma_g = K \epsilon^n$  bağıntısına göre çizilen  $\ln\sigma_g - \ln\epsilon$  grafiğinde farklı eğimlerin bulunmasından anlaşılır. Bu durumda plastik deformasyon bölgesi için *Swift denklemi* olarak bilinen,

$$\sigma_g = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$$

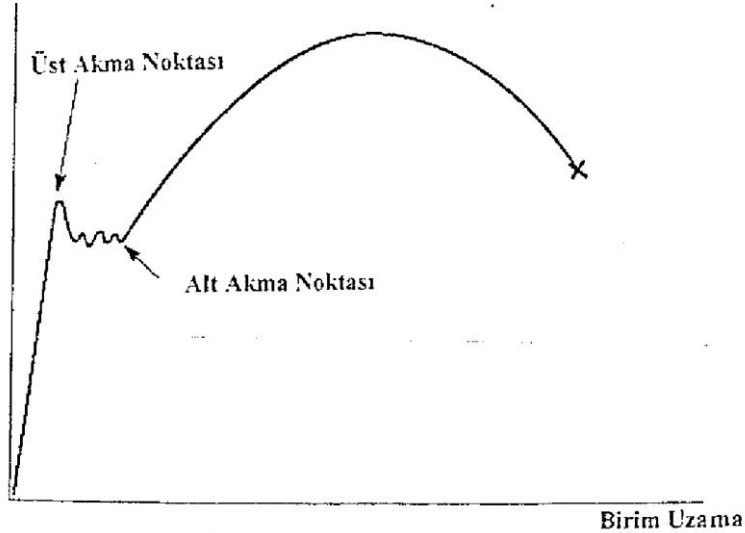
bağıntısını kullanmak daha uygundur. Burada;

$\epsilon_0$ : Malzemeye deney öncesi uygulanan deformasyon miktarı ile ilgili bir sabit. Bu değer tavlanmış malzemelerde  $\epsilon_0=0$ , soğuk işlem görmüş malzemelerde ise  $\epsilon_0 < n$  değerlerinde olmaktadır.

Bu bağıntı ile ilk deformasyon sertleşmesinin etkisi, ilave birim şekil değişimi ile birleştirilerek elde edilmiştir. Burada,  $\epsilon_0$  değerinin ilk soğuk işlemin neden olduğu birim şekil değiştirme,  $\epsilon$  değerinin ise daha sonra yapılan soğuk işlemin neden olduğu birim şekil değiştirme olduğu ortaya çıkar.

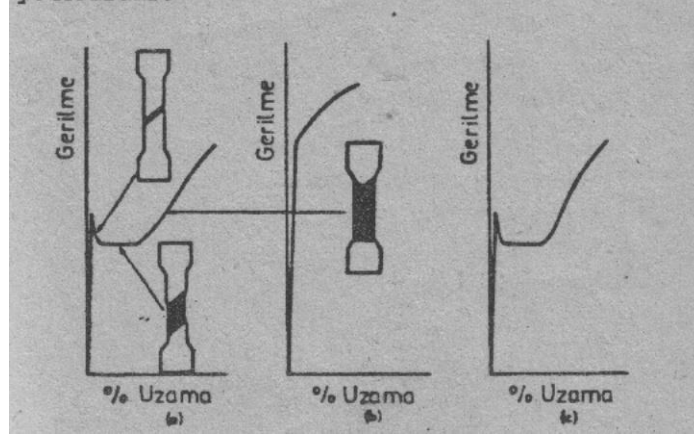
#### 1.4. Belirgin akma (sürekli akma) olayı ve deformasyon yaşanması

Bazı metalik malzemeler elastik şekil değişiminden plastik şekil değişimine geçerken akma olayını belirgin bir şekilde gerçekleştirirler. Bu malzeme grubuna en iyi örnek yumuşak durumdaki (tavlanmış) düşük ve orta karbonlu çeliklerdir. Bu durum özellikle HMK yapılı ara yer katı çözümleri içeren metalik malzemelerde görülmektedir. Bu malzemelerde, elastik deformasyon bölgesi ile homojen plastik deformasyon bölgesini birbirinden ayıran, dar bir homojen olmayan plastik deformasyon bölgesi gözlenmektedir. Bu tür malzemelerde, gerilme belirli bir noktaya kadar elastik olarak artar, sonra aniden düşer ve malzeme bir süre bu gerilme civarında homojen olmayan deformasyona uğrar. Daha sonra plastik deformasyon homojen gerilme artımı ile devam eder. Bu tip akma olayına sürekli akma adı verilir.



Şekil 1.15. Belirgin akma noktası gösteren malzemelerin gerilme-uzama eğrisi

Bu durum özellikle C ve N gibi ara yer atomu içeren düşük ve orta karbonlu çeliklerde görülür. Ara yer elementi içeren diğer katı çözümlerde (örneğin; N içeren  $\beta$ -princi, Cd ve Zn) de bu tip akma görülmekle birlikte akma bölgesi çelikteki kadar açık değildir. Sürekli akma olayı ara yer atomlarının mevcudiyetine dayanılarak açıklanmaktadır. Nitekim C ve N gibi ara yer atomlarından tamamen arındırılan bir çelikte belirgin akma olayı gözlenmemiştir. Deformasyon sırasında C ve N gibi ara yer atomları dislokasyon olan bölgelere yerleşerek dislokasyonların önünde bir atmosfer oluşturmakta ve bu sayede onların hareketini zorlaştırmaktadır. Bu oluşuma, ilk defa 1948'de Cottrell tarafından açıklandığı için *Cottrell Atmosferi* adı verilmiştir. Böyle bir malzemede plastik deformasyonu başlatılmak için, dislokasyonları söz konusu atmosferden kurtararak serbest hale geçirebilecek veya yeni dislokasyonlar oluşumuna neden olacak oldukça yüksek bir gerilmeye ihtiyaç vardır. Bu gerilme *üst akma gerilmesi* olarak tanımlanmaktadır. İlk akmanın gerçekleştiği kayma bandında hemen pekleşme meydana geldiği için burada deformasyonun ilerlemesi durur ve diğer bölgelerde akma olayı gerçekleşmeye başlar. Üst akma noktasından sonra gelişen testere dişi görünümündeki bölge kayma bantlarında akmanın gerçekleştiğini belirtir. Oluşan bu bantlara *Lüders Bantları*, gerçekleşen uzamaya da *Lüders uzaması* denir. Bu bantlar genellikle çekme eksenine  $45^\circ$  eğimle oluşur. Atmosferden kurtulan dislokasyonları hareket ettirmek için gerekli gerilme daha düşük olacağından, üst akma noktasından sonra gerilme düşer. Düşen gerilmenin alt değeri ise alt akma noktasını temsil etmektedir. Bu durumda üst akma gerilmesinin Lüders bantının çekirdeklenmesini, alt akma gerilmesinin ise numune boyunca ilerlemesini sağlayan gerilme olduğu söylenebilir. Bu olay tamamlanınca malzeme homojen olarak pekleşmeye başlar.

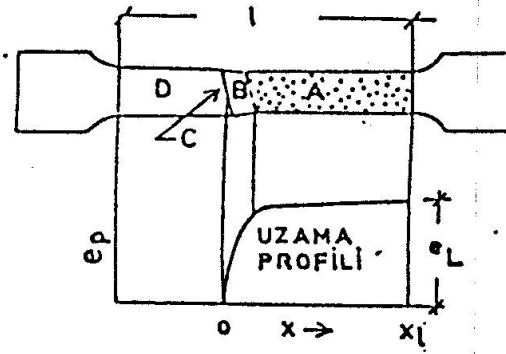


Şekil 1.16. Az karbonlu çelikte süreksiz akma olayı ve Lüders bantlarının oluşumu. (a) Tavlanmış, (b) deforme edilmiş, (c) tekrar tavlanmış.

Süreksiz akma olayı görülen malzemelerde, deformasyonun başlaması devam etmesinden çok daha güçtür. Süreksiz akma halinde uzama, Lüders bantlarının numune boyunca ilerlemesi sonucunda meydana gelir. Numuneyi tutan çenelerdeki gerilmeler, numune yüzeyindeki pürüzle, gerilme konsantrasyonuna neden olur ve Lüders bantlarının oluşmasına neden olur. Lüders bantlarının numune boyunca ilerlemesi sırasında aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi başlıca üç bölge meydana gelir. Bunlar;

- Bandın arkasında kalan deforme olmuş bölge (A bölgesi) Bu bölge deformasyon sertleşmesine uğramış olup, deformasyonun ilerlemesi halinde önemli ölçüde deforme olmayan bölgedir.
- Bandın önünde yer alan deforme olmamış bölge (D bölgesi)
- Lüders bandı bölgesi (B bölgesi). Bu bölgede toplam uzama miktarı bandın sınırından itibaren sıfırdan başlayarak bandın arkasında toplam Lüders uzamasına ulaşır. Böylece uzama profili, deformasyonun, numune boyuna kıyasla oldukça dar bir bölgede yer aldığını göstermektedir. Deformasyon, Lüders bantlarının ilerlemesi ile devam ettiğinden genellikle uygulanan yükte önemli bir değişim olmaz ve çekme eğrisi Lüders bölgesinde yatay gider. Bu nedenle Lüders bölgesinde deformasyon sertleşmesinin oluşmadığı varsayılırsa da bu kabul tamamen yanlıştır. Çünkü yükün sabit kalmasına rağmen, bant sınırındaki uzama miktarına bağlı olarak kesitte meydana gelen azalma, gerilmenin bant boyunca değişimine neden olur.

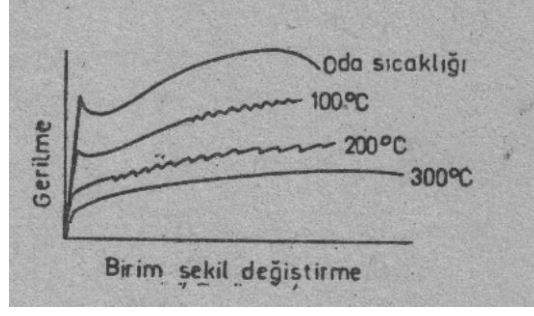
Lüders uzunluğu uygulanan yüke, deformasyon sertleşmesi karakteristiklerine ve numunenin geometrisine bağlıdır. Lüders bant sınırı yaklaşık olarak maksimum kayma gerilmesinin yer aldığı düzlemde uzanır. Üniform süreksiz uzama gösteren malzemelerde akmanın başlangıcında oluşan ani yük düşmesi, Lüders bant sınırı hızının düşmesi ile açıklanmaktadır. Çünkü bant sayısının ve mevcut bantların uzunluklarının aniden artması bu düşmeye neden olur ve kısa bir süre sonra bazı bantlar bir araya gelerek deformasyonun ilerlemesi için gerekli yük miktarı tedricen artar. İki Lüders bandı zıt yönde hareket ettiğinde her ikisinin karşılaşmaları halinde genellikle bunlar tam olarak birbirine paralel olmadığından aralarında deforme olmamış bir bölge kalabilir.



Şekil 1.17. Lüders bantlarının uzaması ve uzama profili. A: deforme olan bölge, B: Lüders bandı, C: Lüders bant sınırı, D: henüz deforme olmamış bölge. X: Lüders bant sınırının arkasında kalmış bölge,  $e_L$ ,  $x_L$ 'nin neden olduğu Lüders uzama oranı.

Çekme deneyi, akma bölgesinden sonra durdurulup yük boşaltıldıktan hemen sonra numune tekrar çekme deneyine tabi tutulursa, yeni çizilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde alt ve üst akma noktası görülmez. Akma olayının tekrar oluşması için Cottrell atmosferinin tekrar oluşması gerekir. Bu ise ısı aktivasyonu gerektirir. Soğuk şekil değiştirmiş belirgin akma özelliği gösteren bir malzemeye ısı aktivasyonu verilirse (çelik için 100-200 °C yeterlidir) belirgin akma olayı yeniden ve daha yüksek gerilme seviyelerinde meydana gelir. Buna *statik deformasyon yaşlanması (strain ageing)* adı verilir. Bu olay, ön deformasyonla çoğalan dislokasyonların yaşlanma sırasında eriyen atomlar tarafından tekrar kilitlenmesi sonucunda meydana gelir. Deformasyon yaşlanması bu bakımdan yer alan ve ara yer atomlarının dislokasyon bölgelerine yayınmasına bağlıdır.

Sürekli akma gösteren malzemelerde, deney sıcaklığı oda sıcaklığının altına düştükçe akma gerilmesi (özellikle üst akma gerilmesi), akma düşmesi ve akma uzaması artmaktadır. Oda sıcaklığının üzerine çıkıldıkça genellikle akma gerilmesi azalır ve sürekli akma olayı kaybolur. Ancak yaşlanabilen düşük karbonlu çeliklerde, pirinç ve Cu-Al alaşımları gibi bazı malzemelerde belirli sıcaklıklarda *dinamik deformasyon yaşlanması* nedeniyle çekme eğrisinde zig-zaklar meydana gelir. Bu durum Portevai-Chatelier olayı olarak bilinir. Bu olayın meydana geldiği sıcaklıkta, eriyen atomlar hareket halindeki dislokasyonlara yayınma yeteneğine sahiptirler. Deformasyon anında, dislokasyonların hareketi zaman zaman bu eriyen atomlar tarafından önlenir. Böylece, dislokasyonların kilitlenip tekrar serbest hale gelmesi çekme diyagramında zig-zaklara neden olur. Yumuşak çeliklerde, 150-250°C arasındaki sıcaklıklarda yapılan deformasyon sırasında görülen ve "*mavi gevreklik*" adı ile tanınan olay dinamik deformasyon yaşlanmasının en tanınmış örneğidir. Dinamik deformasyon yaşlanması, yumuşak çeliklerin dışında  $\alpha$ -pirinç ve çeşitli Al alaşımları gibi demir dışı malzemelerde de görülmektedir. Bu olay genellikle 0.3-0.5 $T_m$  sıcaklık aralığında ve  $10^{-1} s^{-1}$  gibi tipik deformasyon hızlarında meydana gelmektedir. Düşük karbonlu çeliğin mavi gevreklik bölgesindeki deformasyonunda çekme eğrisinde zig-zag tipi değişimin oluşmasına Lüders bantlarının zaman zaman kilitlenmesinin neden olduğu belirlenmiştir. Şöyle ki, deformasyon esnasında hareket eden Lüders bandı, deformasyon yaşlanması nedeniyle bir süre sonra durmakta ve yük artışına neden olmaktadır. Fakat bu esnada başka bir bölgede teşekkül eden Lüders bandı ve bunun hareketi bu kez yükte azalmaya neden olmaktadır. Fakat, yine deformasyon yaşlanması sonucu yük yeniden yükselmektedir. Neticede deformasyon heterojen bir şekilde devam etmekte ve çekme eğrisi testere dişi görünümünü almaktadır.



Şekil 1.17. Çeliklerde dinamik deformasyon yaşlanması

Süreksiz akma olayının ön deformasyona uğramış ve beklemeden çekme deneyine tabi tutulmuş malzemelerde görülmemesinin nedeni şöyle açıklanabilir. Ön deformasyonda hareket eden dislokasyonların yoğunluğu (serbest dislokasyon yoğunluğu) artmış olacağından, bundan sonraki deformasyonda önemli bir dislokasyon çoğalması olmayacak ve süreksiz akma olayı görülmeyecektir. Zamanla bu tür malzemelerde çözünmüş ara yer atomları dislokasyonlara yayınma yoluyla yerleştiklerinde, onları kilitlerler ve hareketlerine engel olurlar. Böylece, bu tür bekletilmiş malzemelerde, sıcaklığa bağlı olarak zamanla süreksiz akma olayı tekrar görülür.

Yumuşatma tavına tabi tutulmuş düşük karbonlu çelik saclar, oda sıcaklığında çekme deneyine tabi tutulduklarında tipik bir süreksiz akma gösterirler. Bu malzemelerin dövülme, derin çekme ve sıvama ile şekillendirilmeleri sırasında süreksiz akma nedeniyle yüzeyde pürüzler meydana gelir. Boyama ve kaplama gibi nihai işlemler gerektiren parçalar için bu tür yüzey hataları kusur sayılır ve kalite kontrolünden geçmez. Çünkü bu etken boya ve kaplamaların iyi tutmamasına, tutsa bile güzel görünmemesine neden olur. Bu etki ancak parlatma gibi nihai işlemler gerektirmesi ilave işçilik ve masraf demektir. Düşük karbonlu çeliklerde süreksiz akma olayını önlemek için birkaç yol mevcuttur. Bunlar;

a) Malzeme yumuşatma tavına tabi tutulduktan sonra düşük oranlarda soğuk ön deformasyon işlemine tabi tutulur. Uygulanan bu işleme "temper haddesi" denir. Temper haddesinde, çok düşük ezme oranı (%5) gibi ile haddelenen düşük karbonlu sac tekrar çekme deneyine tabi tutulursa, yeni çekme diyagramında süreksiz akma bölgesi görülmez. Ön deformasyona uğramış (veya soğuk şekillendirilmiş) malzemelerde süreksiz akma bölgesinin ortadan kalkması, ön deformasyon ile malzemede dislokasyon yoğunluğunun artması nedeniyledir. Çekme sırasında dislokasyonların hızlı çoğalmayışi akma düşmesine izin vermemektedir. Malzeme tavlandığında ise dislokasyon yoğunluğu azalmakta ve ara yer atomları bu esnada yayınma imkanı bularak dislokasyonları tekrar kilitlemektedir. Sonuç olarak tipik akma noktası yeniden ortaya çıkmaktadır.

b) Süreksiz akmaya ve deformasyon yaşlanmasına neden olan olay N ve C gibi ara yer atomlarının dislokasyon bölgelerine yayılması ve onların hareketini engellemesidir. Bu nedenle, C ve N gibi ara yer atomlarının uygun alaşım elementleri ile bağlanması veya tamamen arıtılması sonucu süreksiz akma ve deformasyon yaşlanması gözükmez.



Akma bölgesine aşağıda sayılan temel faktörler etki eder. Bunlar:

**a) Kimyasal bileşim:** Katı eriyik halindeki alaşımlarda genellikle, çözünen atom miktarı arttıkça akma gerilmesi de artar. Ayrıca, alaşım elementinin yer alan veya ara yer atomu şeklinde çözünmesi akma bölgesine etki eder. Öyle ki, akma düşmesi eriyen atomun ara yer atomu olması halinde daha fazladır. Düşük karbonlu çeliklerde, C ve N miktarlarının azalması ile akma gerilmesi ve Lüders uzaması azalır. Ayrıca, C ve N'u bağlayan elementlerin ilavesi de benzer olaya neden olur.

**b) Deney sıcaklığının etkisi:** Deformasyon sıcaklığı düştükçe, üst akma noktası ve Lüders bölgesi bariz bir şekilde artmaktadır. Ayrıca akma düşmesi ve Lüders uzaması da artmaktadır. Sıcaklık yükseldikçe süreksiz akma bölgesi tedricen kaybolur ve bazı malzemelerde belirli sıcaklıkta çekme eğrisinde zig-zaglar (dinamik deformasyon yaşanması) meydana gelir.

**c) Deformasyon hızının etkisi:** Deformasyon hızı da süreksiz akma bölgesinin şekline etki etmektedir. Deformasyon hızı arttıkça üst ve alt akma noktası biraz yükselmekte ve akma düşmesi miktarı artmaktadır. Ayrıca akma uzaması da artmaktadır.

**d) Tane boyutunun etkisi:** Tane boyutu, akma bölgesine bariz bir şekilde etki etmekte olup tane boyutu küçüldükçe üst ve alt akma noktaları çekme diyagramında yukarı kaymaktadır. Tane boyutunun akma mukavemetine etkisi genellikle Hall-Petch bağıntısına uymaktadır. Ayrıca, taneler küçüldükçe akma düşmesi de artmaktadır. Ayrıca, yapı inceldikçe Lüders uzamasının da arttığı saptanmıştır.

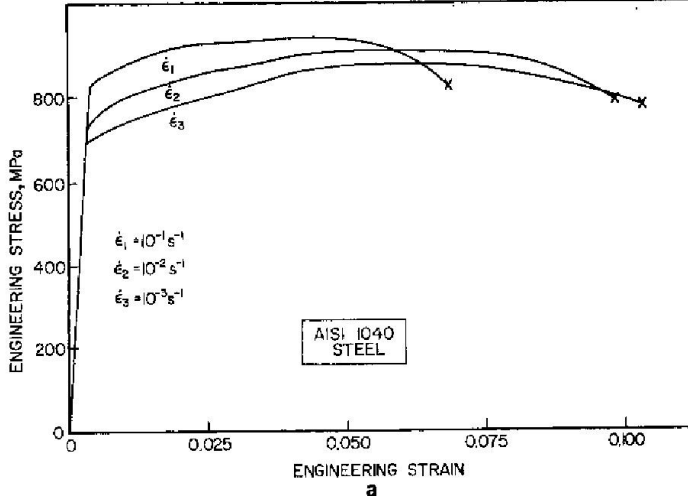
**e) Çeşitli ön işlemlerin etkisi:** Malzemenin yorulması için uygulanan devir sayısı arttıkça akma uzamasının azaldığı ve akma dayanımının düştüğü görülmüştür. Benzer durum numuneye çekme deneyinden önce hidrojen yüklendiğinde de elde edilmiştir. Çeliklere uygulana ılık işlem sonrası yapıda alt tane oluşumu ile akma mukavemetinin yükseldiği ve deformasyon esnasında süreksiz akma olayının meydana gelmediği saptanmıştır.

## 2.5. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine etki eden parametreler

Farklı malzemelerin çekme diyagramları farklı olmasına rağmen aynı malzemenin de çekme diyagramları farklı olabilir. Bu farklılık genel olarak, uygulanan deformasyon hızından, deformasyon sıcaklığından ve malzemenin iç yapısındaki farklılıklardan (tane boyutu, safsızlıklar, yapı kusurları vb.) ileri gelmektedir.

### a) Deformasyon hızının çekme eğrisine etkisi

Malzemeye uygulanan deformasyon hızı aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline etki eden önemli bir faktördür. Bu nedenle, çekme deneyi sonuçlarını verirken, çekme hızını veya deformasyon hızını da vermek gerekir. Aksi takdirde elde edilen sonuçları yorumlamak güçleşir. Deformasyon hızı daha çok HMK yapıları üzerinde etkili olmaktadır. Genel olarak, deformasyon hızı arttıkça malzemenin mukavemeti artmakta diğer bir ifade ile çekme eğrisi yukarı doğru kaymakta ve kopma uzaması değerleri ise düşmektedir. Deformasyon hızının akma gerilmesine etkisi, çekme dayanımına etkisinden daha fazladır.



Şekil 1.18. Malzemelerde gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine deformasyon hızının etkisi

Deformasyon hızı, birim şekil değiştirmede olduğu gibi *mühendislik deformasyon hızı* ( $\dot{e}$ ) ve *gerçek deformasyon hızı* ( $\dot{\epsilon}$ ) olmak üzere iki şekilde ifade edilebilir.

Mühendislik deformasyon hızı ( $\dot{e}$ ), çekme deneyinde cihazın çene hızı ile orantılı olup;

$$\dot{e} = de/dt = d[(L_i - L_0)/L_0]/dt = 1/L_0 \cdot dL_i/dt = v/L_0$$

bağıntısıyla ifade edilir.

Gerçek deformasyon hızı ise,

$$\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = d[\ln L_i/L_0]/dt = 1/L_i \cdot dL_i/dt = v/L_i$$

bağıntısı yardımıyla bulunur.

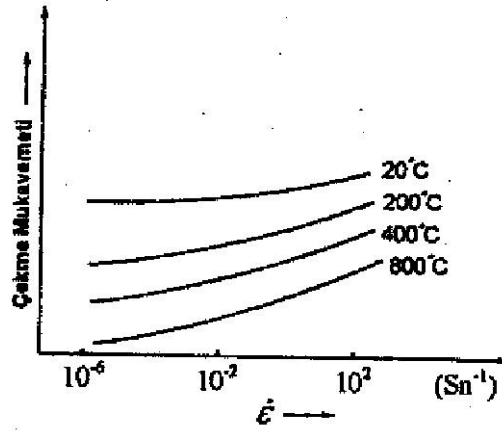
Gerçek deformasyon hızının, numune boyu ve çene hızı ile ilişkisini veren bağıntıya göre, çene hızı  $v$  sabit iken, numune uzadıkça gerçek deformasyon hızının azalacağı görülmektedir. Gerçek deformasyon hızı numune boyunun etkisini gösterdiğinden, mühendislik deformasyon hızına göre daha doğru sonuç vermektedir. Buradan da anlaşılacağı gibi, çekme deneyinde gerçek deformasyon hızının sabit kalabilmesi için deney süresince  $v$  çene hızı uygun şekilde artırılmalıdır. Söz konusu deformasyon hızları arasındaki ilişki ise,

$$\dot{\epsilon} = v/L_i = L_0/L_i \cdot d\dot{e}/dt = \dot{e}/(1+e)$$

şeklindedir.

Deformasyon hızının mukavemete etkisi aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, sıcaklık yükseldikçe artar. Bu şekilden görüldüğü gibi oda sıcaklığında deformasyon hızının etkisi

nispeten az, yüksek sıcaklıklarda oldukça büyüktür. HMK yapılı metaller, deformasyon hızına karşı diğer metalik malzemelerden daha duyarlıdır.



Şekil 1.19. Çeşitli sıcaklıklarda bakırın çekme mukavemetine deformasyon hızının etkisi.

Yüksek sıcaklıklarda ( $T > 0.5T_m$ ) deformasyon hızının malzemenin mukavemetine etkisi çok fazla olup, sabit sıcaklık ve birim şekil değiştirme miktarı için;

$$\sigma_g = C \dot{\epsilon}^m$$

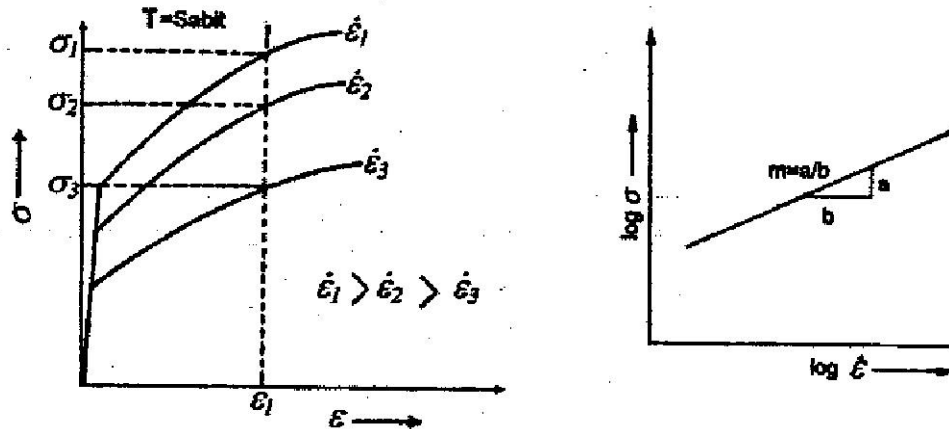
bağıntısının geçerli olduğu belirlenmiştir. Burada;

$\sigma_g$ : Uygulanan gerilme

C: Malzeme sabiti

m: Deformasyon hızı duyarlılık üssü dür.

Deformasyon hızı duyarlılık üssü (m)  $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$  grafiğinin eğimine eşittir. Böyle bir grafik, sabit sıcaklıkta ancak farklı deformasyon hızlarında yapılan çekme veya basma deneyleri sonucunda çizilebilir.



Şekil 1.20. Farklı deformasyon hızlarında yapılan çekme deneylerinden m değerinin belirlenmesi.

Öte yandan, genellikle deformasyon hızı arttıkça malzemenin sünekliği azalır. Deformasyon hızı duyarlılık üssü oda sıcaklığında genellikle düşüktür ( $m < 0.1$ ), fakat sıcaklık arttıkça  $m$ 'in değeri de artar ve en yüksek 1 değerini alabilir.  $m = 1$  olması durumunda malzeme cam gibi akar. Bu nedenle deformasyon hızı duyarlılık üssü aynı zamanda malzemenin sünekliğini de karakterize eder. Şöyle ki;

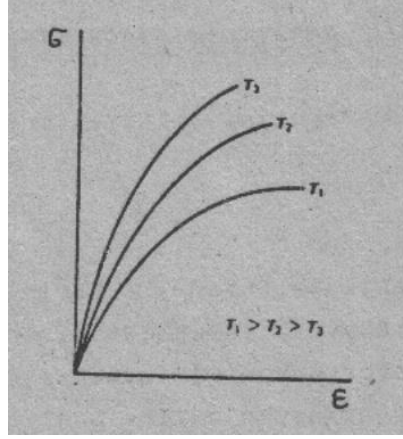
$m \leq 0.1$	: malzeme sünek değildir,
$m \approx 0.3-0.4$	: malzeme sünektir,
$m \geq 0.5$	: malzeme süperplastiktir,
$m = 1$	: malzeme cam gibi akar.

Çekme deneyinde  $m$  değerinin büzülmeye önemli bir etkisi vardır. Deneysel gözlemler, yüksek  $m$  değerine sahip malzemelerin hasara uğramadan önce büyük miktarda uzadığı, yani yüksek  $m$  değerinin büzülmeyi geciktirdiğini göstermiştir. Büzülme başlamak üzere iken, bu bölgede mukavemet geri kalan kısma kıyasla pekleşme nedeniyle daha yüksektir. Ayrıca büzülme bölgesinde uzamanın daha hızlı olması nedeniyle, şekil değiştirme hızı da deney çubuğunun geri kalan kısmına kıyasla daha büyüktür. Bu da büzülme bölgesinin mukavemetini artıran bir faktördür. Büzülme bölgesinde malzeme mukavemetindeki artışın büzülme oluşumunu zorlaştıracığı açıktır. Sonuç olarak yüksek  $m$  değerinin büzülme oluşumunu geciktireceği ve kopmadan önceki toplam uzama miktarını artıracığı anlaşılır.

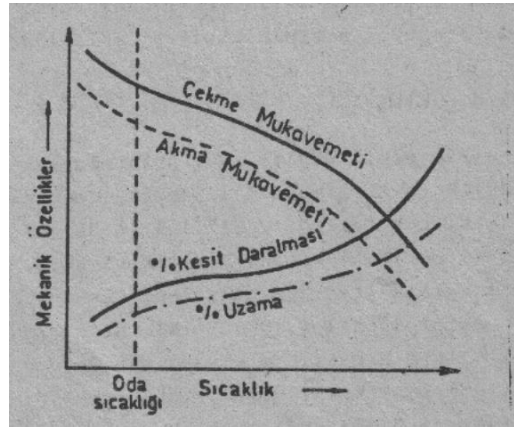
Metallerde mukavemet yükseldikçe genellikle  $m$  değeri düşer.

## **b) Deney sıcaklığının çekme eğrilerine etkisi**

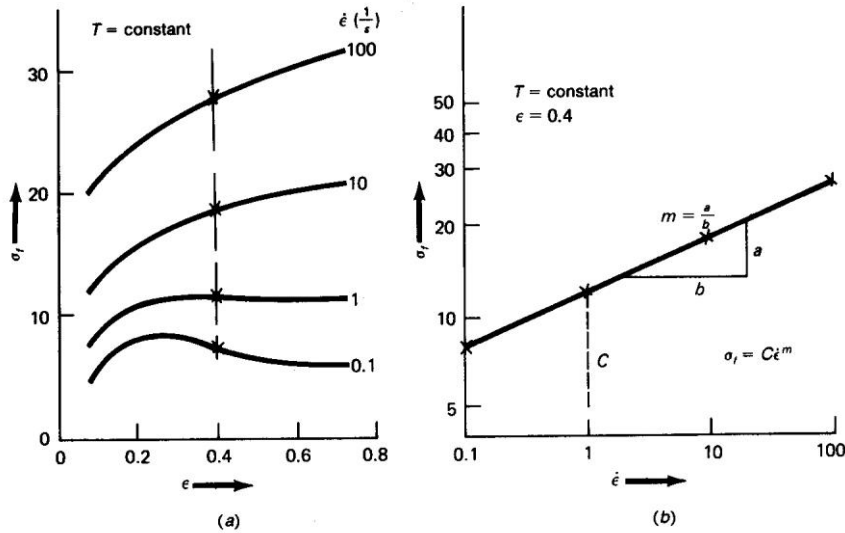
Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin şekline, mukavemet, süneklik ve kırılma özelliklerine deney sıcaklığının etkisi çok fazladır. Deney sıcaklığı arttıkça, genellikle çekme eğrileri aşağı doğru kayar. Yani çekme ve akma dayanımı azalır buna karşın malzemenin kopma uzaması artar (malzeme sünekleşir). Düşük sıcaklıklarda ise, mukavemet ve kırılma artar. Deney sıcaklığının çekme eğrilerine etkisi aşağıdaki şekilde verilmiştir. Deney sıcaklığında malzemede faz dönüşümü oluşuyorsa (yaşlanma, yeniden kristalleşme, martenzitik dönüşüm gibi) çekme eğrileri çok daha farklı bir şekil alabilir. Farklı kristalografik yapıdaki malzemelere sıcaklığın etkisi aynı şiddette değildir. Örneğin, HMK yapılı metallerde sıcaklığın artması ile akma mukavemeti hızla azalırken, YMK sistemdeki metallerde sıcaklık arttıkça akma mukavemetinin azalması çok daha yavaştır. Aynı şekilde, HMK metaller düşük sıcaklıklarda gevrek kırılma gösterirken, YMK metallerde bu durum gözükmez. Yani HMK yapılı metallerde sünek-gevrek geçiş sıcaklığı olmasının karşın YMK yapılı metallerde böyle bir sınır yoktur.



Şekil 1.21. Sıcaklığın gerilme-birim şekil değişimine etkisi.



Şekil 1.22. Malzemelerin mekanik özelliklerine sıcaklığın etkisi



Şekil 23. Sıcak deformasyon işleminde sertleşme ve yumuşamanın beraber etkisi. (a) Akma dayanımı deformasyon hızına çok duyarlı [Schey]

Metalik malzemelerde kırılma tipinin sıcaklık arttıkça transgranüler (tane içi) kırılmadan intergranüler (taneler arası) kırılma tipine geçiş gösterdiği bilinmektedir. Tane içi

kırılmada, kayma düzlemleri tane sınırlarından daha zayıftır ve kırılma taneler içerisindeki kayma düzlemleri boyunca olur. Taneler arası kırılmada ise, tane sınırlarının daha zayıf olması nedeniyle kırılma tane sınırları boyunca ilerler.

Malzemelerin farklı sıcaklıktaki deneylerinden bahsederken, benzeş (Homologous) sıcaklıktan söz etmek yerinde olur. Uygulanan deformasyon sıcaklığının (T), malzemenin ergime sıcaklığına (T<sub>m</sub>) oranı olan benzeş sıcaklığına göre uygulanan deformasyon sınıflandırılabilir.

$T/T_m > 0.5$	: sıcak deformasyon
$0.5 > T/T_m > 0.3$	: ılık deformasyon
$T/T_m < 0.3$	: soğuk deformasyon

Soğuk yapılan plastik deformasyonda malzeme deformasyon hızına karşı duyarlı değildir. Fakat deney sıcaklığı, 0.5T<sub>m</sub>'in üzerinde ise plastik deformasyon, deformasyon hızına karşı çok duyarlıdır.

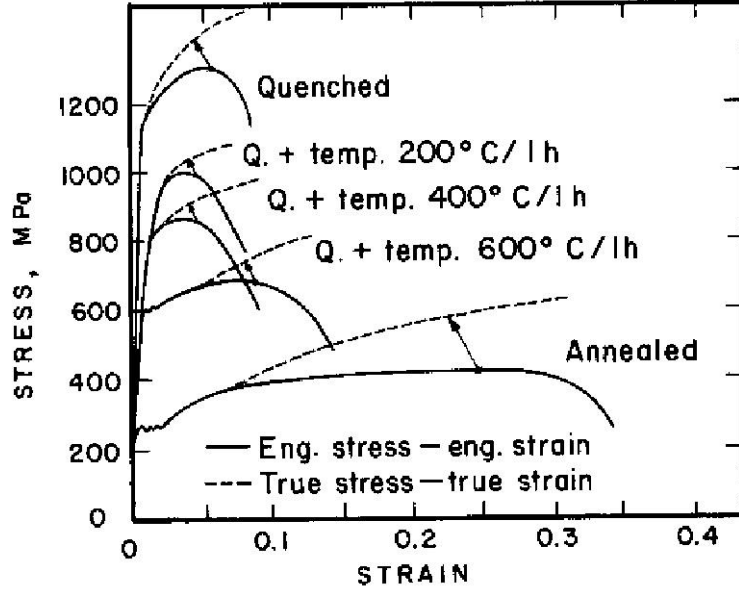
Sıcak deformasyonda, deformasyon sertleşmesi ve bozulan tane yapısı, deformasyon sırasında yeniden kristalleşme sonucu yeni tanelerin oluşması ile giderilir. Bu nedenle büyük oranda deformasyonlar ancak sıcak deformasyonla mümkündür. Sıcak deformasyon esasen sabit gerilme ile gerçekleşir. Soğuk deformasyonda, deformasyon sertleşmesi deformasyona engel teşkil eder ve mukavemet deformasyon miktarı ile artar. Ilık işlem sırasında, yeniden kristalleşme olmaz, fakat dislokasyonların yeniden düzene girmesi sonucu dinamik toparlanma olur. Bu nedenle, ılık işlem sırasında deformasyon sertleşmesi soğuk işlemdeki kadar etkin değildir.

Deformasyon sırasında elde edilen gerilme bağıntıları deformasyon sıcaklığına bağlıdır. Aşağıda, sıcaklığa bağlı olarak verilen deformasyon işlemlerinde geçerli olan gerilme bağıntıları verilmiştir.

Soğuk deformasyon ( $T/T_m < 0.3$ )	: $\sigma_g = K \cdot \epsilon^n$
Ilık deformasyon ( $0.5 > T/T_m > 0.3$ )	: $\sigma_g = D \epsilon^n \dot{\epsilon}^m$
Sıcak deformasyon ( $T/T_m > 0.5$ )	: $\sigma_g = C \dot{\epsilon}^m$

### c) Mikroyapının çekme eğrisine etkisi

Mikroyapının çekme eğrisine etkisi oldukça karmaşıktır. Saf metallerle alaşım elementi içeren malzemelerin çekme eğrileri farklı olup, alaşım elementi ilavesi genellikle eğriyi yukarı doğru kaydırır. Malzemedeki fazların sayısı ve dağılımı da çekme eğrilerine etki eder. Çok fazlı malzemelerde, fazların şekli, dağılımı, mekanik özellikleri, fazlar arasındaki arayüzey enerjisi ve arayüzey bağı çekme eğrisinin karakterini değiştirir. Ayrıca, tek kristal ve çok kristallerin de çekme eğrileri farklı olup kristal içerisindeki tane boyutu küçüldükçe çekme eğrileri genellikle yukarı doğru kayar. Dislokasyon yoğunluğu fazla olan, az olan aynı malzemeye kıyasla daha yüksek mukavemete sahiptir. Aynı malzeme içerisindeki boşluklar ve istenmeyen kalıntı miktarı da çekme sırasında erken kopmaya neden olur ve malzemenin sünekliğini azaltır.



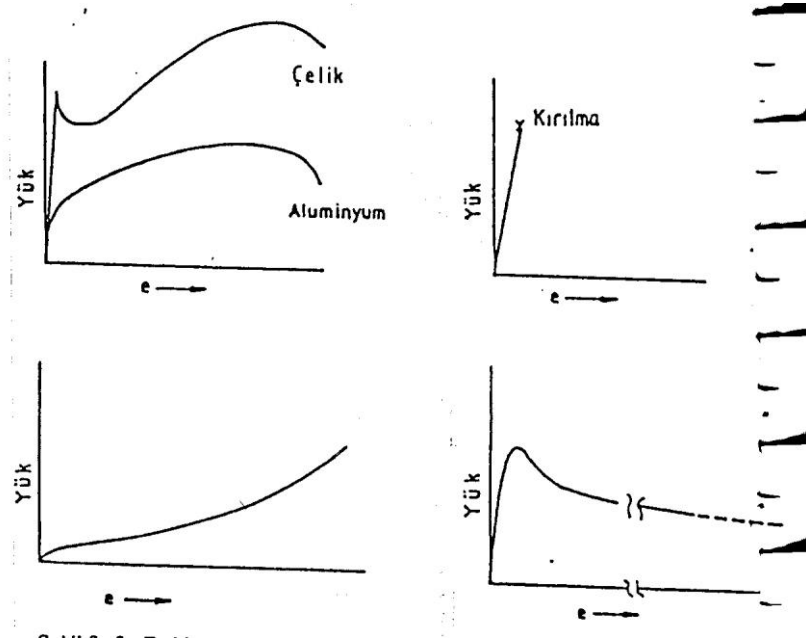
Şekil 1.22. AISI 1040 çeliğine ait gerilme-birim uzama diyagramına ısıl işlemin etkisi

## 2.6. Çekme diyagramı tipleri

Çekme diyagramlarını başlıca 4 grupta toplamak mümkündür. Bunlar sırasıyla;

1. Elastik ve plastik deformasyon gösteren sünek malzemeler,
2. Plastik deformasyon göstermeyen malzemeler. Bu malzemeler elastik deformasyondan sonra kırılırlar (çok gevrek malzemeler)
3. Aşırı elastik deformasyon gösteren malzemeler.
4. Aşırı plastik deformasyon gösteren malzemeler.

Metaller, elastik ve plastik deformasyon gösterirler. Bununla birlikte farklı metallerin çekme diyagramları da farklıdır. Örneğin yumuşak çelik, elastik deformasyondan plastik deformasyona geçişte aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi süreksiz akma noktası gösterir. HMK metallerin çoğu bu tip çekme diyagramına sahiptir. Seramik, dökme demir ve yüksek mukavemetli malzemelerde genellikle plastik deformasyon oluşmadan, elastik deformasyonun sonunda kopma oluşur. Öte yandan, bazı malzemeler ise aşırı oranda homojen plastik deformasyona uğrarlar.



Şekil 1.24. Farklı malzemelerde görülen tipik çekme diyagramları

## 2.6. İdealleştirilmiş Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramları

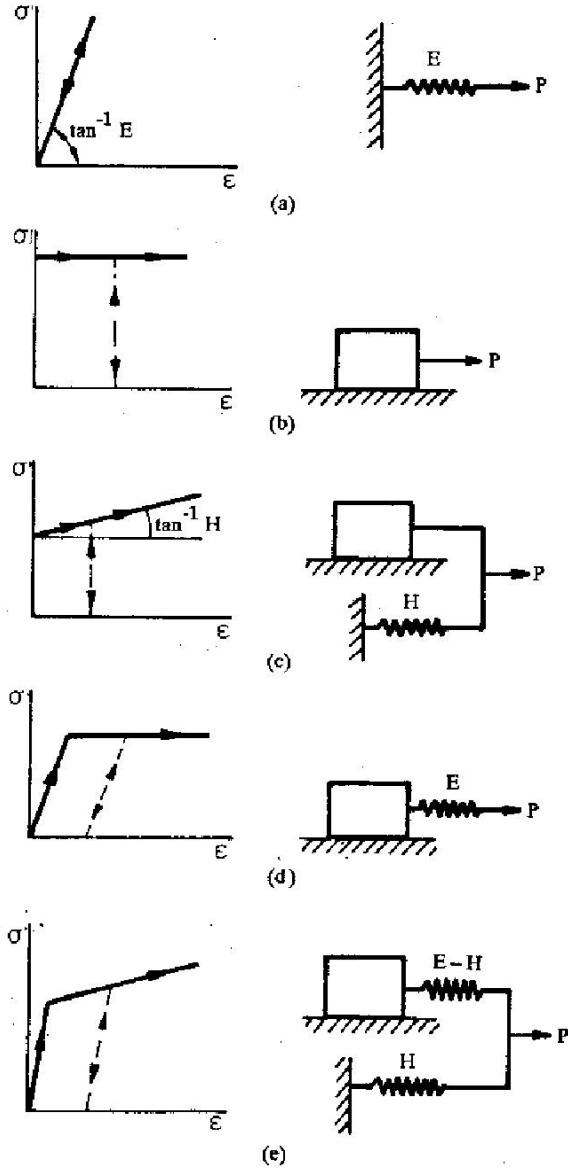
Aşağıdaki şekilde idealize edilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrileri verilmiştir. Şekil 1.25a'da **tam elastik ideal** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ve dinamik modeli görülmektedir. Cam, seramikler ve bazı dökme demirler gibi gevrek malzemelerin davranışı bu tür bir eğri ile gösterilebilir. Kopma uzaması çok küçük (%1-2 kadar) olan ve elastik sınırı aşıldığı takdirde çok az bir uzamadan sonra büzülme göstermeden çekme kuvveti etkisi ile kopan gevrek malzemelerde elastiklik sınırı çekme dayanımına yakındır. Ayrıca gevrek malzemelerin çekme diyagramlarında kopma noktasındaki gerilme değeri ile çekme dayanımı çakışır.

Şekil 1.25b'de **rijit, tam plastik** ideal bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ve dinamik modeli görülmektedir. Bu tür bir malzemeden ( $E$  değeri sonsuz) bir çekme deneyi çubuğu, çekme gerilmesi akma gerilmesine erişinceye kadar tamamen rijittir (elastik şekil değişimi sıfırdır). Çekme gerilmesi akma noktasına eriştiği anda, plastik şekil değişimi başlar ve sabit gerilme altında (pekleşme olmadan) devam eder.

Şekil 1.25c'de **rijit, lineer pekleşen** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ve dinamik modeli verilmiştir. Böyle bir malzemede, çekme gerilmesi akma sınırına erişinceye kadar şekil değişimi görülmez. Çekme gerilmesinin akma sınırına eşit olması ile birlikte plastik şekil değişimi başlarsa da, şekil değişimini artırmak için gerilme de sürekli olarak yükseltilmektedir. Gerilmenin plastik şekil değişimi ile artması (pekleşme) doğrusaldır. Rijit tam plastik malzemede olduğu gibi burada da şekil değişiminin elastik bileşeni plastik bileşen yanında ihmal edilmektedir.

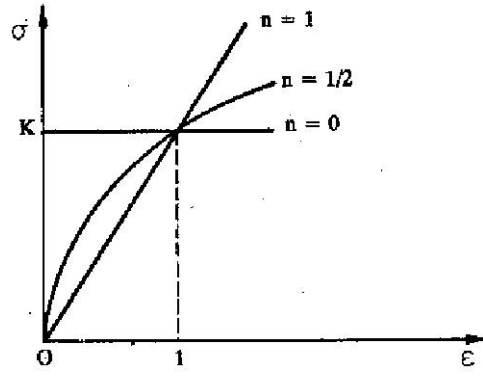
Şekil 1.25d, **elastik tam plastik** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ile dinamik modelini, Şekil 1.25e ise **elastik lineer pekleşen** bir malzemenin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme diyagramı ile dinamik modelini göstermektedir.





Şekil 1.25. İdealleştirilmiş gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme diyagramları ve dinamik modelleri (tek eksenli gerilme). (a) Tam elastik ideal, (b) rijit tam plastik, (c) rijit lineer pekleşen, (d) elastik ideal plastik, (e) elastik lineer pekleşen [çapan]

Şekil 25'deki bazı davranışlar  $\sigma = K \varepsilon^n$  denklemi ile  $n$  deformasyon sertleşme üssüne değişik değerler vererek elde edilebilir.



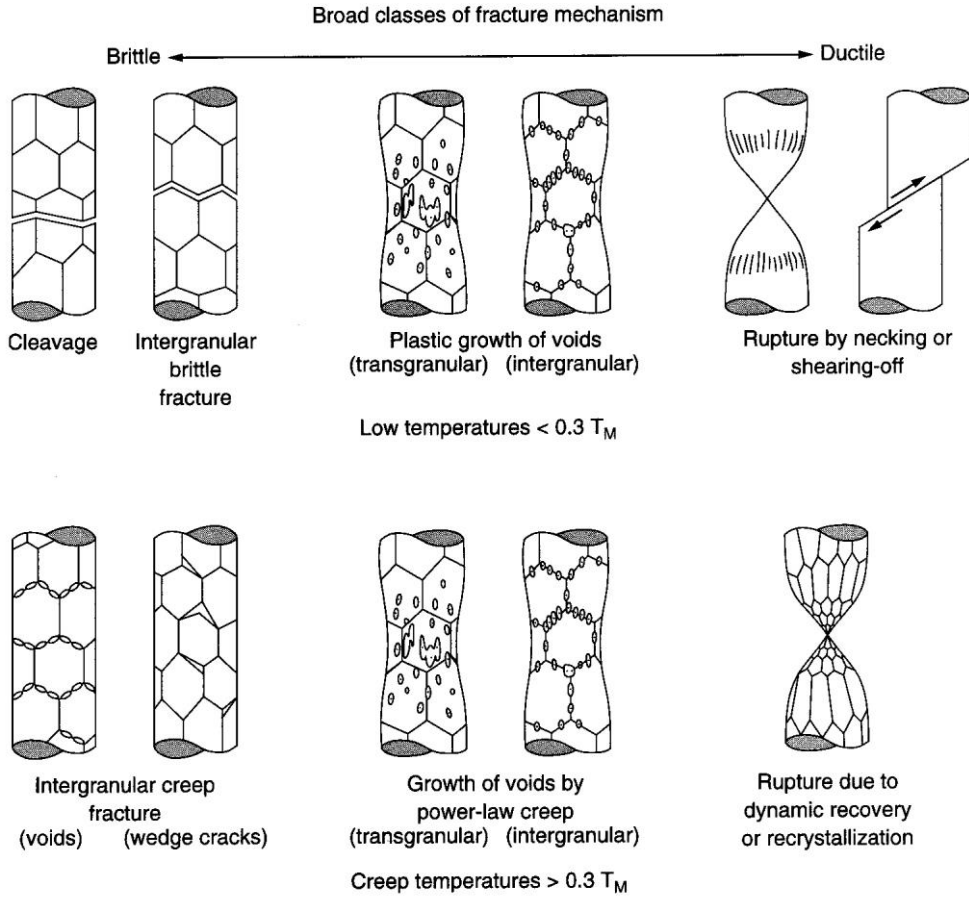
Şekil 1.26. Deformasyon sertleşme üssü  $n$  değerinin gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrilerine etkisi. [çapan]

## 2.6. Çekme deneyinde kırılma tipleri

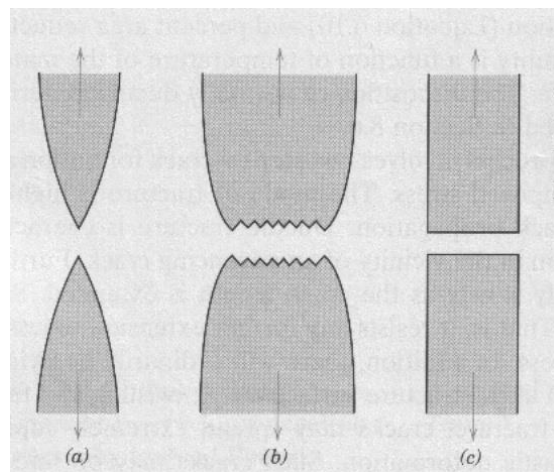
Kırılma çatlak oluşumu ve ilerlemesiyle meydana gelen ve numunenin gerilme altında iki veya daha çok parçaya bölünmesiyle sonuçlanan bir olaydır. Kırılmanın karakteri malzemenin malzemeye değişir ve genellikle uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlıdır. Kırılma, kırılma anındaki deformasyon miktarı, kırılma yüzeyinin kristalografik görünümü ve kırık yüzeyin makro görünümü gibi çeşitli kriterlere göre sınıflandırılır.

Atomik seviyede kırılma, kırılma düzlemi boyunca atomlar arası bağların koparak yeni çatlak yüzeyi ortaya çıkarması sonucu meydana gelir. Buna göre, kırılma düzlemine dik bağların kopması sonucu “klivaj kırılma”, diğer bir deyişle “ayrılma kırılması” meydana gelir. “Kayma kırılması” ise atom düzlemlerinin kayması sırasında atom bağlarının kopması ile meydana gelir. Klivaj kırılma klivaj düzlemleri olarak bilinen bazı kristalografik düzlemler boyunca meydana gelmektedir. YMK yapıları metallere klivaj düzlemi bulunmadığı için klivaj kırılma gözlenmez.

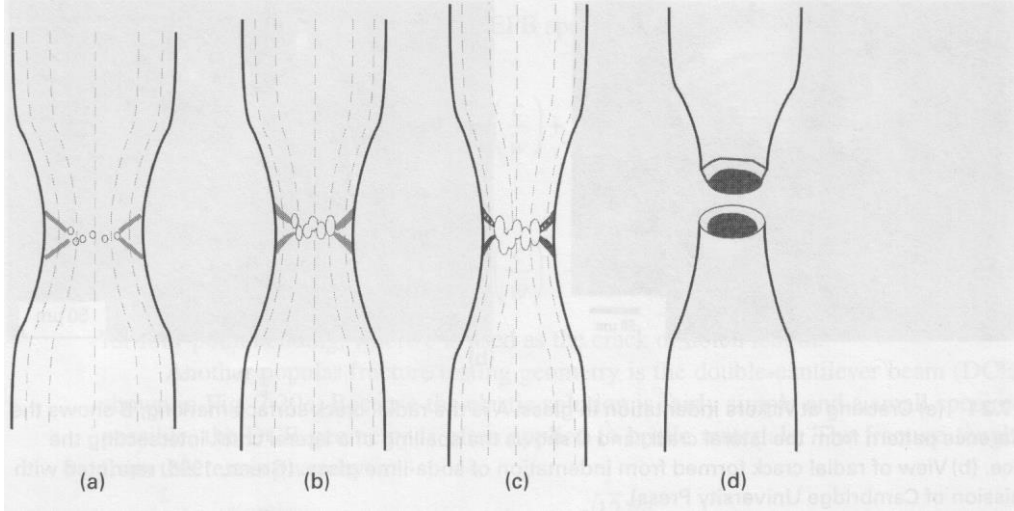
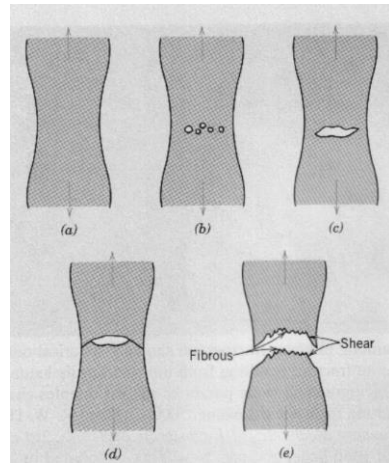
Aşağıda mikroskopik ve makroskopik seviyede çatlak ilerlemesi sonucu meydana gelen kırılma tipleri verilmiştir.



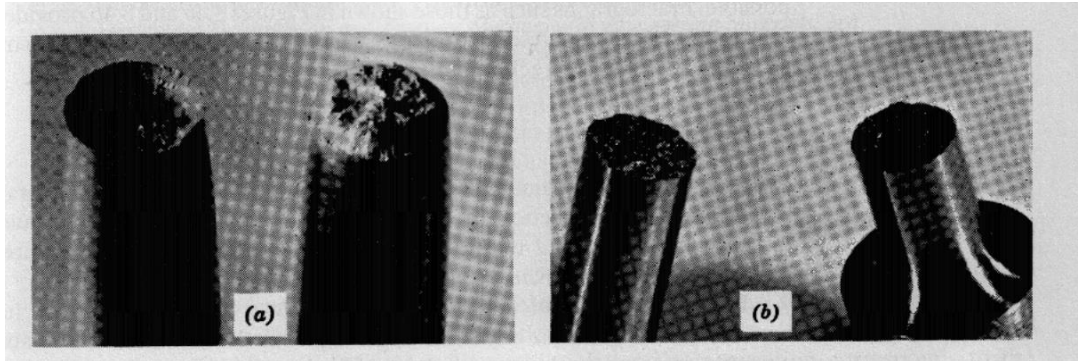
(a) Temel kırılma mekanizmaları [Bowman]



(a) Tam sünek, koni-çanak tipi ve tam gevrek kırılmaların şematik gösterimi



(b) Koni-çanak tipi kırılmanın meydana gelişi



(c) Koni-çanak tipi ve gevrek kırılma gösteren numunelerin kırık yüzey fotoğrafları

Şekil 1.27. Kırılma tipleri.

Tek eksenli gerilme halinde çatlak çekme yönüne dik olarak ilerlediğinden klavaj kırılma tipi düz bir kırılma yüzeyi gösterir. Çok taneli metallerde, klivaj düzlemlerinin yönü her tanede farklı olup, bir taneden diğer taneye geçildikçe çekme doğrultusunu dik olmaz. Bu nedenle bir tane boyutundan daha büyük mesafelerdeki klivaj kırılması düz görünüm göstermez, tane değiştikçe yön değiştirir. Çok gevrek malzemelerde klivaj kırılma bir taneden diğerine klivaj düzlemleri boyunca sürekli olarak ilerleyebilir. Fakat az karbonlu çelikler gibi bazı malzemelerde makroskopik olarak gözlenen klivaj kırılma, mikroskopik seviyede sürekli

değildir. Çoğu tanelerde klivaj kırılma meydana gelirken, bazı tanelerde bunları birleştirecek şekilde kayma kırılması da meydana gelmektedir. Klivaj tipi gevrek kırılmaya neden olan çatlaklar, orijinal malzemede bulunmayıp, deformasyon sırasında ortaya çıkmaktadır. Klivaj kırılma; i) dislokasyon yığılmalarına neden olan plastik deformasyon, ii) çatlak oluşumu ve iii) çatlak ilerlemesi olmak üzere üç aşamada meydana gelmektedir.

Atomik bağların kopması ile oluşan kayma kırılması, yerel olarak meydana gelen bir plastik deformasyon prosesidir. Bilindiği gibi plastik deformasyon, kaymaya karşı direncin az olduğu kayma düzlemleri olarak bilinen atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Kayma sadece bir paralel düzlem takımı üzerinde ilerleyerek oluştuğunda *eğimli kırılma* meydana gelirken, iki taraflı olarak gelişirse *noktasal kırılma* oluşur.

Çok taneli malzemelerde kayma çatlakları maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimi gösterir.

Çatlağın izlediği yol yükleme şekline, iç gerilmeleri meydana getiren faktörlere ve matris yapısına bağlıdır. Çatlak büyümesi, boşlukların oluşması ve daha sonra yerel plastik deformasyon ile çoğalması sonucu meydana gelir. Kayma kırılması, kalın levha ve yuvarlak çekme numunelerinde, malzemenin merkezinde (boyun vermiş bölgede) başlar ve dışarıya doğru ilerler. Makroskopik olarak kırılma yüzeyi çekme eksenine diktir. Mikroskopik seviyede ise, çatlak çekme eksenine 30-45°'lik eğime sahip çeşitli düzlemler üzerinde kayma kopması (boşluk çoğalması) geliştiğinden kırık yüzey oldukça pürüzlüdür. Bu tip kırılma dik kopma (kırılmanın izlediği yol çekme eksenine dik olduğundan) veya lifli kırılma (kırık yüzey lifli görünümde olduğundan) olarak isimlendirilir. Koni-çanak tipi kırılma, merkez bölgede dik kopma ile başlar ve çekme eksenine 45°'lik eğimli düzlemler üzerinde kayma kopması ile sona erer. Kırılma yüzeyi daha az pürüzlüdür. Bu tip kırılma dik kopmadan daha hızlı oluşur. Benzer olarak ince saclarda klivaj olmayan kırılma kayma kopması şeklinde olur ve eğimli kırılmaya benzer.

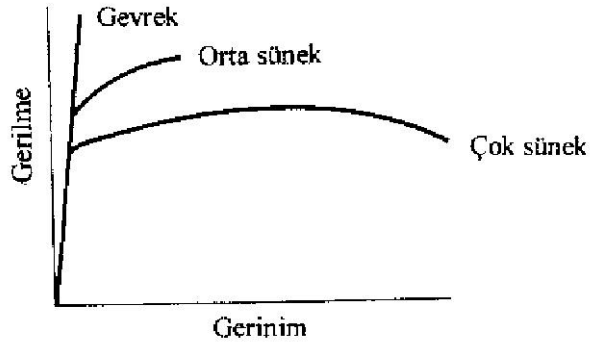
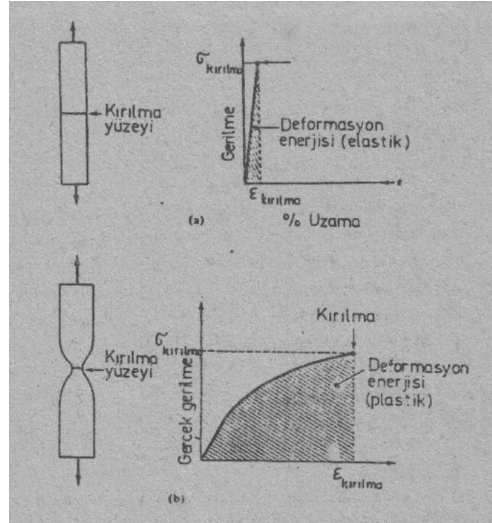
Bazı durumlarda çok taneli malzemelerde, tane sınırları çeşitli nedenlerden dolayı, tanedeki kırılma düzlemlerinden daha zayıf durumda bulunur. Bu durumda kırılma tane sınırları boyunca (intergranüler) meydana gelir. Örneğin çeliklerin tane sınırlarında sementit gibi gevrek bir fazın çözünmesi durumunda kırılma tane sınırları boyunca ilerler. Tane sınırlarında oluşan segregasyon da taneler arası kırılmayı teşvik etmektedir.

Kırık yüzeyin görünümü kriter olarak alındığında, kırılma lifli ve kristalin olmak üzere iki genel gruba ayrılabilir. Klivaj kırılma tane içi düzlemler boyunca meydana geldiğinden kristalin bir görünüme sahiptir. Klivaj kırılmada genellikle tanelerin şekli bozulmaz ve yüzeyin görünüşü düzdür. Kırılma yüzeyi ışığı çok iyi yansıtır ve parlak olarak görülür. Kayma kırılması sonucu ortaya çıkan kırılma yüzeyi ise gri ve lifli bir görünüme sahiptir.

Malzemenin kırılıncaya kadar uğradığı plastik deformasyon miktarı göz önüne alındığında kırılma *sünek* ve *gevrek* olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Gevrek kırılan malzemede çok az plastik deformasyon oluşur. Camlar, seramikler ve gri dökme demir gibi malzemeler gevrek olarak kırılırlar. Gevrek kırılma sırasında çok az bir şekil değişimi olduğunda, kırılma sonrası parçalar birleştirildiğinde numunenin yaklaşık kırılma öncesi şekli elde edilebilir. Gevrek kırılmada malzeme kırılıncaya kadar çok az enerji (gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan) absorbe etmektedir. Kristalografik açıdan gevrek kırılma klivaj kırılma şeklinde oluşmaktadır. Gevrek kırılmada bir çatlağın hiç veya pek az plastik değiştirmeyi izleyerek çok hızlı yayılması sonucu oluşur. Gevrek kırılma, ayrılma düzlemleri yerine tane sınırları boyunca da ilerleyebilir. Buna taneler arası kırılma denir ve tane sınırlarında çökelen kırılma filmlerinin varlığından ileri geldiği söylenebilir. Her iki halde de gevrek kırılma uygulanan çekme gerilmesine dik yönde oluşur.

Sünek kırılmada ise, kırılma öncesi malzeme önemli ölçüde plastik deformasyona uğrar. Bu nedenle kırılan parçaların birleştirilmesiyle elde edilen şekil orijinal numune şeklinden çok farklıdır. Sünek kırılmada parçada büyük ölçüde kesit daralması (büzülme) meydana gelmekte

ve bu sırada büyük oranda enerji absorbe edilmektedir. Bu ise malzemenin tokluğunun yüksek olduğunu gösterir. Kristalografik açıdan sünek kırılma kayma kırılması şeklinde olmaktadır. Sünek kırılma, boşlukların çekirdeklenmesi ile başlar. Çatlak ilerlemesi ve kırılma söz konusu boşlukların büyüyerek birbirleri ile birleşmesi sonucu meydana gelir.



Şekil 1.28. Gevrek ve sünek malzemelere ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.

## 2.7. Plastik kararsızlık ve boyun verme

Deformasyon sertleşme hızı ( $d\sigma/d\varepsilon$ ),  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrisinin eğimi olarak tanımlanır. Holloman denkleminde göre deformasyon sertleşmesi gösteren bir malzemede deformasyon sertleşme hızı ( $d\sigma/d\varepsilon$ );

$$\sigma_g = K \cdot \varepsilon^n$$

$$(d\sigma_g/d\varepsilon) = (dK/d\varepsilon) \cdot \varepsilon^n + K \cdot n \cdot \varepsilon^{n-1}$$

$$dK/d\varepsilon = 0 \text{ olduğundan}$$

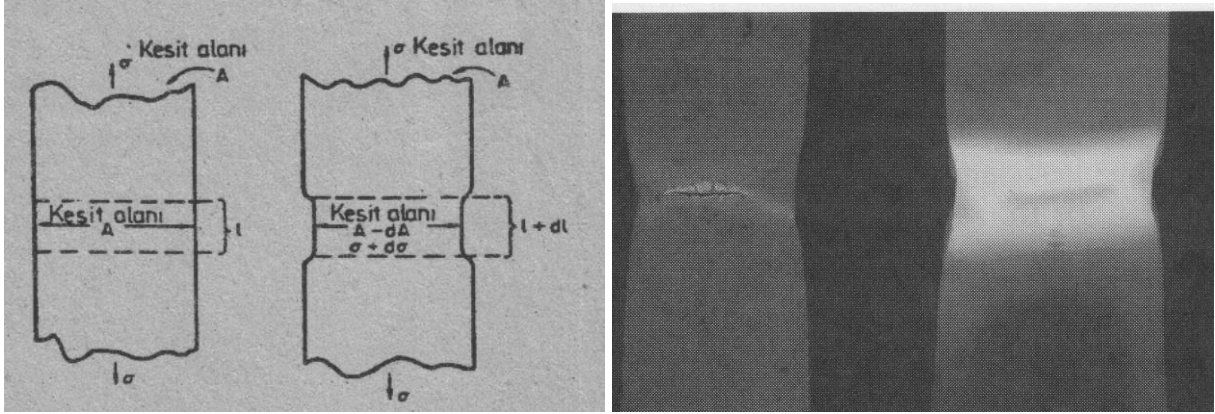
$$(d\sigma_g/d\varepsilon) = K \cdot n \cdot \varepsilon^{n-1} = nK\varepsilon^n / \varepsilon = n\sigma_g / \varepsilon$$

$$(d\sigma_g/d\varepsilon) = n(\sigma_g / \varepsilon)$$

Deformasyon sertleşme hızı, çekme deneyi sırasında numunede meydana gelen boyun oluşumunu belirlemede oldukça önemlidir. Çekme deneyinde, plastik kararsızlık olarak

bilinen boyun verme, maksimum yük (veya maksimum mühendislik gerilmesi) noktasında başlar.

Plastik kararsızlığı inceleyebilmek için F kuvveti etkisiyle numunenin bir kesitin diğer bölgelerden biraz daha plastik deformasyona uğradığını düşünelim. Boyun bölgesinin kesiti daha küçük olduğundan, bu bölgedeki gerilme diğer kısımlardan daha fazladır. Eğer deformasyon sertleşmesi akma mukavemetini yeteri kadar arttırmış ise, daralmış kesit F kuvvetini taşıyabilir. Aksi halde plastik deformasyon boyun bölgesinde olur ve malzeme buradan kopar.



Şekil 1.29. Tek yönde çekme kuvveti uygulanan silindirik bir numunede boyun oluşumu [Bowman]

A alan ve  $\sigma_g$  mukavemet ise, numunenin herhangi bir kesiti  $A \cdot \sigma_g$  yükünü taşıyabilir.  $A \cdot \sigma_g$  değeri, deformasyon miktarına bağlı olarak artarsa numune kararludur, fakat azalırsa numune kararsızdır ve boyun verir. Malzemenin boyun vermesi için kritik koşul;

$$A \cdot \sigma_g = F = s \cdot b \cdot t$$

Buradan,

$$dF = A \cdot d\sigma_g + \sigma_g \cdot dA = 0 \text{ veya } (d\sigma_g / \sigma_g) = -(dA/A) \text{ bulunur.}$$

Plastik deformasyon süresince hacim sabit kaldığından,

$$V = A \cdot L = s \cdot b \cdot t$$

$$-dA / A = dL / L = d\varepsilon$$

$$(d\sigma_g / \sigma_g) = d\varepsilon$$

$$(d\sigma_g / d\varepsilon) = \sigma_g \text{ bulunur.}$$

Bu bağıntı, gerçek gerilme-gerçek birim şekil değiştirme eğrisinde boyun vermenin veya homojen olmayan deformasyonun başladığı noktanın, eğrinin eğiminin, yani deformasyon sertleşme hızının  $(d\sigma_g / d\varepsilon)$  gerçek gerilmeye eşit olduğu nokta olduğunu göstermektedir.  $(d\sigma_g / d\varepsilon) > \sigma_g$  ise boyun verme olmaz, deformasyon homojendir. Buradan, plastik deformasyon sırasında homojen olmayan deformasyonun başlamasının deformasyon sertleşmesi tarafından engelleneceği anlaşılmaktadır.

Mühendislik çekme diyagramında boyun verme kriteri ise  $d\sigma_m / d\varepsilon = 0$  olup, homojen olmayan deformasyon maksimum gerilme noktasında başlar.

Boyun vermenin başlamasına kadar olan üniform birim şekil değiştirme miktarı ( $\varepsilon_u$ ), kararsızlık kriterini belirten denklem ile Holloman denklemi kullanılarak,

$$(d\sigma_g / d\varepsilon) = K n \varepsilon_u^{n-1}$$

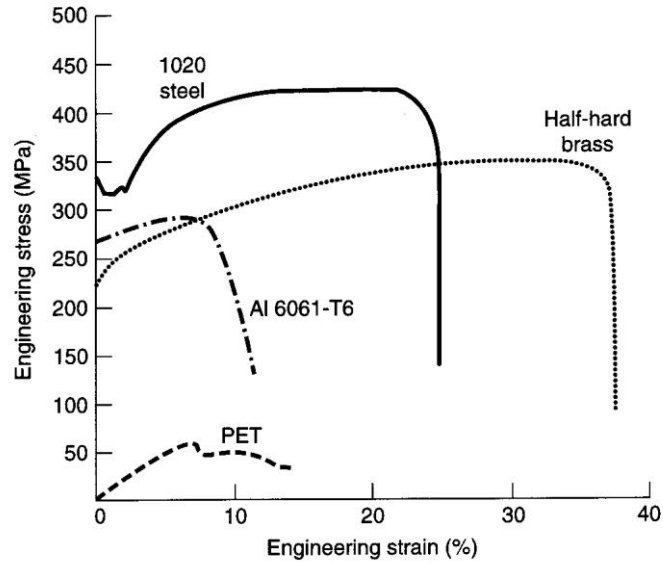
$$(d\sigma_g / d\varepsilon) = \sigma_g = K \varepsilon_u^n$$

$$K n \varepsilon_u^{n-1} = K \varepsilon_u^n$$

$$n = \varepsilon_u$$

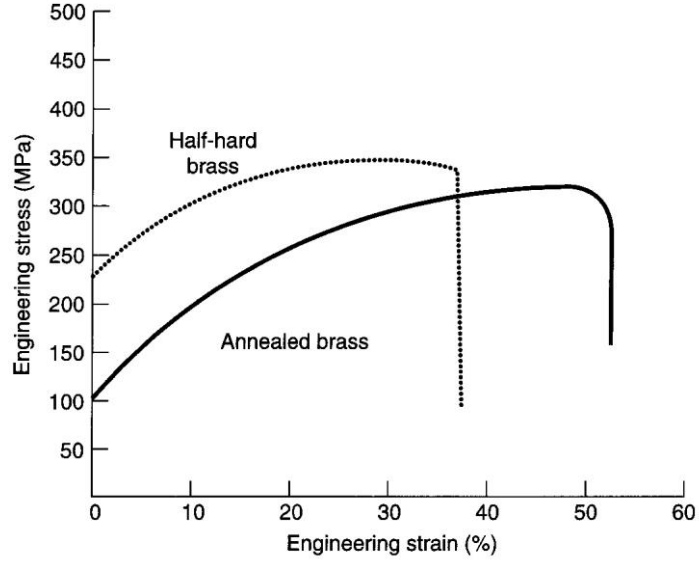
Bu sonuç deformasyon sertleşme üssünün üniform birim şekil değiştirmeye eşit olduğunu, deformasyon sertleşme üssü arttıkça homojen olmayan deformasyona neden olan kesit daralmasının gecikerek üniform birim şekil değiştirme miktarının artacağını göstermektedir. Buna göre malzemede oluşturulan birim şekil değişimi miktarı malzemenin deformasyon sertleşme üssü  $n$  değerinin eşit olduğunda büzülme başlamaktadır. Bu nedenle,  $n$  değeri ne kadar büyükse malzemenin boyun vermeye karşı direnci de o oranda yüksek olmaktadır. Bu bağıntı, malzemelerin deformasyon kabiliyetinin bir ölçüsü olarak üniform deformasyon oranının kriter olarak alındığı soğuk şekil verme işlemlerinde, deformasyon sertleşme üssü ( $n$ ) değeri büyük olan malzemelerin tercihen kullanılacağını da göstermektedir.

### 1.8. Çekme diyagramına ait örnekler

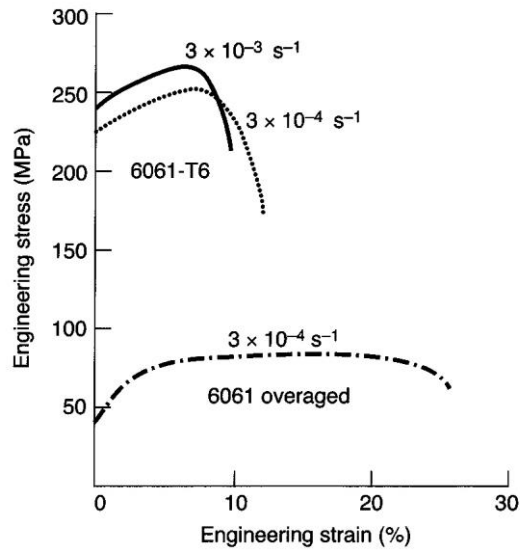


Şekil 1.30. Bazı sünek karakterli malzemelerin oda sıcaklığındaki mühendislik gerilme-uzama diyagramları [Bowman]





Şekil 1.31. Tavlanmış ve yarı sert pirince ait mühendislik gerilme-uzama diyagramları [Bowman]



Şekil 1.32. 6061-T6 Al alaşımına ait iki farklı deformasyon hızlarında yapılmış gerilme-uzama diyagramları ve bunların bu malzemenin aşırı yaşlandırılmış durumda sergiledikleri değişimle karşılaştırılmaları [Bowman].

## 2.7.Çözümlü Problemler

1. Başlangıç ölçü boyu 152 mm olan bir çubuğun çekme deneyinde ölçü boyu 203 mm olduğunda çekme doğrultusundaki birim şekil değiştirme ve gerçek şekil değiştirme değerlerini hesaplayın. Ölçü boyu daha sonra 304 mm uzunluğuna ulaştığında ek birim şekil değiştirme ve gerçek şekil değiştirme miktarı ne olur? Her adımda oluşan birim şekil değiştirme ve gerçek şekil değiştirme değerlerinin toplanabilir olup olmadıklarını gösterin.

### Çözüm

Birinci adımda 
$$e_1 = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{203 - 152}{152} = 0,336$$

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{L_i}{L_0} = \ln \frac{203}{152} = 0,289$$

İkinci adımda 
$$e_2 = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{304 - 203}{203} = 0,498$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{L_i}{L_0} = \ln \frac{304}{203} = 0,404$$

Şekil değişimi bir adımda gerçekleştirildiği takdirde

$$e = \frac{L_i - L_0}{L_0} = \frac{304 - 152}{152} = 1$$

$$\varepsilon = \ln \frac{L_i}{L_0} = \ln \frac{304}{152} = 0,693$$

$$e_1 + e_2 = 0,336 + 0,498 = 0,834 \neq 1 \text{ buna karşılık}$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0,289 + 0,404 = 0,693 = \varepsilon$$

2. Çapı 6,35 mm olan bir çubuğa 8,96 kN değerinde bir çekme kuvveti uygulandığında çubuğun çapı 5,08 mm olmaktadır. Şekil değişimini üniform ve çubuk hacminin sabit kaldığını kabul ederek nominal gerilme, birim şekil değiştirme, gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme değerlerini hesaplayın. Bu çubuğa 345 MPa değerinde gerçek çekme gerilmesi

uygulandığında çapı 5,99 mm olduğuna göre nominal gerilme ve birim şekil değiştirme değerlerini bulun.

### Çözüm

8,96 kN çekme kuvveti etkisinde çubuktaki nominal gerilme

$$\sigma_n = \frac{8960}{\pi(6,35)^2 / 4} = 283 \text{ MPa}$$

bulunur. Hacim sabitliği nedeniyle  $l/l_0 = A_0/A$  olduğundan birim şekil değiştirme için

$$e = \frac{L_i}{L_0} - 1 = \frac{A_0}{A} - 1 \text{ ifadesinden}$$

$$e = \frac{(6,35)^2}{(5,08)^2} - 1 = 0,563$$

elde edilir. Gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme değerleri ise

$$\sigma = \frac{8960}{\pi(5,08)^2 / 4} = 442 \text{ Mpa}$$

$$\varepsilon = \ln \frac{L_i}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A} = \ln \left( \frac{6,35}{5,08} \right)^2 = 0,446$$

Not :  $\ln (1 + e) = \ln (1 + 0,563) = 0,446$  olduğuna göre  $\varepsilon = \ln (1+e)$  ifadesi sağlanmaktadır.

Gerçek ve nominal çekme gerilmeleri arasında  $\sigma = \sigma_n(1+e)$  bağıntısı olduğundan,

bu ifadede  $e = \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 - 1$  koyarak

$$\sigma_n = \sigma \left( \frac{d_0}{d} \right)^2 = 345 \left( \frac{5,59}{6,35} \right)^2 = 267 \text{ MPa}$$

$$e = \left( \frac{6,35}{5,59} \right)^2 - 1 = 0,290$$

bulunur.

3. Çapı 9,07 mm olan metal bir çubuk çekmeye zorlanmaktadır. Çekme kuvveti 13,44 kN olduğunda elastik davranış son bulduğuna ve bu anda yapılan ölçmeler sonucunda çubuğun çapı 9,0576 mm bulunduğuna göre nominal ve gerçek değerlerini kıyaslayın.

### Çözüm

Nominal gerilme

$$\sigma_n = \frac{13440}{\pi(9,07)^2 / 4} = 208 \text{ MPa}$$

Gerçek gerilme

$$\sigma = \frac{13440}{\pi(9,0576)^2 / 4} = 208,7 \text{ MPa}$$

olduğuna göre elastik alanda pratik olarak  $\sigma_n = \sigma$  alınabileceği görülmektedir.

4. Bir çekme deney parçasının başlangıç ölçü boyu  $L_0 = 50$  mm, başlangıç kesiti  $A_0 = 100$  mm<sup>2</sup> dir. Kopma, çekme kuvveti en yüksek değerini aldığı anda meydana gelmektedir (şekil değişimi üniform, büzülme yok).  $L = 60$  mm,  $A = 83,33$  mm<sup>2</sup> olduğuna göre gerçek kopma uzamasını bulun.

### Çözüm

Gerçek kopma uzaması

$$\varepsilon_f = \ln \frac{60}{50} = 0,182$$

dir. Büzülme olmadığı için aynı sonuca,  $L/L_0 = A_0/A$  olması nedeniyle,  $\varepsilon_f = \ln \frac{A_0}{A}$

ifadesiyle de ulaşılabilir  $\left( \ln \frac{A_0}{A} = \ln \frac{100}{83,33} = 0,182 \right)$ .

Not: Başlangıçtaki hacim  $V_0 = A_0 \cdot L_0 = 100 \cdot 50 = 5000$  mm<sup>3</sup>, son hacim  $V = A \cdot L = 83,33 \cdot 60 = 5000$  mm<sup>3</sup> olup, bu şekil değişiminde hacim değişmemektedir.

5. Bir çekme deney parçasının başlangıç ölçü boyu  $L_0 = 2$  in. ve çapı  $d_0 = 0,505$  in. Değerindedir. Kopmadan önce büzülme oluşmaktadır. Kopmada ölçü boyu  $L = 2,780$  in. ve kopma kesitinde en küçük çap  $d = 0,321$  in. Olduğuna göre önceki problemi tekrarlayın. Çekme çubuğu üstünde başlangıçta aralarındaki uzaklık 1,4 in. olan iki nokta alınır ve kopmada bu noktaların uzaklığı 2,05 in. Ölçülürse, bu noktalara göre % kopma uzaması ne olur? Bulduğunuz sonucu irdeleyin.

### Çözüm

Gerçek kopma uzaması, ölçü boyu göz önüne alınır

$$\varepsilon_f = \ln \frac{2,78}{2} = 0,329$$

kesitler göz önüne alınır

$$\varepsilon_f = 2 \ln \frac{0,505}{0,321} = 0,906$$

bulunur. Büzülme oluşması nedeniyle, bulunan  $\varepsilon_f$  değerleri Problem 4 de olduğu gibi eşit değildir. Yine büzülme nedeniyle son hacmin hesaplanma olanağı da yoktur.

Başlangıçta aralarındaki uzaklık 1,4 in. Olan noktalara göre % kopma uzaması,

$$e_f = \frac{2,05 - 1,4}{1,4} \cdot 100 = \%46,4$$

değerindedir. Buna karşılık başlangıç ölçü boyu 2 in. Alınır % kopma uzaması

$$e_f = \frac{2,78 - 2}{2} \cdot 100 = \%39$$

bulunur. Başlangıç ölçü boyu küçük alındıkça % uzamanın büyümesi büzülmenin yerel bir oluşum olmasının doğal sonucudur.

6. Plastik şekil değiştiren silindirik bir çubuğun kesiti % 40 azalmaktadır.  $\sigma = 690 \varepsilon^{0,2}$  (MPa) olduğuna göre soğuk plastik şekil değişimi sonunda malzemenin akma sınırı hangi değeri alır?

### Çözüm

Dairesel kesitli çubuklarda  $\varepsilon = 2 \ln \frac{d_0}{d}$  olduğundan

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{1 - 0,4} = 0,51$$

buradan da

$$\sigma = 690 (0,51)^{0,2} = 603 \text{ MPa}$$

bulunur.

7. Bir malzemenin deneysel olarak bulunan çekme dayanımı 193 MPa dır. Bu malzemenin çekme deneyinde elde edilen  $\sigma$  ve  $\varepsilon$  değerlerinin logaritmik koordinatlara taşınmasıyla çizilen doğru için  $\sigma = 345 \varepsilon^{0,25}$  (MPa) denklemi kabul edildiği takdirde K ve n değerlerinin uygun seçildikleri söylenebilir mi?

Çözüm

Çekme eğrisinin maksimum noktasında, diğer bir deyişle çekme dayanımına ulaşıldığında  $\varepsilon = n$  dir. Burada  $n = 0,25$  seçildiğine göre malzemenin çekme dayanımı

$$\sigma = 345 \left( \frac{\varepsilon}{e} \right)^\varepsilon = 345 \left( \frac{0,25}{e} \right)^{0,25} = 190 \text{ MPa}$$

olmalıdır. Deneysel olarak bulunan çekme dayanımı 193 Mpa olduğuna göre K ve n değerleri için seçim uygun olduğu söylenebilir.

8. 13 mm çapında bir çekme numunesinin ilk ölçü boyu 50 mm dir. %0.2 lik ofsete ait yük 6800 kg dır ve maksimum yük 8400 kg dır. Kopmadan sonraki çap 8 mm ve ölçü boyu 65 mm dir. Malzemenin çekme deneyinden elde edilen standart özelliklerini hesaplayın.

$$A_0 = \frac{\pi}{4} (13)^2 = 132,7 \text{ mm}^2 = 132,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} (8)^2 = 50,3 \text{ mm}^2 = 50,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

maksimum çekme gerilmesi  $\sigma_\xi = \frac{F_{mak}}{A_0} = \frac{8400 \cdot 9,8}{132,7 \times 10^{-6}} = 620 \text{ MPa}$

% 0.2 ofsetli akma gerilmesi  $\sigma_{ak} = \frac{F_{ak}}{A_0} = \frac{6800 \cdot 9,8}{132,7 \times 10^{-6}} = 502 \text{ MPa}$

kopma gerilmesi  $\sigma_{kopma} = \frac{F_{kopma}}{A_0} = \frac{7300 \cdot 9,8}{132,7 \times 10^{-6}} = 539 \text{ MPa}$

kopma uzaması  $e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{65 - 50}{50} \cdot 100 = \%30$

kesit daralması  $A_f = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = \frac{132,7 - 50,3}{132,7} \cdot 100 = \%62$

9. Eğer gerçek gerilme-gerçek birim Şekil değiştirme grafiği  $\sigma = 1400\varepsilon^{0,33}$  olarak verilirse malzemenin maksimum çekme gerilmesi nedir? ( $\sigma$  MPa biriminde)

Maksimum yükte üniform uzama  $\varepsilon_{maksimum} = n = 0,33$  tür.

Maksimum yükte gerçek gerilme  $\sigma_u = 1400(0,33)^{0,33} = 971 \text{ MPa}$  olur.

$\sigma_m = \frac{\sigma_g}{(e+1)}$  ve  $\varepsilon = \ln(e+1)$  denklemlerinde ikinci denklemden  $(e+1)$  i çeker

$(e+1) = e^{\varepsilon_u} = \exp(0,33)$  , ilk denklemde yerine koyarsak ;

buluruz.

10. Ticari saf alüminyum için  $\sigma = C(\varepsilon)^m \Big|_{\varepsilon, T}$  denklemindeki parametreler aşağıda verilmiştir.

	294 K	713 K
C :	70,3 MPa	14,5 MPa
m :	0,066	0,211

Her bir sıcaklık için birim Şekil değiştirmenin üssel olarak 2 kademe büyümesiyle akma gerilmelerindeki değişimi hesaplayın.

$$294 \text{ K de,} \quad \sigma_a = C(\varepsilon)^m = 70,3(1)^{0,066} = 70,3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_b = 70,3(100)^{0,066} = 95,3 \text{ Mpa} \quad \sigma_b / \sigma_a = 1,35$$

$$713 \text{ K de,} \quad \sigma_a = 14,5(1)^{0,211} = 14,5 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_b = 14,5(100)^{0,211} = 38,3 \text{ Mpa} \quad \sigma_b / \sigma_a = 2,64$$

## 2.8. Çözülecek problemler

1. 6 mm yarıçapındaki çelik çubuğa 400N'luk çekme kuvveti uygulandığında, çubuktaki gerilme miktarı ne kadar olur.
2. Al çekme çubuğunda 40 mm'lik ölçü uzunluğu işaretlendikten sonra çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çubuğun boyu 42.3 mm'ye ulaştığında şekil değiştirme oranı ne kadar olur.
3. Bir malzemenin mukaveti ile tokluğunu tanımlayınız?
4. Sıcaklığın akma mukavemetine etkisi ne yöndedir, nedenini açıklayınız?
5. Yay malzemesi seçiminde malzemenin hangi mekanik özellikleri önem taşır, neden?
6. Sünek bir malzemeye ait tipik bir mühendislik çekme diyagramında, elastik bölgeden sonra, homojen deformasyonun yer aldığı bölgede yük niçin artmakta, buna karşın heterojen deformasyon bölgesinde ise niçin azalmaktadır?
7. 10 cm ölçü uzunluğundaki numuneye, 10 dak.<sup>-1</sup> nominal çekme hızı uygulanmak istenirse, çekme cihazının çene hızı kaç mm/dak. Olmalıdır?
8. Bir malzemenin içerisinde katıksı ve/veya mikro-boşluk olduğu tahmin edilirse, bu malzeme hangi mekanik deneylere karşı daha duyarlıdır?



## 2. BASMA DENEYİ

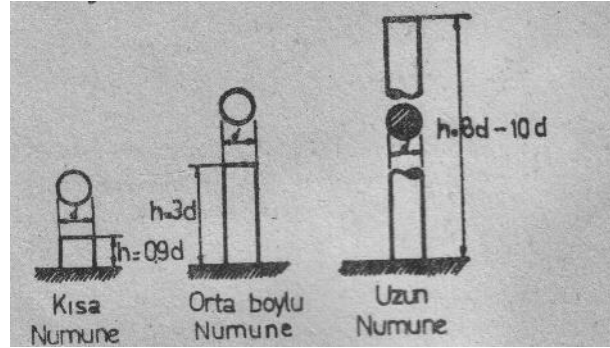
Basma deneyi işlem itibarıyla çekme deneyinin tamamen tersidir. Basma deneyi de çekme deneyi makinelerinde yapılır. Basma gerilmesine maruz kalan malzemelerin temel mekanik özellikleri genellikle basma deneyi ile belirlenir. Bu tür malzemeler, genellikle gevrek yapıya sahip malzemelerdir. Örnek olarak, gri dökme demir, yatak alaşımları gibi metalik malzemeler ve tuğla ve beton gibi metal dışı malzemelerin basma mukavemetleri çekme mukavemetlerine göre çok daha yüksek olduğu için basma kuvvetinin uygulandığı yerlerde kullanılırlar.

Homojen bir malzemenin gerçek gerilme-birim şekil değişimi için çekme ve basma durumları aynıdır.

Basma deneyi sırasında numunenin kesit alanı sürekli olarak büyüdüğü için boyun oluşumu yoktur. Basma deneyi bilhassa gevrek ve yarı gevrek malzemelerin sünekliğinin hassas bir şekilde belirlenmesinde kullanılır.

### 2.1. Basma numunesi

Basma deneyinde, homojen bir gerilme dağılımı elde etmek için genellikle silindirik numuneler kullanılır. Ancak, özel durumlarda kare ve dikdörtgen kesitli numuneler de kullanılır. Basma numunelerinde önemli bir parametre, numunenin boy/çap oranıdır. Bu oranın çok büyük olması durumunda bükülme problemi ortaya çıkar. Metalik malzemelerde bu oran genellikle 2 olarak alınır. Ancak, daha küçük ve büyük oranlarda kullanılabilir. Kısa numuneler yatak alaşımları için, orta boydaki numuneler diğer bütün metalik malzemeler için, uzun numuneler de elastisite modülü tayininde kullanılır.



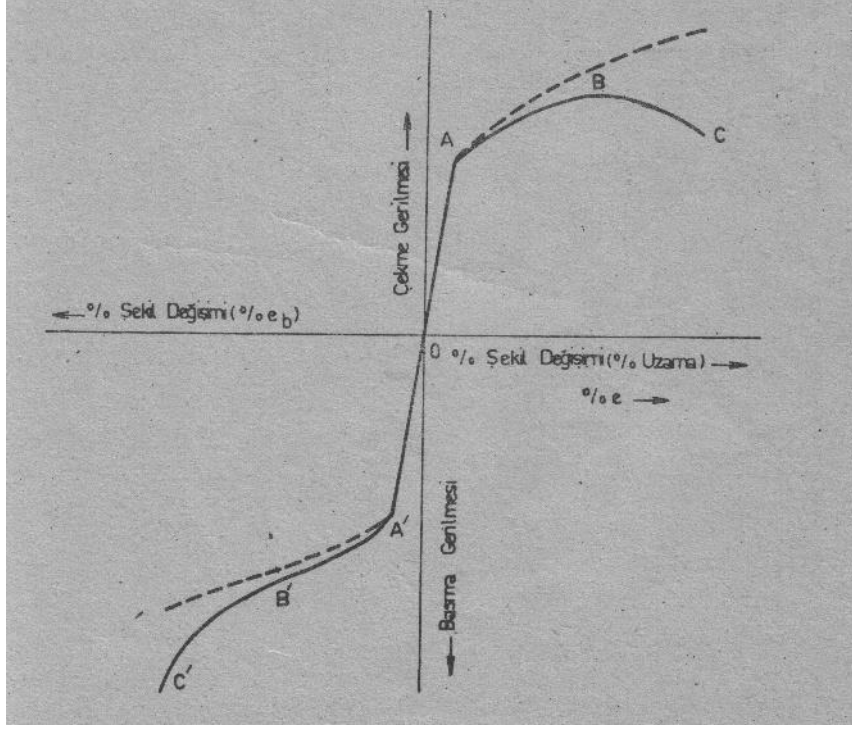
Şekil 2.1. Standart basma numuneleri

Basma deneyi, çekme makinelerinde basma plakaları arasına yerleştirilen numuneye basma kuvveti uygulanarak gerçekleştirilir.

### 2.2. Basma diyagramı

Metalik malzemelerin basma ve çekme diyagramlarının şekli genel olarak birbirine benzer. Basma deneyinde de önce bir elastik bölge (OA') görülür. A' noktası elastik sınır olarak tanımlanır ve bu noktadan sonra plastik deformasyon başlar. Bu bölge, çekme deneyinde elde edilen bölge ile tamamen aynıdır. Plastik deformasyon bölgesinin ilk kısmı (A'B') çekme diyagramının plastik deformasyon eğrisinin ilk kısmına benzer bir eğimle devam eder, fakat daha sonra basma eğrisinin eğimi artar. Bunun nedeni, deney sırasında numunenin kesit alanının sürekli artmasıdır. Deneyin sonuna doğru, kesit çok arttığında

gerilme de ani olarak yükselir. Öte yandan, numunenin gerçek kesit alanına bağlı olarak hesaplanan gerçek gerilme değeri ise mühendislik gerilme değerinden daha düşüktür. Basma ve çekme deneylerinden elde edilen gerçek gerilme-gerçek birim uzama diyagramları aynıdır.



Şekil 2.2. Çekme ve basma gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

### 2.3. Basma gerilmesi ve basma şekil değişimi

Basma deneyi ile elde edilen şekil değişimi ve dayanım büyüklüklerinin tanımları genellikle çekme deneyindekilere benzer. Basma deneyinde de basma yükünün orijinal kesit alanına bölünmesiyle mühendislik basma gerilmesi hesaplanır. Burada da akmaya neden olan yükün numunenin deney öncesi orijinal kesit alanına bölünmesiyle akma gerilmesi hesaplanır.

$$\sigma_{m,a} = F_a/A_0$$

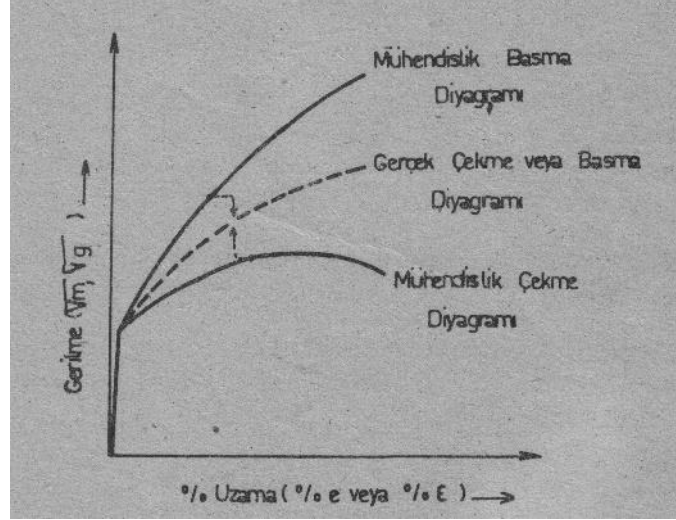
Çekme deneyinde olduğu gibi belirgin akma noktası göstermeyen malzemelerin akma gerilmesi, mühendislik basma diyagramı üzerinde %0.2'lik plastik deformasyona neden olan gerilme değeri alınarak hesaplanır. Metalik malzemelerin çekme ve basma deneyleri ile elde edilen akma gerilmesi değerleri birbirine eşittir.

Basma deneyi sırasında gerçek kesitin ( $A_i$ ) giderek büyüdüğü dikkate alınır, gerçek basma gerilmesi ( $\sigma_{b,g}$ ), çekme deneyine benzer şekilde;

$$\sigma_{b,g} = F_i/A_i$$

yardımla bulunur.

Metalik malzemelerin gerçek çekme ve basma diyagramları birbirinin aynısıdır. Ancak, mühendislik çekme ve basma diyagramları, plastik bölgede birbirinden farklıdır. Bu bölgede mühendislik basma gerilme değerleri mühendislik çekme gerilmesi değerlerinden daha fazladır.



Şekil 2.3. Metalik malzemelerde mühendislik ve gerçek çekme ve basma diyagramlarının karşılaştırılması.

Basma deneyinde, mühendislik ve gerçek şekil değişimi oranları çekme deneyine benzer şekilde hesaplanır. Basma deneyinde mühendislik şekil değişimi ( $\epsilon_b$ ), numunenin yüksekliğindeki azalma miktarının orijinal yüksekliğe oranının yüzde olarak ifadesidir.

$$\% \text{ basma şekil değişimi } (\% \epsilon_b) = \frac{h_1 - h_0}{h_0} \times 100 = (h_1/h_0 - 1) \times 100$$

Burada;

$h_0$  = Numunenin deney öncesi (orijinal) yüksekliği

$h_1$  = Numunenin deney sonrası yüksekliği

Basma deneyinde gerçek şekil değiştirme ( $\epsilon_b$ ) oranı da çekme deneyinde olduğu gibi hesaplanır.

$$\epsilon_b = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_1}{h_0} = -\ln \frac{h_0}{h_1} \quad h_0 > h_1$$

Basmada gerçek şekil değiştirme oranı da negatif değerdedir.

Gerçek ve mühendislik basma gerilmesi değerleri arasında da çekme deneyinde olduğu gibi aşağıdaki bağıntı geçerlidir.

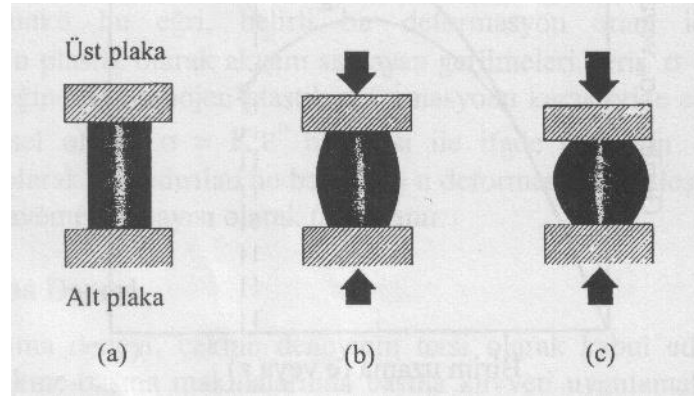
$$\sigma_{b,g} = \sigma_{b,m} (1 + \epsilon_b)$$

Yukarıdaki bağıntıda basma mühendislik birim şekil değiştirmenin negatif değerde olduğu unutulmamalıdır.

Basmada gerçek şekil değişimi oranı ile mühendislik şekil değiştirme oranı arasındaki bağıntı ise aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_b = \ln(1 + e_b)$$

Basma deneyi ile malzemelerin sünekliği veya deformasyon kabiliyeti %şekil değiştirme oranı ile belirlenir. Basmada malzemenin sünekliği, genel olarak numune yüzeyinde ilk görülebilir çatlakın teşekkül ettiği deformasyon miktarı olarak tayin edilir. Bunu yaparken karşılaşılan en büyük zorluk, numune ile plakalar arasındaki sürtünmeden kaynaklanan şişme veya fiçı oluşumudur. Bu durumda homojen olmayan deformasyon meydana gelir ve elde edilen değerlerin güvenilirliği azalır. Bunu önlemek için uygulanan yöntem ara yüzeyin yağlanması ve bu sayede sürtünme etkisinin minimuma indirilmesidir.



Şekil 2.4. Basma numunelerinde fiçı oluşumu

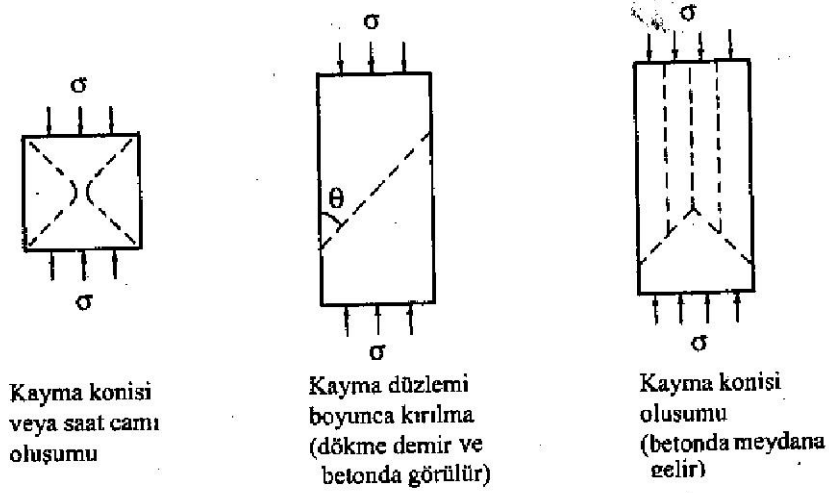
Çekme deneyinde hesaplanan %kesit daralması yerine, basma deneyinde %kesit değişimi hesaplanır.

$$\% \text{ kesit değişimi} = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100 = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \times 100$$

Kalınlığı çok az olan metalik malzemelerden silindir şeklinde basma numunesi hazırlamak imkansızdır. Bu nedenle ince levha ve sacların basma deneyleri, düzlem şekil değişimli basma deneyi ile yapılır.

## 2.4. Kırılma şekilleri

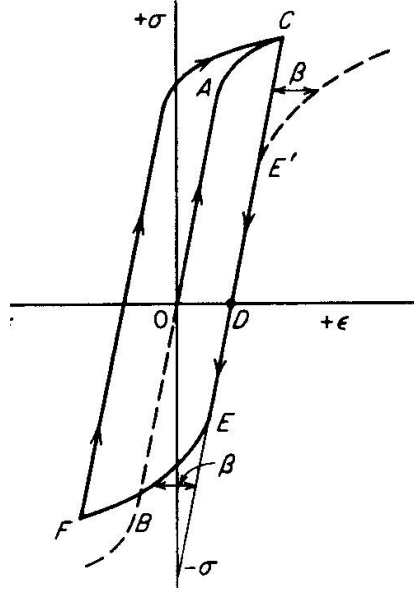
Sünek malzemeler basma deneyi sırasında kırılmadan deforme olur ve şişme göstererek yığılırlar. Gevrek malzemelerde kırılma, genellikle kayma ile numunenin iki parçaya ayrılması şeklinde olur. Pirinç gibi yarı sünek malzemelerde ise koni şeklinde kırılma meydana gelir.



Şekil 2.5. Basma deneyinde karşılaşılan başlıca kırılma tipleri

## 2.5. Bauschinger Etkisi

Başlangıçta çekme ve basma hallerindeki akma sınırı ( $\sigma_a$ ) olan bir malzemenin basit çekme deneyinde, akma sınırından sonra, üniform şekil değişimi bölgesinde bir noktada yük boşaltıldıktan sonra deney parçası tekrar fakat aksi yönde yani basmayla yüklendiği takdirde, basmadaki yeni akma sınırı çekmede akma sınırınının pekleşme nedeniyle yükselmiş olduğu değere kıyasla düşük bulunur. İlk defa J. Bauschinger tarafından gözlemlendiği için (1881) "Bauschinger etkisi" olarak adlandırılan bu olay aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Bu etki, parça önce basmaya sonra çekmeye zorlandığı takdirde de görülebilir.



Şekil 2.6. Baushinger etkisi. Önce çekme gerilmesi altında şekil değişimine uğrayan malzemeye hemen ardından basma gerilmesi uygulandığında akma gerilmesi düşmektedir [Dieter].

Dislokasyon teorisiyle açıklanabilen Bauschinger etkisi, gerilmenin sürekli bir şekilde aksi olarak yön değiştirdiği plastik şekil değişimlerinde ihmal edilemeyecek kadar önemlidir. Bu olayın nedeni, ilk hareket ettiği yönde engellere takılan dislokasyonların ters yönde zorlandıklarında çok daha düşük gerilme seviyesinde geri dönebilmesine dayandırılmaktadır. Bu olaya daha detaylı incelenecek olursa, bu durumun aşağıda verilen iki önemli etkiden kaynaklandığı söylenebilir.

- Kısa aralık etkileri (short range effects):** Hareket eden dislokasyonlar kendilerine hareket yönü doğrultusunda kolaylıkla gidip gelebilecekleri düzlemleri yaparlar. İlk hareket sırasında bunun için harcadıkları enerji ve bunu sağlayan gerilme daha yüksektir. Ancak, geri dönüşleri sırasında doğal olarak daha az enerji gerekecek ve gerilme seviyesi düşecektir.
- Uzun aralık etkisi (long range effects):** Dislokasyonların gerek orman dislokasyonları ve gerekse diğer kilitler tarafından hareketine engel olunması ve bu engellerde tıpkı sıkışmış bir yay gibi elastik şekilde birikmeleri, geri yüklemeye yay şeklinde biriken dislokasyonların boşalma hareketi yaparak geri yöndeki hareketlerini kolaylaştırmaları nedeniyle yumuşama görülmektedir.

Bu etki çok kristalli malzemelerde ortaya çıkan genel bir olaydır. Ardı ardına yapılan çekme-basma-çekme şeklindeki yüklemeler sonucunda yukarıdaki şekilde verilen mekanik histerisiz döngüsü oluşur. Bu döngünün altında kalan alan akma gerilmesinin üzerinde uygulanan ilk şekil değişimine ve çevrim sayısına bağlıdır. Eğer çevrim çok sayıda yapılırsa, yorulma hasarı şeklinde bir hasar meydana gelebilir.

Baushinger etkisi, metal şekillendirme yöntemlerinde önemlidir. Örneğin, çelik plakaların kırılmasında uygulanan ters yönlü gerilmeler malzemenin yumuşamasına neden olur.

Bauschinger etkisi ısıtılma ile giderilebilir.

### 3. SERTLİK DENEYİ

Yapılışının basit olması ve malzemeye hasar vermemesi nedeniyle malzeme üzerinde yapılan en genel mekanik deneylerden biri sertlik deneyidir. Ayrıca, bir malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında paralel bir ilişki de bulunmaktadır ve bu sayede diğer bazı özellikler hakkında fikir edinilebilmektedir. Örneğin çeliklerde, çekme mukavemeti sertlik değeri ile orantılıdır. Dolayısıyla yapılan basit bir sertlik deneyi sonucunda o malzemenin mukavemet değerleri hakkında da fikir edinilebilir.

Sertlik izafi bir ölçü olup, malzemelerin sürtünmeye, kesilmeye, çizilmeye ve plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir. Bilimsel anlamda ise malzemelerin dislokasyon hareketine karşı gösterdiği direnç olarak tarif edilir.

Sertlik ölçme genellikle, konik veya küresel standart bir ucun malzemeye batırılmasına karşı malzemenin gösterdiği direnci ölçmekten ibarettir.

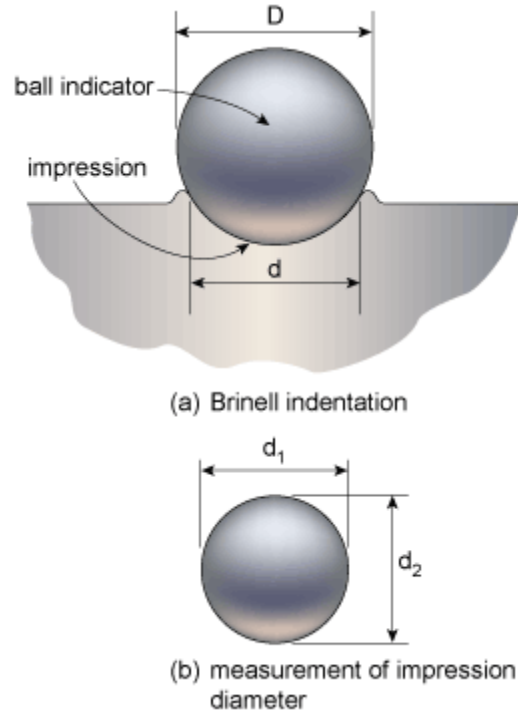
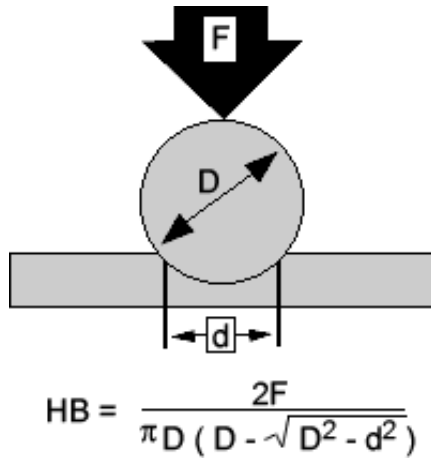
En genel sertlik ölçme deneyleri aşağıda verilmiştir. Bu ölçüler arsında matematiksel ilişkiler mevcut olup bir değerden diğerine geçiş yapılabilmektedir. Sertlik ölçümleri yapılırken, yöntem ne olursa olsun numune üzerinde birkaç ölçüm yapıp bunların ortalaması alınmalıdır.

- a) Brinell sertlik ölçme yöntemi,
- b) Vickers sertlik ölçme yöntemi
- c) Rockwell sertlik ölçme yöntemi,
- d) Mikro-sertlik ölçme deneyi.

#### 4.1. Brinell sertlik ölçme yöntemi

Yüzeye belirli bir yükün, belirli çaptaki sert bir malzemedan yapılmış bir bilye yardımıyla belirli süre uygulanmasından ve sonuç olarak meydana gelen izin çapının ölçülmesinden ibarettir.

**Birinel sertlik değeri (BSD):** Belirli çapta bir bilye ile bir malzemenin yüzeyine belirli bir süre bastırarak suretiyle meydana getirilen kalıcı izin büyüklüğü ile ilgili bir değerdir. Birinel sertlik değeri, bilye üzerine uygulanan yükün numune yüzeyi üzerinde elde edilen küresel yüzey alanına bölünerek belirlenir.



Şekil 3.1. Brinell sertlik deneyi

$$BHN = \frac{F}{2\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Burada:

F: uygulanan kuvvet (N,kg)

D: Bilye çapı (mm<sup>2</sup>)

d: İz çapı (mm<sup>2</sup>)

Standart deneylerde genellikle 10 mm çapında çelik bilye, 300 kg yük ve 30 saniye bekleme süresi seçilir. Diğer deney şartları için BSD işaretinin yanına bilye çapı/yük/süre sırasına göre bilgiler eklenir. Örneğin; 60BSD 5/500/30 şeklinde bir gösterimde, deneyin 5 mm çapında bir bilye üzerine 500 kg yükün 30 saniye süreyle tatbik edilmesi anlatılmaktadır. Ancak pratikte bu yükler çok büyük olduğu ve yüzeyde büyük ezilmeler yarattığı için daha küçük yük-bilye çapı kombinasyonları kullanılmaktadır. Bu deneyin en önemli dezavantajı ise yük-çap kombinasyonlarının malzemeye özel olarak seçilmesi gereğidir. Örneğin çelik bir malzemenin sertliği ölçülecekse, deneyde 2.5 mm çapında bir bilye kullanılırsa uygulanması gereken kuvvet 187.5 kg.f dir. Ancak bir Al alaşımının sertliği ölçülecekse bu durumda 31.25 kgf'lik bir kuvvet uygulanması yeterli olmaktadır.

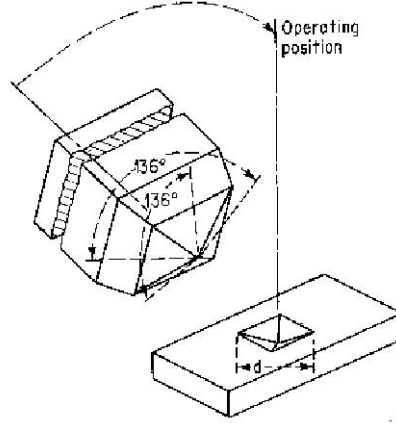
Batıcı uç olarak kullanılan bilyeler sertleştirilmiş çelikten imal edilmektedir. Deney sırasında bilyenin de ezilebileceğini düşünerek, çelik bilyelerle en çok 400 BSD değerine kadar sertlik ölçülmelidir. 550 BSD'ye kadar sert metal (sinter tungsten karbür) bilye kullanılarak deney yapmak mümkündür. Daha yüksek sertliğe sahip metaller üzerinde Brinell deneyi yapmak uygun değildir. Bu durumda bilye ezilerek çapı büyür ve deformasyon geometrisinde yanlış ölçümlerin yapılmasına neden olur.



### 3.2. Vickers sertlik ölçme yöntemi

Bu yöntemde, serliği ölçülecek malzeme parçası üzerine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında batırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegen uzunluklarının ölçülmesi sağlanır.

Meydana gelen iz tabanı, köşegeni  $d$  olan bir kare piramittir ve tepe açısı batıcı ucun tepe açısının ( $136^\circ$ ) aynısıdır. Vickers sertlik değeri kg olarak ifade edilen deney yükünün  $\text{mm}^2$  olarak ifade edilen iz alanına bölümüdür.



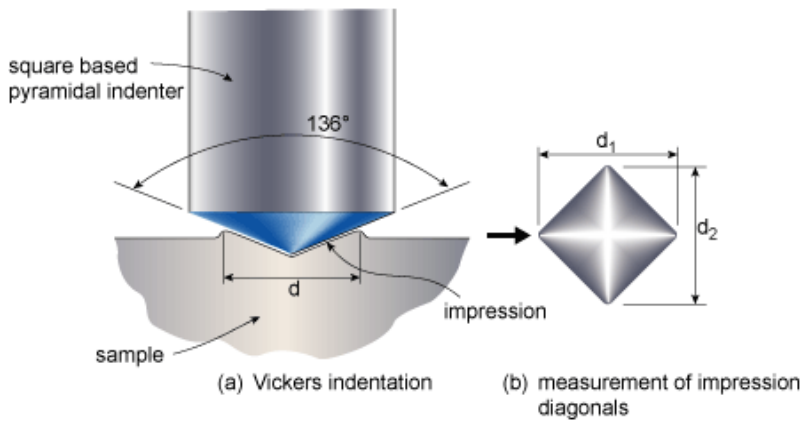
Şekil 3.2. Elmas-piramit Vickers ucu

$$VSD = \frac{2P \sin(\alpha / 2)}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2}$$

Burada: P=kgf cinsinden uygulanan yük

$\alpha$ =Tepe açısı

d= Taban köşegen uzunluğu  $[(d_1 + d_2)/2]$

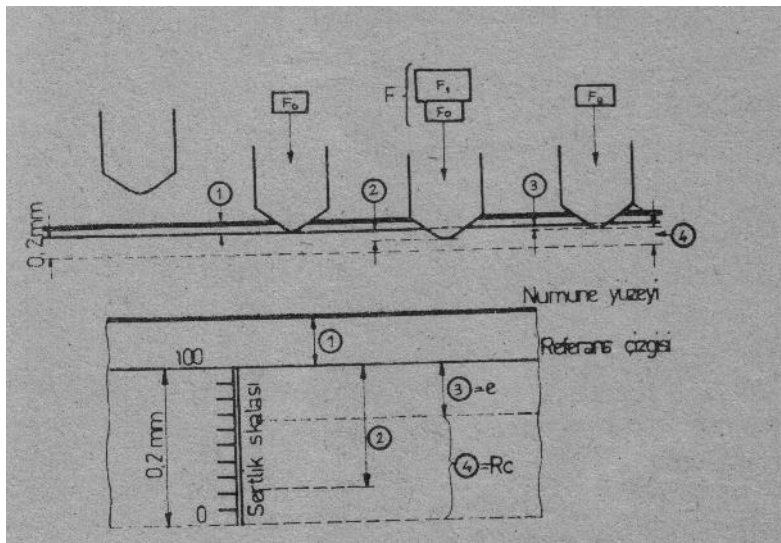


Şekil 3.3. Vickers sertlik deneyi

### 3.3. Rockwell sertlik deneyi

Rockwell sertlik değeri (RSD), malzeme üzerine batıcı bir uç yardımıyla önce sabit belirli küçük bir yükü bastırıldığında meydana gelen izin dip kısmı başlangıç notası alınarak, yük daha yüksek bir değere artırılıp daha sonra tekrar önceki yüke dönmek suretiyle, başlangıçtaki ize nazaran meydana gelen iz derinliğindeki net artışla ters orantılı bir sayıdır.

Bu deney için önce 10 kgf değerindeki küçük yük (ön yük) uygulanarak ilk yükleme yapılır. Bu suretle uç, malzeme üzerine oturur ve onu yerinde tutar. Ekran üzerinde kadran bu konumda sıfıra ayarlanır. Daha sonra büyük yük uygulanır. Bu büyük yük uygulanacak toplam yük olup, derinlik ölçümü sadece küçük yükten büyük yüke kadar artıştan ileri gelen derinlik artışına bağlıdır. Büyük yük uygulandıktan ve kaldırıldıktan sonra, standart işleme göre küçük yük hala uygulanır durumda iken, kadranın gösterdiği değer okunur. Batıcı uç olarak çelik bilye kullanıldığı zaman büyük yük 100 kg olarak alınır. Küresel konik elmas uç kullanıldığı zaman ise bu değer 150 kg olarak seçilir.



Şekil 3.4. Rockwell sertlik değerinin belirlenmesi. 1: Ön yüklemede ucun batma derinliği; 2: İlave yüklemede ucun batma derinliği; 3: İlave yük kaldırıldığında ucun batma derinliği; 4: Rockwell sertliği

Rockwell deneyi için kullanılan batıcı uçlar, belirli çaplardaki çelik bilyeler ile, özel konik elmas uçlardır. Rockwell sertlik değeri daima bir sembol harfle gösterilir ki, bu sembol harf batıcı ucun tipini, kullanılan yük miktarını ve kadran üzerinde okunacak bölümü belli eder.

Bu deneyde, sertliği ölçülecek malzemenin sertlik değerine göre uç seçilmelidir. Bu nedenle plastik malzemelerden metallere kadar çok geniş bir uygulama imkânını bize veren çok değişik ölçüm skalaları vardır. Bu skalalardan en çok kullanılanlar C ve B skalalarıdır. C skalasında genellikle sert metallerin sertlikleri ölçülür. Bu skalada uygulanan yük 150 kgf, batıcı uç ise 120° tepe açısına sahip elmas konidir. Batma derinliği sertlik değeri cinsinden kalibre edildiğinden doğrudan ölçüm yapma imkanı vardır. Daha yumuşak metallere B skalasında deney uygulanır. Bu skalada 100 kgf deney yükü 1/16 inç çapındaki sert bilye üzerinden malzemeye tatbik edilmektedir.

Sertlik ölçülecek yüzeyin çok temiz ve düzgün olması gerekmektedir. Ayrıca izlerin birbirlerine çok yakın basılmaması, kenarlara yakın ölçüm yapılmaması ve en az üç değerın ortalaması alınarak sertlik değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

### 3.4. Mikro-sertlik deneyi

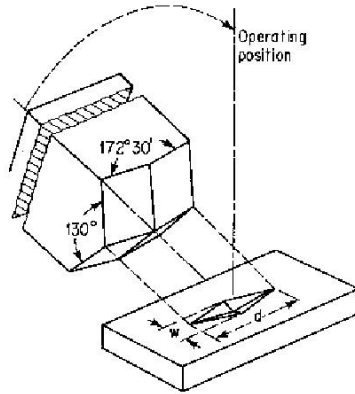
Bu deney, özellikle çok küçük numunelerin ve ince sacların sertliklerinin ölçülmesinde elverişlidir. Sertleştirilmiş ve kaplanmış yüzeylerin sertlikleri de bu yöntemle belirlenebilir. Ayrıca, malzeme iç yapısında bulunan çeşitli fazların ve bölgelerin sertlikleri de bu yöntemle ölçülür. Bu yöntemde batma derinliği genellikle 1 mikronu geçmez.

Mikro sertlik ölçüm cihazı hassas bir cihaz olup, kontrolü otomatik olarak yapılır. Makro sertlik ölçüm cihazlarından farklı, sistemin komple bir metal mikroskobu içermesidir.

Sertliği ölçülecek numune mikroskobun tablasına oturtulur ve okülerden net görüntü alınca kadar tabla hareket ettirilir. Daha sonra, sertlik ölçülecek bölge seçilir ve düğmeye basılarak otomatik olarak yükleme yapılır. Böylece numune üzerinde bir iz elde edilir. İzin boyutları genellikle el ile ayarlanan bir sistemle belirlenir.

Mikro-sertlik deneylerinde iki standart uç kullanılır. Bunlardan biri 136° tepe açısına sahip tabanı kare olan piramit uç (Vickers ucu) dur. Diğeri ise, Knoop ucu olarak bilinen 172°30' lık piramit uçtur. Vickers ucu numune üzerinde kare şeklinde iz bırakırken, Knoop ucu eş kenar dörtgen şeklinde bir iz bırakır.

Mikro-sertlik cihazlarında genellikle 1-10.000 g arası yük değerleri kullanılmaktadır. 1 g altında yük kullanan ultra-sertlik ölçüm cihazları da vardır. Öte yandan son yıllarda geliştirilen ve nano-sertlik ölçüm cihazları olarak bilinen cihazlarla  $\mu\text{N}$  seviyelerinde yükler kullanılarak nm ölçüsünde iz derinlikleri de elde edilebilmektedir.



Şekil 3.5. Knoop sertlik ucu ve elde edilen izin geometrisi

$$\text{Knoop sertliği (KS)} = 14.229F/d^2$$

Mikro-sertlik ölçümü yapılacak numune yüzeyinin metalografik olarak hazırlanması gerekir. Yüzeyin temiz, parlatılmış ve genellikle dağlanmış olması istenir.



Şekil 3.6. Tipik mikro-sertlik ölçüm cihazları

### 3.5. Endüstriyel sertlik ölçüm yöntemleri

Şimdiye kadar incelenen sertlik ölçme yöntemleri laboratuvar tipi olup, “statik sertlik ölçme yöntemleri” olarak adlandırılır. Bu yöntemlerde numunenin sertlik ölçümü için özel olarak hazırlanılması gerekir. Bazı hallerde ise parçadan numune çıkarmanın imkânı olmayabilir veya sertliğin çok büyük parçalar üzerinde ölçülmesi gerekir. Bu tipteki sertlik ölçümleri için endüstriyel tipte cihazlar geliştirmiştir. Endüstriyel sertlik ölçme yöntemleri genellikle “dinamik sertlik ölçme yöntemleri” diye anılır. Bu amaçla geliştirilen cihazları iki grupta toplamak mümkündür.

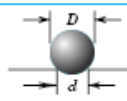

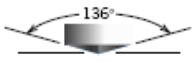

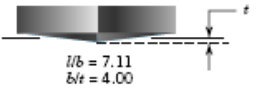
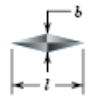
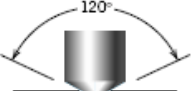


- a) Darbe etkisi ile sertlik ölçen cihazlar,
- b) Sıçrama miktarı ile sertlik ölçen cihazlar.

Birinci grupta, Brinell deneyine benzer bir yol izlenir. Ancak burada kuvvet darbe şeklinde uygulanır. Çelik bilye şeklindeki batıcı uç darbe etkisi ile yüzeyde bir iz bırakır. Bu gruptaki cihazların en tanınmış Poldi çekici sertlik ölçme yöntemidir. Bu yöntemde, sertliği bilinen bir master kullanılır. Elde edilen izin boyutları, aynı zamanda mastarda elde edilen iz ile karşılaştırılarak sertlik değeri belirlenir.

İkinci grupta ise numune üzerine, belirli bir yükseklikten düşürülen küçük bir ağırlık, numune üzerinde daha çok elastik bir deformasyon yaparak geriye sıçramaktadır. Sıçrama miktarı, düşen cismin numuneye çarptıktan sonraki elastik enerji miktarı ile orantılı olup, bu durum yöntemin prensibini oluşturmaktadır. Bu açıklamaya göre, yumuşak malzemelerde sıçrama daha az, sert malzemelerde daha fazla olacağı açıktır. Bu cihazda batıcı uç olarak

sertleştirilmiş çelik bilye veya küresel elmas uç kullanılır ve bunlar düşen ağırlığın alt yüzeyine tutturulur. Sıçrama miktarının kolay ölçülebilmesi için gösterge üzerinde hareket edebilen seygar ibreler kullanılır. Sıçrama esasına göre çalışan cihazların en çok tanınanı “Shore Skleroskobu” dur. Bu tip cihazların en önemli avantajı, iz bırakmadan sertlik ölçmesi ve çok geniş bir yüzeyde sertlik dağılımını ölçebilme kolaylığı sağlamasıdır.

Aşağıdaki şekilde uygulanan temel sertlik ölçme yöntemleri ve bu yöntemlerin genel uygulanış prensipleri verilmiştir.

Deney	Uç	İz Şekli		Yük	Sertlik numarası için denklem
		Yan görünüş	Üst görünüş		
Brinell	10-mm çelik veya tungsten küre			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers mikrosertlik	Elmas Piramit			$P$	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop mikrosertlik	Elmas Piramit			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell ve Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elmas koni</li> <li><math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in.</li> <li>Çapta çelik küreler</li> </ul>		 	<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg } Rockwell</li> <li>100 kg }</li> <li>150 kg }</li> <li>15 kg } Superficial Rockwell</li> <li>30 kg }</li> <li>45 kg }</li> </ul>	

Şekil 3. 7. Temel sertlik ölçme yöntemleri

### 3.6. Sertlik değerini etkileyen faktörler

Deney süresi, yani statik yükün uygulama süresi ölçülen sertlik değerini etkiler. Özellikle sürünme eğilimi gösteren yumuşak malzemelerde bu süre en az 30 saniye, diğer malzemelerde 10-15 saniye arasında seçilmelidir.

Deney sıcaklığının etkisi statik ve dinamik dayanım büyüklüklerine olan etki gibidir. Artan sıcaklık değeri sertlik değerinin düşmesine neden olur.

Parçanın büyüklük ve boyutunun sertlik değerine etkisi, ancak deney yükü nedeniyle parçanın eğilmesi, ize göre ölçüm yüzeyinin ve parça kalınlığının yeterli olmaması gibi durumlarda görülür. Deney yüzeyinin çok küçük olması veya ucun kenara çok yakın basılması malzemenin batmaya karşı direncinin küçük olmasına yol açar. Ayrıca iki iz arasındaki mesafe de az olursa izler birbirini etkiler. Numune kalınlığının batma derinliğinin en az 10 katı, hatta Brinell deneylerinde 17 katı olmalıdır.

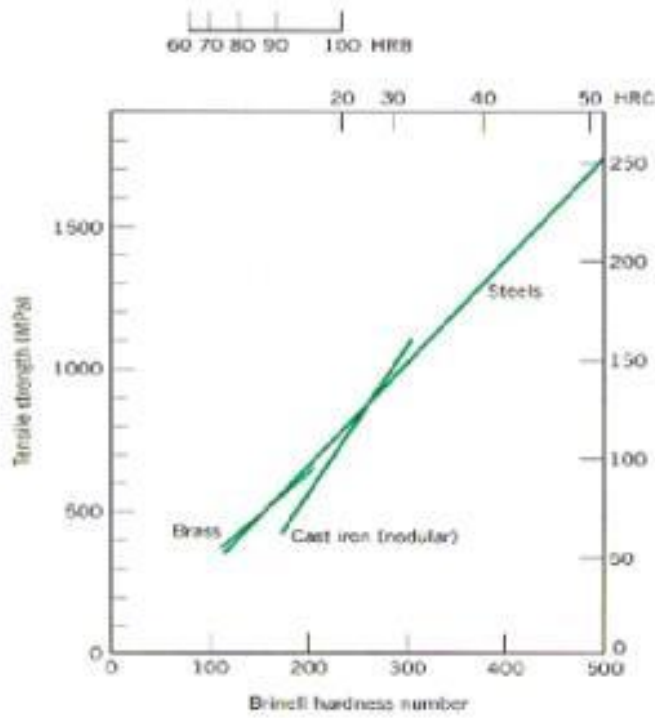
### 4.7. Sertlik-çekme dayanımı ilişkisi

Metalik malzemeler için sertlik değerleri ile çekme dayanımları arasında deneysel olarak farklı kantitatif ilişkiler bulunmasın rağmen, bütün metalik malzemelerde sertlik arttıkça çekme dayanımının da arattığı görülmüştür. Aşağıda, çelik malzemelerde geçerli olan bağıntılar verilmiştir.

Çekme dayanımı (kg/mm<sup>2</sup>) = 0.35 BSD (kg/mm<sup>2</sup>)  
Çekme dayanımı (kg/mm<sup>2</sup>) = 3.5 RSD-C (kg/mm<sup>2</sup>)

Aşağıda verilen şekilde; çelik, dökme demir ve pirinç malzemelerin Brinell sertlik değerleri ile çekme dayanımları arasındaki ilişkiler verilmiştir.

## Hardness & Tensile Strength



$$\sigma_{TS} = 500 \times HB$$

Şekil 3.8. Pirinç, çelik ve dökme demir malzemelerinin sertlik değerleri ile çekme mukavemeti arasındaki ilişki

#### 4. SÜRÜNME DENEYİ

Mühendislik uygulamalarında, oda sıcaklığında çalışan cihaz ve aletler için kullanılacak malzeme cinsinin seçimi genellikle çekme deneyi sonuçları göz önünde bulundurularak yapılır. Örneğin mukavemet hesaplarında malzemenin akma dayanımı belirli bir emniyet katsayısına bölünerek hesaplarda kullanılır. Öte yandan, yüksek sıcaklıklarda çalışan alet ve cihazlar için malzeme seçiminde malzemenin çalışma sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan makine ve makine parçalarına örnek olarak:

- a) Buhar türbinleri, kazanlar ve reaktör parçaları
- b) Jet motoru parçaları
- c) İçten yanmalı motorlar
- d) termokupullar
- e) Roket motorları ve balistik füze gövde parçaları gösterilebilir.

Metallerin yüksek sıcaklıklardaki özellikleri incelendiğinde, sıcaklık seviyesinin yanı sıra metallerin o sıcaklıkta tutulma süresinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, malzemenin yüksek sıcaklıklardaki dayanım, o malzemenin uğradığı birim şekil değiştirme hızı ve o sıcaklıktaki tutuma süresiyle yakından ilgilidir. Metalik malzemelerin çoğu bu şartlar altında *viskoelastik* malzeme özelliği gösterirler. Bu özellik ise metallerin bir çekme gerilmesi altında Sürünme (Creep) mekanizmasıyla şekil değiştirmesine neden olur. Bu olay benzeş sıcaklığın çok kaba olarak 0.5 veya üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Malzemelerin yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışları sürünme deneyi adı verilen bir deneyle belirlenir.

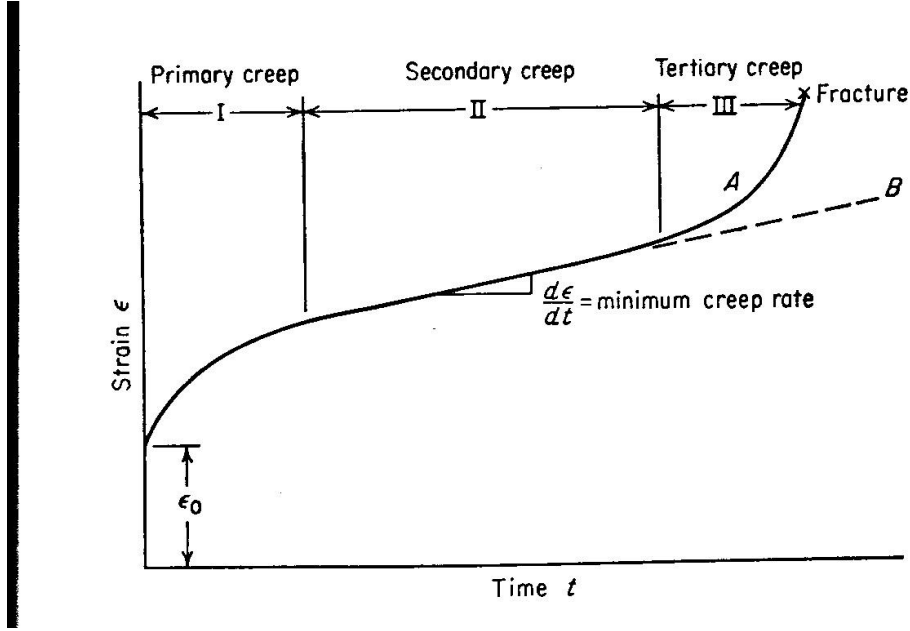
Sabit bir sıcaklık ve sabit bir gerilme (veya yük) altında, malzemede zamanla meydana gelen kalıcı deformasyona sürünme (creep) denir. Sürünme zamanla gelişen bir plastik deformasyon şeklidir. Sürünme deneyi için “sürekli uzama deneyi” terimi de kullanılmaktadır. Bu olay yüksek sıcaklıklarda daha hızlı meydana geldiği için, sürünme bir yüksek sıcaklık deformasyon mekanizması olarak da bilinir. Metalik malzemelerde atomların sıcaklıkla artan hareketliliği ile kristal kusurlarının sayı ve davranışına bağlı olan sürünmede, yayınma ağırlıklı ısı atıve yer değiştirmeler etkin rol oynar.

Yüksek sıcaklıklarda içyapıda ve malzeme özelliklerinde meydana gelen bazı değişimler aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- a) Boş nokta yoğunluğu artar ve yayınma kolaylaşır,
- b) Dislokasyonların tırmanması ve çapraz kayması gibi yeni kayma sistemleri aktif hale gelir,
- c) Mikroyapısal kararlılık azalır. Soğuk şekil değiştirmiş malzeme yeniden kristalleşir, çökme sertleşmesine uğramış malzeme aşırı yaşlanır,
- d) Parça yüzeyi sıcaklığın da etkisiyle ortamla daha kolay reaksiyona girer ve korozyon ve tufal sorunu ortaya çıkar.

Sürünme deneyinde, standart olarak hazırlanmış numune, sabit bir T sıcaklığındaki bir fırın içerisinde çekme veya basma gerilmesi altında deformasyona uğrattılır. Deformasyon miktarı zamanın bir fonksiyonu olarak belirlenir. Deney prensip itibarıyla basit görünmesine karşın önemli laboratuvar koşullarının sağlanmasını gerekli kıldığından oldukça zahmetli ve maliyetlidir. Örneğin, yük ve sıcaklığın çok uzun süreler boyunca sabit kalabilmesinin sağlanabilmesi gerekmektedir. Ayrıca deneyler birkaç ay veya senelerce sürebilir. Deney süresini kısaltmak için deneyler hızlandırılmış koşullarda (yüksek sıcaklık ve yüksek gerilme değerlerinde) yapılır ve elde edilen değerlerden elverişli diyagramlar çizilir. Bu

diyagramlardan okunabileceği gibi, daha uzun sürelerdeki özellikler uygun uzatmalar (ekstrapolasyon) yapılarak elde edilebilir. Sürünme deneyleri genellikle ASTM E139 standardına uygun olarak gerçekleştirilmektedir. Aşağıdaki şekilde, sürünme deneyi sonucunda elde edilen tipik bir sürünme (uzama-zaman) eğrisi ile bu eğride yer alan bölgeler verilmiştir.



Şekil 4.1. Tipik bir sürünme eğrisi

Şekilde görüldüğü gibi, düşük sıcaklıkta ( $T < 0.3T_m$ ) malzemeye elastik sınır altında kalacak şekilde bir F çekme yükü uygulanacak olursa elastik uzama hemen meydana gelir ve yük artırılmadığı sürece uzama sabit kalır. Aynı F çekme yükü nispeten daha yüksek bir sıcaklıkta ( $T > 0.3T_m$ ) uygulandığında,  $\epsilon_0$  uzaması meydana gelir.  $\epsilon_0$ 'nin büyük olması, sıcaklığın artması ile akma sınırının düşmesine bağlıdır.  $\epsilon_0$  uzama miktarı tümüyle elastik olabileceği gibi, elastik-plastik de olabilir. Sıcaklığın ve uygulanan yükün etkisi ile zamana bağlı olarak uzama devamlı artış gösterir ve sürünme eğrisi olarak bilinen şekildeki eğri oluşur. Söz konusu eğrinin herhangi bir noktasındaki eğimi, sürünme hızını ( $\epsilon_s = d\epsilon/dt$ ) vermektedir.

Sürünme eğrisi incelendiğinde, üç değişik safha içerdiği görülür. Aşağıda bu bölgeler detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

**I. Sürünme Bölgesi:** Bu bölgede sürünme hızı deney süresiyle birlikte azalır. Geçici (transient) sürünme safhası da denilen bu bölgede malzemenin sürünmeye karşı olan direnci artmaktadır. Bu bölgede malzeme yükün etkisi altındadır ve deformasyonla dislokasyonların yoğunluğu artar ve buna bağlı olarak deformasyon sertleşmesi meydana gelir. Fakat öte yandan, malzeme yüksek sıcaklıkta olduğundan, iç gerilmeleri de bir taraftan giderilmekte ve malzeme kendine gelme imkanını kazanmaktadır. Bu nedenle malzeme birinci bölgede, deformasyon nedeniyle deformasyon sertleşmesine ve aynı zamanda yüksek sıcaklık nedeniyle toparlanma (poliganizasyon ve çapraz kayma) etkisine maruz kalır. Ancak, bu bölgede dislokasyon yoğunluğunun artmasına ve birbirlerini etkilemelerine bağlı olarak



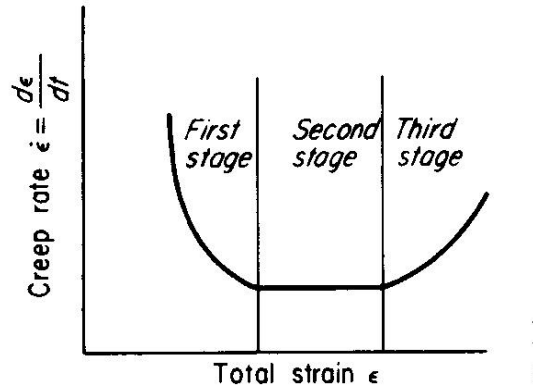
deformasyon sertleşmesi daha etkili olup sürünme hızı gittikçe düşer, yani malzemenin deformasyona karşı direnci artar. Bu aşamada yayınmanın etkisi önemsizdir.

**II. Sürünme Bölgesi (kararlı sürünme bölgesi):** Bu safha sürünme hızının sabit kaldığı devredir. Bunun nedeni, bu bölgede deformasyon sertleşmesi ile kendine gelme (toparlanma) hızlarının birbirine eşit olmasıdır. Bu nedenle bu bölgeye, “kararlı sürünme (steady state creep)” bölgesi veya “vizkoz sürünme (viscous creep)” denilmektedir. Bu devrede, deformasyonun sağladığı dayanım artışı (deformasyon sertleşmesi), yapıdaki toparlanma ve gevşeme mekanizmalarının devreye girmesiyle dengelenerek sürünme hızının sabit kalması sağlanmaktadır. Sürünme hızının kazandığı bu kararlı değer aynı zamanda deney sırasında ulaşılabilecek en düşük değer olduğundan bu bölgedeki sürünme hızı “en düşük sürünme hızı (minimum creep rate)” olarak isimlendirilir. Bu değer, sürünmenin esas alındığı tasarımlarda çok yararlı olan bir özelliktir. Teknik uygulamalarda kararlı sürünme bölgesi büyük önem taşır. Çünkü öngörülen işletme koşulları ve süresine göre I.bölgede kalınması ekonomik açıdan, III. bölgeye girilmesi de kırılmaya karşı güvenlik azalacağı için istenmez. Bu bölgede temel mekanizma olan dislokasyonların tırmanması yardımıyla engeller ve hareketsiz dizlokasyonlar aşularak şekil değiştirmenin devamı (sürünme) sağlanır.

Bir malzemede belirli bir sıcaklıkta, genellikle %0.00001 veya %0.001 olarak kabul edilen sabit bir kararlı sürünme hızına ( $\dot{\epsilon} = 10^{-7} - 10^{-5}$  1/saat) sebep olan gerilme “**sürünme mukavemeti**” olarak isimlendirilir. Alternatif olarak sürünme mukavemeti, belirli bir sıcaklıkta %1 birim şekil değişimine neden olan gerilme olarak da tarif edilebilir.

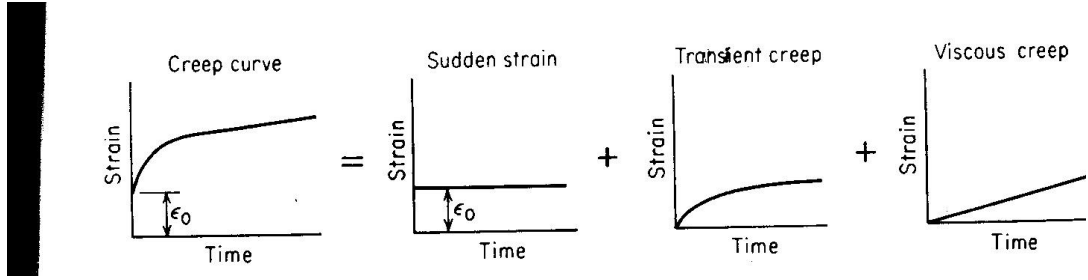
**III. Sürünme Bölgesi:** Bu bölge numunenin boyun vermesiyle başlar ve kopuncaya kadar devam eder. Bu devrede giderek artan sürünme hızı kısa zamanda kırılmaya neden olur. Boş yer oluşumu ve tane sınırlarındaki şekil değişiminin kuvvetlenmesi (tane sınırı çatlakları) hız artışının en önemli nedenidir. Bu safhada, parçanın tane sınırlarında çatlaklar ve boşluklar oluşmaya başlar ve bu da etkin yük taşıma kesitini azaltır. Parçanın bir yerinde büzülme başlar ve yük taşıyıcı gerçek kesit alanı azalır, sonra yumuşama olayı pekleşmeden daha yüksek bir hızla ilerlemeye başlar. Ayrıca bu safhada, yapıdaki çökeltilerin aşırı büyümesi, yeniden kristalleşme veya fazlar arası yayınma karakteristiğinin değişmesi gibi olayların varlığı da görülmektedir. Bu bölgenin sonunda, kesit öyle bir noktaya gelir ki, artık uygulanan yük taşınmaz ve numune kırılır.

Aşağıdaki şekilde, deformasyon hızının deformasyon miktarı ile değişimi verilmiştir. Deformasyon hızındaki bu değişim yukarıda açıklanan yapısal değişimler ile ilgilidir.



Şekil 4.2. Sürünme hızının toplam deformasyon miktarı ile değişimi.

Aşağıdaki şekilde karakteristik sürünme eğrisinin üçüncül sürünme bölgesi dışında kalan bölümü ve bunu oluşturan bileşenleri verilmiştir. Burada birincil bileşen  $\epsilon_0$  ile gösterilen ani birim şekil değişimidir ve bu malzemenin deney için ilk yüklendiği anda meydana gelmektedir. İkinci bileşen ise geçici sürünme sırasında oluşan şekil değişimi miktarını vermektedir. Son bileşen ise viskoz sürünme ile oluşan sabit hızdaki sürünme birim şekil değişimini şematik olarak vermektedir. Her üç safhada gerçekleşen birim şekil değişimlerinin süperpozisyonu neticesinde karakteristik sürünme eğrisi elde edilmektedir. Bu eğri matematiksel olarak Garafalo tarafından aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.



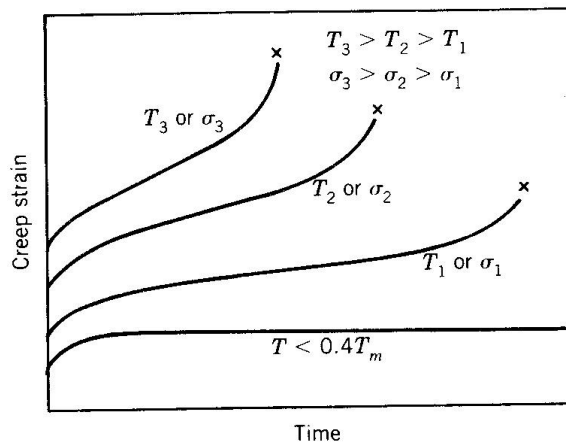
Şekil 4.3. Sürünme eğrisinin bölgelerine denk gelen uzama-zaman eğrileri

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_t(1 - e^{-r.t}) + \epsilon_s t$$

Burada,  $\epsilon_t$ : geçici sürünmedeki birim şekil değiştirme miktarı  
 $r$ : bir malzeme sabiti

$\epsilon_s$ : kararlı bölgedeki sürünme hızı (en küçük sürünme hızı)

Sürünme eğrisi, uygulanan deney sıcaklığı ve gerilmeden önemli ölçüde etkilenmektedir. Aşağıda, gerilme ve sıcaklığın sürünme eğrisi üzerindeki etkileri verilmiştir.

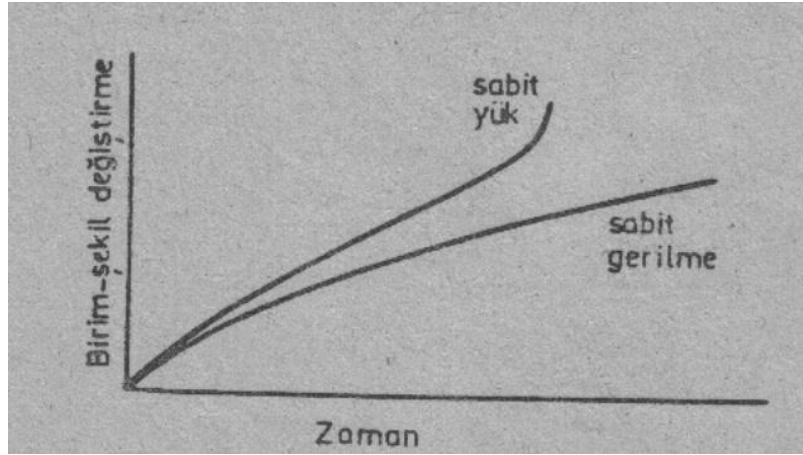


Şekil 4.4. Gerilme ve sıcaklığın sürünme eğrisine etkisi

Bu eğrilerden görüldüğü gibi, birincil sürünme daha çok düşük gerilme seviyelerinde etkin rol oynamaktadır. Gerilme artırıldıkça, ikincil ve hatta üçüncül safhalar kendilerini hissettirmeye başlamaktadır. Gerilme artışı aynı zamanda, en düşük sürünme hızının da artmasına neden olmaktadır. Aynı durum, sıcaklık artışında da gözlenmektedir.

Sürünme olayında, malzemenin şekil değiştirmesi ve şekil değişiminin neden olduğu deformasyon sertleşmesi birbirine ters yönde etki ederler. Düşük sıcaklıklarda deformasyon sertleşmesi hakim olduğundan, sürekli bir sürünme olayı ancak uygulanan gerilmenin deformasyon sertleşmesini yendiği durumlarda görülür. Deformasyon sertleşmesinin hakim olduğu durumlarda ikinci bölgeye ait eğri yatay bir çizgi olur. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin deformasyon hızı, deformasyon sertleşme hızına göre daha büyük olduğundan sürünme daha düşük gerilmelerde olur.

Sürünme deneyleri sabit yük veya sabit gerilme uygulanarak yapılmaktadır. Bu iki tür deney arasında önemli farklar mevcuttur. Yükün sabit olduğu sürünme deneylerinde numunenin kesit alanının sürekli olarak daralması nedeniyle, gerçek gerilme ve sürünme hızı artan birim şekil değişimi ile artmaktadır. Bu nedenle, sabit yük ve sabit gerilme altında yapılan sürünme deneylerinden elde edilen eğriler birbirinden oldukça farklıdır. Söz konusu iki sürünme değerleri arasındaki diğer önemli fark, sürünme eğrisindeki III. Bölgenin, sabit gerilme altında yapılan deneylerde oldukça gecikmesidir.



Şekil 4.5. Sabit yük ve sabit gerilme altında yapılan sürünme deneylerinden elde edilen sürünme eğrileri

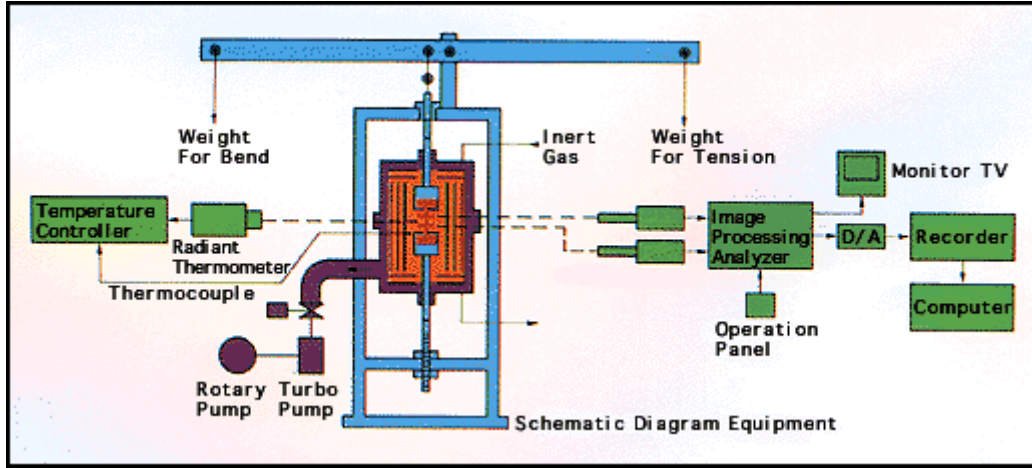
Sabit gerilme altında yapılan sürünme deneylerinde, numuneye uygulanan yük, numunenin kesit alanındaki azalmaya bağlı olarak düşer. Sabit gerilmeli sürünme deneyleri bilimsel çalışmalar açısından oldukça önemlidir. Mühendislik uygulamalarında ise sabit yük altında yapılan sürünme deneyleri çok daha fazla önem kazanmaktadır.

#### 4.1. Sürünme deney makinesi

Sürünme deneylerinin gerçekleştirildiği makinelerde,

- Bir sıcaklık ortamı (elektrik dirençli fırın) ve sıcaklığın kontrolünü sağlayan kontrol sistemi,
- Deney sırasında meydana gelen uzamayı sürekli algılayacak sistem (ekstansometre ve bilgisayar)
- Kuvvet uygulama sistemi

Aşağıdaki şekilde tipik bir sürünme deney makinesinin şematik resmi verilmiştir.



Şekil 4.6. Sürünme deney sistemi

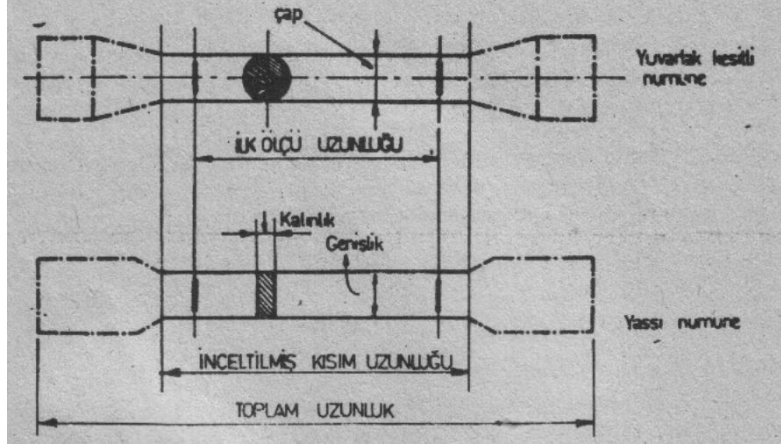
Fırın içerisinde oksitlenmenin meydana gelmesi istenmiyorsa, sisteme vakum veya soy gaz verme sistemi de ilave edilir. Fırın iki ucundan kapatılarak havanın dolaşımı engellenir ve bu sayede hem oksitlenme önlenir hem de fırının sabit sıcaklıkta kalması sağlanır.

Sıcaklık ölçümleri genellikle termokupl ile yapılır. Ortam sıcaklığı, termokupl ile ölçülen sıcaklığın bir kontrol ünitesi ile işlenmesi sayesinde sıcaklık sabit tutulur.

Kuvvet mümkün olduğu kadar numune ekseninde uygulanır ve yük değişimleri  $\pm 1$  mertebelerinden fazla olmamalıdır.

#### 4.3. Deney Numuneleri

Numuneler, iç yapı ve özellikler açısından kullanılacak malzemeyi tam yansıtmalıdır. Çekme deneyi için kullanılan numuneler sürünme deneyi için de uygundur. Diğer boyutlar aynı kalmak şartıyla, ölçü kesiti ile baş kısmın birleşme yerlerinde kavis yerine uygun ölçülerde koniklik bir kısımda bulunabilir. Baş kısmın kesit alanı diğer kısmın kesit alanından %50 daha fazla olmalıdır. Böylece özellikle çentik duyarlılığı yüksek olan malzemelerin baş kısımdan kopmaları önlenir. Daire kesitli numunelerin çeneler tarafından daha iyi kavranması için numunenin baş kısımlarında vida açılması veya basamaklar yapılması yararlı olabilir.



Şekil 4.7. Sürünme deneylerinde kullanılan daire ve dikdörtgen kesitli numuneler.

#### 4.4. Sürünme Mekanizmaları

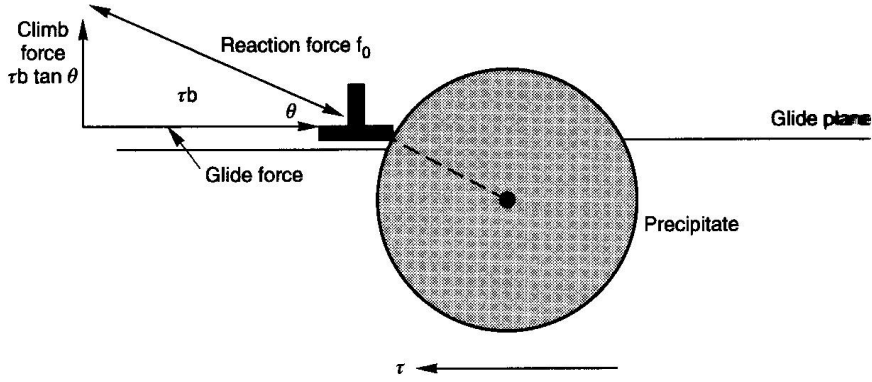
Sürünmeye olayı sırasında etkin rol oynayan mekanizmalar şu şekilde sıralanabilir.

- Kayma
- Dislokasyon sürünmesi (dislocation creep)-üssel ilişkili sürünme
- Yayınma sürünmesi (diffusion creep)
- Tane sınırı kayması (grain boundary sliding)
- Alt tane oluşumu (sub-grain formation)

**a) Kayma:** Sıcaklık seviyesi arttıkça malzemelerde yeni kayma sistemleri meydana gelerek plastik şekil değişiminin daha kolay gerçekleşmesi olasılığı artmaktadır. Örneğin, 250°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda alüminyumdaki mevcut {111} kayma sistemindeki düzlemlere ek olarak {100} ve {211} düzlem sistemlerinde de kayma mümkün hale gelmektedir. Kritik kayma gerilmesi değerleri de artan sıcaklıkla azalmaktadır.

**b) Dislokasyon Sürünmesi:** Dislokasyon sürünmesi mekanizması, malzemedeki kenar dislokasyonların engellerle karşılaştıklarında, ısıl aktivasyonun katkısıyla tırmanma hareketini gerçekleştirmesi şeklinde açıklanmaktadır. Böylece tırmanan dislokasyonlar hareketlerini kısıtlayan engellerden kurtularak ilerleme fırsatını elde ederler ve plastik şekil değişimine neden olurlar. Aynı kısıtlayıcı etkenden vida dislokasyonları da çarpraz kayma ile kurtulmaya çalışır. Ancak bu durumda ısıl aktivasyonun büyük bir katkısı yoktur.

Bu olayı daha iyi açıklayabilmek için, kayma düzlemleri üzerinde bulunan çözelti partikülleri nedeniyle, kaymanın engellendiği durumu düşünelim. Kayma kuvveti (birim uzunluk başına  $\tau b$ ), çökeltideki  $f_0$  reaksiyon kuvveti ile dengelenir. Eğer dislokasyon çökeltinin merkez noktasına çarpmış ise, dislokasyona kayma düzleminde dışarıya doğru itmeye çalışan  $\tau b \tan \theta$  değerinde bir kuvvet bileşeni oluşur. Atom düzlemlerinin kayması ile dislokasyon yukarı doğru hareket edemez, fakat yarım düzlemin altındaki atomların yayınması söz konusu olursa dislokasyon yukarı doğru hareket edebilir. Yayınma için gerekli itici güç, konsantrasyon farkından kaynaklanmakta olup, yayınmada Fick kanunu geçerlidir. Bu işlem **tırmanma** olarak adlandırılır. Tırmanma sonucu çökelti ile etkileşimi azalan dislokasyonlar, serbest hale gelirler ve böylece yeniden kaymaya neden olurlar. Benzer durumlar, dislokasyon hareketlerinin çökelti atomları ve diğer dislokasyonlarla engellenmesi halinde de kendini gösterir. Serbest hale geçen dislokasyonlar komşu engele rastlayıncaya kadar kayar ve benzer olaylar zinciri tekrarlanır.

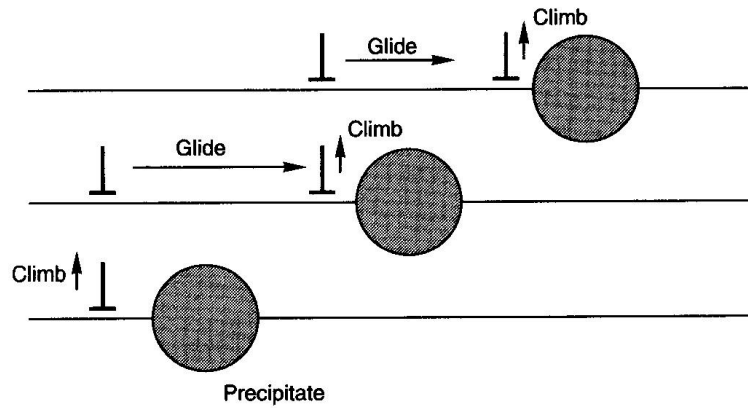


Şekil 4.8. Bir dislokasyona etki eden tırmanma kuvveti

Aşağıdaki şekilde dislokasyon düzlemi altındaki atomların difüzyonun etkisiyle oradan ayrılması ve bu sayede dislokasyonların tırmanarak engelleri aşması gösterilmiştir. Ayrıca, kenar dislokasyonunun tırmanması ile sürünmenin meydana gelişi şematik olarak verilmiştir.

Ashby, ş. 19.2, s: 188

Şekil 4.9. Difüzyonun dislokasyonların tırmanmasına neden oluşu



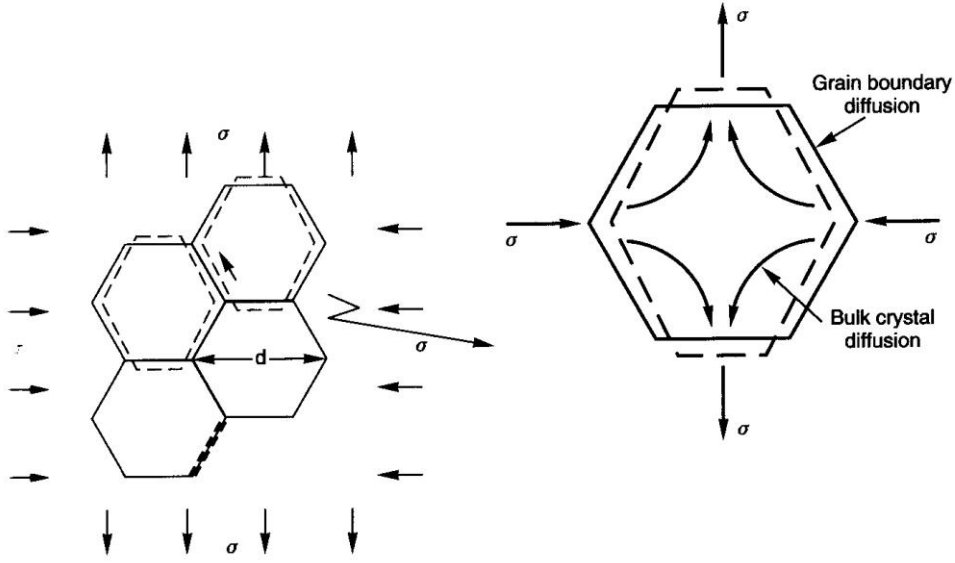
Şekil 4.10. Sürünmenin dislokasyon tırmanması ile meydana gelişi

Sürünme olayının gerilmeye bağlılığı tırmanma kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Gerilme arttıkça tırmanma kuvveti de artmakta ve birim zamanda daha fazla dislokasyon serbest hale gelerek kayar ve böylece sürünme hızı da artar.

### c) Yayınma Sürünmesi

Yüksek sıcaklıklarda tanelerin kenarlarında bulunan atomların çekme gerilmesinin olaya yön verip hız kazandırması ile bu gerilme yönünde hareket etmeleri ve tanelerin üst ve altındaki boşlukları doldurması ile gerçekleşir. Böylece tane boyutu çekme gerilmesi yönünde büyüyerek bu yönde malzemenin plastik olarak şekil değiştirmesine neden olur. Taneler

arasındaki boşlukların oluşması için bu işleme, tane sınırlarının kayması katkıda bulunmaktadır.



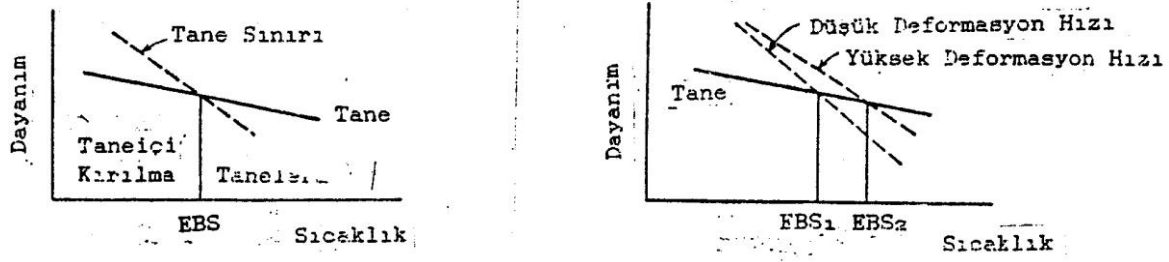
Şekil 4.11. Yayınma etkisi ile meydana gelen sürünme

**c) Tane Sınırı Kayması:** Tane sınırlarında kayma, tane sınırı yönünde oluşan kayma gerilmeleri neticesinde meydana gelmekte olup, taneler bu sırada birbirlerine göre hareket etme durumundadır. Sıcaklığın yüksek derecelere çıkması ve birim şekil değişim hızının düşük olması durumunda görülür.

**d) Alt tane oluşumu:** Sürünme sırasında tane sınırlarına yakın bölgelerde kenar dislokasyonlarının üst üste yığılması neticesinde eğilebilir ve küçük açılı tane sınırları oluşabilir. Böylece boyutu kısıtlı da olsa kristal yapıda plastik şekil değişimi meydana gelir.

#### 4. 5. Sürünme hasarı ve sürünme kırılması

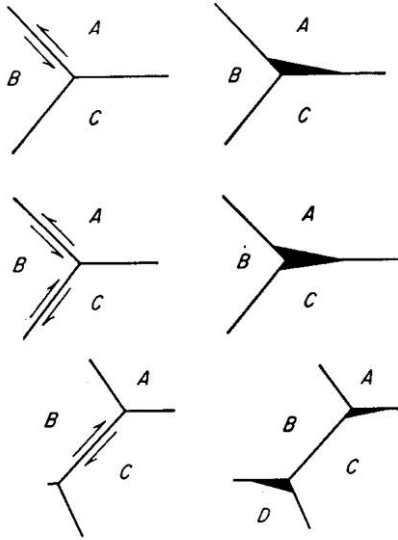
Sürünme olayında hasar, iç boşlukların oluşumu ile çoğalır. Hasar öncelikle sürünme eğrisinin III. Bölgesinde başlar ve artan bir hızla ilerler. Boşluklar büyüdükçe numunenin kesiti de daralır ve sabit yük altında gerilme artar. Metallerin düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara doğru gidildikçe tane içi kırılma karakteri taneler arası kırılma karakterine dönüşmektedir. Tane içi kırılma, kristalin kayma düzlemlerinin tane sınırlarına göre daha zayıf olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Aynı şekilde taneler arası kırılma da tane sınırlarının kayma düzlemlerine göre daha zayıf olma durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu durum aşağıda şematik olarak verilen “eş bağıllık sıcaklığı (equi-cohesive temperature) kavramıyla açıklanmaya çalışılmaktadır.



Şekil 4.12. Kırılma tipinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesi

İlk şekilde görüldüğü gibi eş bağlilik sıcaklığı (EBS) tane sınırı ile tanelerin kayma düzlemlerinin dayanımlarının eşit olduğu sıcaklık olarak tanımlanmaktadır. Bu noktadan önce, dayanım açısından taneler daha kritik bir durumda bulunmakta, bu sıcaklıktan daha yüksekte ise tane sınırları daha kritik duruma gelmektedir. İkinci şekil ise, birim şekil değişim hızının kırılma karakteri üzerindeki etkisini belirtmektedir. Yüksek deformasyon hızları EBS sıcaklığının artmasına neden olarak tane içi kırılma karakterinin daha yüksek sıcaklıklarda da devam etmesini sağlamaktadır.

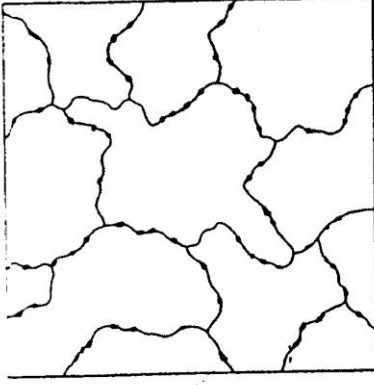
Yüksek sıcaklıklarda, tane sınırlarının kayması ile tanelerin birbirlerine göre yer değiştirmeleri nedeniyle tane köşelerinde oluşan boşlukların büyüüp birbirleriyle birleşmeleri sonucu, kopma tane sınırları boyunca olmaktadır. Bu olayın meydana gelişini aşağıda verilmiştir.



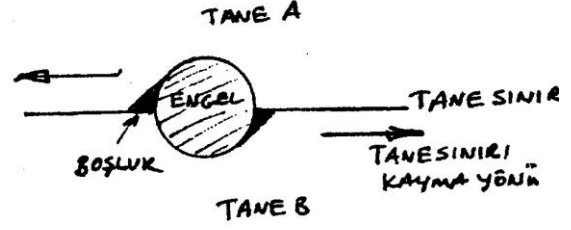
Şekil 4.13. Tane köşelerinde boşluk ve çatlakların oluşması

Oval boşluklar ise gene tane sınırlarında ve çoğunlukla tane sınırlarında bulunan engellerin katkısıyla gerçekleşmektedir. Ancak bu durumda da tane sınırı kayma mekanizmalarının çalışması gerekmektedir.



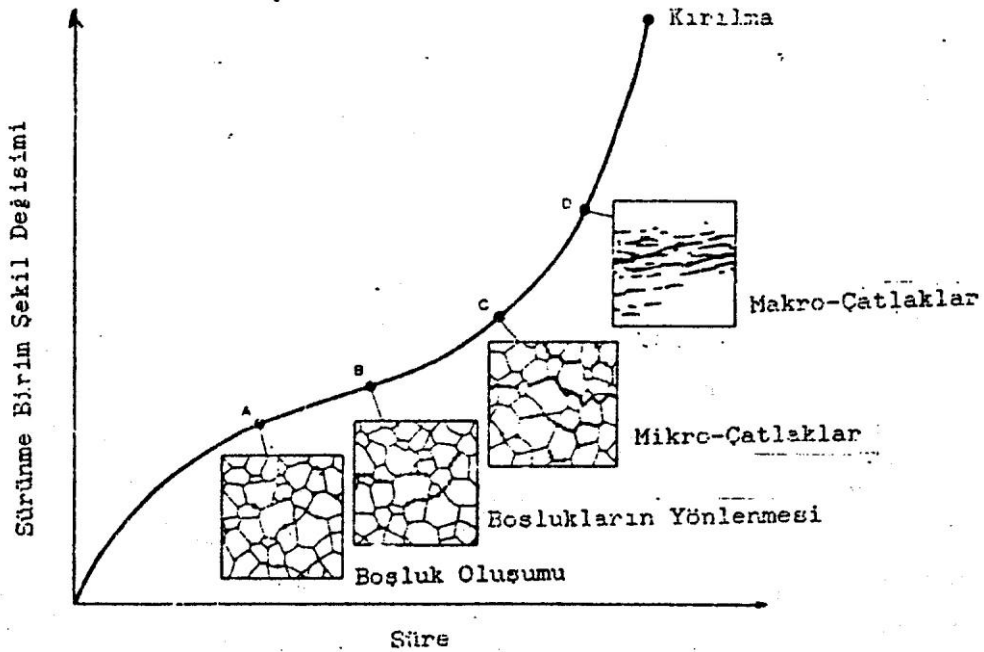


Tane Sınırlarındaki Oval Boşluklar



Şekil 4.14. Tane sınırlarındaki oval boşluklar ve bunların meydana gelişi

Sürünme safhaları boyunca çatlak ve boşlukların oluşumu aşağıdaki grafikte şematik olarak özetlenmiştir. Buradan görüldüğü gibi, A noktası olan kararlı sürünme bölgesinin başlamasıyla beraber boşluk ve çatlak oluşumu yerel ve birbirinden bağımsız olarak başlamaktadır. Kararlı sürünme bölgelerinin ortalarında, B noktasında, boşluk ve çatlaklar uygulanan gerilmeye dik gelecek şekilde yönlenmeye başlamakta sayıları da oldukça artmaktadır. C noktası olan III. Sürünme bölgesinin başlangıcında artık oluşumları tamamlanmış bulunan boşluklar birbirleriyle birleşerek hem çoğalırlar, hem de kırılmaya neden olacak makro çatlakları meydana getirirler.



Şekil 4.15. Sürünme eğrisi boyunca çatlak ve boşlukların oluşumu

#### 4.6. Sürünme deneyinden elde edilen veriler

**a) Sürünme Dayanımı (Creep strengt):** Sürünme aralığındaki belirli bir sıcaklıkta, bir saatte %0.00001 veya %0.001'lik sürünme birim şekil değişimine neden olan gerilme değerine sürünme dayanımı denir.

**c) Sürünme kırılması dayanımı (Creep repture strengt)**

Sürünme aralığındaki belirli bir sıcaklıkta, genellikle 1000, 10.000 veya 100.000 saatte sürünme kırılması hasarını oluşturan gerilme değeridir.

**c) İkincil veya kararlı (en küçük) sürünme hızı (Minimum creep rate)**

Sürünme aralığında belirli bir sıcaklıkta, sabit bir gerilmenin kararlı sürünme bölgesinde oluşturduğu sürünme hızıdır. Genellikle bu değer uzun süren deneyler sonucunda elde edilir. Kararlı sürünme hızı sürünme eğrisinin doğrusal kısmının eğimi olup,  $\dot{\epsilon}_{ks} = \frac{d\epsilon}{dt}$  bağıntısı ile verilir. Ancak metalik malzemelerin çoğunda ikincil sürünme hızı aşağıdaki universal bağıntıyla hesaplanır.

$$\dot{\epsilon}_{ks} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_s}{RT}\right)$$

Burada;  $\dot{\epsilon}_{ks}$  : kararlı sürünme hızı

A : malzeme sabiti

$\sigma$  : uygulanan gerilme

n : gerilme üssü

$Q_s$  : sürünme için aktivasyon enerjisi

R : gaz sabiti

T : mutlak sıcaklık

Ayrıca en düşük sürünme hızının belirlenmesi ile ilgili universal olarak kabul edilmiş bazı yöntemlerden de yararlanılmaktadır. Bunlar;

**i)** Sabit sıcaklıkta, sabit bir gerilmenin oluşturduğu sürünme kırılması için gereken süre  $t_r$  ile aynı şartların sağladığı en küçük sürünme hızı  $\dot{\epsilon}_{ks}$  arasında aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

$$\log t_r + B \cdot \log \dot{\epsilon}_{ks} = K$$

Burada, K ve B birer malzeme sabiti olup önceki çalışmalarda bulunmuş verilerdir. Sürünme kırılması deneylerini yapmak sürünme deneylerini yapmaktan çok daha kolay olduğu için sürünme hızı tayininde önemli elverişlilik sağlamaktadır. Aynı şekilde sürünme hızı bilinen bir malzemenin sürünme ömrünü de tayin edebilme olanağı da vardır.

**ii)** Larson ve Miller tarafından önerilen bir yöntemde ise sürünme hasarı süresi  $t_s$ , sıcaklık T ve uygulana gerilme  $\sigma$  arasında ampirik bir bağıntıdan yararlanılmaktadır. Bu bağıntıda Larson-Miller parametresi, P(r)

$$T \cdot (\log t_r + C) = P(r)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Burada;

T: Sıcaklık (K)

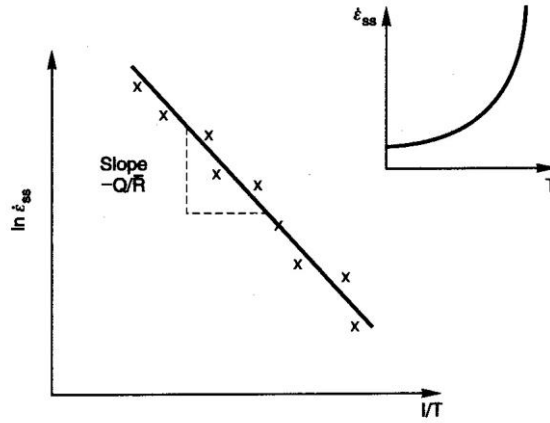
Tr: sürünme hasarı süresi (saat)

C: Larson-Miller sabiti (Metaller için 15 ile 25 arasında değişen, çoğunlukla 20 olarak kabul edilen bir malzeme sabitidir.

Bu yöntemde gerilmeye olan ilişki Larson-Miller Mastır Grafikleri yardımıyla sağlanmaktadır.

Böylece, gerilme, sıcaklık ve hasar süresi değerlerinden ikisinin bilinmesi durumunda üçüncüsünün bulunması mümkün olmaktadır.

Aşağıdaki şekilde kararlı sürünme hızının sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi belli bir sıcaklıktan sonra sürünme üssel olarak artmaktadır. Sıcaklıktaki 20°C'lik bir artış sürünme hızını iki katına çıkarmaktadır.



Şekil 4.16. Sürünme hızının sıcaklıkla değişimi [Ashby]

### 5.7. Sürünmeye Dayanıklı Malzemelerin Dizayını

Yüksek sıcaklıklarda kullanılacak alaşımların geliştirilmesi esas itibariyle zahmetli ve uzun deneysel çalışmaları gerektiren bir olaydır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, yüksek sıcaklıklarda dayanımın artırılmasını sağlayacak aşağıdaki önlemler alınabilir.

- Malzeme olarak yüksek ergime noktasına ve düşük yayınma özelliğine sahip alaşımlar seçilmelidir.
- Tane sınırı kayması mekanizmasının sürünme olayındaki etkisinin azaltılması için toplam tane sınırı miktarının en düşük olduğu büyük taneli malzemeler seçilmeli veya elde edilmelidir. Teorik olarak, sürünme açısından en elverişli malzeme tek taneli olanıdır.
- Taneleri, uygulanan gerilme yönünde uzatılmış yapı oluşturularak gerilmeye dik ve 45°'lik açılarda uzanan tane sınırları sayısının en aza indirilmesi sağlanmalı, böylece tane sınırı kayması mekanizmasının etkin bir şekilde çalışmasına mani olunmalıdır.

- d) Tane sınırlarında ve tane içerisinde kararlı çökeltiler (ikinci faz parçacıkları) oluşturarak tane sınırı kayması ve dislokasyon sürünmesi mekanizmalarının etkin bir şekilde çalışmasına mani olunmalıdır.
- e) Alaşımların yüksek sıcaklıktaki ortamın aşırı oksitleyici etkisinden bir ölçüde kurtulabilmesi için yüzeyine koruyucu kaplama uygulanması yapılmalıdır.
- f) Alaşıma yüksek sıcaklıkta özelliğinin kolay kaybetmeyen,  $Al_2O_3$  (alümina),  $SiO_2$  (silika)  $ThO_2$  (torya) gibi oksit tozları katılmak suretiyle dispersiyon sertleşmesi sağlanabilir.
- g) Alaşım vakum ortamında dökülerek bileşimi ve katışkı miktarı daha kolay kontrol edilebilir.

Sürünme ihtimali olan ortamlarda oldukça yaygın olarak kullanılan gerek kullanıldıkları sıcaklık ve gerekse içerdikleri alaşım elementleri itibariyle aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler.

- a) Ferritik çelikler (500 °C'ye kadar)
- b) Ostenitik çelikler (650 °C'ye kadar)
- c) Nikel esaslı süper alaşımlar (1000 °C'ye kadar)
- d) Kobalt esaslı süper alaşımlar (1100 °C'ye kadar)
- e) Seramik malzemeler

Table 4.1. Sıcaklık aralıkları ve bu aralıklarda kullanılan tipik malzemeler [Ashby-195]

<i>Temperature range</i>	<i>Principal materials*</i>	<i>Applications</i>
Cryogenic: -273 to -20°C	Copper alloys Austenitic (stainless) steels Aluminium alloys	Superconduction Rocket casings, pipework, etc. Liquid O <sub>2</sub> or N <sub>2</sub> equipment
-20 to 150°C	Most polymers (max temp: 60 to 150°C) Magnesium alloys (up to 150°C) Aluminium alloys (up to 150°C) Monels and steels	Civil construction Household appliances Automotive Aerospace
150 to 400°C	PEEK, PEK, PI, PPD, PTFE and PES (up to 250°C) Fibre-reinforced polymers Copper alloys (up to 400°C) Nickel, monels and nickel-silvers	Food processing Automotive (engine)
400 to 575°C	Low alloy ferritic steels Titanium alloys (up to 450°C) Inconels and nimonics	Heat exchangers Steam turbines Gas turbine compressors
575 to 650°C	Iron-based super-alloys Ferritic stainless steels Austenitic stainless steels Inconels and nimonics	Steam turbines Superheaters Heat exchangers
650 to 1000°C	Austenitic stainless steels Nichromes, nimonics Nickel based super-alloys Cobalt based super-alloys	Gas turbines Chemical and petrochemical reactors Furnace components Nuclear construction
Above 1000°C	Refractory metals: Mo, W, Ta Alloys of Nb, Mo, W, Ta Ceramics: Oxides $Al_2O_3$ , MgO etc. Nitrides, Carbides: $Si_3N_4$ , SiC	Special furnaces Experimental turbines

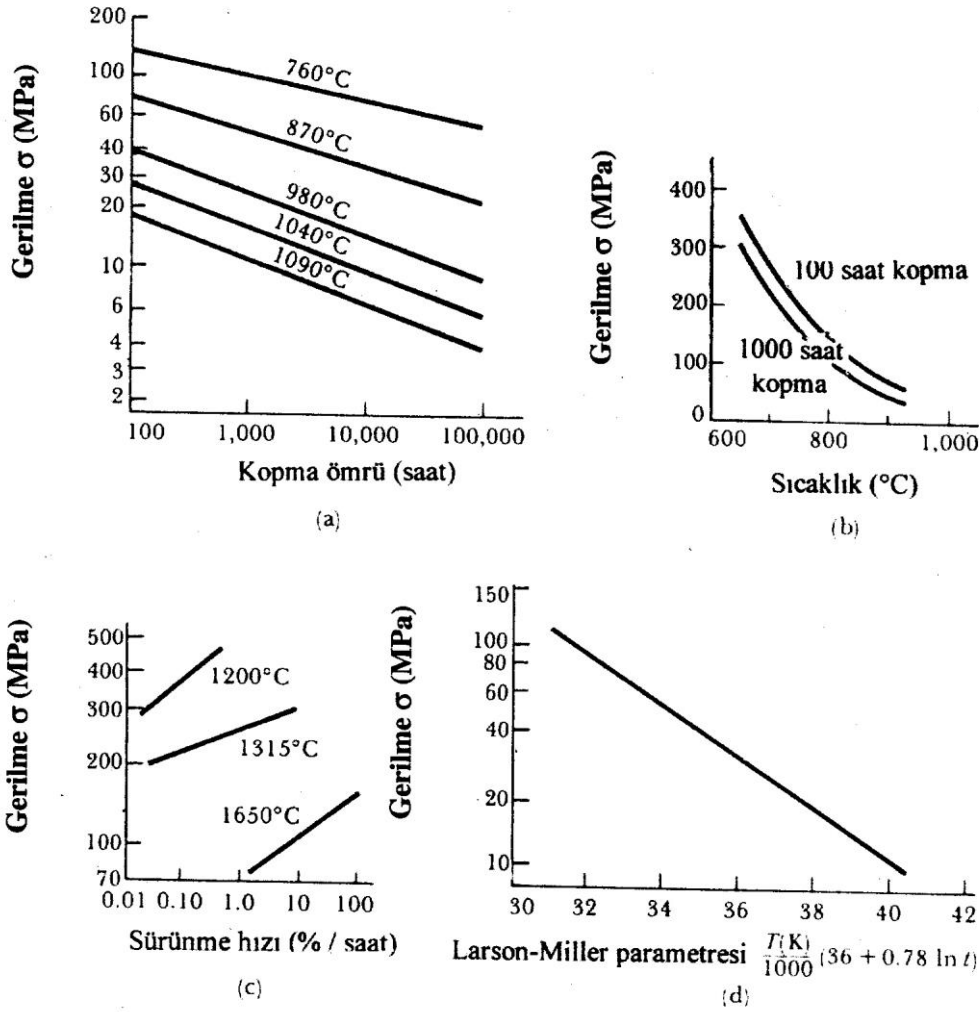
Tablo 4.2. Yüksek sıcaklıkta kullanılan bazı alaşımlar ve kimyasal bileşimleri

Alloy	C	Cr	Ni	Mo	Co	W	Cb	Ti	Al	Fe	Other
Ferritic steels											
1.25 Cr-Mo	0.10	1.25	—	0.50						Bal.	
5 Cr-Mo	0.20	5.00	—	0.50						Bal.	
Greek Ascoloy	0.12	13.0	2.0			3.0				Bal.	
Austenitic steels											
316	0.08	17.0	12.0	2.50						Bal.	
16-25-6	0.10	16.0	25.0	6.00						Bal.	
A-286	0.05	15.0	26.0	1.25				1.95	0.2	Bal.	
Nickel-based alloys											
Astroloy	0.06	15.0	56.5	5.25	15.0			3.5	4.4		
Inconel	0.04	15.5	76.0								7.0
Inconel 718	0.04	19.0	Bal.	3.0			5.0	0.80	0.60	18.0	
René 41	0.10	19.0	Bal.	10.0	11.0			3.2	1.6	2.0	
Mar-M-200	0.15	9.0	Bal.	—	10.0	12.5	1.0	2.0	5.0		
TRW 1900	0.11	10.3	Bal.	—	10.0	9.0	1.5	1.0	6.3		
Udimet 700	0.15	15.0	Bal.	5.2	18.5			3.5	4.25	1.0	
In-100	0.15	10.0	Bal.	3.0	15.0			4.7	5.5		1.0 V
TD Nickel	—	—	Bal.								2.0 ThO <sub>2</sub>
Cobalt-based alloys											
Vitallium (HS-21)	0.25	27.0	3.0	5.0	Bal.					1.0	
S-816	0.40	20.0	20.0	4.0	Bal.	4.0		4.0		3.0	

Bugün uygulamada kullanılan sürünmeye dayanıklı yüksek sıcaklık alaşımlarının çoğu parçacık dağılımı ile sertleştirilmiştir. Çökelmiş parçacıkların ince üniform dağılımının sürünmeyi sınırlamaktaki etkileri, parçacıkların kaymaya ve tane sınırı kaymasına karşı oluşturdukları ek engellerle kısmen ilgilidir. Bu tür dağılmış parçacıklar toparlanma olayını kısıtlamada da yararlı olurlar.

### 5.8. Sürünme verilerinin kullanımı

Elde edilen sürünme verilerini sunmanın dört yolu aşağıdaki şekillerde verilmiştir. İlk şekilde verilen kopma gerilme eğrisi özellikle sıcaklık ve zaman kombine edilerek bir parçanın beklenen ömrünün tahmin edilmesini sağlar. Benzer bilgi 100 saat ve 1000 saatte kopmayı gösteren eğriden elde edilir. Şekil 4.15(c)'de verilen eğri ise, uygulanan gerilme ve sıcaklığın kombinasyonu için elde edilebilecek sürünme hızını gösterir. Şekil 4.14(d)'de gösterilen Larson-Miller parametresi, gerilme-sıcaklık-kopma zamanı ilişkilerinin değerlendirilmesi için kullanılır.



Şekil 4.17. Bir dizi sürünme deneylerinden elde edilen sonuçlar. (a) Bir demir-krom-nikel alaşımı için gerilme-kopma eğrisi, (b) Isı-dirençli bir nikel alaşımı için 100 saat veya 1000 saat kopma eğrileri, (c) bir titanyum alaşımı için minimum sürünme hızı eğrisi, (d) sünek (sfero) dökme demir için Larson-Miller parametresi.

#### 4.7. Süperplastik Davranış

Yüksek sıcaklıklarda üstün dayanım özelliklerinin korunması açısından ince taneli yapıya sahip malzemelerin kullanımından kaçınmak gerekmektedir. Bu sayede, özellikle tane sınırı kayması mekanizmasının etkin olması neticesinde aşırı plastik şekil değişimleri görülmeyecektir. Bu nedenle, sürünme dayanımının artırılması için iri taneli veya mümkünse tek taneli yapıların kullanılması gündeme gelmektedir.

Bunun aksine sürünme dayanımı düşürülerek, plastik şekil değişimi olayında sürünme mekanizmalarını da aktif kılmak suretiyle daha kolay ve büyük oranda plastik şekil değişimleri elde edilebilir. Diğer bir deyişle çok küçük taneli yapılar sürünme şartlarında plastik şekil değiştirmeye oldukça yatkındırlar. Benzeş sıcaklığın 0.5 değerinin üzerindeki sıcaklıklarda oldukça düşük şekil değişimi hızlarının uygulanmasıyla çok ince taneli metal ve alaşımlar süperplastik özellik göstererek %1000 mertebelerindeki plastik şekil değişimlerine herhangi bir kopma veya ayrılma olmadan ulaşabilmektedirler. Bu özellik pratikte çok zor şekillendirilebilen metal ve alaşımları için çok büyük yararlar sağlamaktadır. Bu

malzemelerden yapılan parçalar bir veya birkaç şekillendirici kalıp içerisinde çok karmaşık şekillere sokulabilirler.

Yüksek sıcaklık bölgesinde birim şekil değişimi hızı ile malzemenin akma gerilmesi arasında üssel bir ilişki vardır.

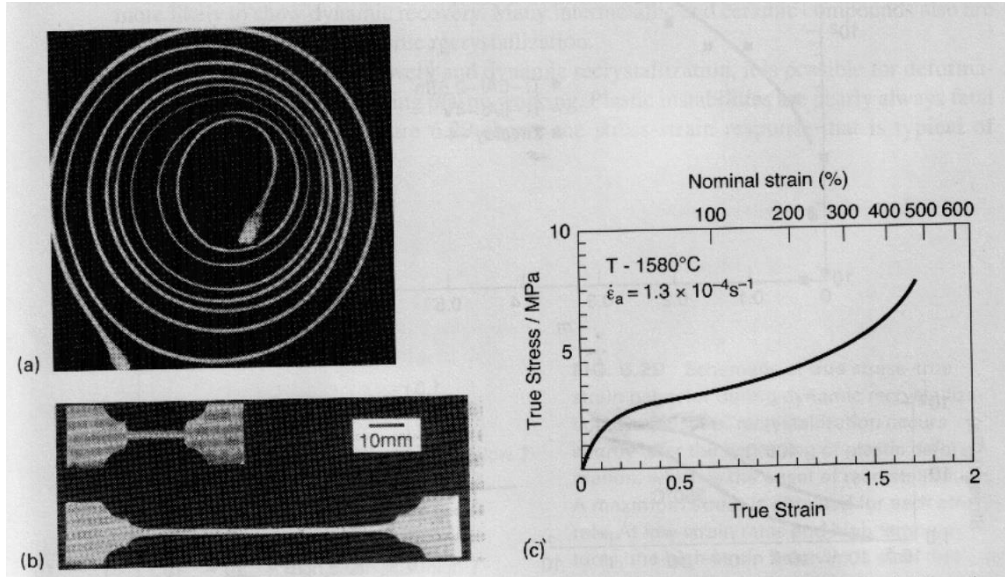
$$\sigma_g = C \cdot \dot{\epsilon}^m$$

Burada m, deformasyon hızı duyarlılık faktörü veya üssü olarak adlandırılmaktadır.

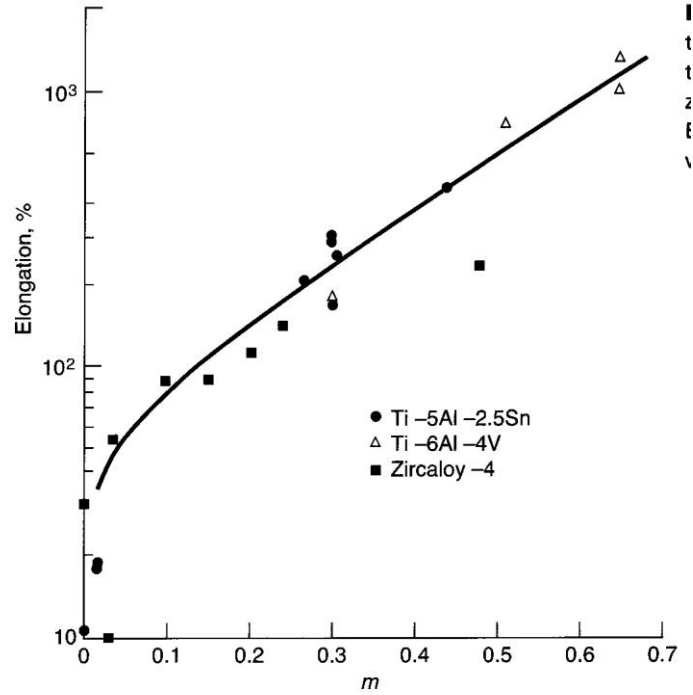
Bir malzemenin süperplastik özellik gösterebilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir.

- Malzemenin 10 $\mu$ m'nin altında tane büyüklüğüne sahip olması gerekir.
- Malzeme genellikle mutlak ergime noktasına yakın (0.5-0.65T<sub>e</sub>) sıcaklıklarda deforme edilmelidir.
- Çok düşük birim şekil değişimi hızlarında çalışılması veya şekillendirme yapılması gerekmektedir. Ayrıca, alaşımın şekil değiştirmesi için gerekli gerilme şekil değiştirme hızına karşı çok duyarlı olmalıdır. Boyun verme başladıysa, boyun veren bölge yüksek hızla uzar, bu bölgede oluşan yüksek deformasyon hızı bölgenin pekleşme hızını artırır ve boyun vermeyi durdurur ve üniform şekil değiştirme devam eder.
- Malzemenin m değerinin 0.3'ten büyük olması gerekir.
- Gerilme uygulandığında, tane sınırları birbiri üzerinde kolay kayabilmeli ve dönebilmelidir. Bunun olabilmesi için uygun sıcaklık ve çok ince tane boyutu gereklidir.

Örnek olarak bir kurşun-kalay alaşımı için üniforma uzama değeri %4800 değerine ulaşabilir. Süperplastik malzemelere örnek olarak sıcak cam ve polimerler ile Ti-%6Al-%4V ve çok ince taneli ötektoid Zn-%22Al alaşımı verilebilir.



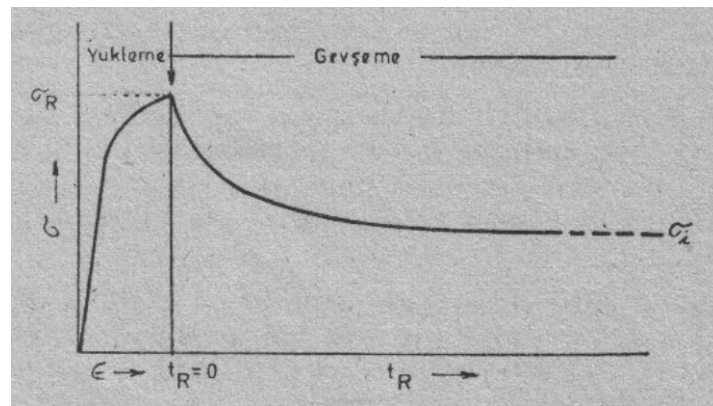
Şekil 4.18. (a) Bi-Sn ötektik alaşımının süperplastik uzaması, (b) –(c) 0.1  $\mu$ m tane boyutuna sahip süperplastik silikon nitrit bileşiğinin çekilmiş numuneleri ve gerilme-uzama diyagramı [Bowman]



Şekil 4.19. Deformasyon hızı duyarlılık üssünün ( $m$ ) uzamaya etkisi [Bowman]

#### 4.8. Gerilme Gevşemesi

Yüksek sıcaklıklarda,  $\sigma_0$  gerilmesine kadar zorlanan bir malzeme  $\epsilon_0$  kadar birim şekil değişimine uğrar. Eğer bu birim şekil değişimi sabit tutulacak olursa, malzemeye etkiyen gerilmenin zamanla azaldığı görülür. Başlangıçta, uygulanan gerilmenin etkisi ile özellikle dislokasyon sürünmesi mekanizması çalışarak dislokasyon yığılmasının derecesini düşürür. Bu ise yapıda gevşemeye yol açar ve gerilme de bununla birlikte giderek düşer. Gerilme gevşemesi, uygulanan gerilmenin seviyesine ve sıcaklık derecesine bağlıdır. Ancak çok uzun süreler sonra asimtotik gitme eğilimi vardır. Özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan bağlama elemanlarının tasarımında gerilme gevşemesi olayı dikkate alınmalı ve bu durum deneylerle test edilmelidir. Sıcak ortamlarda çalışan türbinlerdeki civatalar zamanla gevşeyeceğinden belirli aralıklarla sıkılmaları gerekmektedir.



Şekil 4.20. Gerilme gevşemesi eğrisi

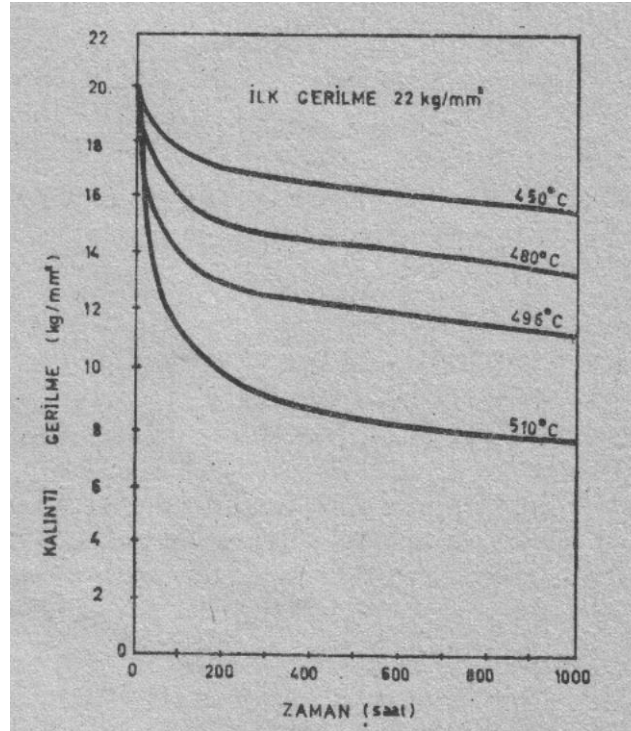


Bu deneyler, sabit bir sıcaklık ve sabit bir gerilme durumunda, malzemede gerilmenin zamana göre değişimini tespit eden bir deneydir. Bu deney de sürünme deneyi gibi uzun süreli bir deneydir ve aşağıda özetlenen çeşitli özelliklerin belirlenmesinde kullanılabilir.

- Gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler (çentik, inklüzyon, çatlak, delik, yarık gibi) gerilmelerin zamanla gevşemesi durumu tespit edilebilir.
- Malzemelerin çeşitli işlem kademelerinde (döküm, plastik şekil verme, kaynak gibi) oluşan kalıcı iç gerilmelerin ölçülmesinde ve bu gerilmelerin giderilmesinde uygulanacak ısıl işlemlerin iç gerilmelere etkisi incelenebilir.
- Gerilme gevşemesi ile malzemenin mekanik özellikleri arasında bir ilişki olup, bu ilişkiden faydalanarak, aktivasyon enerjisi, deformasyon hızı duyarlılık üssü, dislokasyon hareketi için gerekli etkin gerilme gibi bazı parametreler de bu deneyle belirlenebilir.
- Metalik malzemelerden yapılmış bir konstrüksiyonda, bağlantı yerlerinde kullanılan malzemelerde (cıvata, pim vb. ) sağlanan sıkıştırma kuvvetinin zamana bağlı olarak azalması bu deneyler belirlenebilir.

Bu deney de sürünme deneylerinde olduğu gibi genellikle çekme deney cihazlarında yapılır. Önce numuneye belirli bir yük uygulanır ve belirli bir gerilme durumu elde edilir ve ardından uygulanan kuvvet sabit kalacak şekilde cihaz durdurulur. Bu arada numunenin boyu sabit tutulur ve numunenin gevşemesine bağlı olarak yükün veya gerilmenin zamana göre değişimi tespit edilir.

Gevşeyen gerilme, gerilme gevşemesi deneyi sırasında ölçülen kalıntı gerilmelerin, gerilme gevşemesi deneyinin başlatıldığı ilk gerilme değerinden çıkarılması ile elde edilir. Gerilme gevşemesi deneyi çeşitli sıcaklıklarda yapılabilir. Deney sırasında sıcaklık sabit tutulmalıdır. Sıcaklığın çok az değişimi bile gerilme gevşemesi eğrisini çok etkiler. Aşağıda verilen şekilde çeşitli sıcaklıklarda yapılan gerilme gevşemesi eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.21. Alaşımli bir çeliğin farklı sıcaklıklardaki gerilme gevşemesi eğrileri.

## 5. DARBE DENEYİ

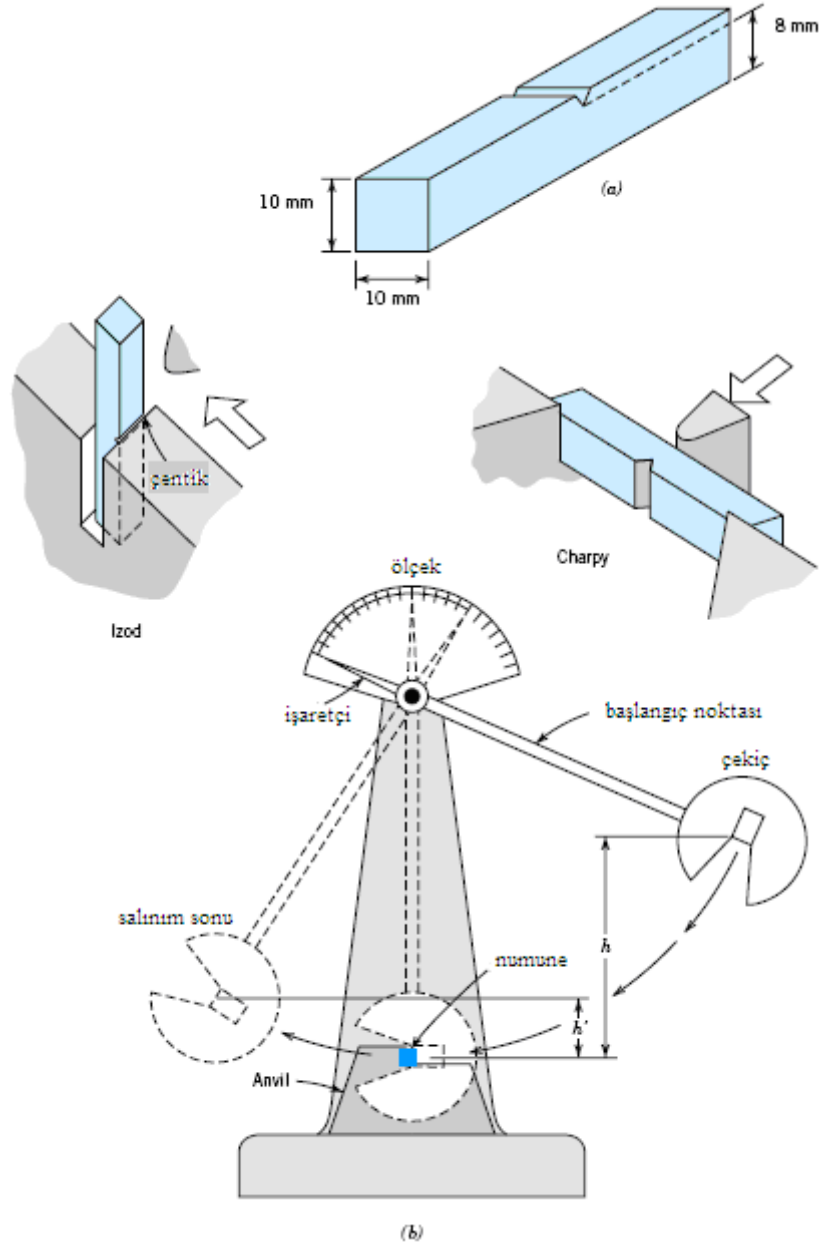
Çentik darbe deneyinde amaç, malzemenin bünyesinde muhtemelen bulunacak bir gerilim konsantrasyonunun (gerilim birikiminin) darbe esnasında çentik tabanında suni olarak teşkil ettirilip, malzemenin bu durumda dinamik zorlamalara karşı göstereceği direnci tayin etmektir. Gri dökme demir numunelerinde, malzemenin bünyesindeki grafit levhacıklar çentik gibi etki yapacaklarından, ayrıca çentik açmağa lüzum yoktur. Darbe deneyi, metallerin özellikle gevrek kırılmaya müsait şartlardaki mekanik özellikleri hakkında sağlam bir fikir elde etmek amacıyla uygulanır.

Çentikli bir numune zorlandığı zaman, çentiğin tabanına dik bir gerilim meydana gelir. Kırılmanın başlaması, bu gerilimin etkisi ile olur. Numunenin kırılabilmesi için bu dik (normal) gerilimin, kristalleri bir arada tutan veya kristallerin kaymasına karşı koyan kohezif dayanımdan fazla olması gerekir. Numune, plastik biçim değiştirmeğe fırsat bulamadan bu hal meydana gelirse, buna gevrek kırılma denir. Burada kırılan yüzey, düz bir ayrılma yüzeyidir. Deney esnasında, numune kırılmadan önce çoğu zaman plastik biçim değiştirme meydana gelir. Uygulanan kuvvet etkisi ile normal (dik) gerilime ilaveten, bununla yaklaşık olarak 45° farklı bir kayma gerilimi etki etmeğe başlar. Kayma gerilimi, kayma dayanımını (kritik kayma gerilimi) aştığı an, elastik (esnek) özellik sona erer ve plastik biçim değiştirme başlar. Bu durumda önce plastik biçim değiştirme, daha sonra kırılma meydana gelir. Buna sünek kırılma hali denir ve kırılma yüzeyi girintili çıkıntılı bir görünüştendir.

Çentikli darbe deneyleri genellikle, iki türde yapılmaktadır;

- **Charpy Darbe Deneyi**
- **Izod Darbe Deneyi**

Charpy darbe deneyi, yatay ve basit kiriş halindeki iki mesnede yaslanan numunenin çentik tabanına, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile kırılması için gerekli enerjiyi tayin işlemidir. Izod darbe deneyi, dikey ve konsol kiriş halindeki bir kavrama çenesine tesvit edilen numunenin yüzeyine, kavrama çenesinden belirli yükseklikte, bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisi ile numunenin kırılması için sarf edilen enerjiyi tayin işlemidir.



Şekil 5.1. Charpy ve Izod deneylerinde kullanılan deney numunelerinin çenelere yerleştirilmesi ve hesaplarda kullanılan ilgili parametreler.

Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarı tayin edilir. Bulunan değer, malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) veya çentik darbe tokluğu olarak tanımlanır. Vurma değeri çentik dibindeki anma kesitine oranlanırsa çentik darbe tokluğu elde edilir. Bu deneylerde, Şekil 5.1’de şematik olarak gösterilen sarkaç tipi cihazlardan faydalanılır. Ağırlığı  $G$  olan sarkaç,  $h$  yüksekliğine çıkarıldığında potansiyel enerjisi  $(G \times h)$  mertebesindedir. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında, düşey bir düzlem içinde hareket ederek numuneyi kırar ve aksi istikamette  $h_1$  yüksekliğine kadar çıkar. Böylece, numunenin kırılmasından sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji  $(G \times h_1)$  mertebesinde demektir.

Sarkaçın, numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı, o numunenin kırılması için gereken

enerjiyi başka bir deyimle, darbe direncini verir. Bu enerji aşağıdaki formülle de gösterilebilir:

$$\text{Kırılma enerjisi} = G (h - h_1) = G.L. (\cos\beta - \cos\alpha)$$

Burada;

G = Sarkacın ağırlığı (kg)

L = Sarkacın ağırlık merkezinin, sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

h = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

h<sub>1</sub> = Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m),

$\alpha$  = Düşme açısı (derece),

$\beta$  = Yükseliş açısı (derece),

Darbe direnci (kg-m) veya (kg-m/cm<sup>2</sup>) cinsinden ifade edilmektedir.

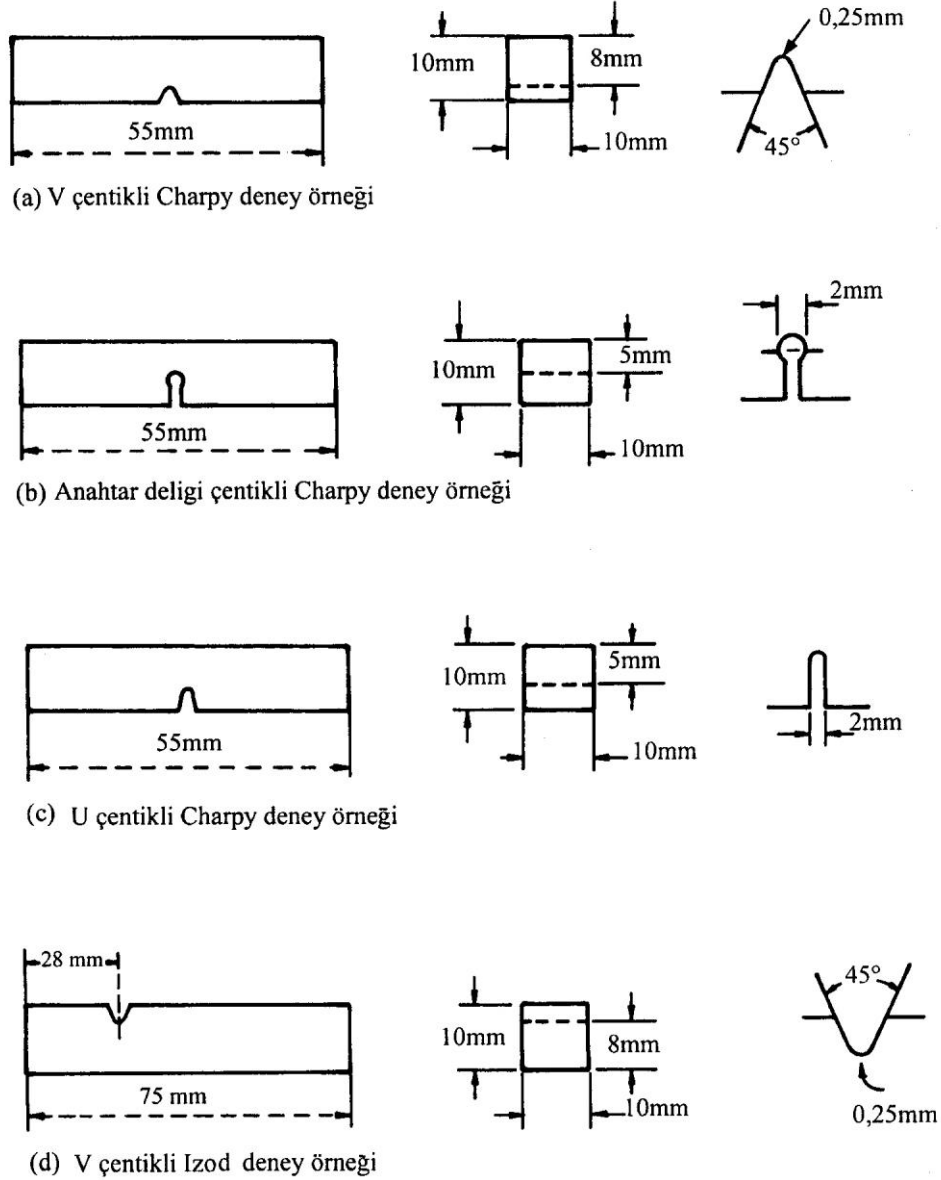
Bu deney tamamen ampirik olduğu ve şartlar değiştikçe malzeme farklı özellik gösterdiği için numunelerin cihaza uygun bir şekilde yerleştirilmesi, doğru sonuç alma yönünden önemlidir.

Deney esnasında önce sarkaç, daha önce tespit edilen potansiyel enerjiye sahip olabileceği bir yüksekliğe çıkarılır. Daha sonra numune, uygun bir şekilde yerleştirilir. Örneğin, en çok uygulanan Charpy deneyinde numune, mesnetlere tam yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentiğin simetri düzlemi 0,5 mm içinde birbirine çakışacak şekilde yerleştirilir. Bu durum cihaza bağlı, yardımcı bir aletle sağlanabilir. Numune uygun şekilde yerleştirildikten sonra, okumaların yapıldığı kadranın göstergesi başlangıç durumuna getirilir ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakılır. Sonuç, deneyden sonra kadrandan okunur.

Darbe tokluğu dayanım hesaplamalarında sayısal bir değer olarak kullanılamaz; çünkü konstrüksiyondaki gerilme durumu, yüklemenin seyri, boyutlar ve çentik geometrisi çok farklıdır. Bu nedenle sadece malzeme kalitesinin belirlenmesi için yapılan bu deneylerde sonuçların verilmesi ve mukayese amaçlı kullanılması yeterlidir.

## 5.1. Numuneler

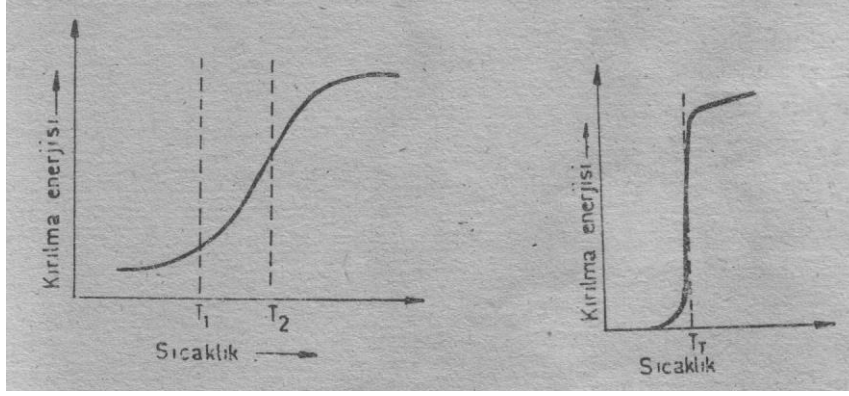
Standartlarda belirtilen numune boyut ve biçimleri aşağıdaki şekilde verilmiştir. Bazen, bu standartlara uygun numune hazırlama imkânı olmadığı durumlarda standart dışı numunelerde hazırlanabilir.



Şekil 5.2. Standart çentik darbe deneyi numuneleri

## 5.2. Darbe deneyinde sıcaklık etkileri

Belirli bir malzeme için değişik sıcaklıklarda yapılan darbe deneyleri, o malzemenin darbe direnci hakkında daha anlamlı bir netice sunar. Değişik sıcaklıklarda yapılan bir seri deney, aşağıdaki şekilde verilen eğriye benzer bir eğri verir. Bu eğriden anlaşılacağı gibi sıcaklık düşüklükçe darbe direnci de düşer. Yüksek sıcaklıklarda numunenin kopmasını sağlamak için büyük bir absorpsiyon enerjisi gerekirken, düşük sıcaklıklarda malzeme daha az enerji absorpsiyonu ile kopar. Yüksek sıcaklıklarda, malzeme yoğun şekil değiştirmeye gelişen sünek bir davranış gösterir ve numune kopmadan önce plastik deformasyona uğrar. Düşük sıcaklıklarda malzeme genelde gevrek ve kopma noktasında çok az şekil değiştirme gözlenir. Geçiş sıcaklığı, malzemenin sünek kopmadan gevrek kopmaya geçtiği sıcaklıktır.



Şekil 5.3. Darbe enerjisinin sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık düştükçe darbe enerjisinin (veya direncinin) düşmesi, aniden olabildiği gibi, belirli bir sıcaklık aralığında da olabilir. Darbe enerjisinin aniden düştüğü sıcaklığa “geçiş (transition) sıcaklığı” denir. Belli bir geçiş aralığı olan malzemelerde bu sıcaklığı belirlemek zordur. Bu durumda, tek bir sıcaklık yerine  $T_1$  ve  $T_2$  gibi sıcaklıklar arasında kalan geçiş aralığı tarif edilir.  $T_1$  sıcaklığının altında malzeme gevrek bir davranış gösterir. Kırılma, klivaj düzlemleri boyunca olup, kırılma yüzeyi kristalin (granüler, ince taneli) bir görünüştedir. Bu sıcaklıklarda, darbenin tesiri ile çatlak kolayca meydana gelir ve çatlak çok yüksek bir hızla yayılır.  $T_2$  sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise malzeme sünek bir davranış gösterir. Bu sıcaklıklarda darbenin tesiri ile malzemede, önce bir plastik şekil değiştirme ve daha sonra kopma meydana gelir. Sünek davranıştan dolayı malzemede çatlak oluşumu güçleşir ve çatlağın yayılma hızı da yavaşlar. Bu durumda kopma yırtılma şeklinde olup, kopma yüzeyi lifli bir görünüş arz eder. Geçiş aralığında ise her iki davranış da bir arada görülür.

Orta ve düşük mukavemetli YMK metaller ve çoğu SDH yapıları metaller yüksek darbe direncine sahiptir ve bu tür metallerde (özel reaktif kimyasal ortamlarda bulunmuyorsalar) gevrek kırılma problemi yoktur. Yüksek mukavemetli ve gevrek yapıları malzemeler düşük darbe direncine sahip olduklarından, yapılarında çatlak bulunuyorsa, bütün sıcaklık ve deformasyon hızlarında elastik bölgedeki gerilme değerlerinde gevrek olarak kırılırlar. Yüksek mukavemetli çelikler, alüminyum ve titanyum alaşımları bu guruba girer.

Düşük ve orta mukavemetli HMK yapıları metallerin ve seramiklerin darbe dirençleri sıcaklığa oldukça bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda klivaj kırılma, yüksek sıcaklıklarda ise kayma kırılması meydana gelmektedir. Diğer bir değişle, artan sıcaklığa bağlı olarak gevrek kırılmadan sünek kırılmaya geçiş olmaktadır. Metallerde bu geçiş mutlak ergime sıcaklığına bağlı olarak  $0.1-0.2 T_m$ , seramiklerde ise  $0.5-0.7 T_m$  aralığında olmaktadır. Sünek-gevrek geçiş aralığı içeren malzemelerde, geçiş sıcaklığını belirlemek için çeşitli kriterler kullanılmaktadır.

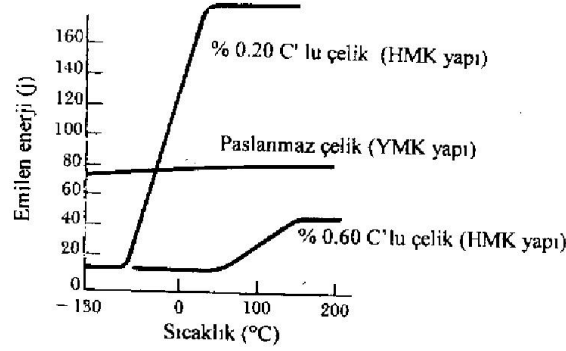
- %50 klivaj, %50 kayma kırılmasının meydana geldiği sıcaklık geçiş sıcaklığı olarak belirlenir.
- Genel bir kriter göre, geçiş sıcaklığı belirli bir  $C_v$  enerji değerine karşı gelen sıcaklık olarak da alınabilir.
- %100 klivaj kırılmanın meydana geldiği sıcaklık geçiş sıcaklığı olarak alınır.

$T_g$ , geçiş sıcaklığı malzemenin kimyasal bileşimine, ısıl işlem durumun, işleme yöntemine ve mikroyapısına bağlıdır. Bu değişkenler arasında, tane boyutunu küçültme mukavemeti Hall-Petch bağıntısına göre artıran ve aynı zamanda geçiş sıcaklığını düşüren tek yöntemdir.

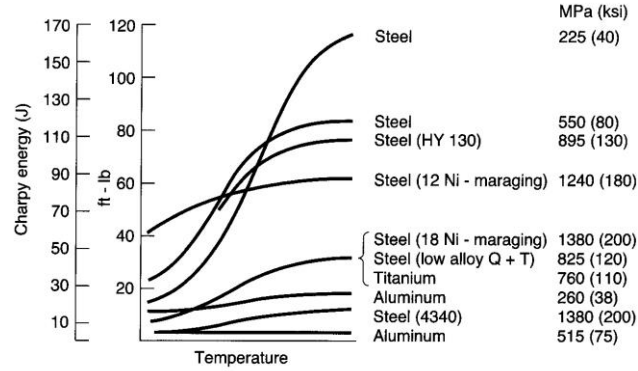
Malzemelerin geçiş sıcaklığı, mühendislik uygulamalarında özellikle malzeme seçimi sırasında önemli bir kriterdir. Geçiş sıcaklığı düştükçe, malzemenin tokluğu artacağından, geçiş sıcaklığı düşük olan malzemeler daha çok tercih edilir. Düşük sıcaklıklarda çalışacak malzemelerde geçiş sıcaklığı bu nedenle oldukça büyük önem taşır.

Darbe deneylerinden elde edilen sonuçlar o malzeme için kıyaslama değeridir ve bu sonuçlar çekme deneyi sonuçları gibi mühendislik hesaplamalarında kullanılamazlar.

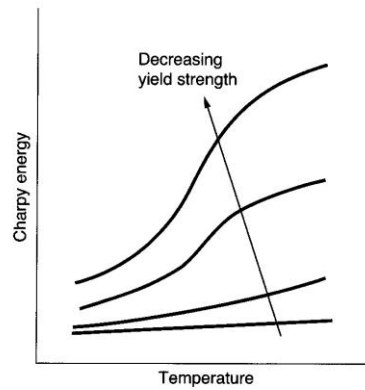
Aşağıda verilen şekilde iki farklı kristal yapısına sahip metalik malzemenin darbe enerjilerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmektedir.



(a)



(b)

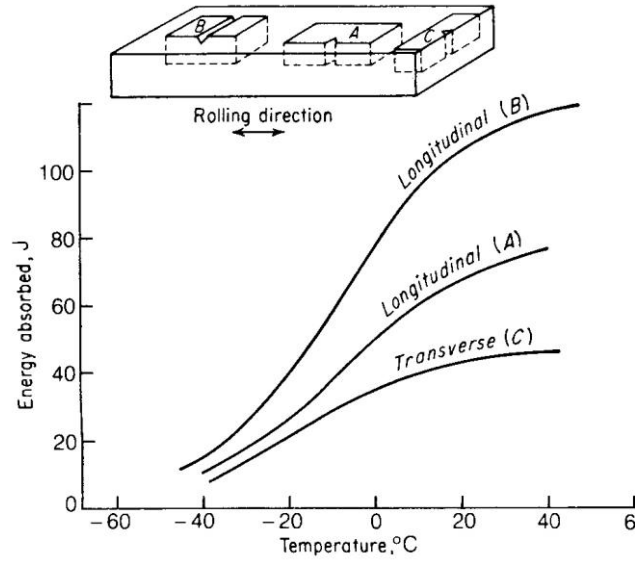


(b)

(c)

Şekil 5.4. Farklı malzemelerde darbe enerjisinin sıcaklıkla değişim. (c)'de verilen değerler malzemelerin akma mukavemetini göstermektedir [Bowman].

Haddelenmiş ve dövülmüş malzemelerde, çentik darbe direnci çubuğun veya levhanın değişik yönlerinde farklı değerlerinde olur. Aşağıdaki şekilde, bir levhadan haddeleme yönünde ve haddelemeye dik yönde çıkarılan numunelerin darbe direnci-sıcaklık eğrileri verilmiştir. A ve B numuneleri hadde yönünde alınmıştır. Ancak A numunesinde çentik levhaya diktir, B numunesinde ise levha yüzeyi ile paraleldir. Bunlar arasında A tipindeki numuneler daha çok tercih edilir. C numunesi haddelemeye dik yönde alınmış olup çentik levhaya dik gelecek şekilde seçilmiştir. Bu şekil incelenecek olursa, nispeten yüksek sıcaklıklarda değişik yönlerde alınmış numunelerin kırılma enerjileri birbirinden çok farklıdır. Düşük sıcaklıklarda ise bu fark ihmal edilecek kadar azdır.



Şekil 5.5. Haddelenmiş bir levhada değişik yönlerde alınmış numunelerin kırılma enerjisi-sıcaklık eğrileri.



## 6.YORULMA DENEYİ

### 6.1. Giriş

Birçok makine parçaları ve yapı elemanları kullanım esnasında tekrarlanan gerilmeler (yükler) ve titreşimler altında çalışır. Bu tür uygulamalarda, uygulanan gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrar sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. “Yorulma” adı verilen bu olay ilk defa 1850-1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır.

Yorulma olayına, dışardan uygulanan mekanik kuvvetlerin yanında ısı genleşme ve büzülmelemlerden doğan ısısal gerilmeler de neden olabilmektedir.

Yorulma olayında çatlak genellikle yüzeyde bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta ve ani kesit değişimlerinin olduğu yerlerde başlar. Çatlak teşekkülü için aşağıdaki üç ana faktör gereklidir.

- Yeterli derecede yüksek bir çekme gerilmesi (anma gerilmesi),
- Uygulanan çevrimsel gerilmenin yeterli genliğe sahip olması,
- Yeterli sayıda çevrimin uygulanmış olması

Bunların yanında, parçadaki gerilme yığılması, korozyon, sıcaklık, ani ve aşırı yüklemeler, metalografik yapı, artık gerilmeler ve birleşik gerilme hali de yorulmayı etkileyen diğer faktörlerdir.

Yorulma deney sonuçları uygulamada karşılaşılan bütün şartları içermeyebilir. Bu nedenle, yorulma deney sonuçları belirli koşullar için fikir verir ve benzer koşulların bulunabileceği parça dizaynında gerekli önlemlerin alınmasında yardımcı olur. Son yıllarda, önemli parçaların yorulma davranışlarını daha iyi belirleyebilmek için, standart bir deney numunesi yerine, parçanın kendisi özel cihazlarda çalışma koşullarına benzer koşullarda deneye tabi tutulmaktadır. Böylece çok daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir.

### 6.2. Yorulma Deney Türleri

Deneyde kullanılan gerilme türü, yorulma deneyine de adını vermektedir. Gerilme türüne göre başlıca yorulma deneyleri;

1. **Eksenel gerilmeli yorulma deneyi:** En basit sistem olan bu tip deneyde numuneye uzunluğu boyunca değişen çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Uygulanan gerilme numune eni boyunca da üniform olarak dağılır. Bu tip etkilerin olduğu uygulamalara en iyi örnek, içten yanmalı motorların bağlantı rotlarıdır (biyeler). Ancak burada eksenel gerilme yanında eğme kuvvetleri de oldukça etkilidir.

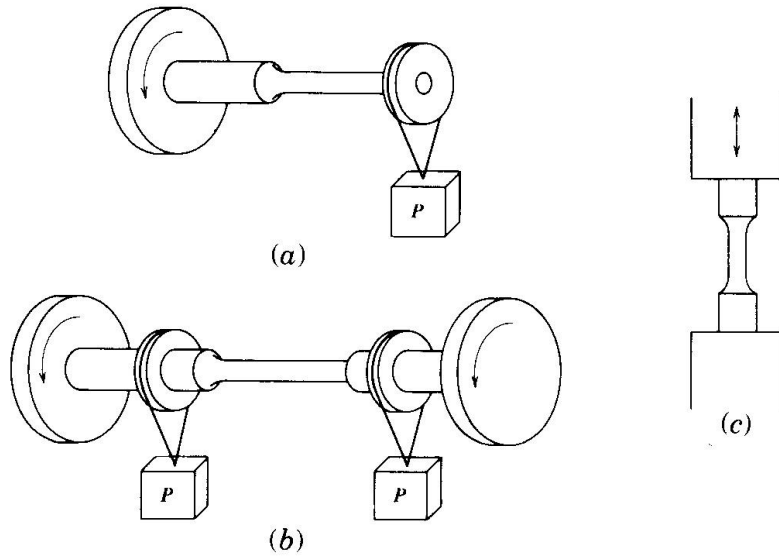
2. **Eğme gerilmeli yorulma deneyi:** Bu deney türü kendi arasında ikiye ayrılır.

- Düzlemsel eğme gerilmeli yorulma deneyi
- Dönen eğme gerilmeli yorulma deneyi

Birinci deney türünde, numune nötr bir düzleme (veya eksene) göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelerin olduğu en güzel örnek, taşıtlarda kullanılan yaprak yaylarıdır (makas yayları).

İkinci deney türünde, numune devamlı dönen bir tarafsız eksene göre tekrarlanan eğme gerilmeleri altındadır. Bu tür gerilmelere, örnek olarak hareket halindeki taşıtların akslarında meydana gelen gerilmeler gösterilebilir.

3. **Burma gerilmeli yorulma:** Burada deney numunesi sabit bir eksene göre tekrarlanan burma gerilmesi altındadır. Araçların süspansiyon yaylarında ve çekme-basma kuvvetlerinin uygulandığı tüm helisel yaylarda bu tür burma gerilmeleri oluşur.
4. **Bileşik gerilmeli yorulma deneyi:** Yukarıda sayılan farklı türdeki gerilmelerin ikisinin veya daha fazlasının bir arada bulunabileceği durumlarda bileşik gerilmeler söz konusudur. Uygulamada en çok, eğme-burma gerilmeli ve aksenal-burma gerilmeli bileşik durumlar gözlenmektedir. Motorların krank mili başlıklarında gerilme, eğme ve burma gerilmelerinin bir arada bulunduğu gerilme türüne ait en güzel örnektir.



Şekil 6.1. Temel yorulma deney makinelerinin prensip şemaları. (a) Tek uçtan yüklemeli dönele eğmeli, (b) iki uçtan yüklemeli dönele eğmeli ve (c) aksenal gerilmeli (çeki-bası) [Hertzberg]

### 6.3. Yorulma deneyi ile ilgili terimler

- **Çevrim (gerilme periyodu):** Gerilme-zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına bir çevrim denir.
- **Maksimum gerilme ( $\sigma_{maks}$ ):** Uygulanan gerilmeler arasında en büyük cebirsel değeri olan gerilmedir.
- **Minimum gerilme ( $\sigma_{min}$ ):** Uygulanan gerilmeler arasında en küçük cebirsel değeri olan gerilmedir.
- **Ortalama gerilme ( $\sigma_0$ ):** Maksimum ve minimum gerilmelerin cebirsel ortalamasıdır.

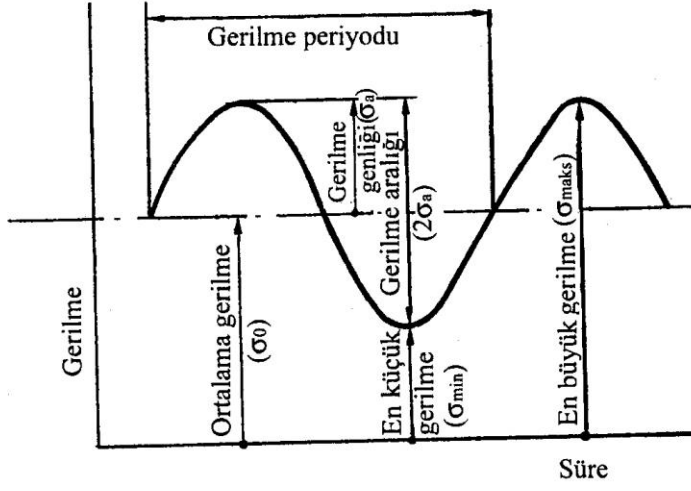
$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}$$

- **Gerilme aralığı ( $\Delta\sigma$ ):** Maksimum ve minimum gerilmeler arasındaki cebirsel farktır.

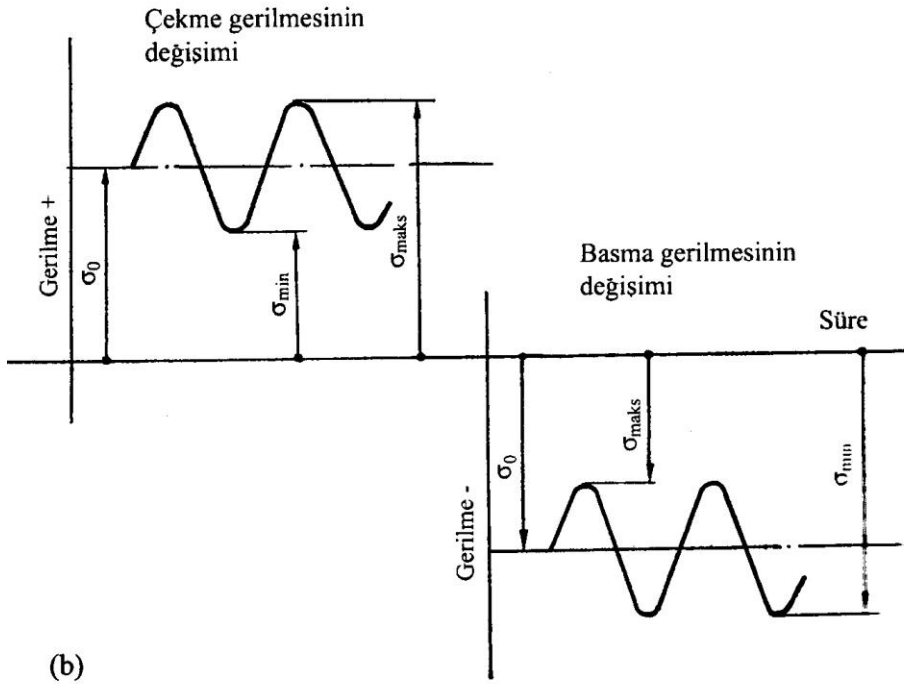
$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min}$$

- **Gerilme genliği ( $\sigma_a$ ):** Gerilme aralığının yarısına eşittir. Maksimum ve minimum gerilme ile ortalama gerilme arasındaki farktır.

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2}$$



(a)



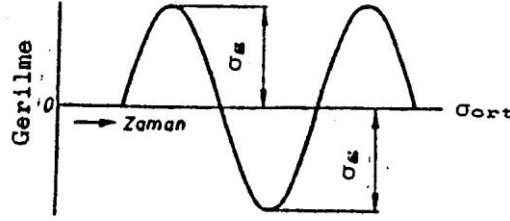
(b)

Şekil 6.2. (a) Yorulma deneyi ile ilgili tipik bir gerilme-zaman eğrisi ve (b) basma gerilmelerinin değişimi [Savaşkan]

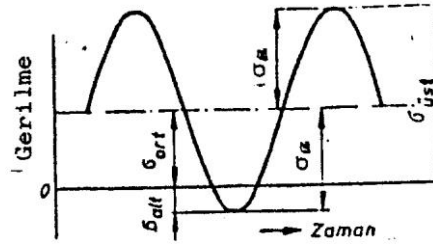
#### 6.4. Yorulma zorlanması türleri

Yorulma zorlanmasında karşılaşılabilecek tipik gerilme çevrimleri aşağıda verilmiştir.

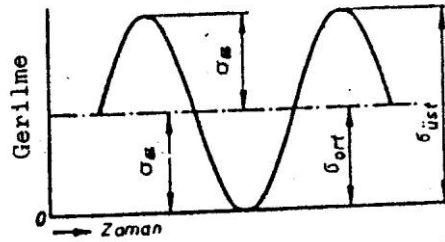
a) Değişken yorulma zorlanması ( $\sigma_{ort}=0$ )



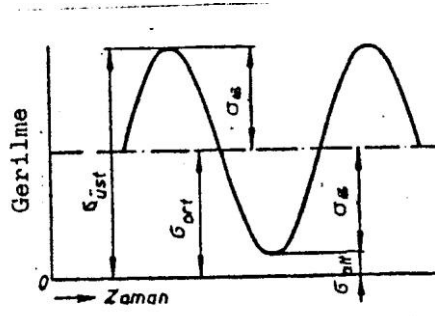
b) Değişken çekme bölgesinde yorulma zorlanması ( $\sigma_{ort}>0$  ve  $\sigma_{min}<0$ )



c) Dalgalı yorulma zorlanması ( $\sigma_{ort}>0$  ve  $\sigma_{min}=0$ )



d) Dalgalı çekme bölgesinde yorulma zorlanması ( $\sigma_{ort}>0$  ve  $\sigma_{min}>0$ )



Aynı terminoloji basma bölgesi için,  $\sigma_{ort} < 0$  olacak şekilde kullanılabilir.

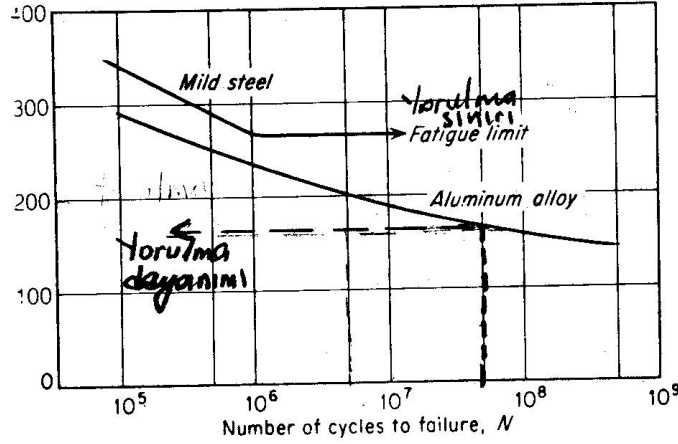
### 6.5. Gerilme-yorulma ömrü (S-N) ilişkisi (Wöhler Diyagramı)

Bir malzemeye, ortalama gerilmesi sıfır olan bir çevrimsel zorlanma uygulandığında, yorulma hasarının değişken gerilme genliğine bağlı olarak hangi çevrimde oluşacağını bildiren grafiklere Wöhler Eğrileri (veya S-N eğrileri) denir. Bu eğriler, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda çatlacağını veya kırılacağını gösterir. Ortalama gerilme tüm deneylerde sabit kalmak üzere farklı numunelere farklı çevrimsel gerilmeler uygulayarak numunenin çatlmasına veya kırılmasına kadar geçen çevrim sayısı (N) tespit edilir. Deneylerin tümünde gerilme genliği sabit tutulur. Küçük gerilmeler için çatlamanın görüleceği çevrim sayısı çok büyük olduğundan, önceden belirlenen çevrim sayısına kadar deney devam ettirilerek malzemenin davranışı izlenir. Gerilme eksenini ordinatta genellikle doğrusal, bazı hallerde ise logaritmik skala kullanılır ve bu ekseninde ya maksimum gerilme, ya minimum gerilme ya da gerilme genliğinden biri kaydedilir. Çevrim sayısı olan apsiste ise genellikle logaritmik skala kullanılır.

Wöhler eğrileri, metal veya alaşımların kristal yapısına bağlı olarak farklı özellikler göstermektedir. Örneğin, HMK yapıdaki metaller (özellikle demir ve çelikler) belirli bir gerilme genliğinin altındaki zorlanmalarda yorulmaya uğramamaktadır. Bunu belirleyen eşik değere “Yorulma Sınırı (Fatigue Limit)” adı verilir ve o metalin yorulma dayanımını belirler. Yorulma dayanım sınırı, çatlak oluşumuna neden olabilecek hareketli dislokasyonlar etrafında karbon atomlarının bir atmosfer oluşturarak veya küçük partiküller halinde çökerek onları kilitlemeleri sonucu oluşan deformasyon yaşlanması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Ayrıca deformasyon yaşlanması gösteren bazı alüminyum alaşımları gibi demir dışı malzemelerde de bu durum gözlenebilmektedir.

Demir dışı, yani YMK ve SDH yapıya sahip metal ve alaşımlarda istisnai durumlar dışında bu özelliğe rastlanmaz. Diğer bir deyişle gerilme genliğinin azalmasıyla ömürde sürekli bir artış söz konusudur. Genellikle bu tür malzemeler için “Yorulma Dayanımı (Endurance Limit)” olarak  $5 \times 10^7$  çevrimde yorulma hasarı oluşturacak gerilme genliği esas alınır.

- Yorulma dayanımı (fatigue strength):** Malzemenin N çevrim sonunda çatlama veya kopma gösterdiği gerilme değeri olarak tanımlanır.
- Yorulma sınırı (Yorulma dayanım sınırı) (fatigue limit):** S-N diyagramında eğrinin asimtotik durum aldığı gerilmeye “yorulma sınırı” veya “Yorulma dayanım sınırı” denir. Bu gerilmenin altındaki çevrimsel gerilmelerde parçanın sonsuz çevrime dayanacağı kabul edilir.
- Yorulma ömrü (Fatigue life):** Belirli büyüklükte tekrarlı gerilme uygulanan bir malzemenin kırılmasına kadar geçen çevrim sayısına denir.



Şekil 6.3. Demir esaslı ve demir dışı malzemelerin tipik S-N (Wöhler) eğrileri (Dieter)

Bu tür eğrilerde dikkat edilmesi gereken bir husus da yorulma hasarının  $10^4$  çevrimden önce oluşması durumudur. Bu yorulma türüne “Kısa ömürlü Yorulma (Low Cycle Fatigue)” adı verilmekte olup, olayı artık gerilme genliğinin seviyesi değil birim şekil değişiminin seviyesi kontrol eder.

Dikkat edilmesi gereken diğer bir konu da, gerek deney tekniklerindeki farklılıklar ve gerekse malzemedeki homojensizlikler nedeniyle yorulma deneylerinden elde edilen ömür değerlerinde büyük dağılımların beklenmesi gereğidir.

## 6.6. Yorulma deney cihazları

Yorulma deneylerinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmasına rağmen, bu cihazların numuneye uyguladıkları gerilme türü açısından 4 ana grupta toplamak mümkündür.

- a) Eksenel çekme-basma gerilmeleri uygulayan cihazlar.
- b) Eğme gerilmesi uygulayan cihazlar
  - Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayanlar
  - Dönen eğme gerilmesi uygulayanlar
- c) Burma gerilmesi uygulayan makineler
- d) Bileşik gerilme uygulayan makineler.

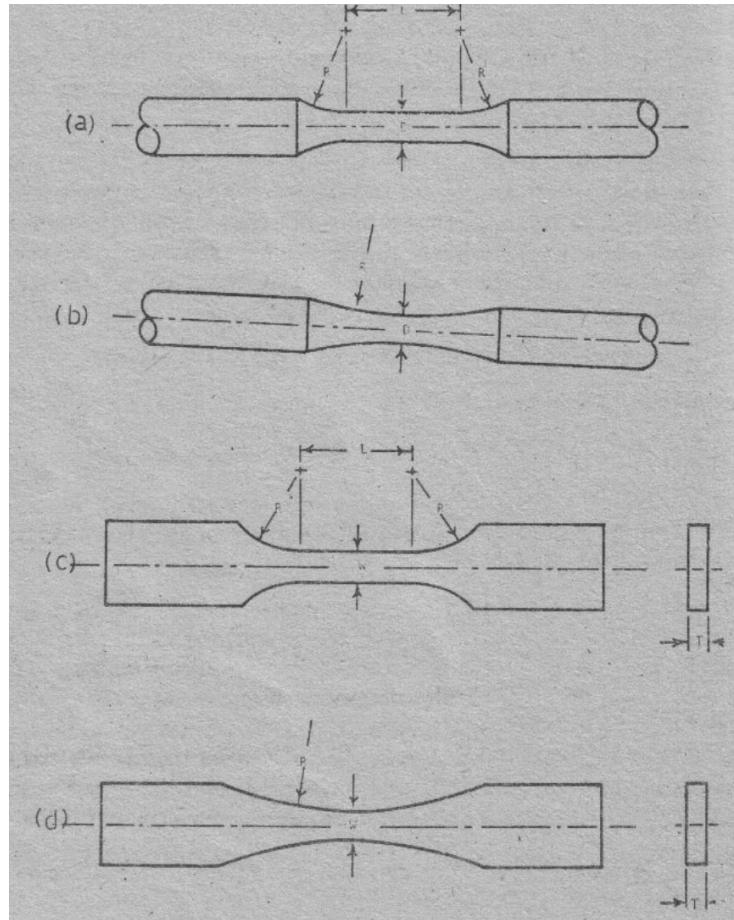
Deneye tabi tutulacak parça çalışma esnasında ne tür gerilmelere uğrayacaksa, o tür gerilmelerin uygulandığı deney cihazının seçilmesi gerekir. Yorulma deney cihazları, çalışma prensiplerine göre de mekanik, elektromekanik, manyetik, hidrolik ve elektro-hidrolik cihazlar diye sınıflandırılabilir.

## 6.7. Yorulma Numuneleri

Yorulma deneyinde kullanılacak numune tipi ve boyutu genellikle cihazın tipine, kapasitesine ve boyutuna bağlıdır. ASTM-466'da eksenel gerilmeli yorulma deneyi için aşağıda verilen numune şekilleri tavsiye edilmektedir. Numune boyutları için aşağıdaki genel kurallara dikkat edilmelidir.

- Numune, çatlağın numunenin daraltılmış kesitinde olacak şekilde dizayn edilmelidir.
- Numunenin daraltılmış kesiti öyle seçilmelidir ki, max. gerilme deney cihazının çalışma kapasitesinin en az %25'inde, min. gerilme ise cihazın çalışma kapasitesinin en az %2.5'inde oluşsun.
- Numune boyutları öyle seçilmelidir ki, numunenin doğal frekansı cihazın frekansının en az iki katı olmalıdır.

Yorulma numuneleri dairesel veya dikdörtgen kesitli olabilir. Dairesel kesitli numunelerin baş kısmının çapı daraltılmış kısmının çapının en az 1.5 katı olmalıdır. Çentik etkisini minimuma indirmek için daraltılmış kesitin her iki ucundaki kavisli bölgede (R) eğrilik yarıçapı daraltılmış kısmın (D) çapının en az 8 katı olmalıdır. Dikdörtgen kesitli numunelerde kesit daraltılması tek boyutta ve genellikle genişlikte yapılır. Diğer boyutlar dairesel kesitli numuneler gibi seçilir. Daraltılmış kısımda genişliğin kalınlığa oranı 2-6 arasında olmalıdır. Daraltılmış kısmın uzunluğu, daraltılmış kısımdaki genişliğin en az 3 katı olmalı, basma gerilmesi uygulandığı durumlarda 4 katını geçmemelidir.

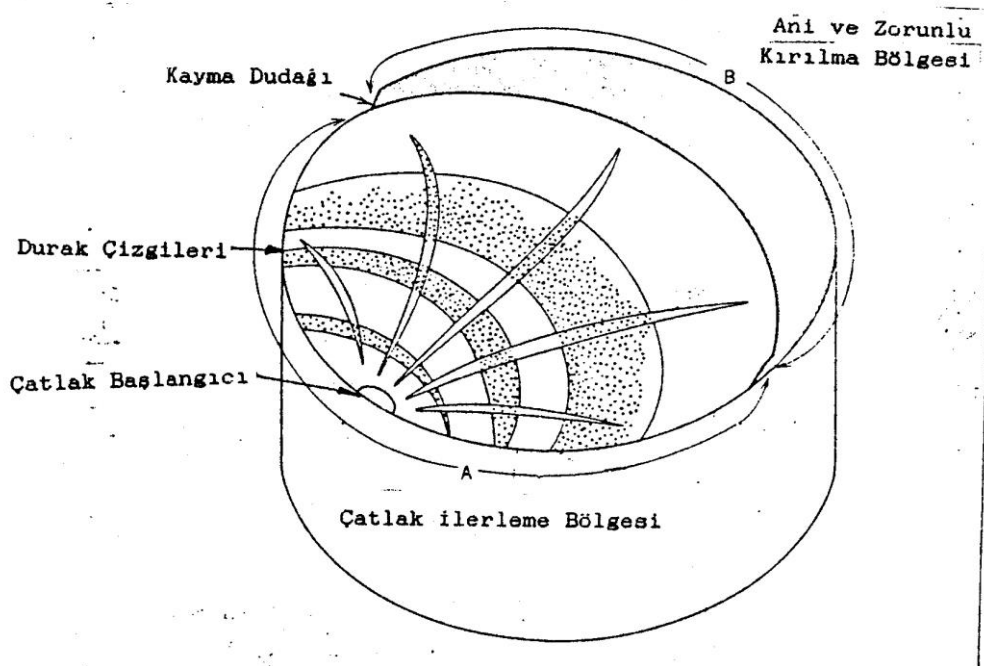


Şekil 6.4. ASTM E-466'ya göre eksenel gerilmeli yorulma deneyi numunesi şekilleri (Kayalı)

Yorulma numunelerinin hazırlanmasında büyük özen gereklidir. Talaş kaldırma işlemi keskin bir kalem ucu ile yapılmalı ve iç gerilmelerin oluşmasını engellemek için aşırı deformasyonlardan ve aşırı ısınmalardan kaçınılmalıdır. Yüzeyde çizik ve çentik oluşturulmamalıdır. Talaş kaldırma sonrası numuneye hassas bir taşlama işlemi ve daha sonra numune boyunca ince zımpara işlemi uygulanmalıdır. Numuneler korozif olmayan bir ortamda saklanmalıdır.

## 6.8. Kırılma Yüzeylerinin makroskopik görüntüsü

Yorulma kırılmasına uğrayan bir parçanın kırık yüzeyi, zorlanmanın şekli, seviyesi ve zamanla değişimi hakkında önemli bilgiler verdiğinden hasar analizi (failure analysis) çalışmalarında sıkça yararlanır. Yorulma sonucu oluşan kırık yüzeyler, gevrek özellikler taşıyan parlak görüntülü olup büyük şekil değişimi izlerine rastlanmaz ve çekme gerilmesine dik olarak uzanır. Yorulma hasarı yüzey görünümünden de anlaşılabilir. Örnek olarak aşağıdaki şekilde olduğu gibi, yuvarlak kesitli bir parçanın kırık yüzeyi incelendiğinde değişik özelliklerdeki bölgelerin varlığı dikkat çeker. A bölgesi, yorulma çatlaklarının ilk oluştuğu O noktasını da içeren kararlı ilerleme bölgesi olarak tanımlanır. Bu bölgede ayrıca makroskopik ölçekte “duraklama çizgileri (Beach Marks)”, ile çatlak ilerleme yönünü gösteren “radyal çıkıntılar (radial ledges)” yer almaktadır. Duraklama çizgileri, yüklemenin durdurulması, gerilme seviyelerinin değiştirilmesi, çalışma ortamındaki değişiklikler gibi nedenlerle oluşmakta ve çatlakın yönündeki cephe izlerinden meydana gelmektedir. Duraklama çizgilerinin arasında mikroskopik ölçekte, yorulma zorlanmasının her bir çevriminde oluştuğu idda edilen “yorulma striasyonları (fatigue striations)” na rastlanılır. Çatlak A bölgesinde değişik dinamik zorlanmalar altında kararlı olarak ilerler ve son çatlak cephesine ulaştığı anda malzemenin kalan kesitinin zorlanmayı taşıyamayacak kadar küçülmüş olmasından dolayı ani ve zorunlu olarak kırılır. Bu durum şekildeki B bölgesi ile gösterilmiş olup, burada sünek kırılma belirtisi olan lifli kırık yüzeyler en belirgin özellik olarak dikkati çeker.

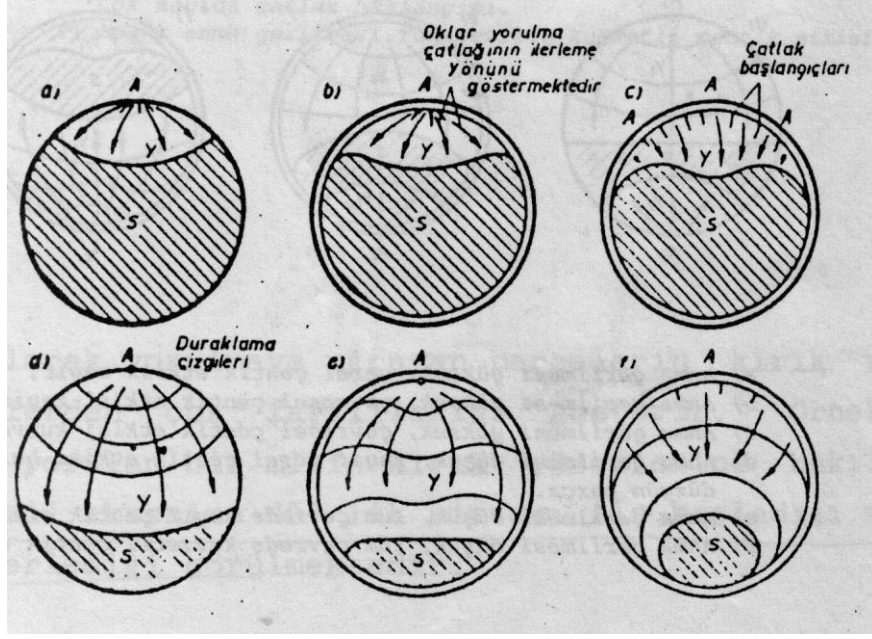


Şekil 6.5. Yorulma kırılmasına uğramış tipik bir kırık yüzeyin şematik gösterimi (Demirkol-ders n.)



Genellikle x2-x20 gibi küçük büyütmelelerde stereo mikroskoplarda incelenen kırık yüzeyler zorlanma şartları hakkında aşağıdaki şekillerde özetlenmiş bilgileri vermektedir.

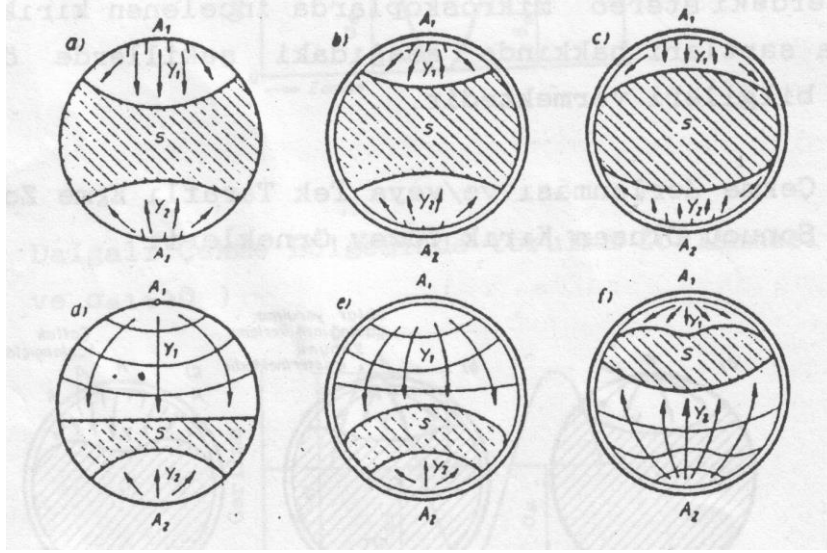
- a) Çekme zorlanması ve/veya tek taraflı eğme zorlanması sonucu oluşan kırık yüzey örnekleri



- a- Çekme zorlanması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek, çentik etkisi zayıf,  
b- Çekme zorlanması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede zayıf bir çentik etkisi söz konusu, çatlak cephesinin kenarları daha hızlı ilerliyor.  
c- Çekme zorlanması altında yorulma kırılması: Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi. Cephe kenarları daha da hızlı ilerliyor.  
d- Çekme, düşük akma gerilmesi. Küçük bir yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça. Çatlak cephesi A etrafında daireler şeklinde ilerliyor.  
e- Çekme, düşük akma gerilmesi. Zayıf fakat çevresel olan çentik etkisi ile çatlak cephesi kenarları hızlı ilerliyor.  
f- Çekme, düşük akma gerilmesi. Tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi. Son kırılma hemen hemen tümüyle yorulma çatlakları ile çevrilmiş.

Şekil 6.6. Çekme zorlanması sonucu oluşan kırık yüzey modelleri. Y: yorulma çatlaklarının ilerleme bölgesi, S: ani kırılma bölgesi (Demirkol-d.not.)

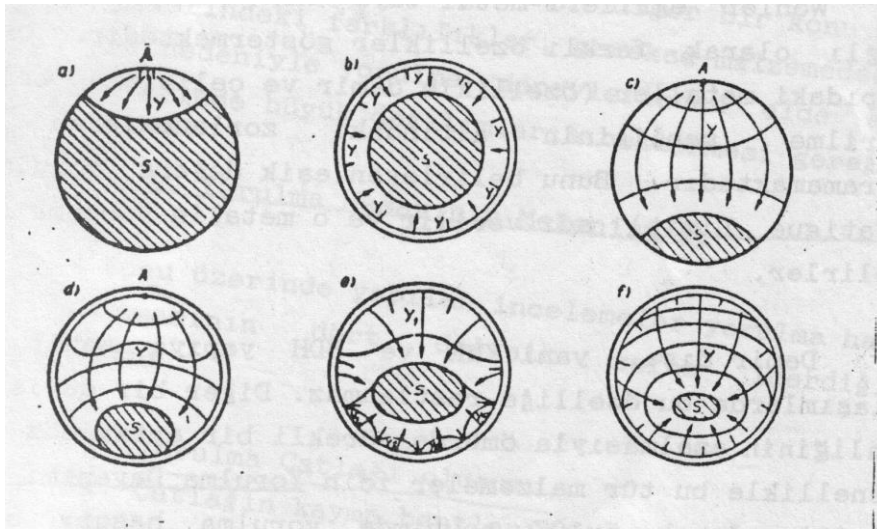
- b) Çift taraflı zorlanmaları sonucu oluşan kırık yüzeylere ait örnekler



- a- Anma gerilmesi yüksek, yerel çentik etkisi zayıf,
- b- Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi zayıf,
- c- Anma gerilmesi yüksek, çevresel çentik etkisi kuvvetli,
- d- Anma gerilmesi düşük, zayıf yerel çentik etkisi bulunan düzgün parça,
- e- Anma gerilmesi yüksek, tüm çevrede zayıf çentik etkisi,
- f- Anma gerilmesi düşük, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi

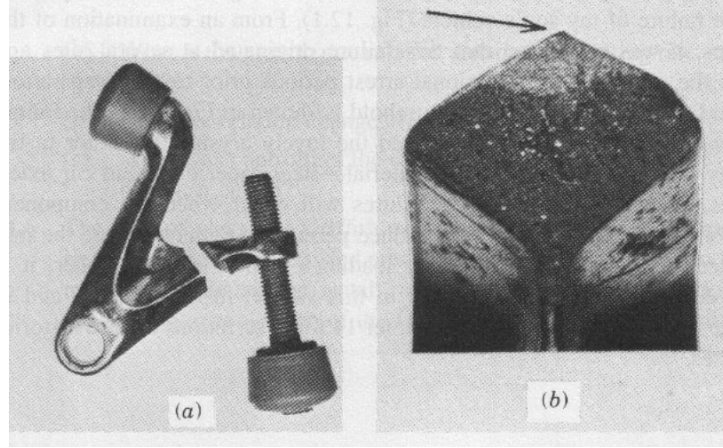
Şekil 6.7. Çift taraflı eğme zorlanması sonucu oluşan kırık yüzey modelleri (Demirkol-d.not.)

c) Dönene parçaların eğilmesi sonucu oluşan yorulma kırılmasına ait örnekler

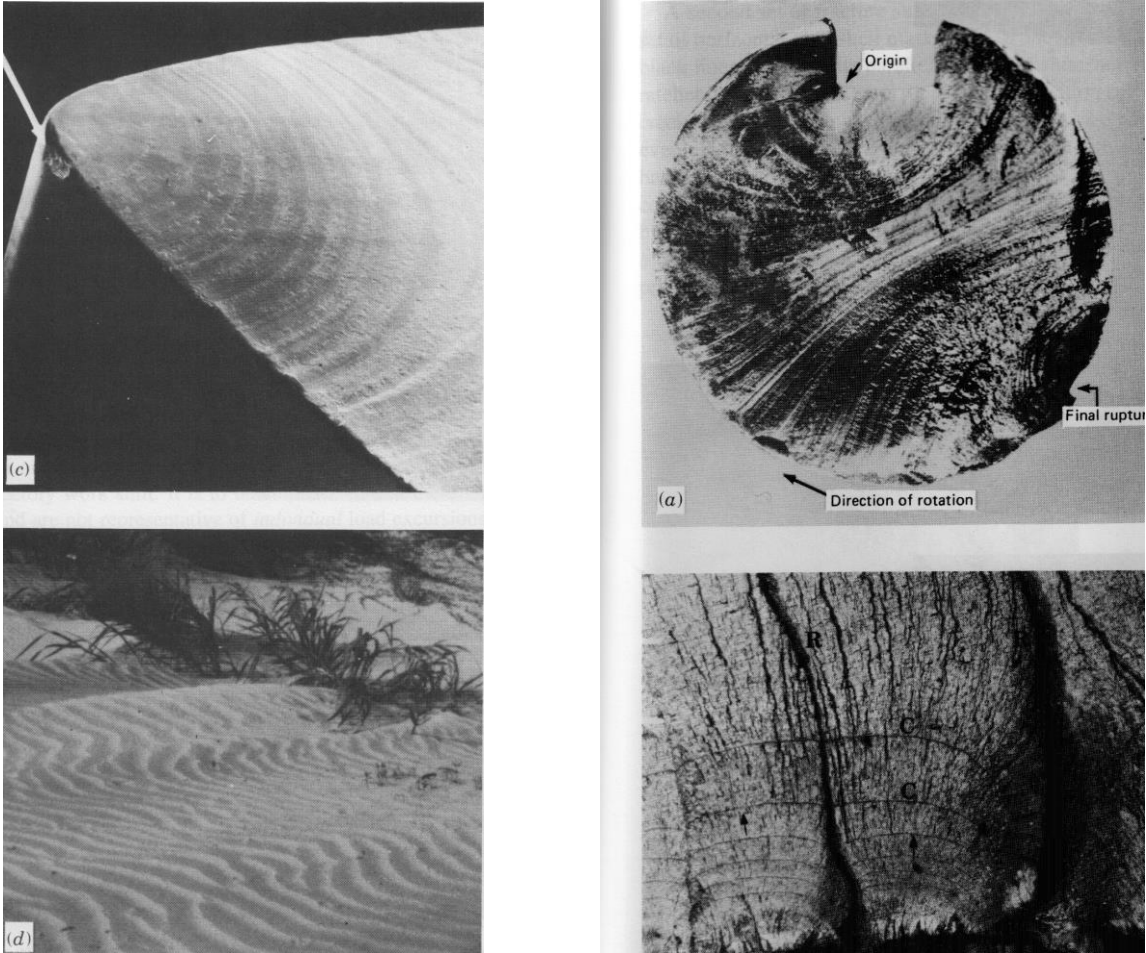


- a- Yüksek anma gerilmesi, yerel çentik etkisi,
- b- Yüksek anma gerilmesi, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi,
- c- Düşük anma gerilmesi, yerel çentik etkisi,
- d- Düşük anma gerilmesi, tüm çevrede zayıf çentik etkisi,
- e- Düşük anma gerilmesi, tüm çevrede zayıf çentik etkisi, çok sayıda çatlak başlangıcı,
- f- Düşük anma gerilmesi, tüm çevrede kuvvetli çentik etkisi.

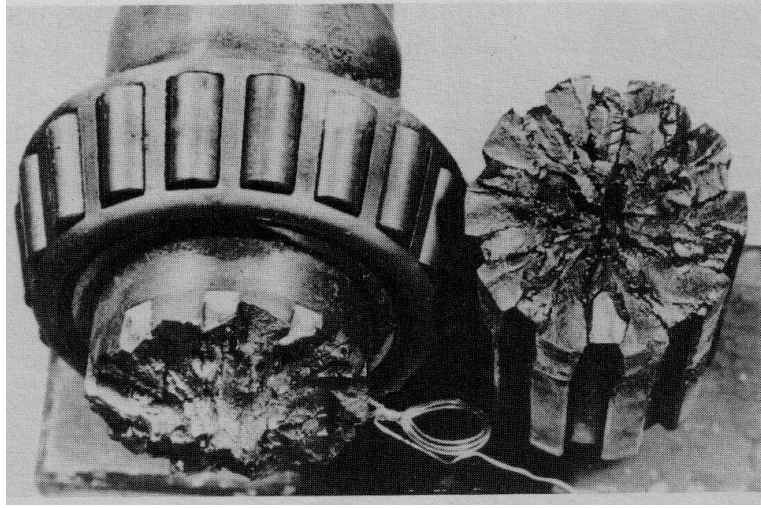
Şekil 6.8. Dönel eğilme sonucu oluşan kırılma yüzeyi modelleri (demirkol-d.not.)



Şekil 6.9. Çinkodan basınçlı dökümlle üretilmiş bir kapı durdurucusunun yorulma kırılması [Hertzerg]



Şekil 6.10. Yorulma kırılması işaretleri. (a) Döner çelik şaftın yorulma kırılması. (b) Alüminyum malzemenin yorulma kırılmasında oluşan deniz kabuğu görünümü (oklar yorulma çatlaklarının ilerleme yönünü göstermektedir), (c) Yorulma sonucunda oluşan yorulma ilerleme izleri ve (d) bu izlerin dalga izlerine (beach marks) benzetilmesi. [Hertzerg]



Şekil 6.11. Yorulma sonucu hasara uğramış çelik bir şaftın görünümü

## 6.9. Çatlaksız ve çatlaklı malzemelerde yorulma özellikleri

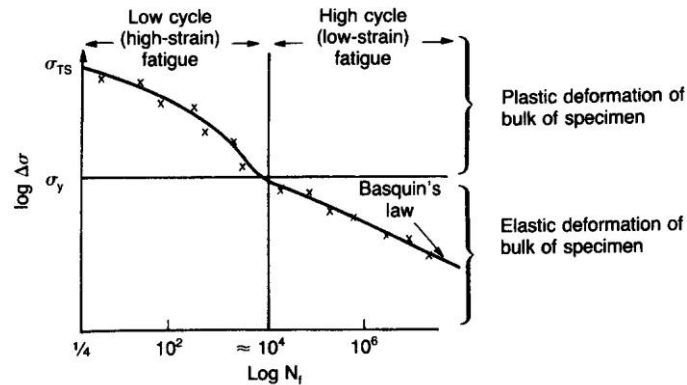
### 6.9.1. Çatlaksız malzemelerde yorulma

Çatlaksız malzemelerin yorulma deneyleri, çekme-basma veya dinamik eğme halleri için standart numunelerle yapılır. Genelde gerilme, zamana göre sinüzoidal olarak değiştiğinden, dalgaların şekli servo-hidrolik deney cihazları ile kontrol edilmektedir.

Çatlaksız malzemelerde görülen uzun ömürlü yorulmada, uygulanan max. ve min. gerilme değerlerinin mutlak değeri malzemenin akma mukavemetinden düşüktür. Bu tür yorulmada deney sonuçlarının ampirik olarak,

$$\Delta\sigma N_f^a = c_1$$

bağıntısına uyduğu tespit edilmiştir. **Basquin** kanunu olarak isimlendirilen bu bağıntıda;  $\Delta\sigma$  gerilme aralığı,  $N_f$  kırılmaya kadar olan çevrim sayısı (yorulma ömrü),  $a$  (çoğu malzemeler için 1/8-1/15) ve  $c_1$  birer sabittir.



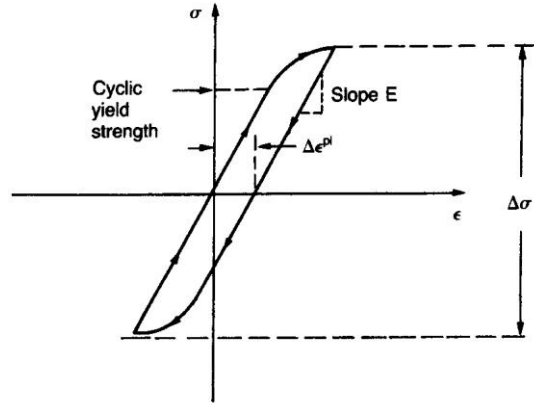
Şekil 6.12. Çatlak oluşumunun kontrol ettiği uzun ömürlü yorulmada Basquin kanunu [Ashpy]

Çatlaksız malzemelerin kısa ömürlü yorulmasında, uygulanan gerilmenin max. ve min. larının mutlak değeri malzemenin akma mukavemetinin üzerinde olduğundan bu durumda Basquin bağıntısı geçerli değildir. Bu tür yorulmada yorulma özellikleri, sabit toplam birim

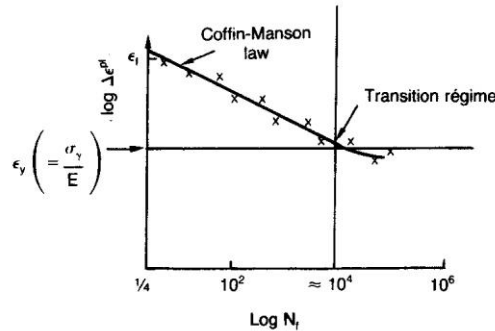
şekil değiştirme aralığında ( $\Delta\epsilon_t$ ) veya sabit birim şekil değiştirme genliğinde ( $\Delta\epsilon_{gn} = \Delta\epsilon_t/2$ ) yapılan deneylerle belirlenir. Ancak malzemenin yorulma özellikleri birim plastik şekil değiştirme aralığına bağlıdır. Kısa ömürlü yorulmada **Coffin-Manson** kanunu olarak bilinen,

$$\Delta\epsilon_{pl} N_f^b = c_2$$

bağıntı geçerlidir. Burada b (çoğu malzeme için 0.5-0.6 arasında) ve  $c_2$  birer sabit.



Şekil 6.13 Kısa ömürlü yorulmada plastik şekil değiştirme aralığı (ashby)



Şekil 7.14.Çatlak oluşumunun kontrol ettiği kısa ömürlü yorulma. Coffin-Manson kanunu [Asphy]

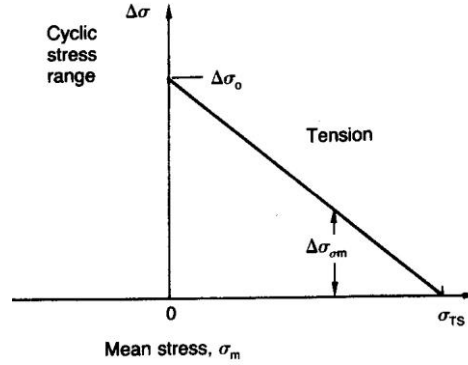
Yukarıda verilen iki yaklaşım veya kanun ortalama gerilmenin ( $\sigma_m$ ) sıfır olduğu kabulü ile yapılmaktadır. Malzeme ortalama çekme veya basma gerilmesinin etkisinde kaldığında ise (yani  $\sigma_m \neq 0$  ise) Goodman kuralına göre, aynı  $N_f$  değerini korumak için gerilme aralığı azaltılmalıdır.

$$\Delta\sigma_{om} = \Delta\sigma_0 \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_c}\right)$$

$\Delta\sigma_0$ : sıfır ortalama gerilme altında,  $N_f$  çevrim sonunda kırılmaya neden olan gerilme aralığıdır.

$\Delta\sigma_{om}$ : ortalama gerilme için aynı şeyi ifade etmektedir.

$\sigma_c$  : malzemenin çekme mukavemeti



Şekil 6.15. Goodman kuralı. Çatlaksız malzemelerin yorulma özelliğine ortalama çekme gerilmenin etkisi.

Goodman bağıntısı amprik bir bağıntı olup, her zaman geçerli değildir. Bu nedenle kullanım koşullarına benzer şartlarda deneyler yapılmalı ve buluna sonuçlar son dizayn tasarımlarında kullanılmalıdır. Genellikle ilk dizayn tasarımları bu bağıntıya dayanarak yapılmaktadır.

Yorulma ömrü, yorulma deneyi cihazlarında gerilme veya şekil değişimi sabit tutularak yapılır. Sabit gerilme genliklerinde yapılan deneylerde, çevrim sayısına bağlı olarak her çevrimdeki şekil değiştirme miktarı belirlenir. Sabit birim şekil değiştirme genliğinde ise, çevrim sayısına bağlı olarak her çevrimdeki gerilme miktarı tespit edilir. Sabit gerilme genliğinde, çevrim sayısı ile birim şekil değiştirme miktarının azalması (veya sabit birim şekil değiştirme genliğinde çevrim sayısı ile gerilmenin artması) malzemenin deformasyon sertleşmesine uğradığını göstermektedir. Malzemenin değişken zorlanmalar altında sertleşmesi normal bir davranış olup çoğunlukla tavllanmış homojen yapıli malzemelerde görülür. Soğuk işlem görmüş malzemelerin yorulma deformasyonunda ise, sabit gerilme genliklerinde çevrim sayısı ile birim şekil değişiminin arttığı (veya sabit birim şekil değiştirme genliklerinde çevrim sayısı ile gerilmenin azaldığı) görülmüştür. Bu olay deformasyon yumuşaması olarak isimlendirilmekte olup, malzemenin yorulma ömrünün azalmasına neden olduğundan oldukça tehlikeli bir durumdur. Yorulmada deformasyon sertleşmesi veya yumuşaması, özellikle yorulma zorlanmasının başlangıcında olup, belirli bir çevrim sayısından sonra gerilme ve birim şekil değiştirme genlikleri sabit değerler almaktadır.

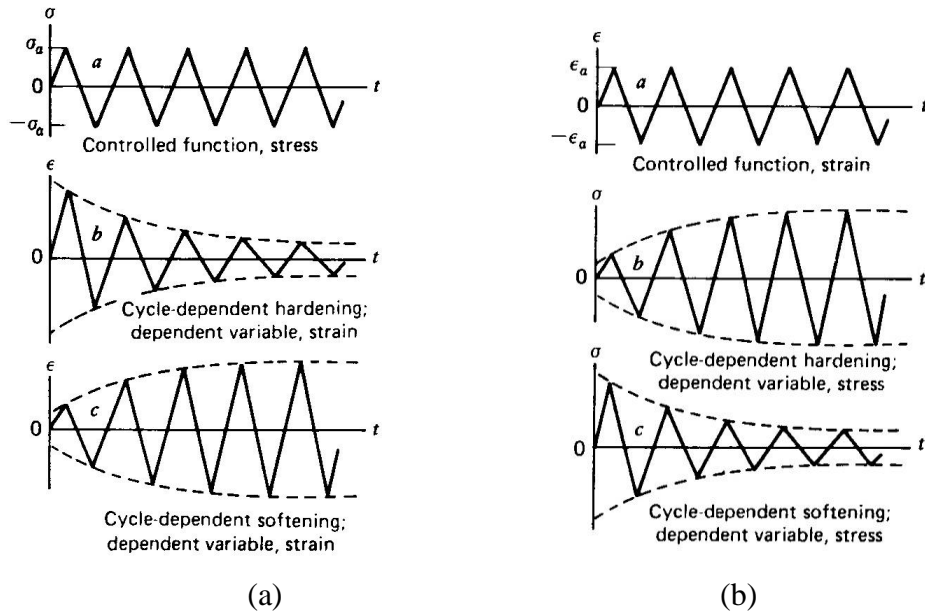
Yorulma sırasında ortaya çıkabilecek bu davranış çekme deneyinden elde edilen verilerden yararlanarak yaklaşık belirlenebilir. Malzemelerin çekme ve akma gerilmeleri arasındaki oran bu konuda bir fikir vermektedir.

- $(\sigma_c/\sigma_a) > 1.4$  : sertleşme,
- $(\sigma_c/\sigma_a) < 1.2$  : yumuşama,
- $(\sigma_c/\sigma_a) = 1.2-1.4$ : önemli bir değişim olmaz.

Malzemelerin yorulma deformasyonunda davranışını önceden tahmin etmeye yarayan diğer bir kriter ise, malzemenin deformasyon sertleşme üssü ( $n$ ) değeridir.

$n > 0.2$ : deformasyon sertleşmesi,  
 $n < 0.1$ : deformasyon yumuşaması

Bundan dolayı, sert ve yüksek mukavemetli malzemeler genellikle yorulma yumuşaması, yumuşak malzemeler ise deformasyon sertleşmesi gösterirler. Bazı malzemeler ise önce deformasyon sertleşmesi daha sonra ise yumuşama veya bunun tersi de görülür.



Şekil 6.16. Yorulma deformasyonunda, malzemenin deformasyon özelliklerinin çevrim sayısı ile değişimi. (a) Gerilmenin sabit tutulması durumu, (b) Şekil değişiminin sabit tutulması durumu [Hertzberg]

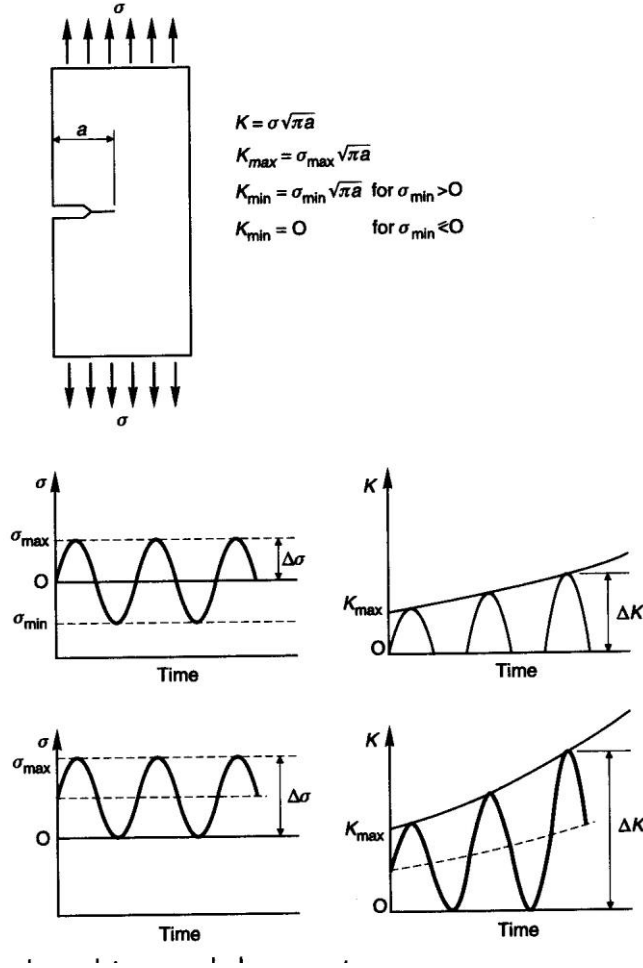
### 6.9.2. Çatlaklı malzemelerde yorulma

Büyük yapılar (köprüler, gemiler ve nükleer basınç kapları gibi özellikle kaynaklı yapılar) her zaman çatlak ihtiva eder. Bu çatlakların ilk uzunluğu, belirli bir değerin altında olmalıdır. Yapının emniyetli ömrünü belirlemek açısından, çatlakların aniden ilerleyebilecekleri uzunluğa ne kadar zamanda (kaç çevrimde) erişebileceğini bilmek gerekir. Öte yandan, uzun ömürlü yorulmada, yorulmanın II. aşamasında da çatlak boyu belirli bir değere eriştiği için çatlaklı malzemelerde yorulma kapsamında ele alınabilir.

Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, çatlak bulunan numuneyi çevrimsel olarak yüklemek suretiyle çeşitli veriler elde edilebilir. Ancak, çatlaklı malzemelerde yorulma olayının anlaşılabilmesi için gerilme şiddet faktörünün en büyük ve en küçük değerlerine bağlı olarak gerilme faktörünün bilinmesi gerekir.

Gerilme şiddet faktörü ( $\Delta K$ )

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$



Şekil 6.17. Çatlaklı malzemelerde yorulma çatlığının ilerlemesi [Ashby]

Gerilme şiddet faktörü ( $\Delta K$ ) zaman göre (sabit yükte) artar (Şekil 7. 17). Çünkü çatlak sürekli olarak büyümektedir. Bu aralığın artması ile çatlak ilerleme hızı da artmaktadır.

Kararlı durumda çatlak ilerleme hızı (da/dN);

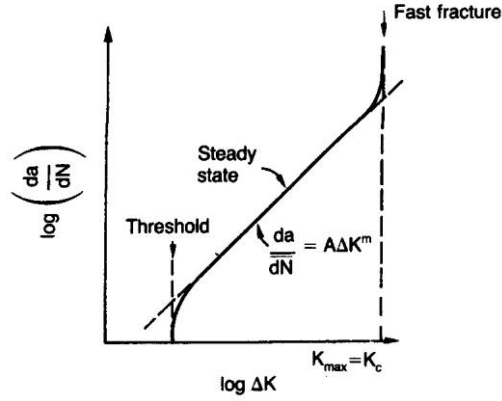
$$da/dN = A\Delta K^m$$

olarak ifade edilmiştir. Burada A ve m malzeme sabitleridir. Bu durumda ilk çatlak uzunluğu ( $a_0$ ) ve çatlakın kararsız hale gelip hızla ilerleyeceği son çatlak uzunluğu ( $a_f$ ) biliniyorsa veya hesaplanabiliyorsa, yukarıdaki denklemin entegrali alınarak emniyetli çevrim sayısı bulunabilir.

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A(\Delta K)^m}$$

Burada;  $\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$  olduğu unutulmamalıdır.





Şekil 6.18. Çatlaklı malzemelerde yorulma çatlak ilerleme hız [Asphy]

### 6.10. Yorulmada toplam hasar kavramı (Miner kuralı)

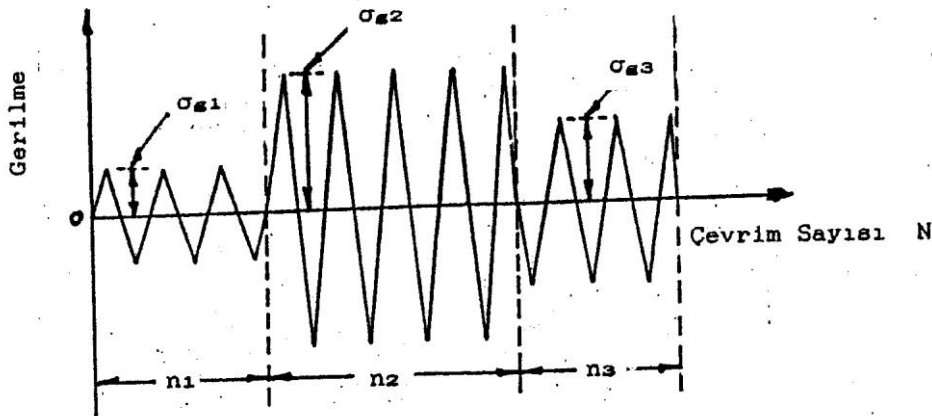
Çoğu gerçek durumda olduğu gibi, bir makine parçasının farklı zamanlarda değişik süreler boyunca gene farklı gerilme genliklerinde çalıştığı düşünüldüğünde, hasarın ne zaman oluşabileceğinin belirlenmesi için **Miner Kuralı** adı verilen bir yöntemden yararlanılmaktadır. Bunun için parçanın aşağıdaki gibi bir zorlanmayla karşı karşıya olduğu düşünülürse, Miner kuralı;

$$(n_1/N_1) + (n_2/N_2) + \dots + (n_k/N_k) = 1$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\sigma_{gi}$  dinamik zorlanmada gerilme genliği değerleri,  $N_i$  bu gerilme genliğinde elde edilecek yorulma hasar çevrim sayıları (yorulma ömrü),  $n_i$  ise  $\sigma_{gi}$  gerilme seviyesinde uygulanan çevrim sayılarıdır. Daha genel hali ile bu kural,

$$\sum_{i=1}^k (n_i / N_i) = 1$$

Şeklinde ifade edilmekte olup, aslında belirli bir gerilme genliği uygulanan çevrim sayısının o gerilme için geçerli olan hasar ömrüne oranlarının toplamının yorulma hasarı oluşabilmesi için 1'e eşit olması gerektiğini vurgulamaktadır.



Şekil 6.19. farklı gerilme genliklerine maruz kalan makine elemanlarında toplam hasarın belirlenmesi [Demirkol, not]

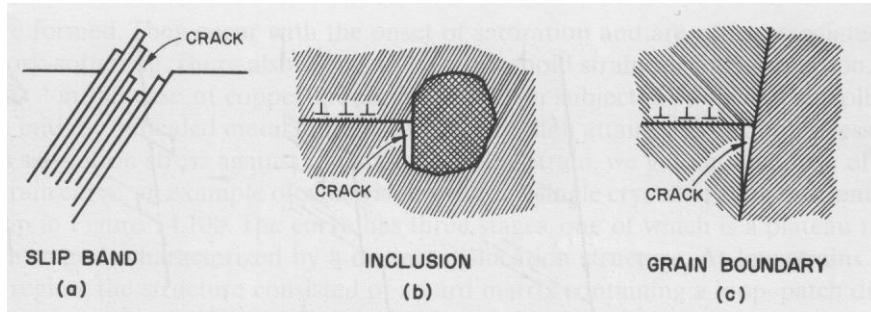
### 6.11. Yorulma hasarı mekanizması

Yorulma üzerinde yapılan çalışmalar, yorulma hasarı oluşum mekanizmasının dört değişik safhada meydana geldiğini göstermiştir. Bunlar;

1. Çatlak oluşumu,
2. Çatlağın ilk aşamada kayma bantları boyunca ilerlemesi,
3. Çatlağın gerilmeye dik olarak ilerlemeye devam etmesi,
4. Zorunlu kırılma.

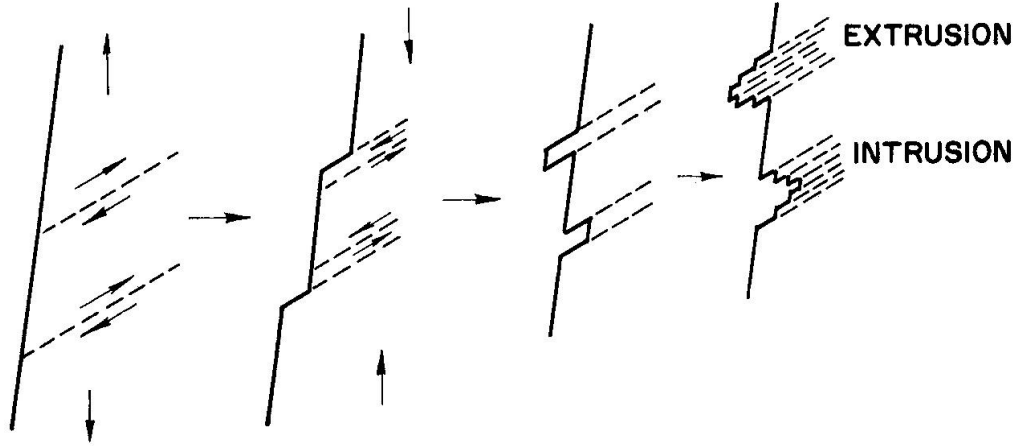
Yorulma çatlağı genellikle yüzeyde başlamaktadır. Çünkü gerilmenin en büyük değeri yüzeyde oluşmaktadır. Yüzeyler dış etkilere açıktır ve çevrimsel zorlanmanın kristal içerisindeki kayma hareketleri yüzeyde son bulmaktadır.

Öte yandan Ti, Mg ve onların alaşımları gibi sıkı düzenli hegzagonal (SDH) yapıli malzemelerdeki ikiz sınırları (twin boundaries) önemli bir çatlak başlangıcı oluşturabilir. Ticari saflıktaki Al, yüksek dayanımlı çelik ve polimerik malzemelerde inklüzyonlar ve ikinci faz parçacıkları da önemli bir çatlak başlangıcı teşkil edebilirler. Tane sınırları özellikle yüksek sıcaklıklarda ( $0.5T_m$ 'in üzerinde) ve büyük şekil değiştirme aralıklarında çatlak başlangıcını teşkil edebilirler. Ayrıca, bu sınırlarda gevreklik oluşturan çökeltilerin bulunması durumunda bu olay hızlanmaktadır. Bu tür ikincil bazı çatlak oluşum mekanizmaları aşağıda verilmiştir.

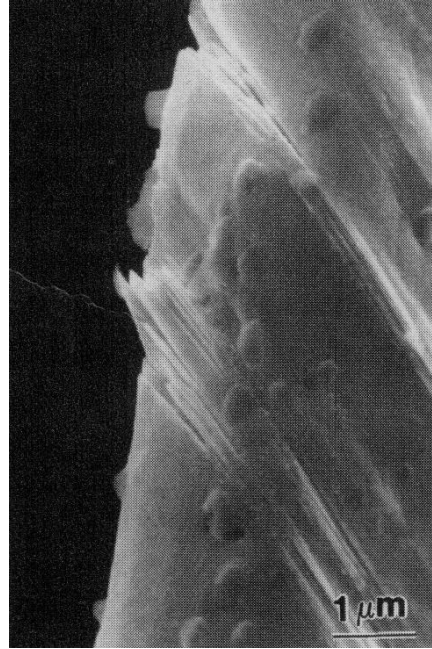


Şekil 6.20. Bazı yorulma çatlağı oluşum mekanizmaları. (a) kayma bantları, (b) inklüzyonlar ve (c) tane sınırları.

Yüzeyde çatlak oluşumundan önce mikro ölçekte plastik şekil değişimlerinden kaynaklanan “kararlı kayma bantları (Persistent slip bands)” meydana gelmektedir. Gerilemenin yön değiştirmesiyle bantlardaki kayma olayı bir takım yan etkilerden dolayı tam anlamıyla geri dönememekte, böylece malzeme yüzeyinde girinti (intrusion) ve çıkıntı (extrusion)’lara neden olmaktadır. Atomik mertebedeki bu yüzey pürüzlülüğü zorlanmalar sırasında gerilme yığılmalarına neden olmakta ve bunun neticesinde büyük değerlere ulaşan gerilmeler yorulma çatlağının çekirdekleşmesini sağlarlar. Bu mekanizma toplam yorulma ömrünün %10’unu kapsamaktadır.

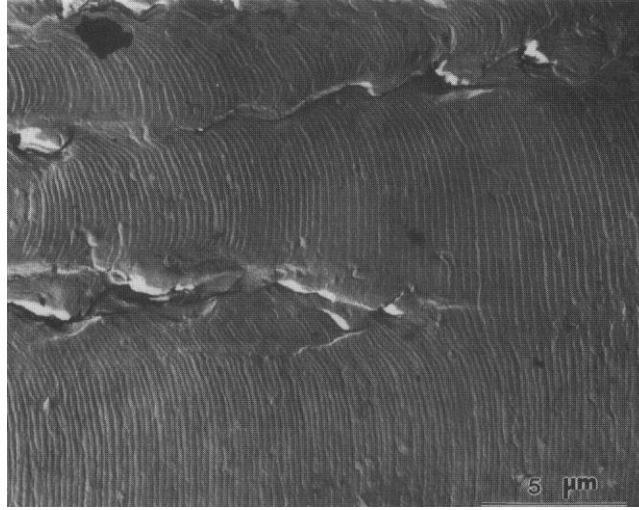


Şekil 6.21. Kayma bantlarında yorulma çatlaklarının çekirdeklenmesi [Meyers]

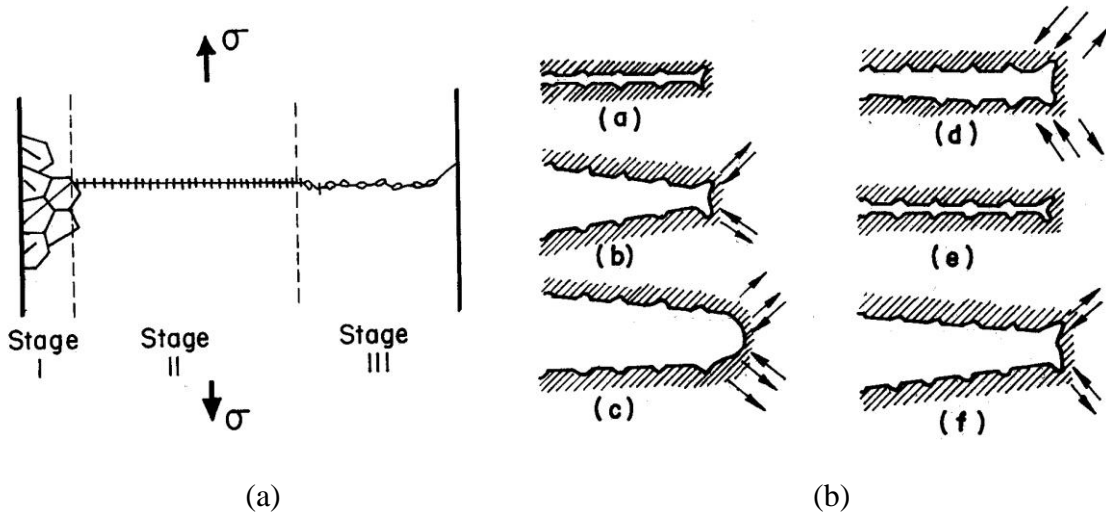


Şekil 6.22. Bakır levhada yorulma deneyi sırasında oluşan girinti ve çıkıntıların görünümü [Meyers]

Oluşan mikro çatlaklar önce kayma bantları boyunca ilerler. Bu ilerleme genellikle uygulanan gerilmenin yönü ile yaklaşık  $45^\circ$  lik bir açı yapar ve bir veya iki tane boyunca bu şekilde gelişimini sürdürür. Bundan sonra çatlak gerilme yönüne dik gelecek şekilde ilerlemeye başlar ve kararlı çatlak ilerleme safhasını oluşturur. Kararlı çatlak ilerleme safhasında yorulma yüzeyinde striasyon çizgileri (striation markings) oluşur. Çatlak açılma safhasında kayma mekanizması yardımıyla bir miktar uzamakta, bu sırada çatlak dibindeki plastik şekil değişimi neticesinde burada körelme (blunting) gerçekleştiğinden gerilme şiddeti azalmakta ve ilerleme durmaktadır. Ancak kapanma sırasında çatlak dibi bu defa keskinleşmekte ve takip eden açılma sırasında gerilme yığılmasını tekrar artırarak çatlakın ilerlemesine neden olmaktadır (Şekil 7. 23(b)). Bu olay her çevrim sonunda tekrarlanmakta olup yorulma striasyonlarının oluşumu da bu şekilde açıklanmaktadır.



Şekil 6.23. 2014-T6 Al alaşımında striasyon çizgilerinin görünümü [Meyers]



Şekil 6.24. Çatlak oluşumu ve ilerlemesi. (A) Çatlağın üç aşamalı ilerleyişi, (b) Çatlağın plastik körelme mekanizmasıyla ilerlemesi [Meyers]

### 6.13. Yorulmayı etkileyen faktörler

Bir makine elemanının yorulmaya karşı emniyetli olabilmesi için işletme sırasında doğabilecek anma gerilmelerinin malzemenin yorulma dayanımının altında seçilmesi yeterli olmayabilir. Diğer bir deyişle, zorlanma şartları gerek malzemenin yorulma dayanımını indirgeyici, gerekse gerilme genliğini arttırıcı bazı faktörleri de içerebilir. Bu faktörler;

#### a) Yorulma Dayanımını İndirgeyici Etkisi Olan Faktörler

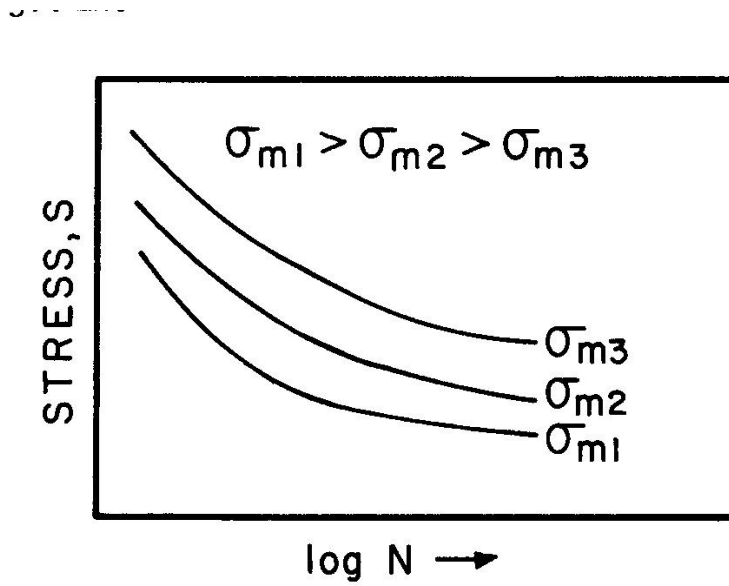
1. Ortalama gerilme
2. Boyut
3. Yüzey durumu
4. Kesit biçimi

#### b) Gerilme Genliğini Arttırıcı Etkisi Olan Faktörler

1. Darbeli yükler
2. Çentik etkisi

### 6.13.1. Ortalama Gerilmenin Etkisi

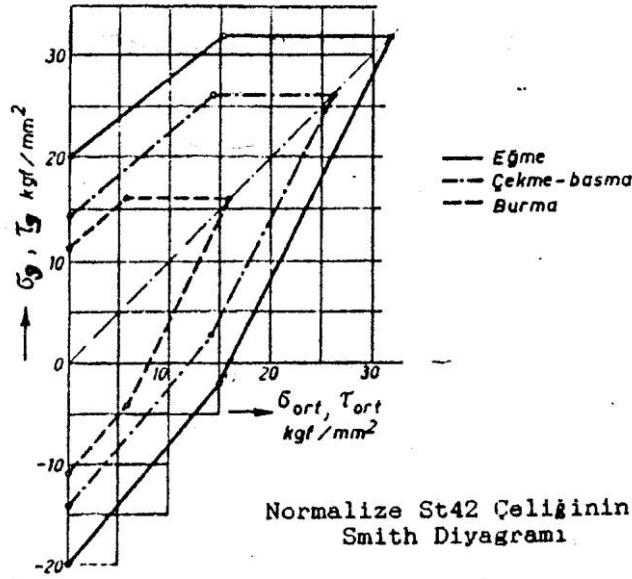
Yorulmaya değişen gerilme genliği yol açar. Literatürdeki malzemelere ait yorulma sınırını veya dayanımını veren verilerin büyük çoğunluğu değişken yorulma zorlanması  $\sigma_{ort}=0$  için tayin edilmiş  $\sigma_G$  değerlerini içermektedir. Ancak gerçek gerilme zorlamaları ideal durumdan farklılıklar göstermektedir. Özellikle işletme şartlarında malzemeye gerilme genliğinin yanı sıra ortalama gerilmenin de etkidiği görülmektedir. Çoğunlukla ortalama gerilmenin pozitif olduğu durumda basma yönündeki ortalama gerilmelerden daha tehlikeli durumlar ortaya çıkardığı bilinmektedir. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi genellikle ortalama gerilme arttıkça yorulma ömrü azalmaktadır.



Şekil 6.25. Ortalama gerilmenin malzemelerin S-N eğrisi üzerindeki etkisi [Meyers]

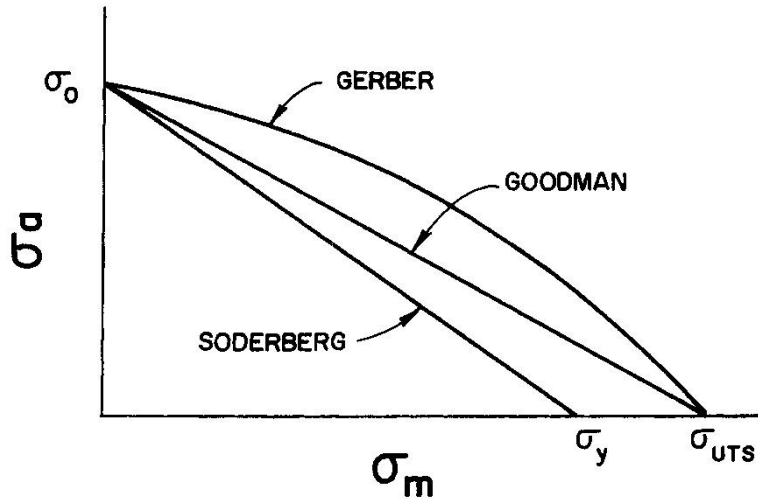
Ortalama gerilmenin varlığı durumunda yorulma dayanımı olarak tanımlanan  $\sigma_G$  değerinin hangi değere indirgeneceğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu iki yaklaşımla gerçekleştirilir.

1. Yorulma deneyleri sonunda elde edilen verilerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen ve “Smith Diyagramları” adı verilen grafiklerden bu bilgi doğrudan elde edilebilir. Bunun için malzemenin yapısına (sertleştirilmiş, tavllanmış vb.) ve zorlanma şekline uygun (çekme-basma, eğme veya burulma) Smith diyagramlarının elde edilmesi gerekmektedir. Uygulamada sık olarak kullanılan malzemeler için bu diyagramların bulunması oldukça kolaydır. Bu diyagramların uygun olanı seçildikten sonra yatay eksene ortalama gerilme yerleştirilir. Bu değerden dikey olarak dik çıkılır. Bu doğrunun, Smith diyagramını yukarıdan sınırlayan çizgisi ile merkezden geçen 45°'lik doğru arasında kalan bölüme indirgenmiş yorulma dayanımı veya sınırını belirlemektedir. Smith diyagramları yaygın bir gösterim biçimi olup, yorulma dayanımına ait alt ve üst gerilmelerin ortalama gerilme ile değişimini verir.



Şekil 6.26. Normalizir edilmiş St42 elliğinin Smith diyagramı [Demirkol-ders N.]

2. Bazı matematiksel ve grafik yöntemler kullanılarak, malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı gibi özelliklerden yararlanmak suretiyle, ortalama gerilmeden kaynaklanan yorulma dayanımının indirgenmiş değirlerini de bulmak mümkündür. Bu yöntemlerin en basiti "Soderberg Doğrusu" adını almakta ve yorulma dayanımının ortalama gerilmeyle değişimini malzemenin akma dayanımıyla ilişkilendirmektedir.



Şekil 6.27. Soderberg, Goodman ve Gerber Yaklaşımları [Meyers]

Matematiksel olarak indirgenmiş yorulma dayanımı  $\sigma_a$

$$\sigma_{Gin} = \sigma_0 \cdot (1 - \sigma_m / \sigma_{ak}) \quad (\sigma_0: \text{ortalama gerilmenin 0 olduğu durumdaki yorulma dayanımı})$$

şeklinde hesaplanabilir.

Bu şekilde kullanılabilen diğer bir yöntem de,

$$\sigma_{Gin} = \sigma_0 \cdot [1 - (\sigma_m / \sigma_c)^\alpha]$$

şeklinde ifade edilen ve  $\alpha=1$  için **Goodman doğrusu** ve  $\alpha=2$  için **Gerber parabolü** olarak adlandırılan yöntemdir. Gerber yöntemi daha çok sünek malzemeler için gerçeğe yakın değerler vermekle birlikte Goodman doğrusu daha konservatif bir yaklaşım içerdiği için ve yorulmanın doğasında var olan dağılım nedeniyle daha emniyetli olarak kabul etmekte ve tasarımlarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

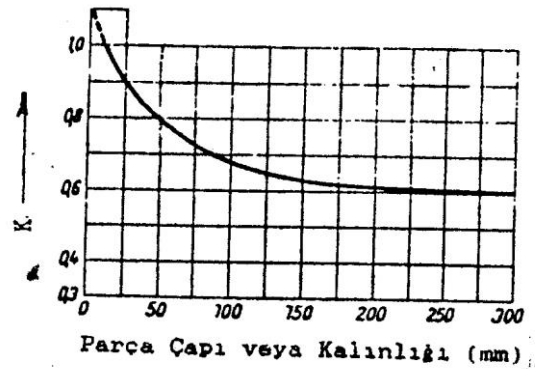
Bu yöntemlere ek olarak bir de malzemenin çekme, akma dayanımlarını beraberce içeren ve “Düzeltilmiş Goodman Diyagramı (Midified Goodman Diagram)” adı verilen bir yöntem daha vardır. Smith diyagramlarına çok benzemekle birlikte bu diyagramlar amprik ve tahmini karakter taşırlar.

Ortalama gerilmenin hesaplanması sırasında zorlanma şartlarından doğabilecek darbe etkisinin hesaba katılması gerekebilir. Diğer bir değişle ortalama gerilme, eğer bir darbeli zorlanma durumu varsa ilerideki bölümde açıklanacak olan  $\phi$  darbe etkisi katsayısı ile çarpılarak diyagramlardaki yerine konulmaktadır.

### 6.13.2. Boyut etkisi

Yapılan çalışmalar makine parçalarının boyutlarının, malzemenin eğme ve burulma yorulma dayanımlarını önemli oranda etkilediğini ortaya koymuştur. Parça büyüdükçe yorulma dayanımı azalmaktadır. Bu değişim, 10 ile 200 mm çap (ya da kalınlık) aralığında söz konusudur. Boyut etki katsayısı birden küçük bir değer içermekte olup K ile belirtilmektedir. Bu etki ile indirgenmiş yorulma dayanımı,

$\sigma_{Gin} = K \cdot \sigma_G$  değerine düşürmektedir.



Şekil 6.28. Parça çapı ve kalınlığı ile boyut etki katsayısı K'nın değişimi [Demirkol ders. Nor.]

Tablo 6.1. Boyut etki katsayısının değişimi [Dieter]

Çap (mm)	K
$D \leq 10$	1.0
$10 \leq D \leq 50$	0.9
$50 \leq D \leq 230$	$1-(D-0.76)/380$

Bu etki büyük kesitli parçaların yüzeylerinin daha büyük olması ve yorulmanın yüzeyde başlaması nedeniyle hasar oluşumunun daha çabuklaşabilmesi ve büyük kesitli parçalarda eğme ve burulma zorlanması nedeniyle oluşan gerilme gradyanının, yüksek gerilme altında bulunan hacim oranının artmasına neden olması şeklinde açıklanmaktadır.

### 6.12.3. Yüzey durumunun etkisi

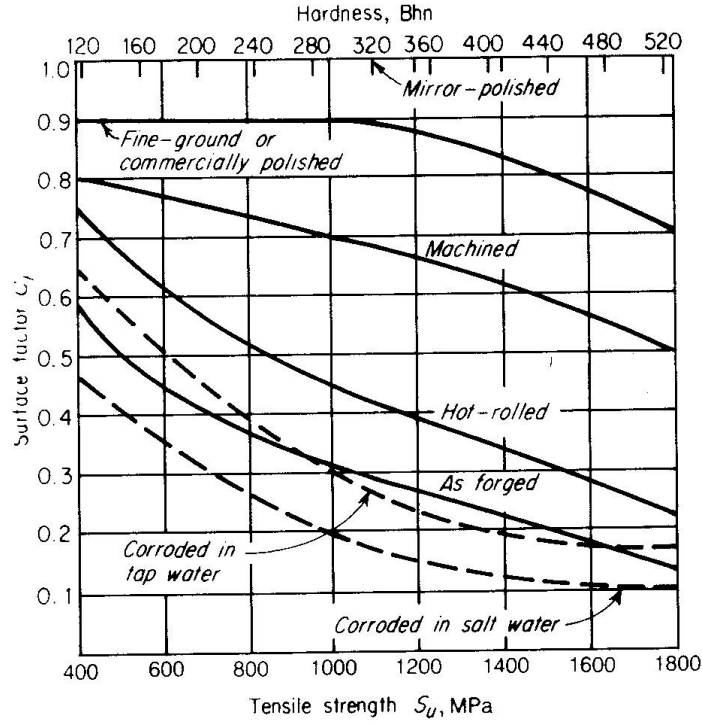
Gerek parçaların şekillendirilmesi, gerekse çalıştıkları ortam nedeniyle oluşan yüzey durumu ve yüzey kalitesi de yorulma dayanımı üzerinde etkin rol oynamaktadır. Yorulma olaylarında çatlak oluşumu genellikle yüzeyde başlar. Çünkü eğme ve burma gerilmelerinin uygulandığı durumlarda en büyük gerilme yüzeylerde oluşur. Eksenel gerilme halinde ise, gerilmenin tüm kesite üniform olarak dağılması beklenirken rastgele yönlendirilmiş çok taneli malzemelerde gerilme üniform dağılmayıp yüzeyde maksimum değerler alabilir.

Yüzeyde başlayan yorulma çatlaklarının kendisi de bir süre sonra çentik etkisi göstereceğinden gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlakın hızla ilerlemesine yol açacaktır. Bu nedenle malzemenin yorulma dayanımını artırmak büyük ölçüde yüzey çatlaklarının oluşumunu engellemek gerekir. Çatlakla engel olmak yüzey kalitesini iyileştirmekle olur. Literatürde yorulma dayanımı veya sınırı değerini veren tüm veriler yüzeyi parlatılmış deney parçalarından elde edilmiştir. Yüzey kalitesi azaldıkça veya pürüzlülük arttıkça yorulma dayanımının azaldığı görülür. Bu azalma malzemenin çekme dayanımı arttıkça daha belirginleşmektedir. Yüzey etki faktörü  $\Omega$  ile gösterilir ve yorulma dayanımını

$$\sigma_{Gin} = \Omega \sigma_G$$

değerine indirgemektedir. Demir ve çelikler için yüzey etki katsayısını belirlemede kullanılan diyagram aşağıda verilmiştir.





Şekil 6.29. Yüzey etki faktörünün yüzey kalitesi ve çekme dayanımı ile değişimi [Dieter]

Tablo 6.2. SAE 3130 çeliğinin yorulma ömrünün yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak değişimi [Dieter]

Yüzey işlemi	Yüzey pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )	Ortalama yorulma ömrü (çevrim)
Kaba işlenmiş	2.67	24000
Kısmen elle parlatılmış	0.15	91000
Elle parlatılmış	0.13	137000
Taşlanmış	0.18	217000
Taşlanmış ve parlatılmış	0.05	234000

Özellikle sert malzemelerde yüzeyin düzgünlüğü yorulma dayanımını büyük ölçüde artırmaktadır. Örneğin yüzeyi parlatılmış bir numunenin yorulma dayanım sınırı, tornada kabaca işlenmiş bir numuneye oranla %15-40 daha yüksektir. Yüzeydeki pürüzlülükler birer çentik etkisi yaparak, gerilme konsantrasyonuna ve dolayısıyla çatlak oluşumuna neden olmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünün yanında, yüzey sertliğinin de artırılması çatlama karşı direnci artıracığından, yorulma dayanımının artmasını sağlar. Çeliklerde, sementasyon, nitrürasyon ve benzeri yüzey sertleştirme işlemleri yorulma dayanımı açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Öte yandan karbon çeliklerinin tavlanması ve sıcak işlenmesi esnasında yüzeyde karbon azalması (dekarburizasyon) olur. Bu durum yüzeyde yumuşamaya ve sonuç olarak yorulma dayanımının düşmesine neden olur. Ancak, yüzey sertleştirme işlemleri sırasında, bu işlemlerin yanlış uygulamalarından kaynaklanabilecek çatlamalara (su verme çatlağı vb.) meydan verilmemesi gerekmektedir.

#### 6.13.4. Kesit biçiminin etkisi

Yorulma deneyleri genellikle dairesel kesitli numunelerle yapılmaktadır. Öte yandan, dikdörtgen kesitli numuneler üzerine yapılan deneyler, dikdörtgen kesitli parçaların yorulma dayanımlarının dairesel kesitli parçalara göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Kesit biçim faktörü,  $q$ , dairesel kesitli parçalar için 1, dikdörtgen kesitli parçalar için 0.8 olarak kabul edilmektedir. Bu durumda indirgenmiş yorulma dayanımı,

$$\sigma_{Gin} = q \cdot \sigma_G$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

#### 6.13.5. Darbe etkisi

Makine parçası darbeli yükler altında çalışıyorsa, gerilme genliğinde artış beklenmelidir. Bu durumda çevrimsel zorlanma sırasında oluşan gerilme genliği değeri darbe etki katsayısı  $\phi$  ile çarpılmalıdır. Diğer bir deyişle yükselmiş gerilme genliği değeri,

$$\sigma_{gyük} = \phi \cdot \sigma_g$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Değişik işletme şartları için geçerli olan darbe etki katsayıları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 6. 3. Darbe etki katsayısının darbe türüne göre değişimi

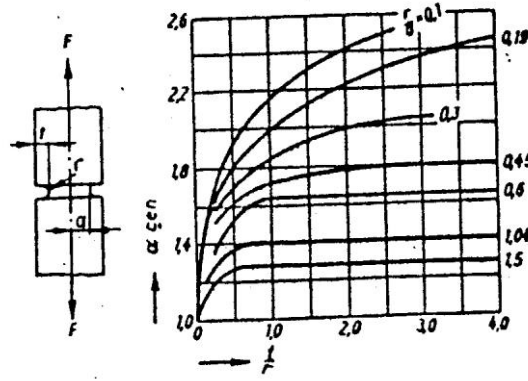
Darbe türü	Çalışma şartları	Darbe etki katsayısı ( $\phi$ )
Hafif	Buhar ve su türbinleri, kompresörler, elektrik makineleri, taşlama tezgahları	1.0-1.1.
Orta	Buhar makineleri, içten yanmalı motorlar, pistonlu kompresör ve pompalar, tornalar, planya ve hidrolik presler	1.2-1.5
Kuvvetli	Dövme presleri, abkant presler, makaslar, zımba makineleri, öğütücüler, çekme tezgahları	1.5-2.0
Çok kuvvetli	Şahmerdanlar, hadde tezgahları, taş kırıcılar	2.0-3.0

Not: Darbe etkisinin ortalama gerilmeyi de etkilediği unutulmamalıdır.

#### 6.13.6. Çentik etkisi

Parça kesitindeki ani değişimlerine çentik adı verilmektedir. Parça kesitinde çentik, delik ve ani değişimlerin bulunması yorulma dayanımı ve yorulma ömrünü büyük ölçüde azaltmaktadır. Çentikler malzemenin o bölgesinde etkin olan gerilmeleri artırarak çatlak başlangıcına neden olurlar. Yorulma zorlanmasında da bu etki aynı yöndedir. Diğer bir deyişle bu etki, etkin olan gerilme genliğinde artışa neden olurlar. Çentik etkisi çentiğin şekil ve boyutlarına bağlıdır. Makine parçalarındaki ani kesit daralmaları, yağ deliği, yolluk, vida dişi ve benzeri kısımlar daima çentik etkisi gösterirler. Bu parçaların dizaynında çentik etkisini minimuma indirecek uygun şekil ve boyutlar ile uygun imalat yöntemleri seçilmelidir.

Statik zorlanma durumları için çentiğin yol açtığı gerilme artışı çentik etki katsayısı  $\alpha_{çen}$  ile belirlenmekte olup bu değerler literatürde grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 6.30. Çentik etki katsayısının değişimi [Demirkol-d.not]

Örnek olarak yukarıdaki grafik, çekme gerilmesi altında çevresel u-çentiği içeren yuvarlak bir çubuk için çentik etkisi katsayısını çentik geometrisine bağlı olarak vermektedir. Burada R çubuğun yarıçapını, r çentik dibi radüsünü, t ise çentiğin derinliğini temsil etmektedir.

Yorulma zorlanmasında statik  $\alpha_{\text{çen}}$  değerleri geçerliliğini yitirmekte ve  $\beta_{\text{çen}}$  ile gösterilen yorulma çentik katsayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun elde edilmesi için iki yol izlenebilir.

### 1. Yorulma çentik katsayısı

$$\beta_{\text{çen}} = 1 + (\alpha_{\text{çen}} - 1) \cdot \eta_{\text{çen}}$$

formülü yardımıyla elde edilebilir. Ancak bu durumda  $\eta_{\text{çen}}$  ile ifade edilen ve bir malzeme özelliği olan çentik duyarlılık katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Aşağıda bazı malzemelere ait çentik duyarlılık katsayısı değerleri verilmiştir.

Tablo 6.4. Çentik duyarlılık katsayısının değişimi [Demirkol-ders.not]

Malzeme	Çentik duyarlılık katsayısı ( $\eta_{\text{çen}}$ )
St42 (1020)-Normalize edilmiş	0.40-0.70
St50 (1040)- Normalize edilmiş	0.50-0.85
St70 (1060)- Normalize edilmiş	0.55-0.85
Alaşımli yapı çelikleri- Normalize edilmiş	0.65-0.75
Alaşımli yapı çelikleri-İslah edilmiş	0.80-0.95
Yay çeliği-İslah edilmiş	0.95-1.00
Ostenitik çelikler	0.10-0.35
Hafifi metaller	0.40-0.80

Malzeme dayanımı arttıkça ve sünekliliği azaldıkça çentik duyarlılığı artmaktadır. Ancak görüldüğü gibi değerlerin büyük dağılım göstermesi nedeniyle gerçek değerlerin tam olarak belirlenememesi tehlikesi vardır.

## 2. Matematiksel formüller

Yukarıdaki zorluklar nedeniyle Bollenrath ve Troost tarafından yorulma çentik katsayısının belirlenmesinde aşağıdaki formüller önerilmiştir.

a) Çekme-basma türü zorlanmalar için:

$$\beta_{\text{çen}} = \alpha_{\text{çen}} \left( 1 - \frac{\frac{1540}{\sigma_{\text{ç}}}}{\frac{1}{1 + \frac{\sigma_{\text{ç}}}{13700}} + r} \right)$$

Burada r çentik dibi radüsünü,  $\alpha_{\text{çen}}$  statik çentik etki katsayısını,  $\alpha_{\text{ç}}$  malzemenin çekme dayanımını temsil etmektedir.

b) Eğme türü zorlanmalar için:

$$\beta_{\text{çen}} = \alpha_{\text{çen}} \left( 1 - \frac{\frac{1540}{\sigma_{\text{ç}}}}{\frac{1}{1 + \frac{\sigma_{\text{ç}}}{13700}} + \frac{1}{1 + \frac{r}{2.3R}}} \right)$$

Burada R eğmeye çalışılan parçanın yarıçapını veya yassı çubuğun yarı kalınlığını ifade etmektedir. Bu amprik bağıntıların kullanılmasında çekme dayanımının  $\text{kg.f/cm}^2$ , boyutların ise cm olarak seçilmesine dikkat edilmelidir. Bu yöntemden uygulamalarda daha çok yararlanılmaktadır. Çünkü malzemenin çentik duyarlılığı çekme dayanım değerlerini de içermekte olup gerçeğe daha yakın değerler vermektedir.

### 6.14. Yorulmada emniyet katsayısı

Çevrimsel zorlanmalar altında çalışan makine parçalarında malzemenin yorulma dayanımı veya sınırı  $\sigma_G$  ve zorlanmanın gerilme genliği  $\sigma_g$  yardımıyla emniyet katsayısı,

$$\gamma = \sigma_G / \sigma_g$$

olarak tanımlanır. Ancak, boyut, yüzey şartları, darbe, çentik, ortalama gerilme ve kesit biçimi gibi etkiler göz önüne alındığında yorulma dayanımı  $\sigma_G$  yerine boyut, yüzey, biçim ve ortalama gerilme etkilerinden dolayı indirgenmiş yorulma dayanım değeri  $\sigma_G'$  esas alınarak yorulma emniyet katsayısı,

$$\gamma = \sigma_G' / \sigma_g'$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Bu etkilerden dikkate alınmaması gerekenler varsa ilgili katsayısı 1 olarak kabul edilir. Böylece en genel durum için yorulma emniyet katsayısı,

$$\gamma = \frac{\sigma_G \cdot K \cdot q \cdot \Omega}{\sigma_g \cdot \Phi \cdot \beta_{\zeta en}}$$

şeklinde yazılabilir. Ortalama gerilmenin etkisi söz konusu ise  $\sigma_G$  yerine diyagramdan elde edilmiş indirgenmiş yorulma dayanımı değerleri kullanılmalıdır.

Tasarımlarda yorulma emniyet katsayısının seçilmesinde genel olarak şu faktörler göz önünde bulundurulur.

1. Zorlanmanın seviyesi, zamanla değişimi ve bunların tahmininde gerçeğe yakınlık,
2. Malzemenin iç yapısı, homojenliği, anizotropisi, artık gerilme durumu vb.,
3. Tasarımı yapılan parçanın imalat teknolojisine olan hakimiyet,

Bütün bu faktörler tam olarak belirlenebilmişse, ayrıca buna benzer parçalarda edinilmiş deneyimler varsa ve de bir hasar oluşması ile teknik ve ekonomik bir facia doğması tehlikesi yoksa yorulma emniyet katsayısı genellikle 1.5-2.0 arasında seçilir. Etkiyen faktörler kesin olarak belirlenemiyorsa bu değerler daha yüksek seçilmesi gerekir. Can emniyetinin söz konusu olduğu tasarımlarda ise emniyet katsayısı 2.0-5.0 arasında seçilir.

### 6.15. Çok eksenli gerilme hali

Makine parçalarına yorulma zorlanması sırasında birden fazla gerilmenin etkimesi sonucunda bunların oluşturduğu efektif gerilmenin saptanmasında değişik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Örneğin sünek malzemeler için Deformasyon Enerjisi (Von Misses) Kriteri kullanılarak saptanan efektif gerilme değerinin daha iyi sonuç verdiği öne sürülmektedir. Dolayısıyla sünek ve tok malzemeler için efektif gerilme,

$$\bar{\sigma} = 1/\sqrt{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Gevrek malzemeler için en büyük asal gerilmenin efektif gerilme olarak alınması daha uygun sonuçlar vermektedir. Bu malzemeler için efektif gerilme,

$$\bar{\sigma} = \sigma_1$$

şeklinde saptanmaktadır.

Ayrıca normal ve kayma gerilmelerinin aynı anda etkimesi durumunda yorulma analizine esas olacak gerilmenin saptanması için,

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

bağıntısından yararlanılabilir.

### 6.16. Yüzey sertliğinin etkisi

Yorulma çatlakları yüzeyde oluştuğu için yüzey şartlarının yorulma ömrünün artırılıp azaltılmasında büyük önemi vardır. Nitrüleme, sementasyon gibi yüzey sertleştirme yöntemlerinin uygulanması yorulma dayanımının artırılmasını sağlamakta, dekarbürizasyon

gibi yüzeyde yumuşamaya neden olan işlemler neticesinde ise yorulma dayanımı azalmaktadır. Ancak yüzey sertleştirme işlemleri sırasında bu işlemin yanlış uygulanmasından kaynaklanan çatlamalara (su verme çatlama v.b.) meydan verilmemesi gerekmektedir.

### **6.17. Artık gerilmelerin etkisi**

Makine parçalarının üretimleri sırasında bünyelerinde oluşabilecek artık gerilmeler, işletme gerilmeleri yönünde ise yorulma ömründe önemli azalmalara neden olur. Ancak, işletme gerilmesinin ters yönünde bir artık gerilme malzeme bünyesinde oluşturulmuş ise bu defa ömürde bir artış söz konusu olacaktır. Çünkü gerilmelerin vektörel olarak toplanabilmesi esasına göre işletme sırasında oluşacak gerilmeler önce artık gerilmelerin üzerine çıkmaya çalışacağından gerçek değerinde azalmaya uğrayacak, bu ise yorulmaya neden olan gerilme genliğinin daha düşük seviyede kalmasına neden olacaktır.

Endüstriyel uygulamalarda bu etkiden çok yaygın olarak yararlanılmaktadır. Yorulmaya çalışan makine parçalarının sadece yüzeyleri ve yüzeye çok yakın bölgeleri bilye püskürtülerek plastik deformasyona uğratılmaktadır. Bu işleme “Bilya Püskürtme (Shot Peening)” adı verilmekte olup sonuçta malzeme yüzeyinde basma yönünde artık gerilme oluşturulmaktadır. Böylece çekme zorlanmaları altında yorulmaya çalışan makine parçalarının ömürlerinde 2-10 misline varan artışlar sağlanmaktadır. Ancak bilyalama işleminin kontrollü yapılması gerekmektedir. Bu işlemin şiddetini sayısal olarak belirlemede Almen Deneyi adı verilen bir yöntemden yararlanılmaktadır.

### **6.18. Yorulmaya etki eden metalurjik faktörler**

Metallerin yorulma özellikleri yapıları ile doğrudan ilişkili olmasına rağmen metalurjik yöntemlerle yorulma özelliklerinin iyileştirilmesi çabaları çok sınırlı gelişmeler sağlamıştır. Bu konudaki gelişmeler daha çok, tasarımlarda çentik etkisi yapabilecek bölgelerdeki gerilme şiddetlerinin azaltılması, artık gerilmelerden yararlanılması ve yüzey sertleştirme yöntemlerinin uygulanmasından elde edilmiştir.

Genellikle malzemenin statik çekme dayanımı arttıkça, malzemenin yorulma dayanım sınırı da yükselir. Demir esaslı metal ve alaşımlar için yorulma dayanımının çekme dayanımına oranı %50 mertebelerinde iken, demir dışı metal ve alaşımlar için bu oran %35 seviyelerinde kalmaktadır. Sadece akma dayanımındaki artışın da yorulma özelliğini artırmadığı üzerinde de bileşilmektedir. Çekme dayanımını artırmadan sadece yorulma dayanımını artıran bir alaşım elementi yoktur.

Metallerin alaşım sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesine uğratılması yorulma özelliklerinin de gelişmesine neden olmakta, ancak bu gelişme çekme dayanımlarındaki artışa paralel olarak gelişmektedir.

Basit karbonlu çeliklerde kaba perlitten oluşan yapı sertlik ve dayanım özellikleri açısından önemli bir fark yaratmamakla beraber, yorulma dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu perlitteki kaba karbür lamellerinin yapıda çentik etkisi göstermesine bağlanmaktadır.

Yorulma dayanımının malzemenin çapraz kayma yeteneği ile doğrudan ilişkili olduğu gözlenmiştir. Kolay çapraz kayabilen yüksek dizi hatası enerjisine sahip metaller, dislokasyonlara engeller etrafında rahat hareket etme sağlamakta, bu ise kayma düzlemi oluşumunu, dolayısıyla çatlak oluşumunu hızlandırmaktadır. Bu tür kaymaya Dalgalı Kayma (Wavy-slip) denilmektedir. Düşük dizi hatası enerjisine sahip metallerde ise çapraz kayma kolay kısıtlandığından çatlak oluşumu da gecikmekte, bu da yorulma dayanımının artmasını

sağlamaktadır. Bu malzemelerde görülen kayma türü Düzlemsel Kayma (Planar-slip) adını almaktadır.

Düşük gerilmelerin söz konusu olduğu yorulma zorlanmalarında tane büyüklüğü, çatlağın oluşum ve ilerleme safhalarında etkili olmaktadır. Daha çok düzlemsel kayma gösteren düşük dizi hatası enerjisine sahip metallerde görülen bu etki, yorulma dayanımının tıpkı statik çekme dayanımında olduğu gibi tane büyüklüğünün kare kökü ile ters orantılı olduğu şeklinde açıklanmaktadır.

Genel olarak ıslah edilmiş yapıya sahip çelikler dayanım, süneklik ve yorulma dayanımı açısından optimum sonuçlar vermektedir. Ancak 40 RSD-C sertliği civarında ostemperleme (Austempering) ile elde edilen beynitik yapı aynı sertlik ve statik dayanıma sahip olmasına rağmen temperlenmiş martanzitik yapıya oranla daha üstün yorulma özellikleri vermektedir. Bu ise beynitteki karbür tabakasının çok ince ve sürekli olmaması neticesinde daha az çentik etkisi yapmasıyla açıklanmaktadır. Isıl işlem uygulanacak çelik parçalarda alaşım elementinin en önemli rolü çeliklerin su alma derinliğini artırarak, sertliğin yüzeyden itibaren daha derin kısımlara kadar artmasını sağlamak ve dolayısıyla yorulma dayanımını artırmaktadır.

Sünek malzemelere uygulanan son mekanik işlemlerin de yorulma dayanımında etkisi vardır. Soğuk işlem ile sertliği ve yüzey düzgünlüğü artırılan malzemenin yorulma dayanımı, sıcak işlem görmüş aynı malzemeye oranla daha yüksektir.

Yüksek dayanımlı metal ve alaşımların yorulma dayanımları yüzey şartlarına ve (pürüzlülük), artık gerilmelere ve özellikle yapıdaki empüritilere çok bağlıdır. Yüksek dayanımlı çelikler, özellikle yorulmaya çalışması beklenenler empüritilerden arındırılmış olarak üretilmelidir. Bu ise vakumda ergitme, curuf altı ergitme veya döküm sırasında argon veya azotla yıkamak gibi yöntemlerin uygulanmasıyla sağlanabilmektedir. Böyle üretilmiş çeliklere literatürde temiz çelik (clean steel) adı verilir. Rulman çelikleri bu tip çeliklere iyi bir örnektir.

Konvansiyonel yöntemlerle üretilen çeliklerde yapılan çalışmalar, metalin şekillendirme yönüne dik doğrultuda yorulma dayanımının paralel yönündekinin yaklaşık %60-70 i olduğunu ortaya koymuştur. Bu da empüritilerin deformasyon yönünde uzaması ve enine yönündeki zorlanmalarda keskin çentik etkisi yaratmasıyla açıklanmaktadır.

Demir ve titanyum alaşımlarında görülen yorulma sınırı, yapıda var olan ara yer atomlarına bağlanmaktadır. Mikro seviyede bile olsa deformasyon yaşlandırması oluşturabilen metal ve alaşımlar yorulma sınırı özelliği de göstermektedir.

Metal yapısının gerek fazlar, gerekse deforme olan bölgeler açısından homojensizlik göstermesi yorulma dayanımını azaltıcı yönde etki yapmaktadır. Özellikle karbürlerin tane sınırlarına çökelmiş olması ve artan karbür tanesi büyüklüğü yorulma dayanımını ters yönde etkileyen faktörlerdendir.

### **6.19. Yorulmaya sıcaklığın etkisi**

Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Ancak bu durum malzemenin çentik hassasiyetini de artırmaktadır. Sıcaklık azaldıkça yapıdaki ısıl aktivasyonun neden olduğu olaylar gerektiği gibi gerçekleşemezler. Dolayısıyla boşluk oluşumu ve ara yer atomlarının hareketleri de sınırlanmış olur. Bu ise malzemenin şekil değiştirme yeteneğini kısıtlar ve sonuçta malzemenin dayanımını artırır. Yorulma dayanımı da bu değişime paralel olarak sıcaklık düşüşü ile artış gösterir. Ancak yüksek frekanslı zorlanmalarda darbe etkisi söz konusu olduğunda çatlak ilerlemesi safhasında daha düşük ömür beklenmelidir.

Oda sıcaklığının üzerinde ise genellikle sıcaklık yükseldikçe yorulma dayanımı düşmektedir. Sadece düşük karbonlu çeliklerde 200-300°C arasındaki sıcaklıklarda yorulma

dayanımında artış görülür. Bu olay bu aralıkta söz konusu çeliklerin deformasyon yaşlanmasına uğrayarak çekme dayanımının artmasına bağlıdır. Yüksek sıcaklıklarda, çapraz kayma ve tırmanma gibi mekanizmalarında devre girmesi neticesinde dayanım düşer ve buna paralel olarak da yorulma dayanımı da azalır. Sıcaklık çok arttığında ( $T_b > 0.5$ ) artık sürünme olayı etkili olmaya başlar ve kopma daha çok sürünme sonucunda gerçekleşir. Bu durumda kopma yorulmadan çok sürünme ile gerçekleşir. Bu iki olayı birbirinden ayıran kırılma türüdür. Yorulma kırılması tane içinden (transgranüler), sürünme kırılması ise tane sınırlarından (intergranüler) olmaktadır.

Demir esaslı alaşımlarda görülen yorulma sınırı özellikle  $430^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda artık gözlenmez. Malzemelerin sürünme dayanımı arttıkça, yüksek sıcaklıktaki yorulma dayanımı da artar. Tane boyutu küçüldükçe, düşük sıcaklıktaki yorulma dayanımı da artmaktadır. Sıcaklık arttıkça bu fark azalmakta ve yüksek sıcaklıklarda ise sürünme etkisinden dolayı tane boyutu küçüldükçe yorulma dayanımı da düşmektedir.

## 6.20. Diğer yorulma türleri

### 6.20.1. Isıl yorulma (thermal fatigue)

Makine parçalarının kullanılma esnasında sıcaklık değişimlerine uğramaları, ısıl gerilmelere yol açarak yorulmaya neden olabilirler. Sıcaklık değişimleri sırasında parçanın boyut değiştirmesi herhangi bir şekilde sınırlanırsa parçada iç gerilmeler oluşur. Sıcaklığın  $\Delta T$  kadar değişmesiyle malzemede oluşan iç gerilme,

$$\sigma = \alpha.E.\Delta T$$

seviyesinde oluşacaktır. Burada;  $\alpha$  lineer ısıl genleşme katsayısı, E malzemenin elastisite modülüdür. Sıcaklık azalmasında bu gerilme pozitif yani çekme yönünde, sıcaklık artışında ise negatif yani basma yönünde oluşacaktır. Ostenitik paslanmaz çeliklerde ısı iletim katsayısı küçük, ısıl genleşme katsayısı büyük olduğundan bu malzeme termal yorulma olayına karşı çok duyarlıdır.

Hasar ısıl gerilmenin tek bir uygulaması sırasında oluşursa bu Isıl Şok (Thermal shock), çok sayıda tekrar sonrasında oluşursa Isıl Yorulma adını alır. Bu tür yorulma daha çok yüksek sıcaklık teçhizatlarının parçalarında görülür.

### 6.22.2. Kısa ömürlü yorulma (low cycle fatigue)

Yorulma deneyleri genellikle  $10^4$  çevrimden sonra tahribat (çatlama veya kırılma) gösterecek gerilme koşullarında incelenmektedir. Mühendislik uygulamalarında ise nispeten yüksek gerilme altında (akma gerilmesinden daha yüksek gerilmeler altında), küçük çevrim sayılarında tahribata uğrayan parçalara rastlanmaktadır. Bunlara örnek olarak nükleer endüstrisinde kullanılan basınçlı kaplar, buhar kazanları, kuvvet santrallerindeki makineler gösterilebilir. Buralarda yorulma olayına genellikle ısıl gerilmeler neden olmaktadır. Isıl gerilmeler, ısıl genleşmelerden (gerilim çevriminden) çok deformasyon değişimleri (deformasyon çevrimleri) söz konusudur. Bu nedenle, kısa ömürlü yorulma uzun ömürlü yorulmanın aksine gerilme genliği ile değil birim şekil değişimi genliği ile kontrol edilmektedir.

Kısa ömürlü yorulmada toplam birim şekil değişimi, elastik ve plastik olmak üzere iki bileşene ayrılır.

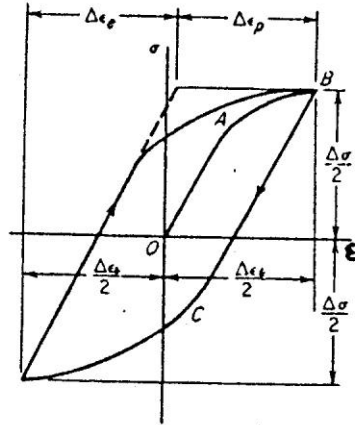
$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$



Aynı şekilde toplama genleme alanı da,

$$\Delta \varepsilon_t = \Delta \varepsilon_e + \Delta \varepsilon_p$$

şeklinde ifade edilmektedir. Aşağıdaki şekilde, küçük çevrim sayılı yorulma deneyine ait tipik bir gerilme-deformasyon çevrimi görülmektedir. İlk yüklemde gerilme-deformasyon eğrisi OAB eğrisini izler. Çekme yönündeki yük boşaltılıp, basma yönündeki yük uygulandığında Bauschinger etkisinden dolayı akma olayı daha küçük C gerilmesinde görülür. Tekrar çekme yönünde yük uygulandığında histerizis çevrim tamamlanır. Çevrimde,  $\Delta \varepsilon$  genişliği toplam deformasyon aralığını,  $\Delta \sigma$  yüksekliği ise gerilme aralığı olarak tanımlanır.  $\Delta \varepsilon$  toplam deformasyon aralığı,  $\Delta \varepsilon_e = \Delta \sigma / E$  gibi bir elastik deformasyon ile  $\Delta \varepsilon_p$  gibi bir plastik deformasyondan oluşur. Histerizis çevrimin genişliği deformasyon miktarına bağlıdır. Deformasyon miktarı azaldıkça çevrimin genişliği daralır. Sabit deformasyonlar altında yapılan deneylerde  $\Delta \sigma$  gerilme aralığı genellikle çevrim sayısının artması ile değişim gösterir. Tavlanmış malzemelerde çevrim sayısı arttığında deformasyon sertleşmesi olacağından  $\Delta \sigma$  gerilme aralığı önce sürekli artar, ancak yaklaşık 100 çevrimden sonra bu artış durur ve hatta azalmaya başlar. Soğuk işlem görmüş malzemelerde ise çevrim sayısı arttıkça malzeme yumuşama gösterir ve  $\Delta \sigma$  azalır.



Şekil 6.30. sabit deformasyon değişimine ait gerilme-deformasyon çevrimi [Kayalı]

Bu tür yorulma sırasında uygulanan plastik birim şekil değişimi aralığı değerleri ile yorulma ömrü arasında üstel bir ilişki vardır. Literatürde Coffin-Manson bağıntısı adını taşıyan bu ilişki,

$$N^\alpha \cdot \Delta \varepsilon_p = C$$

veya

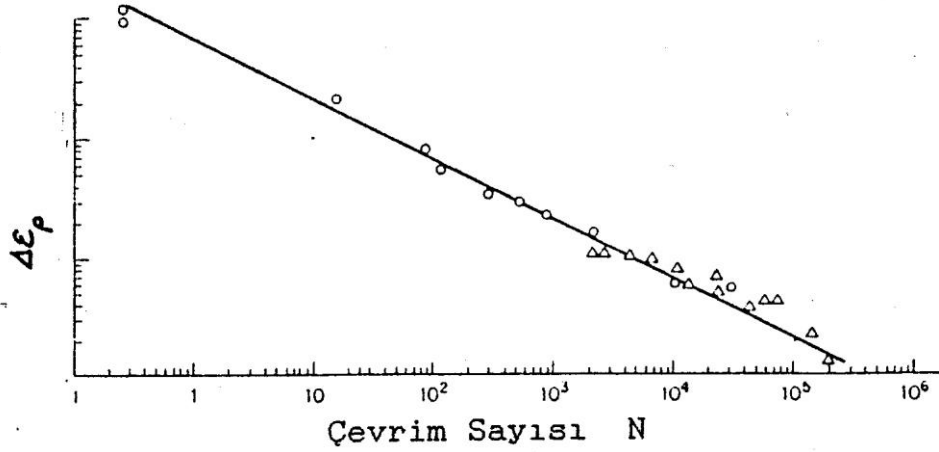
$$\Delta \varepsilon_p = C \cdot N^{-\alpha}$$

şeklinde ifade edilmekte olup bu bağıntı logaritmik skalada bir doğru denklemi vermektedir.

Burada;

$\alpha$ : Doğrunun eğimi,

C: Doğrunun düşey eksenini kestiği noktadır. Bunların her ikisi de birer malzeme sabiti olup, hemen hemen tüm metaller için  $\alpha \approx 0.5$  değerini almaktadır. Dolayısıyla C değeri büyük malzemelerin kısa ömürlü yorulma dayanımları daha fazla olmaktadır.



Şekil 6.32. SAE 347 paslanmaz çeliğinin küçük çevrim sayılı yorulma deneyi eğrisi [Kayalı]

#### 6.20.4. Korozyonlu yorulma (Corrosion fatigue)

Normal koşullarda, yorulma olayında çatlak oluşumu genellikle yüzeyde başlar. Bu yüzeyin temas ettiği ortam malzemenin yorulma özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Örneğin, yüzeyi yağ ile kaplanan ve bu sayede hava ile teması kesilen kurşunun yorulma ömrü 10 kat artmaktadır.

Malzemeye çevrimsel gerilmenin kimyasal olarak saldırgan bir ortamda etkimesi sonucunda koproyonlu yorulma olayı meydana gelir. Malzemenin yorulma davranışı böyle ortamlarda önemli ölçüde azalır ve çatlak ilerleme hızlarında çok büyük artışlar görülür. Yorulma sınırı gösteren malzemeler saldırgan ortam içerisinde bu özelliklerini yitirirler. Korozyif ortam malzemelerin yorulma çatlak oluşum safhasından çok yorulma çatlak ilerleme safhasında etkilidir. Çok kaba olarak yorulma hasar ömürlerinde yarı yarıya azalmalar beklenmelidir. Bu tür yorulmaya karşı alınabilecek önlemler:

- a) Korozyona dayanıklı malzeme seçmek,
- b) Dış yüzeyde korozyon koruyucu kaplama yapmak (mekanik gerilmeler bu tabakanın parçalanmasına neden olmamalıdır),
- c) Giydirme yaparak metalin yüzeyini korozyona daha dayanıklı başka bir metalle kaplamak,
- d) Alaşimsız çeliklerde nitrürleme yapmak,
- e) Korozyif ortamın etkisini azaltıcı bazı kimyasal inhibitörler kullanmak sayılabilir.

#### 6.20.4. Yenme-korozyon yorulması (Fretting fatigue)

Bu yorulma türünde hasar yüzeyde aşınma neticesinde çatlak oluşumu ile başlar ve korozyif ortam etkisiyle çok çabuk şekilde ilerleyerek kırılmaya neden olur. Bu tür hasarlar mekanik ve kimyasal etkilerin beraberce etkimesi sonucunda meydana gelmekte ve çoğunlukla sıkı yataklanmış şaftlarda ve zincirlerde karşılaşılmaktadır.

Aşınma sırasında yüzeyden ayrılan parçacıklar hemen oksitlenir ve sertleşirler. Parça yüzeyi sürtünmeye çalıştığı için bu parçacıklar aşındırıcı rol oynar ve yüzeye mekanik zarar vermeye devam ederek çatlağı oluştururlar. Oluşan çatlak ya tekrarlı gerilmeler altında korozyonlu-yorulmaya neden olur, ya da statik gerilmeler altında gerilmeli korozyona neden olur.

## **KIRILMA VE KIRILMA TOKLUĞU DENEYİ**

### **TEKNOLOJİK DENEYLER**