

MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

DERS NOTLARI

GENEL ÇERÇEVE

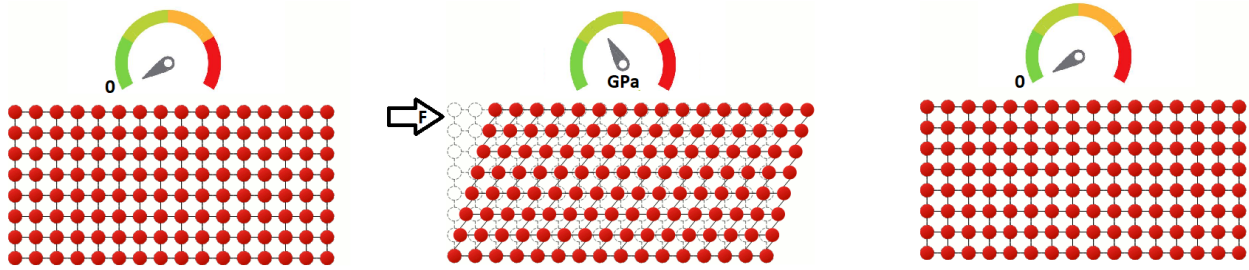
- I.** Genel Kavramlar
- II.** Sertlik ve Sertlik Ölçüm Yöntemleri
- III.** Çekme ve Basma Etkisinde Davranış
 - A.** Çekme Etkisinde Davranış ve Çekme Testi
 - B.** Basma Etkisinde Davranış ve Basma Testi
- IV.** Kayma Etkisinde Davranış ve Burulma Testi
- V.** Eğme Etkisinde Davranış ve Eğme Testi
- VI.** Kırılma Tokluğu ve Kırılma Tokluğu Testleri
- VII.** Yorulma ve Yorulma Testi
- VIII.** Sürünme ve Sürünme Testi

I. GENEL KAVRAMLAR

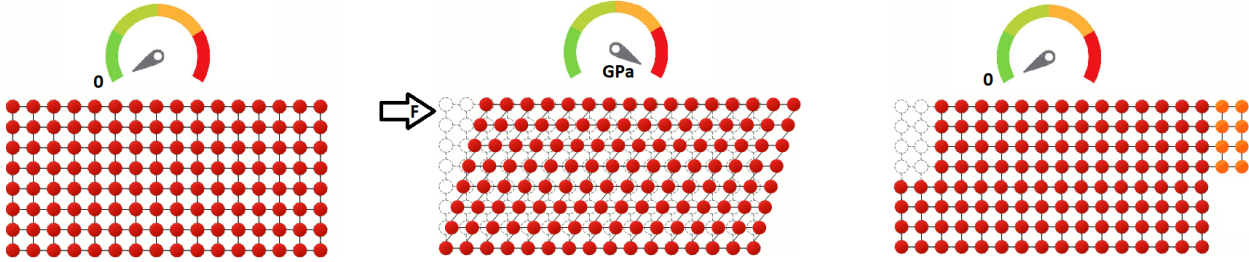
Bütün malzemeler uygulanan bir kuvvet etkisi altında önce şekil değiştirir daha sonra kuvvet artarak uygulanmaya devam ederse kırılır. Malzemeler arasındaki mekanik davranış farkı, bu şekil değiştirme ve kırılma mekanizmaları arasındaki farktan kaynaklanır.

Mekanik Davranış: Bir malzemenin uygulanan kuvvetlere karşı gösterdiği tepkidir. Cisimler artan dış zorlamalar altında önce şekil değiştirir sonra mukavemetini kaybederek kırılır.

Düşük gerilmeler altında şekil değişimi elastiktir. Elastik sınır içerisinde malzemeye uyguladığımız kuvvetle meydana gelen şekil değişimi kuvvet ortadan kaldırıldığında ortadan kalkar.



Gerilme değeri elastik sınırı aşarsa plastik şekil değişimi oluşur. Plastik şekil değişimi kalıcıdır. Kuvvet ortadan kaldırılrsa bile şekil değişimi eski haline gelmez.



Elastiklik Modülü: Bir malzemenin elastik şekil değişimine karşı gösterdiği direnç elastiklik modülü denir. E harfi ile gösterilir. Rijitlik olarak da bilinir.

Mukavemet (Dayanım): Malzemenin iç yapısında kalıcı değişim veya kırılma oluşturan herhangi bir gerilme sınırı mukavemet olarak tanımlanır.

ÖNEMLİ NOT: Bir malzemenin mekanik özellikleri iki aşamada tespit edilir:

Birinci aşamada mekanik test uygulanan cismin sürekli ortam olduğu kabul edilir. Ve bu sürekli ortamın uygulanan dış etkilere karşı tepkisi deneysel olarak ölçülür. Bu aşamada atomların nasıl davrandıkları ve iç yapıdaki değişiklikler değerlendirmeye alınmaz.

İkinci aşamada ise şekil değiştirme ve kırılma süreçlerinde atomların nasıl davrandığı, iç yapıda mikro düzeyde ne tür değişikliklerin olduğu ve iç yapı ile mekanik özellikler arasında nasıl bir ilişki bulunduğu gibi konular ele alınır.

II. SERTLİK VE SERTLİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

Sertlik, genellikle bir malzemenin çizilmeye karşı direnci olarak tanımlanır. Bu doğru ama mekanik açıdan eksik bir tanımlamadır. Eski çağlarda sertliği tespit etmek için iki malzeme birbirine sürtülerek basit bir test uygulanırdı. Böylece çizenin çizilenden daha sert olduğu düşünülürdü.

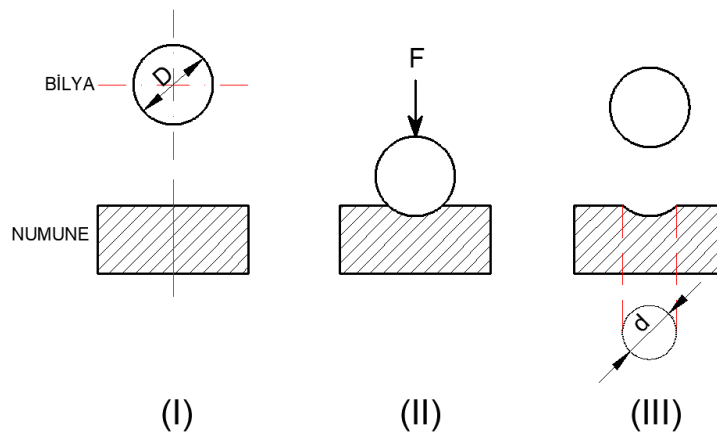
Sertlik, bir malzemenin üzerine batırılmak istenen kendisinden daha sert bir malzemeye karşı gösterdiği dirençtir. Genellikle belirli koşullarda yüzeyde oluşturulan plastik (kalıcı) izin büyüklüğüne göre belirlenir.

Mühendislik malzemelerine uygulanan sertlik ölçüm yöntemleri malzeme üzerine standart bir uçla, standart bir kuvvetle, standart bir süre boyunca bastırılması ve oluşturulan kalıcı izin büyüklüğünün tespit edilmesi prensibine dayanır. Kullanılan standart batıcı ucun biçimine, uygulanan yükse ve oluşan izin değerlendirilme şekline göre üç temel sertlik ölçüm yöntemi vardır:

- i. Brinell Sertlik Ölçüm Yöntemi
- ii. Vickers Sertlik Ölçüm Yöntemi
- iii. Rockwell Sertlik Ölçüm Yöntemi

A. Brinell Sertlik Ölçüm Yöntemi

Bu yöntem, standart çapta küresel bir bilyanın F yükü ile malzemenin yüzeyine bastırılması ve oluşan izin çapının ölçülmesi esasına dayanır. Uygulanan F yükü oluşan izin yüzey alanı olan A'ya bölünerek malzemenin Brinell sertlik değeri elde edilir. Genellikle HB veya B.S.D. kısaltmaları ile gösterilir.



Standart Brinell sertlik ölçüm deneyinde 1 mm çapındaki küresel bilya malzeme yüzeyine 3000 kgf değerindeki bir yükü 10-30 saniye boyunca bastırılır. Uygulanan kuvveti yüzey alanına bölerek elde edilen Brinell sertlik değerinin birimi kgf/mm^2 'dir.

$$BSD = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad \left[\frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \right]$$

F : Uygulanan Yük (Kgf)

D : Bilya Çapı (mm)

d : İz çapı (mm)

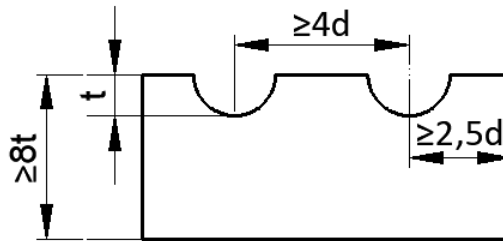
ÖNEMLİ NOT: Standarttan farklı koşullarda yapılan BSD ölçümleri için BSD değerinin altına (Bilya çapı/Yük/Yükleme Süresi) sırasına göre bilgi eklenir. Örneğin 50 BSD/ 5/500/30 şeklinde ifade edilen değer, 5 mm çapında bilyanın 500 kgf kuvvet yük altında 30 saniye süre ile malzeme yüzeyine bastırılması sonucunda hesaplanan Brinell sertlik değerinin 50 olduğunu ifade eder. Herhangi bir açıklama yapılmamışsa deney standart koşullarda gerçekleştirilmiş demektir.

Brinell Sertlik Ölçüm Deneyi için Numune Özellikleri

Sertlik ölçümünü sağlıklı bir şekilde yapabilmek için deney numunesinin bazı özellikleri sağlanması gerekmektedir. Genellikle sertlik ölçümü yapılırken tek bir ölçüm yeterli olmaz, deneyler tekrarlanır. Tekrarlı ölçümler yapılırken de dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır.

- Deney yapılan numune, meydana gelen izin ters tarafında kuvvetin etkisinin gösterecek herhangi bir kabarıklık olmayacak kadar kalın olmalıdır.
- Numune kalınlığı, meydana gelen iz derinliğinin 8 katından az olmamalıdır.
- Oluşan izin merkezinin numune kenarına olan uzaklığı, iz çapının en az 2,5 katı ve en yakın iki izin merkezleri arasındaki uzaklık ise iz çapının en az 4 katı olmalıdır.
- Ölçüm yapılacak yüzey bilyanın yüzeye tam olarak basacağı şekilde düzgün olmalıdır.

Brinell sertlik ölçümü uygulanacak numunenin minimum boyutları yukarıda belirtilen kurallara göre belirlenir.



Kullanılan Bilyalar

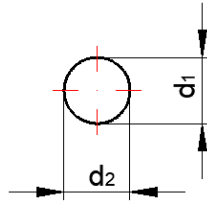
Standart Brinell sertlik ölçüm deneyinde kullanılan bilya çapı $10 \pm 0,0045$ mm'dir. Yani, deney esnasında uygulanan maksimum yük deney numunesi üzerine bastırıldığında bilyanın çapındaki kalıcı değişim 0,0045 mm'den daha fazla olmamalıdır.

Boyutsal toleranslar dışında bilyanın malzemesi de önemlidir. Farklı sertlik değerlerindeki numuneler için farklı malzemelerden imal edilmiş bilyalar kullanılır.

- B.S.D < 450 ⇒ Sertleştirilmiş, menevişlenmiş çelik bilya
 450 < B.S.D < 630 ⇒ Metal karbürlerinden (*seramik*) yapılmış bilyalar
 B.S.D > 630 ⇒ Brinell sertlik ölçüm yöntemi tavsiye edilmez.

Brinell Sertlik Ölçüm Deneyinin Uygulanışı

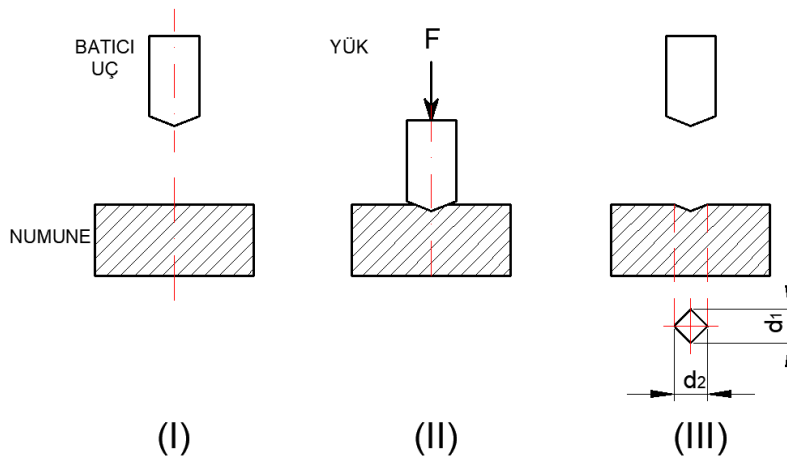
- Standart Brinell testinde uygulanan yükler, 500, 1500 ve 3000 kgf dir.
- Kuvvet, numuneye dik şekilde uygulanmalıdır.
- Yükün uygulama süresi genellikle 10-15 saniyedir. Bazı yumuşak metaller için bu süre 30 s'ye kadar çıkartılabilir.
- Malzeme üzerinde meydana gelecek izin çapı 2,5-6 mm olacak şekilde deney seçilmelidir. İz çapı küçüldükçe hata miktarı artar.
- Meydana gelen izin birbirine dik iki yöndeki çapı bir büyüteçle ölçülür ve B.S.D. hesaplanırken bu iki değer ortalama alınır.



$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [\text{mm}]$$

B. Vickers Sertlik Ölçüm Yöntemi

Bu yöntemde kullanılan uç, tabanı kare bir piramit şeklinde olup elmadan üretilmiştir. Tepe açısı 136°'dir. Belirli bir yük ile malzeme yüzeyine bastırılan batıcı uç numune üzerinde eşkenar dörtgen şeklinde bir iz oluşturur. Sertlik değeri hesaplanırken eşkenar dörtgenin iki köşegeninin uzunluklarının ortalaması alınır. Genellikle HV veya V.S.D. kısaltmaları ile gösterilir.

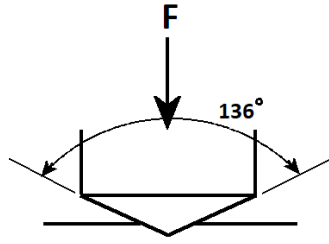


$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [\text{mm}]$$

$$DS (Hv) = 1,854 \frac{F}{d^2} = \frac{2F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad [\text{kgf/mm}^2]$$

F: Uygulanan Yük (kgf)
d: Oluşan İzin Köşegen Uzunluğu (mm)

Üç boyutlu düşünüldüğünde, Vickers sertlik ölçüm deneyinde oluşan iz, taban köşegen uzunluğu d olan kare tabanlı bir piramittir. Bu piramidin tepe açısı batıcı uçun tepe açısı ile aynıdır ve 136° 'dir.



ÖNEMLİ NOT: Vickers sertlik deneyi sonucu ile beraber bazen uygulanan yük ve uygulama süresi gibi verileri ifade eden sayısal işaretler de belirtilir. Örneğin, VSD/30/20 ifadesi 30 kgf değerindeki bir yükün 20 s boyunca uygulandığını gösterir.

Vickers Sertlik Ölçüm Deneyi için Numune Özellikleri

- Vickers sertlik ölçüm yöntemi geniş çubuklardan ince sac plakalara kadar her ölçüde numuneye uygulanabilir. Ancak numunelerin alt ve üst yüzeyleri, yük uygulandığı zaman numune hareket etmeyecek şekilde düz olmalıdır.
- Numune kalınlığı, meydana gelen izin ters tarafında kuvvetin etkisinin gösterecek herhangi bir kabarıklık oluşturmayacak şekilde ayarlanmalıdır.
- Numune yüzeyleri, sağlıklı ölçüm alınabilmesi için köşegen uçlarını tam olarak gösterebilecek şekilde düzgün parlatılmış olmalıdır.
-

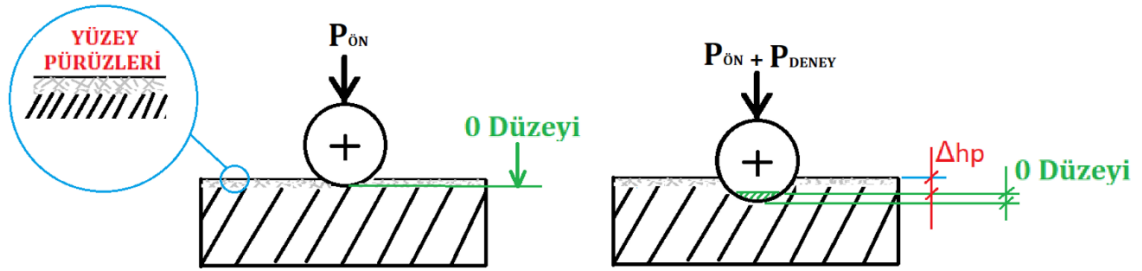
Vickers Sertlik Ölçüm Deneyinin Uygulanışı

Batıcı uç, sabit bir kuvvetle belirli bir süre boyunca numune yüzeyine uygulanır. Kuvvet, numuneye dik şekilde uygulanmalıdır. Yük uygulandıktan sonra numunenin Vickers sertlik değerini hesaplamak için eşkenar dörtgen şeklindeki izin köşegenlerini hassas bir şekilde ölçmek gerekir. Genellikle bu ölçüm işlemi sertlik ölçüm cihazlarına ilave edilen metalürji mikroskopları yardımıyla yapılır. Aktarılan görüntü üzerine ilave edilen cetveller yardımıyla köşegen uzunlukları ölçülür, ortalaması alınarak Vickers sertlik değeri hesaplanır.

C. Rockwell Sertlik Ölçüm Yöntemi

Uygulanışı itibariyle diğer sertlik ölçüm yöntemlerinden farklı bir yöntemdir. Hem konik hem de bilya şeklindeki uçlarla farklı yükler kullanılarak uygulanabilir. Yüzeylerdeki pürüzlülük etkisini azaltmak için ön yükleme yapılır. Ayrıca oluşan izin büyüklüğü yerine derinliği ölçülür.

Bilya veya konik şekle sahip bir ucun malzeme yüzeyine bastırılmasıyla oluşan kalıcı izin derinliğinin ölçülmesiyle tespit edilir. Ancak bu yöntemde derinlik ölçümü yapılacağı için yüzey pürüzlülüğü sonuçları etkileyebilir. Bu duruma engel olmak için numuneye bir ön yük uygulanarak cihaz, "0" düzeyine ayarlanır. Daha sonra deney yükü belirli bir hızla uygulanıp kaldırılır. Yükün neden olduğu kalıcı izin derinliği ölçülür.



Farklı deney koşullarına elde edilen farklı skalalardaki Rockwell sertlik değerleri R_A , R_B , R_C gibi simgelerle ifade edilir. Her skala için ön yük 10 kgf'dir.

Skala	Batıcı uç	Ön yük F_0 (kgf)	Büyük Yük F_1 (kgf)	Toplam Yük F (kgf)	E
A	Elmas koni	10	50	60	100
B	1/16 inç çelik bilya	10	90	100	130
C	Elmas koni	10	140	150	100
D	Elmas koni	10	90	100	100
E	1/8 inç çelik bilya	10	90	100	130
F	1/16 inç çelik bilya	10	50	60	130
G	1/16 inç çelik bilya	10	140	150	130
H	1/8 inç çelik bilya	10	50	60	130
K	1/8 inç çelik bilya	10	140	150	130
L	1/4 inç çelik bilya	10	50	60	130
M	1/4 inç çelik bilya	10	90	100	130
P	1/4 inç çelik bilya	10	140	150	130
R	1/2 inç çelik bilya	10	50	60	130
S	1/2 inç çelik bilya	10	90	100	130
V	1/2 inç çelik bilya	10	140	150	130

Rockwell Sertlik Ölçüm Deneyi için Numune Özellikleri

- Bu yöntemde biçim açısından çeşitli numuneler kullanmak mümkündür. Hem parçanın kendisi hem de parçadan alınan küçük bir numune üzerinde ölçüm yapılabilir. Diğer

yöntemlere benzer şekilde numunelerin alt ve üst yüzeyleri, yük uygulandığı zaman numune hareket etmeyecek şekilde düz olmalıdır.

- Numune meydana gelen izin ters tarafında kuvvetin etkisinin gösterecek herhangi bir kabarıklık oluşturmayacak şekilde yeterli kalınlıkta olmalıdır. Genellikle numune kalınlığının batma derinliğinin en az 1 katı olması tavsiye edilir.
- Rockwell sertlik ölçümü esnasında meydana gelen iz hem kenara hem de diğer izlere yakın olmamalıdır. İzin merkezinin numune kenarından uzaklığı bilya çapının en az 2,5 katı kadar, iki iz merkezinin birbirinden uzaklığı ise bilya çapının en az 3 katı kadar olmalıdır.

Rockwell Sertlik Ölçüm Deneyinin Uygulanışı

Numune üzerine öncelikle 10 kgf değerindeki ön yük uygulanarak ilk yükleme yapılır. Böylece uç, malzeme yüzeyine oturur ve onu sabitler. Bu iki yük arasında meydana gelen derinlik farkı tespit edilir. Yük tekrar ön yükleme değerine düşürülür. Ön yükleme kuvveti hala uygulanır haldeyken kadranın gösterdiği değer okunur.

Rockwell Yüzey Sertlik Deneyi: Prensip olarak Rockwell sertlik ölçüm deneyinin aynısıdır. Ancak batma miktarı daha küçük olduğu için ince sacların ve yüzeyi az miktarda karbürize veya dekarbürize edilmiş çeliklerin yüzey sertliklerin tespit edilmesinde kullanılır. Yumuşak malzemeler için 1/16" çapında standart Rockwell ucu, sert malzemeler içinse konik uç kullanılır. Temas süresi daha kısadır.

D. Mikrosertlik Ölçüm Yöntemi

Özellikle çok küçük numunelerin ve ince sacların sertliklerini ölçmek için elverişli bir yöntemdir. *Genellikle mikroskop yardımıyla inceleme yapılır.*

- Dekarbürizasyon, karbürizasyon, kaplama gibi yüzey işlemleri görmüş malzemelerde,
- Segregasyonların tespit edilmesinde,
- Cam, porselen, metalik karbürler gibi çok sert ve kırılgan malzemelerin sertliklerinin tespit edilmesinde kullanılır.
-

Mikrosertlik ölçüm yöntemi diğer yöntemlere göre hassas bir yöntem olup deney malzemesine uygun olarak seçilen yükler için ucun batma derinliği 1 μm ' u geçmez. Mikrosertlik ölçüm cihazı diğer ölçüm yöntemlerinden farklı olarak optik bir mikroskopa tamamen adapte edilmiştir.

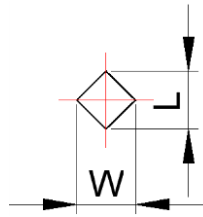
Mikrosertlik Ölçüm Deneyinin Uygulanışı

Sertliği ölçülecek malzeme mikroyapı incelemeleri için gerekli aşamalardan *(kesme-zımparalama-parlatma-dağlama)* mikroskop tablasına yerleştirilir. Okülerde net bir görüntü elde edilinceye kadar mikroskop tablası hareket ettirilir. Bu aşamadan sonra tam otomatik sistemlerde bilgisayarla, manuel sistemlerde ise elle numune batıcı ucun altına getirilir. Uç, numuneye otomatik olarak 20 saniye süre ile batar ve bu süre sonunda geri döner. Böylece

numune üzerinde bir iz elde edilir. İzin boyutlarını ölçmek için numune tekrar objektifin altına getirilir. Sanal bir cetvel veya bilgisayar yazılımı yardımıyla izin boyutları ve malzemenin sertliği tespit edilir.

Mikrosertlik Ölçüm Deneyinde Kullanılan Uçlar

Mikrosertlik deneyi için iki farklı standart uç kullanılarak iki farklı skalada ölçüm yapılabilir. Bunlardan birisi 136 ° tepe açısına sahip, tabanı kare piramit ucla ölçüm yapılan Vickers skalası diğeri de 172 ° 30' tepe açısına sahip piramit ucla yapılan Knoop skalasıdır. Mikrosertlik cihazında 25-1000 grama kadar yük uygulanması mümkündür. En uygun yükü bulmak için meydana gelen izin köşegenlerinin kolayca görülebilecek bir uzunlukta olması esas alınır. Yani, malzemenin sertliğine göre en uygun yük genellikle denemeler sonucunda bulunur.



$$MSD = \frac{F}{A_p} \quad [kgf/mm^2]$$

F : Uygulanan Yük (kgf)

A_p : Oluşan İzin Alanı (mm²)

$$A_p = \frac{WL}{2} \quad [mm^2]$$

W : Eşkenar dörtgenin kısa köşegen uzunluğu (mm)

L : Eşkenar dörtgenin uzun köşegen uzunluğu (mm)

*** Knoop ucunun geometrik şekli göz önüne alındığında her iki köşegen arasındaki bağıntı şöyle özetlenebilir;

$$\frac{\tan 65^\circ}{w} = \frac{\tan 86^\circ 16'}{L} \quad \text{--->>} \quad W = 0,14056L \quad \text{--->>} \quad A_p = \frac{L(0,14056L)}{2} = 0,07028L^2$$

$$MSD (KNOOP) = \frac{F}{0,07028L^2} \quad \left[\frac{kgf}{mm^2} \right]$$

E. Endüstride Kullanılan Farklı Sertlik Ölçüm Yöntemleri

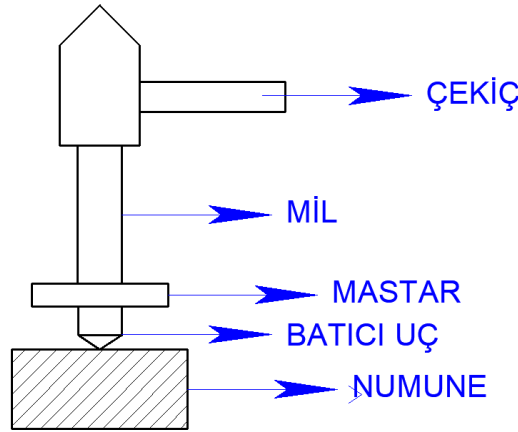
Daha önce bahsedilen sertlik ölçüm yöntemleri genellikle laboratuvar ölçekli sertlik ölçüm yöntemleri olup **statik sertlik ölçme yöntemleri** olarak adlandırılırlar. Ve statik yöntemlerin hepsi özel numune alma hazırlığı gerektirirler. Oysa endüstride ölçümlerin daha hızlı ve seri bir şekilde yapılması gerekir. Ayrıca bazı durumlarda da parçadan numune alma imkânı olmayabilir. Böyle durumlarda malzemelerin sertliğini ölçebilmek için farklı yöntemler ve cihazlar geliştirilmiştir. Bu yöntemler genellikle **dinamik sertlik ölçme yöntemleri** olarak adlandırılırlar ve iki temel başlık altında toplanırlar:

A) Darbe etkisi ile sertlik ölçen yöntemler

B) Sıçrama miktarı ile sertlik ölçen yöntemler.

Birinci grupta basit olarak Brinell deneyine benzer bir yol izlenir. Ancak burada kuvvet darbe şeklinde uygulanır. Batıcı uç genellikle çelik bir bilya olup darbe etkisi ile malzeme yüzeyinde iz bırakır. İz çapı ölçülerek önceden hazırlanmış eğri veya tablolar ile statik Brinell sertlik ölçüm yöntemine geçilir. Bu yöntemde genellikle sertliği 400 HB altında olan malzemelerin sertlik değerleri tespit edilebilir.

Bu gruptaki yöntemlerin en tanınmış ve en yaygın kullanılanı Poldi çekici yöntemidir.

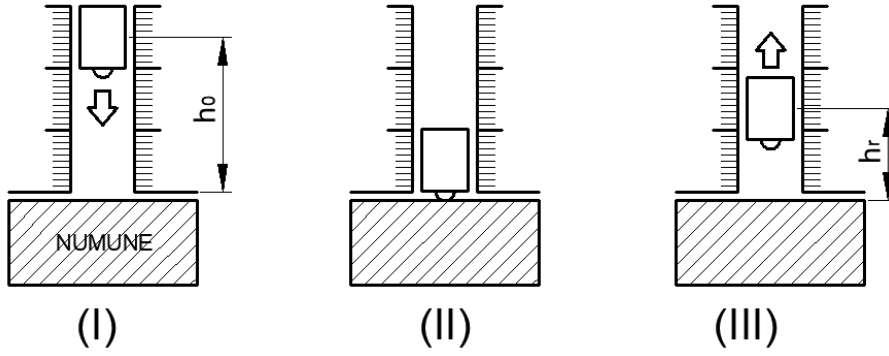


Bu yöntemde bir mil ile bilya arasında sertliği bilinen bir master vardır. Mile çekiç yardımıyla bir darbe indirildiğinde aynı anda hem numune hem de master üzerinde izler oluşur. Masterın sertliği bilindiğinden izlerin farkı alınarak ve yardımcı tablolar kullanılarak numunenin sertliği belirlenir.

İkinci gruptaki dinamik sertlik ölçüm yöntemlerinde ise numune üzerine belirli bir yükseklikten düşürülen küçük bir ağırlık numune yüzeyinde çoğunlukla elastik bir deformasyon gerçekleştirerek geri sıçrar. Sıçrama miktarı, düşen cismin numuneye çarpmasından sonraki elastik enerji miktarı ile orantılı olup sertlik ölçmede bir ölçüt olarak kullanılmaktadır. Yumuşak malzemelerde sıçrama daha az, sert malzemelerde ise sıçrama daha fazla olur.

Bu tip cihazlarda batıcı uç olarak sertleştirilmiş çelik veya küresel elmas bilya kullanılır. Bilyalar düşen ağırlığın alt yüzeyine tutturulur. Sıçrama miktarını kolaylıkla ölçmek için gösterge üzerinde hareket eden seyyar bir ibreden faydalanılır.

Bu grupta en yaygın kullanılan yöntem Shore yöntemidir. Ağırlık bir tüp içerisinde belirli bir h_0 yüksekliğinden serbest bırakılır ve numuneye çarptıktan sonraki h_r sıçrama yüksekliği belirlenerek malzemenin sertlik değerine geçiş yapılır.



Göstergenin tamamı 13 birimden oluşur. 1 birim ötektoid (% 0,8 C' lu) çeliğin su verilmiş haldeki sertliğine eş kabul edilir.

Örnek Problemler

① Bir malzemenin Brinell Sertlik değerini tespit etmek için 10 mm çapında çelik bilya 3000 kgf yükü malzeme yüzeyine 20 sn boyunca bastırılıyor. Elde edilen izin çapı 7,32 mm olduğuna göre malzemenin Brinell Sertlik değerini hesaplayınız.

$$BSD = \frac{2(3.000)}{\pi 10(10 - \sqrt{10^2 - (7,32)^2})} \cong 60 \text{ kgf/mm}^2$$

② 10 mm çapındaki bir standart çelik bilya, 3000 kgf yükü bir malzemenin yüzeyine 20 sn boyunca bastırılıyor. Elde edilen izin çapı 8,25 mm olduğuna göre malzemenin Brinell sertlik değeri nedir?

$$B. S. D. = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2.3000}{\pi 10(10 - \sqrt{10^2 - 8,25^2})}$$

$$B. S. D. = \frac{6000}{\pi 10(10 - \sqrt{31,9375})} = \frac{6000}{\pi 10(10 - 5,651)} = \frac{6000}{136,62} = 43,917$$

③ Vickers sertlik ölçme yönteminde elmas uç ile 30 kgf yük altında bir malzemenin sertliği ölçülüyor. Elde edilen izlerin ortalama köşegen uzunlukları tabloda verilmiştir. Bu malzemelerin ortalama sertlik değerini hesaplayınız.

Ölçüm No	Ortalama Köşegen uzunluğu (mm)
1	0,527
2	0,481
3	0,497

$$H_v = 1,854(F/d^2)$$

$$1. \text{ iz için, } H_{v1} = 1,854 \frac{F}{d^2} = 1,854 \frac{30}{0,527^2} \cong 200 \text{ kgf/mm}^2$$

$$2. iz için, H_{v2} = 1,854 \frac{F}{d^2} = 1,854 \frac{30}{0,481^2} \cong 240 \text{ kgf/mm}^2$$

$$3. iz için, H_{v3} = 1,854 \frac{F}{d^2} = 1,854 \frac{30}{0,497^2} \cong 225 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{Ortalama Sertlik Değeri, } H_{v,ort} = \frac{H_{v1} + H_{v2} + H_{v3}}{3} \cong 221,7 \text{ kgf/mm}^2$$

④ 10 mm çapındaki bir standart çelik bilya, 3000 kgf yükle bir malzemenin yüzeyine 20 sn boyunca bastırılıyor. Elde edilen izin çapı 7,32 mm olduğuna göre malzemenin Brinell sertlik değeri nedir?

$$\text{B. S. D.} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2.3000}{\pi 10(10 - \sqrt{10^2 - 7,32^2})} = 59,93 \cong 60 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

⑤ 10 mm çapındaki bir standart çelik bilya, 3000 kgf yükle bir malzemenin yüzeyine 20 sn boyunca bastırılıyor. Elde edilen izin çapı 4,01 mm olduğuna göre malzemenin Brinell sertlik değeri nedir?

$$\text{B. S. D.} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2.3000}{\pi 10(10 - \sqrt{10^2 - 4,01^2})} \cong 228 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

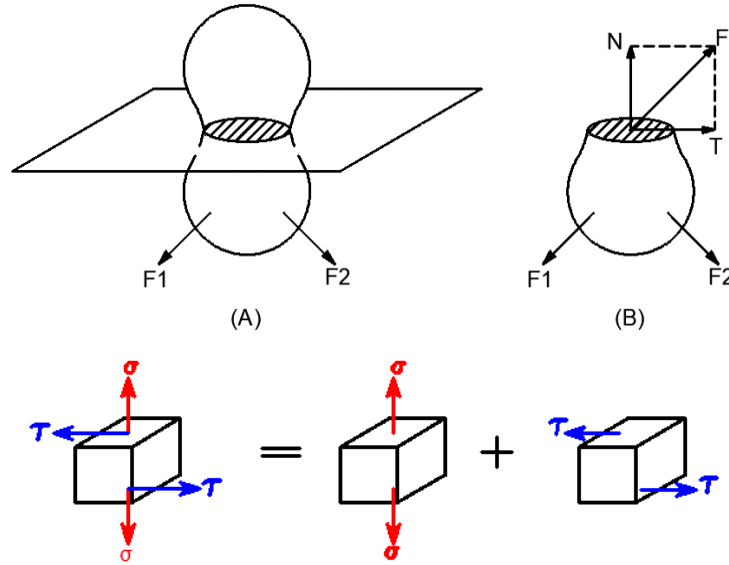
⑥ 10 mm çapındaki bir standart çelik bilya, 3000 kgf yükle bir malzemenin yüzeyine 20 sn boyunca bastırılıyor. Elde edilen izin çapı 3,8 mm olduğuna göre malzemenin Brinell sertlik değeri nedir?

$$\text{B. S. D.} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2.3000}{\pi 10(10 - \sqrt{10^2 - 3,8^2})} = 254,602 \cong 255 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2}$$

III. MALZEMELERİN ÇEKME VE BASMA ÖZELLİKLERİ

Gerilme Türleri

Malzemelerin mekanik davranışları incelenirken homojen ve sürekli ortam oldukları kabul edilir. Dış kuvvetlerin denge halindeki bir malzeme içerisinde oluşturduğu iç kuvvetlerin büyüklüğü denge denklemleri yardımıyla bulunur.



Dış kuvvetlerin etki ettiği bir malzeme parçası ele alalım. Denge halindeki dış kuvvetlerin malzeme içerisinde oluşturduğu iç kuvvetleri bulmak için hayali bir kesme düzlemi ile parça ikiye bölünür ve alt parça ele alınır. Bu parçanın dengede kalabilmesi için gerekli olan F bileşke kuvveti denge denklemleri yardımıyla bulunur.

Gerçekte F bileşke kuvveti kesit boyunca malzemenin atomlarına etki eden yayılı iç kuvvetlerin toplamına eşittir. Toplam iç kuvvet (F), normal (N) ve teğetsel (T) olmak üzere iki farklı bileşene ayrılabilir.

N normal kuvveti, malzeme ekseninden dışarı doğru ise çekme etkisi; içeri doğru ise basma etkisi oluşturur. T teğetsel bileşeni ise yüzeye paralel olup kayma ve kesme etkisi oluşturur. Çekme ve basma gibi mekanik özellikler incelenirken basit geometrik şekillere sahip (genellikle silindirik veya prizmatik şekilli) deney numuneleri kullanılır.

Gerilme

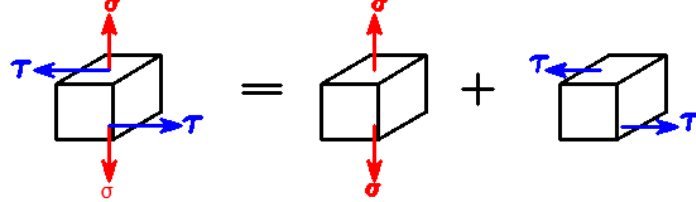
Birim alana etki eden kuvvete gerilme adı verilir. Parçaya etki eden N normal kuvveti etkilediği alana bölünerek σ çekme gerilmesi, T teğetsel kuvveti de etkilediği alana bölünerek τ kayma gerilmesi hesaplanır.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$\tau = \frac{T}{A} \quad \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

Lineer Elastik Davranış

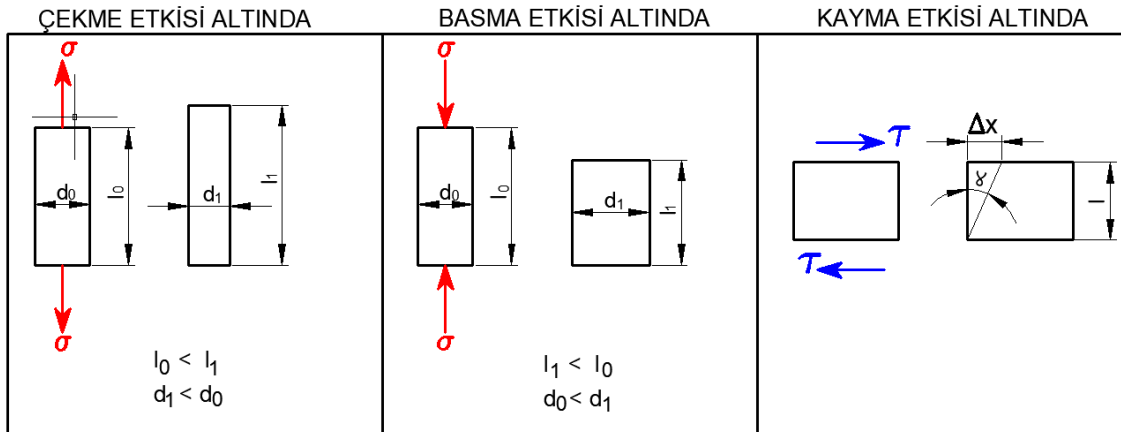
Malzemeler uygulama koşullarında genellikle lineer elastik davranış gösterirler. Bu tür davranışta aynı anda uygulanan iki farklı gerilmenin birlikte oluşturduğu etki, bu gerilmeler ayrı ayrı uygulandıklarında oluşturdukları etkilerin toplamına eşittir.



Şekil Değiştirme

Malzemeler gerilme etkisinde şekil değişimine uğrarlar. Ancak şekil değiştirme türü uygulanan gerilmenin türüne göre değişir. Çekme gerilmesi etkisinde malzemenin boyu uzar, eni kısalır; basma gerilmesi etkisinde ise tam tersi olur. Kayma gerilmesi etkisinde ise yalnızca açılar değişir. Boyutlardaki değişim şekil değiştirme oranı ile belirlenir.

$$\text{Şekil Değiştirme Oranı (Ş. D. O)} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\text{Son Boy} - \text{İlk Boy}}{\text{İlk Boy}} \times 100$$



Çekme gerilmesi etkisinde şekil değiştirmeler:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Eksenel Şekil Değişimi} \quad \epsilon_a = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \\ \text{Yanal Şekil Değişimi} \quad \epsilon_y = \frac{d_1 - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \end{array} \right\} \epsilon_a (+), \epsilon_y (-)$$

Basma gerilmesi etkisinde şekil değiştirmeler:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Eksenel Şekil Değişimi} \quad \epsilon_a = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \\ \text{Yanal Şekil Değişimi} \quad \epsilon_y = \frac{d_1 - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0} \end{array} \right\} \epsilon_a (-), \epsilon_y (+)$$

Yanal Şekil Değişimi

$$\varepsilon_y = \frac{d_1 - d_0}{d_0} = \frac{\Delta d}{d_0}$$

Poisson Oranı (ν)

Lineer elastik malzemelerde küçük gerilmeler altında yanal şekil değiştirme (ε_y), eksenel şekil değiştirme (ε_a) ile doğru orantılıdır. Bu orantı katsayısına Poisson oranı denir ve (ν) ile gösterilir. Poisson oranı her zaman pozitif değer alır.

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_a} \quad [\text{mm}]$$

Çekme halinde; $\varepsilon_a (+)$, $\varepsilon_y (-)$, $\nu (+)$
Basma halinde; $\varepsilon_a (-)$, $\varepsilon_y (+)$, $\nu (+)$

Hooke Kanunu

Malzemeler küçük gerilmeler altında genellikle lineer elastik davranış gösterirler. Lineer elastik davranışta gerilmeler şekil değiştirmeler ile orantılıdır. Ve şekil değiştirmeler tersinirdir. Bu davranış Hooke Kanunu ile ifade edilir.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Elastiklik Modülü

Küçük gerilmeler altında, elastik şekil değişimi devam ederken gerilme, şekil değiştirme ile orantılıdır. Burada orantı katsayısı olan E malzemenin elastiklik modülü olarak adlandırılır. Young modülü olarak da bilinir. Birimi N/mm²'dir.

Elastiklik modülü esas olarak malzemenin elastik şekil direncine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Örneğin çeliğin elastiklik modülü alüminyumunkinden 3 kat daha büyüktür. Buna göre aynı boyutta çelik ve alüminyum çubuklara aynı bölgede eşit yük uygulanırsa alüminyum çelikten 3 kat fazla uzama gösterir.

Benzer şekilde lineer elastik malzemelerde τ kayma gerilmesi ile γ kayma şekil değiştirmesi de orantılıdır. Ve bu orantı katsayısına kayma modülü denir. G ile gösterilir.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad [\text{N/mm}^2]$$

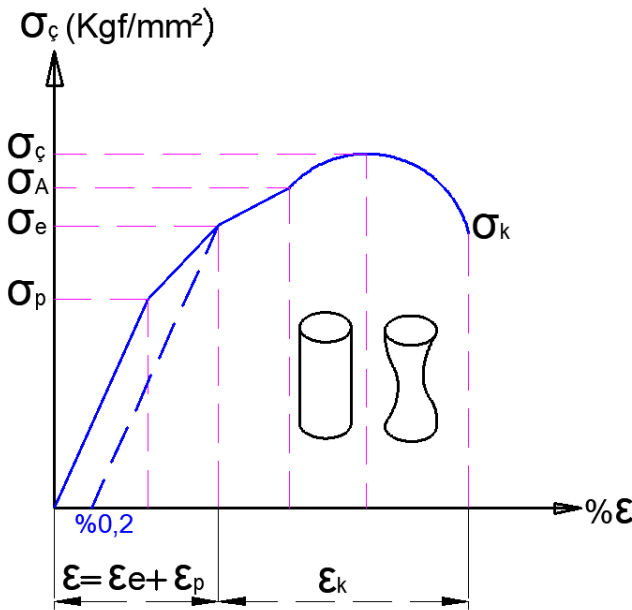
A. ÇEKME ETKİSİNDE DAVRANIŞ VE ÇEKME DENEYİ

Çekme deneyi en sık tercih edilen mekanik karakterizasyon yöntemidir. Nedeni malzemenin birçok özelliği hakkında tek bir testle bilgi sahibi olunmasına imkân sağlamasıdır.

Çekme deneyinde standartlara göre hazırlanmış deney numunesine tek eksenle, belirli bir hızla, sabit sıcaklıkta kırıluncaya kadar artan kuvvet uygulanır. Deney süresince artan kuvvet değerlerine karşılık gelen numunedeki uzaman miktarı kaydedilir.

Çekme deneyi ile malzemenin aşağıdaki özellikleri hakkında bilgi edinilebilir:

- Elastiklik Modülü
- Elastiklik Sınırı
- Rezilyans
- Akma Gerilmesi
- Çekme Gerilmesi
- Tokluk
- % Uzama Oranı
- % Kesit Daralması



Cisimlerin büyük çoğunluğunda küçük gerilmeler altında şekil değiştirmeler elastik yani tersinirdir. Bu bölgede gerilmelerle şekil değiştirmeler doğru orantılıdır (Hooke Kanunu) Gerilme değerleri orantılılık sınırını (σ_0) aşarsa artık Hooke Kanunu geçerli olmaz. Bu sınırın üzerinde çok küçük bir bölgede ($\sigma_0 - \sigma_E$ arasında) gerilmelerle şekil değiştirmeler doğru orantılı değildir. Gerilmeler elastik sınırı (σ_E) aşacak olursa kalıcı (plastik) şekil değişimi başlar. Bu aşamada oluşan şekil değişiminin bir kısmı hala elastiktir. Ve bu bölgede boşaltma-tekrar yükleme şeklinde ilerleyen kısım da lineerdir. Bu doğru, diyagramın başlangıcındaki kısma paraleldir. Yani, plastik bölgede de elastik şekil değiştirmeleri karakterize eden elastiklik modülü (E) aynıdır, elastik bileşen için Hooke Kanunu hala geçerlidir.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad \text{Elastik bileşen} \quad \varepsilon_e = \frac{\sigma_e}{E} \quad \text{bağıntısıyla hesaplanabilir}$$

ÖNEMLİ NOT: Elastik sınır yükleme boşaltma deneyleri ile tespit edilebilirse de pratik olmaması nedeniyle bu yöntem tercih edilmez. Bunun yerine plastik bölgenin başlangıcı olarak akma sınırı (akma dayanımı) alınır.

ÇEKME DENEYİNDEN ELDE EDİLEN VERİLER

i. Akma Sınırı (Akma Dayanımı/Akma Gerilmesi) (σ_A):

Malzemede %0,2 plastik şekil değişimi oluşturan gerilme değeri olarak tanımlanır. Yani σ - ϵ diyagramı üzerinde %0,2 noktası işaretlenir ve bu noktadan diyagramın doğrusal kısmına paralel çizilir. Bu paralel çizginin σ - ϵ eğrisini kestiği noktaya karşılık gelen gerilme değeri akma sınırı olarak tanımlanır.

ii. Çekme Gerilmesi (Çekme Dayanımı) (σ_C):

Akma gerilmesinden sonra malzemeye uygulanan kuvvet artırılmaya devam ederse kuvvet bir maksimum değere (F_{maks}) ulaştığında artış durur. Çekme gerilmesi, çubuğun taşıyabileceği bu maksimum kuvvetin malzemenin başlangıçtaki kesit alanına bölünmesiyle elde edilir.

$$\sigma_C = \sigma_m = \frac{F_{maks}}{A_0} \quad \left[\frac{kgf}{mm^2} \right]$$

iii. Kopma Gerilmesi (Kopma Dayanım) (σ_K):

Kuvvet, maksimum bir (F_{maks}) değere ulaştıktan sonra azalmaya başlar. Bu anda çubuğun bir bölgesinde kesitin daraldığı görülür. Malzemede maksimum kuvvete kadar olan uzamalar üniormdur. Silindir biçimindeki parça boy olarak uzayıp çap olarak daraldığı halde silindir biçiminde kalır. Ancak, büzüle başladıktan sonra bu bölgede ek uzamalar oluşur, kesit gittikçe daralır. Diğer bölgelerde ise uzama olmaz. Bu nedenle şekil değişimi üniform değildir. Büzülen bölgedeki uzamaları oluşturmak için daha az kuvvet gerektiğinden kuvvet ibresi düşmeye başlar. Gerilmeler sürekli olarak artar ve en sonunda kopma kuvveti (F_K) değerinde parça koparak ikiye bölünür. Kopma mukavemeti bu andaki F_K değerinin malzemenin başlangıçtaki kesit alanına bölünmesiyle elde edilir.

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_0} \quad \left[\frac{kgf}{mm^2} \right]$$

iv. % Uzama Oranı (% ϵ):

Numunenin uzaman miktarının orijinal uzunluğuna oranının yüzde olarak ifadesidir.

$$\% \epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100$$

v. % Kopma Uzaması (% ϵ_K):

Numunenin kopma sonrası boy farkının orijinal uzunluğuna oranının yüzde olarak ifadesidir.

$$\% \epsilon_K = \frac{l_K - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{\Delta l_K}{l_0} \times 100$$

vi. % Kesit Daralması (% Ψ):

Numunenin kırıldıktan sonra kesti alanındaki küçülmenin başlangıçtaki orijinal kesit alanına oranının % olarak ifadesidir.

$$\% \Psi = \frac{A_0 - A_K}{A_0} \times 100 = \frac{\Delta A_K}{A_0} \times 100$$

vii. Rezilyans:

Bir malzemenin elastik olarak şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi şekil değişimini oluşturan kuvvetin ortadan kaldırılmasıyla geri verebilme özelliğine rezilyans denir. Rezilyans modülü ile ölçülür.

Rezilyans modülü çekme eğrisinin elastik sınıra kadar olan kısmının altında kalan alandır.

$$RM(v_R) = \frac{\sigma_A \epsilon}{2} = \frac{\sigma_A^2}{2E}$$

σ_A : Akma Gerilmesi

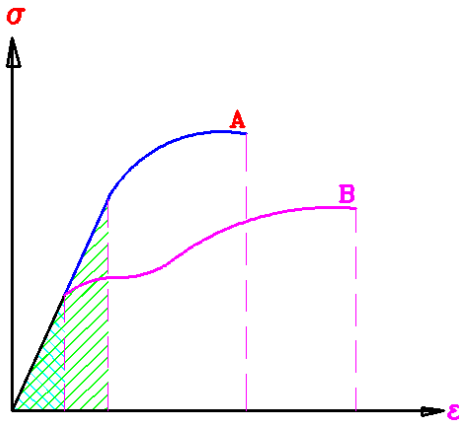
ϵ : Elastik Uzaman Oranı

E : Elastiklik Modülü

$$w = \int \sigma \cdot d\epsilon = \int E \cdot \epsilon \cdot d\epsilon = E \frac{\epsilon^2}{2} = \frac{\sigma_A^2}{2E}$$

W :

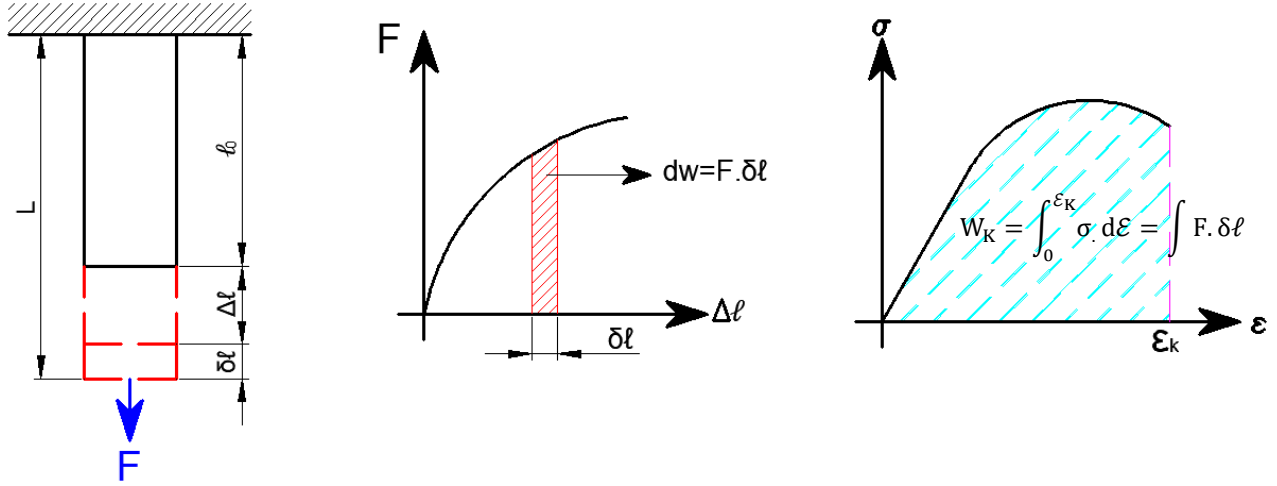
Bağıntıdan da anlaşılabileceği gibi yüksek akma gerilmesine ve düşük elastiklik modülüne sahip olan malzemeler yüksek rezilyans modülüne sahiptir.



Örneğin A malzemesinin rezilyans modülü B malzemesinin rezilyansından daha düşüktür.

viii. Tokluk:

Bir malzemenin plastik şekil değişimi sırasında enerji absorbe etme yeteneğine tokluk denir. Aynı zamanda bir malzemede şekil değişimi oluşturmak için gerekli işe eşittir. Çekme deneyinden elde edilen σ - ϵ eğrisinin altında kalan alandan hesaplanabilir.



$$\text{Tokluk} = \int_0^{\epsilon_K} \sigma_m d\epsilon$$

$$\rightarrow dw = F \cdot \delta l$$

$$\rightarrow \int dw = \int F \delta l$$

$$W_K = \int_0^{\epsilon_K} \sigma \cdot d\epsilon = \int F \cdot \delta l$$

$$\rightarrow F = \sigma \cdot A$$

$$\rightarrow \delta l = l \cdot d\epsilon$$

$$W = \int_0^{\epsilon} \sigma \cdot \underbrace{A \cdot l}_{V_0} d\epsilon$$

$$\rightarrow V_0 = A_0 \cdot l_0 = A_1 \cdot l_1 = A l$$

Elastik bölgede numunenin hacmi değişmez

$$W = \int_0^{\Delta l} F \cdot dl$$

$$\text{Birim hacimde yapılan iş } \frac{W}{V_0} = w = \int \sigma \frac{V_0}{V_0} d\epsilon$$

Bir cismin birim hacimde ϵ uzama için oluşturulan şekil değiştirme enerjisi σ - ϵ eğrisinin altında kalan alana eşittir. Tokluk, birim hacimdeki cismi kırmak için gerekli enerji olarak da tanımlanabilir:

$$W_K = \int_0^{\epsilon_K} \sigma \cdot d\epsilon$$

Bu da σ - ϵ eğrisinin altında kalan alana eşittir.

Gerçek Gerilme (σ_g)- Gerçek Uzama (ϵ_g) Diyagramı

Çekme deneyi esnasında deney parçasının kesit alanı sürekli olarak azalır. Teknolojik (mühendislik) gerilmeleri hesaplanırken F çekme kuvveti deney başlangıcındaki A0 kesit alanına bölüldüğü için deney parçasına etki eden gerçek gerilme teknolojik gerilmeden farklıdır. Gerçek gerilme, hesaplandığı andaki çekme kuvvetinin o andaki parça kesitine bölünmesi ile bulunur.

$$\text{Gerçek Gerilme } (\sigma_g) = \frac{P_i}{A_i}$$

P_i: Herhangi bir i anındaki çekme kuvveti

A_i: P_i çekme kuvvetinin uygulandığı andaki numune kesiti

Çekme deneyi esnasında deney parçasındaki şekil değişimi de homojen değildir. Teknolojik (mühendislik) % uzama oranı (% ϵ), deney parçasının boyundaki değişimin (Δl) parçanın orijinal boyuna bölünmesiyle elde edilir. Gerçek şekil değiştirme ise her an için uzayan boya göre hesaplanır. Bu nedenle gerçek şekil değişimi de teknolojik şekil değişiminden farklıdır.

Teknolojik şekil değişimi, birbirini takip eden noktalar yardımıyla hesaplanır.

$$0 - 1 \text{ noktaları arasında; } \epsilon_{0-1} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

$$1 - 2 \text{ noktaları arasında; } \epsilon_{1-2} = \frac{l_{12} - l_1}{l_1}$$

$$0 - 2 \text{ noktaları arasında; } \epsilon_{0-2} = \frac{l_2 - l_0}{l_0}$$

$$\epsilon_{0-1} + \epsilon_{1-2} \neq \epsilon_{0-2}$$

Buradan, çekme deneyi esnasında çeşitli noktalarda hesaplanan teknolojik (mühendislik) % uzama oranlarının toplamının, toplam teknolojik uzama miktarını vermediği görülmektedir. Gerçek uzama oranı şöyle hesaplanır:

$$\epsilon_g = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln l \Big|_{l_0}^{l_i} = \ln l_i - \ln l_0 = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

Gerçek uzama oranı formülü ile çekme deneyi esnasında çeşitli noktalardan hesaplanan şekil değiştirme oranlarının toplamı, toplam gerçek şekil değiştirme oranına eşittir.

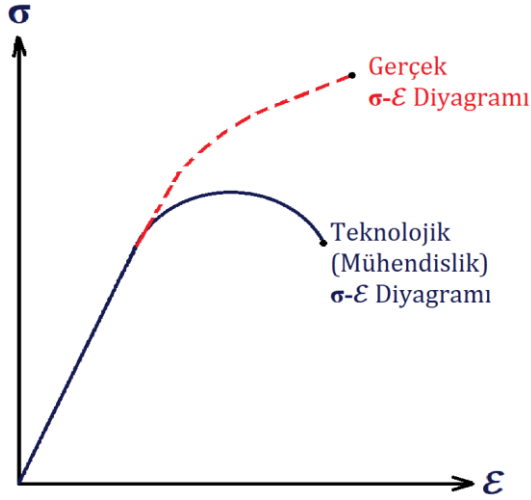
$$0 - 1 \text{ noktaları arasında; } \epsilon_{0-1} = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

$$1 - 2 \text{ noktaları arasında; } \epsilon_{1-2} = \ln \frac{l_2}{l_1}$$

$$0 - 2 \text{ noktaları arasında; } \varepsilon_{0-2} = \ln \frac{l_2}{l_0}$$

$$\varepsilon_{0-1} + \varepsilon_{1-2} = \varepsilon_{0-2}$$

Gerçek σ - ε Diyagramı ile Teknolojik (Mühendislik) σ - ε Diyagramı Arasındaki İlişki



Çekme deneyi esnasında hacimdeki artış çok küçüktür. Deformasyonun çok fazla olduğu durumlarda bile orijinal hacmin

$$\left. \begin{array}{l} V_0 = V_i \\ A_0 l_0 = A_i l_i \end{array} \right\} \frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_i}$$

V₀: Orijinal numune hacmi

V_i: Deformasyonun herhangi bir i anındaki numune hacmi

$$\frac{l_i}{l_0} = \frac{A_0}{A_i}$$

$$\text{Teknolojik Şekil Değiştirme Oranı; } \varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{l_i}{l_0} - 1 \Rightarrow \frac{l_i}{l_0} = \varepsilon + 1$$

$$\text{Gerçek Uzama; } \varepsilon_g = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

$$\sigma_g = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{A_0 l_0}{l_i}} = \frac{F}{A_0} \frac{l_i}{l_0} = \sigma \left(\frac{l_i}{l_0} \right) \Rightarrow \sigma_g = \sigma(1 + \varepsilon)$$

**** Gerçek gerilmeler görünen gerilmelerden büyüktür.**

Süneklik

Bir malzemenin plastik şekil değiştirme yeteneği süneklik olarak tanımlanır. Uygulamada malzemelerin işlenebilirliği açısından önemli bir özelliktir. Genellikle çekme deneyi ile kopma anında oluşan plastik şekil değiştirme veya kopma uzama oranı ile belirlenir.

Çekme gerilmesi etkisinde malzemede büzülme başlamadan önce oluşan şekil değiştirmeler üniformdur ve şekil değiştirme oranı l_0 'dan bağımsızdır. Ancak, büzülme başladıktan sonra uzamalar büzülme bölgesinde üniform olmayan bir şekilde devam eder. Bu bölgedeki ek uzamalar kısa bir l_0 değerine bölünürse büyük, uzun bir l_0 değerine bölünürse küçük uzama oranı değerleri elde edilir. Bu durumda bulunacak süneklik değeri parçanın ilk boyu l_0 'a bağlı olur. Bu amaçla yapılan farklı araştırmalarda büzülme bölgesindeki ek uzamaların parça kesitinin karekökü ile doğru orantılı olduğu görülmüştür;

$$l_g = k\sqrt{A_0}$$

l_g : Ölçü Boyu (mm)

A_0 : Deney numunesinin orijinal kesiti (mm^2)

k : Bir sabit (Uzun çubuklar için 11,3; kısa çubuklar için 5,65)

Deney numunesinin kesiti dairesel ise uzun çubukta ölçü boyu $l_g=10d_0$, kısa çubukta ise $l_g=5d_0$ olarak alınır.

Bazı deney parçalarının boyutları kısıtlı ise süneklik ölçüsü olarak numune kesitinin büzülme oranı (Ψ) da kullanılabilir.

$$\% \Psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} 100$$

A_0 : Deney numunesinin orijinal kesiti (mm^2)

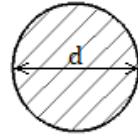
A_k : Deney numunesinin kopma sonrası kesiti (mm^2)

Çekme Deneyi Numuneleri

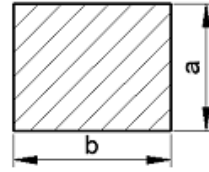
Çekme deneyine tabi tutulacak numunelerin şekil ve boyutları standartlarla belirlenir. Numuneler iki kısımdan oluşur:

- A. Baş Kısımları:** Numuneleri çekme cihazının çeneleri arasına sıkıştırmak ve yük uygulamak için kullanılan kısımlardır. Diğer bölgeye oranla daha büyük boyuttadır.
- B. Orta Kısım:** Yük uygulandığında deforme olması istenen ve baş kısımlarına göre daha ince kesite sahip olan bölgelerdir.

Çekme deneyi için kullanılacak numuneler yuvarlak veya dikdörtgen kesite sahip olabilirler.



$$A_o = \pi \frac{d^2}{4}$$

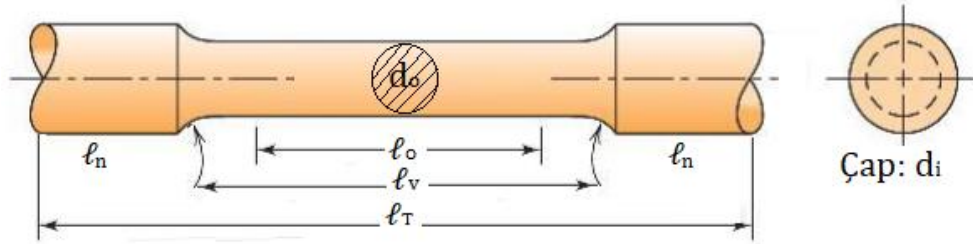


$$A_o = a \times b$$

BARBA Kanunu

Numunenin iç kısmı içerisinde kopma uzamasının tespitine yarayan en az l_o boyu kadar bir uzunluk olmalıdır.

$$l_o = 5,65\sqrt{A_o}$$



Yuvarlak Kesitli Silindirik Başlı Çekme Numunesi

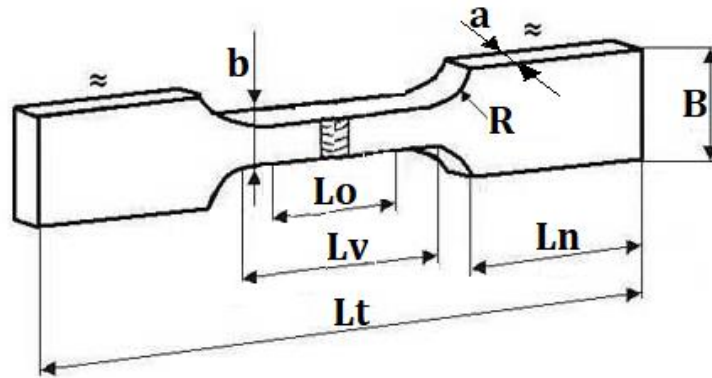
d_o : Numune çapı

d_i : Baş kısmının çapı ($1,2d_o$)

l_v : İnceltilmiş kısmın uzunluğu ($l_v = l_o + d_o$)

l_t : Toplam uzunluk

l_n : Baş kısmının uzunluğu



Dikdörtgen Kesitli Çekme Numunesi

a: Numune kalınlığı

b: Ölçü uzunluğu içinde numune genişliği

B: Baş kısmı genişliği ($\approx 1,2b + 3\text{mm}$)

A_o : Ölçü uzunluğu içerisinde kesit alanı ($a \times b$)

l_v : Daraltılmış kısmın uzunluğu ($l_v = l_o + b$)

l_o : Ölçü uzunluğu ($l_o = 5,65\sqrt{A_o}$)

l_t : Toplam uzunluk

l_n : Baş kısmının uzunluğu ($\approx 2b + 10\text{mm}$)

Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Malzemeler mekanik davranış açısından iki sınıfa ayrılırlar;

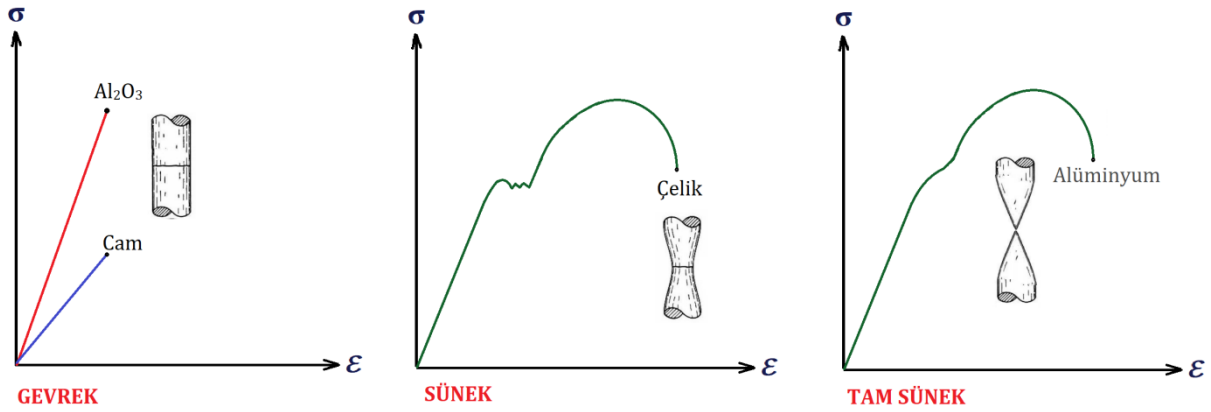
- A) Sünek malzemeler
- B) Gevrek malzemeler

A) GEVREK MALZEMELER

Elastik bölge sonunda, plastik şekil değişimine uğramadan aniden kırılırlar. Bu tip malzemelerde elastik sınır akma gerilmesi ve çekme mukavemeti birbirine eşittir. Genellikle büzülme gözlenmez. Malzeme çok az bir enerjiyle kırılır (Cam, Al_2O_3 , ...)

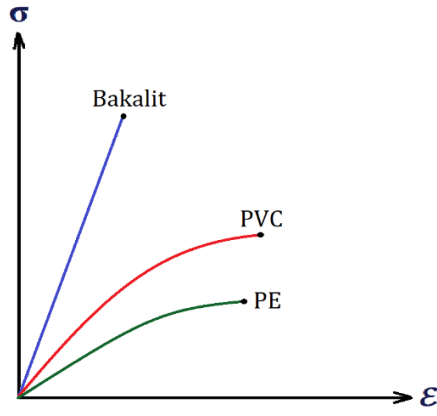
B) SÜNEK MALZEMELER

Önemli ölçüde plastik şekil değiştirmeden sonra büzülerek kırılırlar. Kırma için oldukça büyük enerjiye gerek vardır (yani toklukları yüksektir).



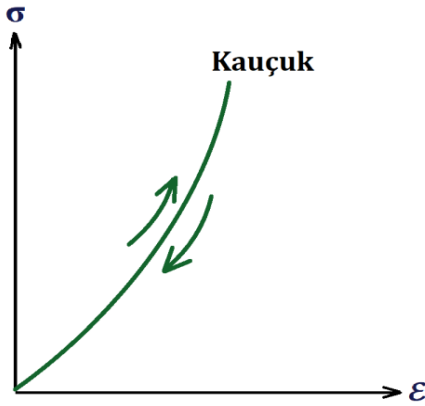
Örneğin saf Al plastik şekil değiştirmeden sonra çok büzülür ve kopma noktasında kesit 0' a yakl%100 e yakın büzülme gösterdiğinden tam sünek malzeme olarak adlandırılır.

Çelik ise belirgin bir akma basamağına sahiptir. Akma sınırına gelince gerilme biraz azalır, akma süresince yaklaşık sabit kalır, akma bitince de tekrar artar. Böyle malzemelerde akmanın başladığı gerilmeye üst akma, bittiği gerilmeye ise alt akma sınırı denir.



Termoplastikler genelde sünek davranış gösterirler (PE). Termoset polimerler ise sürekli kovalent bağları nedeniyle plastik şekil değiştirmezler, gevrek niteliktedirler (Bakalit).

Malzemelerin büyük bir çoğunluğu lineer elastik olduğu gibi plastik bölgede de şekil değiştirmenin elastik bileşeni bu özelliği korur. Ancak doğal kauçuk gibi bazı malzemeler lineer olmayan elastik davranışlar gösterirler.



Kauçuk büyük ölçüde elastik şekil değiştirir. Şekil değiştirme arttıkça E yükselir, iç yapısındaki uzun ve dolaşık polimer zincirleri kuvvet etkisinde açılarak paralel hale gelir. Yeniden düzenli bir yapı oluştururlar. Bu durumda hacim azalır. Özgül ağırlık ve E artar. Yük kaldırıldığında polimer zincirleri başlangıçtaki konumlarına dönerler.

Örnek Problemler

① 12 mm çapında bir çelik çubuğa 3 kN çekme kuvveti uygulandığında çubukta oluşacak çekme gerilmesini ve şekil değiştirmeyi bulunuz? ($E=210000 \text{ N/mm}^2$)

$$A) \quad A_o = \frac{\pi d_o^2}{4} = \frac{\pi (12)^2}{4} = 114 \text{ mm}^2$$

$$B) \quad \sigma = E \epsilon \Rightarrow \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma = \frac{F}{A_o} = \frac{3000}{114} = 26,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon = \frac{26,3}{210000} = 1,2 \cdot 10^{-4} \quad (\%0,12)$$

② Bakır bir çubuğun dayanabileceği maksimum gerilme 70 N/mm^2 dir. Bu çubuğun 2 kN yük taşıyabilmesi için çapı ne olmalıdır? 2 kN yük altında çubukta oluşacak şekil değiştirmeyi hesaplayınız. ($E= 115000 \text{ N/mm}^2$)

$$A) \quad \sigma = \frac{F}{A_o} \text{ ve } A_o = \frac{\pi d_o^2}{4} \Rightarrow \sigma = \frac{F}{\frac{\pi d_o^2}{4}}$$

$$B) \quad \sigma = E \epsilon \Rightarrow \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$d_o = \sqrt{\frac{4F}{\pi \sigma}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2000}{\pi \cdot 70}} = 6,03 \text{ mm}$$

$$\epsilon = \frac{70}{115000} = 6 \cdot 10^{-4} \quad (\%0,06)$$

③ 16 mm çapında bir çelik numune 84 kN değerindeki çekme kuvvetinin etkisi altında kopuyor. En dar yerde çapı 12,4 mm oluyor. Gerçek ve mühendislik kopma mukavemetlerini bulunuz.

$$\begin{aligned} \text{A)} \quad A_s &= \frac{\pi d_s^2}{4} = \frac{\pi (12,4)^2}{4} = 120 \text{ mm}^2 & \text{B)} \quad A_o &= \frac{\pi d_o^2}{4} = \frac{\pi (16)^2}{4} = 200 \text{ mm}^2 \\ \sigma_{gk} &= \frac{F}{A_s} = \frac{84.000}{120} = 700 \text{ N/mm}^2 & \sigma_k &= \frac{F}{A_o} = \frac{84.000}{200} = 420 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

④ Bronzun $E=111000 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{AK}=158 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_K=238 \text{ N/mm}^2$ ve büzülme oranı $\Psi=\%34$ dür. Akma başlamadan önceki şekli değiştirmeyi ve kopma noktasındaki gerçek gerilmeyi hesaplayınız.

$$\begin{aligned} \text{A)} \quad \varepsilon &= \frac{\sigma_{AK}}{E} = \frac{158}{111000} = 1,42 \cdot 10^{-3} \quad (\%0,14) \\ \text{B)} \quad \sigma_{gk} &= \frac{F}{A_s} \quad \text{ve} \quad \sigma_K = \frac{F}{A_o} \Rightarrow \sigma_{gk} A_s = \sigma_K A_o \Rightarrow \sigma_{gk} = \frac{A_o}{A_s} \sigma_K \\ \Psi &= \frac{A_o - A_s}{A_o} \Rightarrow \frac{A_o}{A_s} = \frac{1}{(1 - \Psi)} \\ \sigma_{gk} &= \frac{A_o}{A_s} \sigma_K = \frac{1}{(1 - \Psi)} \sigma_K = \frac{1}{(1 - 0,34)} 238 = 360 \text{ MPa} \end{aligned}$$

⑤ Bir bakır alaşımının elastiklik modülü 110000 MPa, Akma sınırı 330 MPa ve çekme dayanımı ise 350 MPa'dır.

a) Söz konusu alaşımdan imal edilen 3 m uzunluğundaki bir telin boyunu 2 mm uzatmak için ihtiyaç duyulan gerilme değerini hesaplayınız.

b) Bu çubuğun 22 kN yükü akma oluşturmaksızın taşıması için çapı ne olmalıdır?

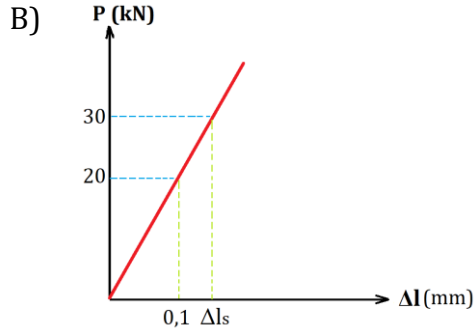
$$\begin{aligned} \text{A)} \quad \varepsilon &= \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{2}{3000} \quad \text{ve} \quad \sigma = E\varepsilon \Rightarrow \sigma = 111000 \frac{2}{3000} = 73 \text{ MPa} \\ \text{B)} \quad \sigma &= \sigma_A \Rightarrow \sigma = \frac{F}{A_{os}} = \frac{F}{\frac{\pi d_o^2}{4}} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot 22000}{\pi 330}} = 9,2 \text{ mm} \end{aligned}$$

⑥ Dökme demir lineer elastik gevrek bir malzemedir. 16 mm çapında ve 20 cm boyunda dökme demir bir çubuk 20 kN yük altında 0,1 mm uzuyor ve 30 kN'da kopuyor.

- a) Dökme demirin Elastisite modülünü bulun.
b) Bu çubuğu kırmak için gerekli enerjiyi hesaplayın.

$$A) \quad \sigma = \frac{F}{A} = \frac{2000}{\frac{\pi 16^2}{4}} = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0,1}{200} = 5 \cdot 10^{-4}$$



$$W_K = \frac{F_K \Delta l_s}{2}$$

Lineer olduğu için $\frac{20}{0,1} = \frac{30}{\Delta l_s} \Rightarrow \Delta l_s = 0,15 \text{ mm}$

$$W_K = \frac{30000 \cdot 0,15}{2} = 2250 \text{ Nmm}$$

- ⑦ Bir çelik çubuğun çekme mukavemeti 50 N/mm^2 ' dir. Bu çubuğun 15.000 N ' luk bir yükü kopmadan taşıyabilmesi için çapı ne olmalıdır?

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad 50 = \frac{15000}{\frac{\pi d^2}{4}}, \quad d = \sqrt{\frac{15000 \cdot 4}{50 \cdot \pi}}, \quad d \cong 20 \text{ mm}$$

- ⑧ Akma sınırı 550 MPa olan 10 mm çaplı bir çelik çubuğa 70 kN ' luk bir kuvvet uygulanıyor. Çubukta oluşan şekil değişiminin türü nedir?

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, A = \frac{\pi d^2}{4}, \quad \sigma = \frac{70000}{\frac{\pi (10)^2}{4}} = 892 \text{ Mpa}$$

$\sigma > \sigma_a$ olduğu için plastik şekil değişimi oluşur.

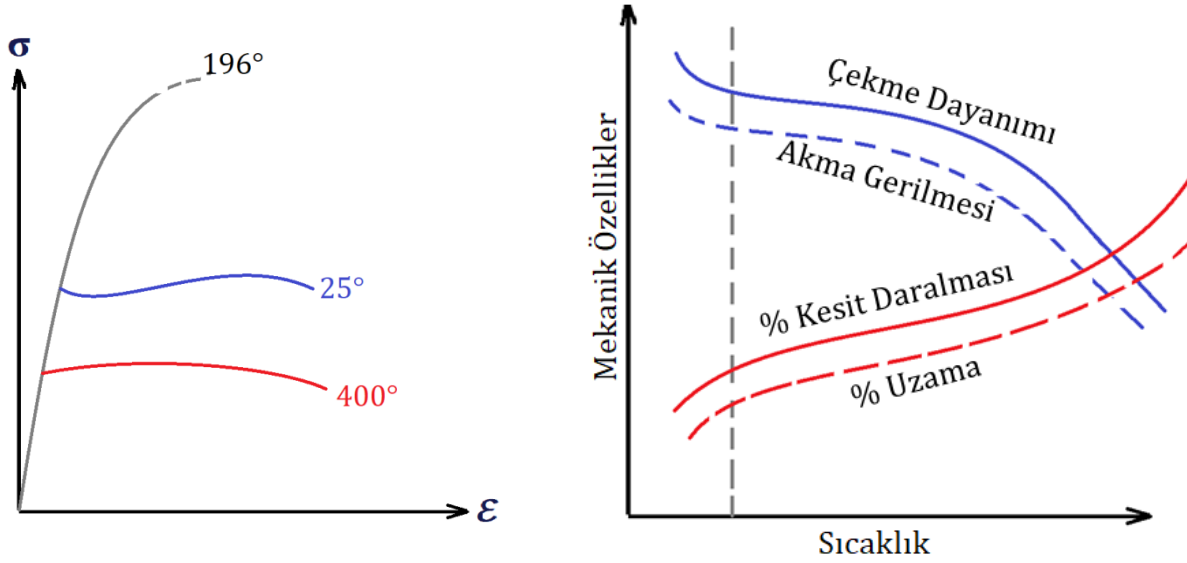
Deney Şartlarının Çekme Deneyi Sonuçlarına Etkisi

Çekme deneyi herhangi bir durum belirtilmemişse oda sıcaklığında, belirli ve sabit bir çekme hızı altında yapılır.

A) Sıcaklık Etkisi

Çekme cihazlarına adapte edilen çeşitli fırın veya soğutucu tertibatlar yardımıyla oda sıcaklığından yüksek ya da düşük sıcaklıklarda deney yapılmasına imkân tanır.

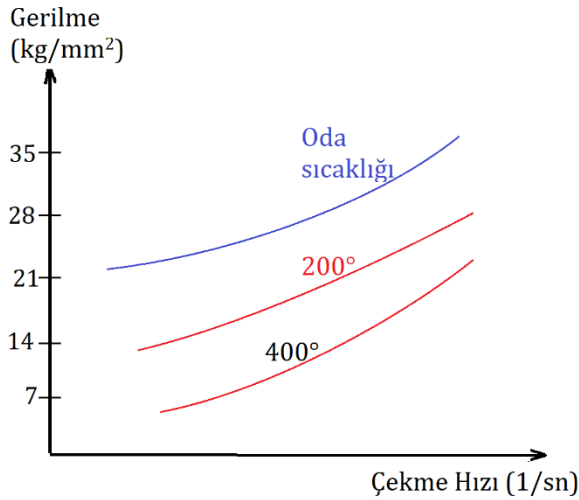
Aynı malzemeden yapılmış, aynı boydaki numunelerin farklı sıcaklıklarda yapılan çekme deneyi sonuçları farklılık arz eder. Genel olarak sıcaklık arttıkça malzemenin mukavemeti azalır, sünekliği artar. Düşük sıcaklıklarda ise mukavemet ve kırılmalık artar.



B) Çekme Hızı Etkisi

Çekme hızının artması malzemenin mukavemetinin artmasına neden olur. Bu nedenle çekme deneyinde çekme hızını belirtmek gerekir. Çekme hızının akma gerilmesine etkisi çekme dayanımına etkisinden daha fazladır.

Saf bakırın çekme dayanımındaki değişimi



Sıcaklık arttıkça çekme hızının akma ve çekme mukavemetine etkisi artar. Yüksek sıcaklıklarda yapılan çekme deneylerinde çekme hızının etkisi çok daha fazla olur.

C) Numune Yönü Etkisi

Özellikle haddelenmiş ve dövülmüş metalik malzemelerden alınan numunelerde çekme deneyi sonuçları numune alınan yöne göre değişir. Özelliklerin yöne bağıllığı anizotropi olarak

ifade edilir. Anizotropik malzemelerde numune yüzeyine bağlı olarak çekme deneyi ile bulunan mekanik özelliklerin hepsi değişmesine rağmen, % kesit daralmasındaki değişme en fazladır.

Sertlikle Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki

Sertlik bir malzemenin plastik şekil değiştirmeye karşı direnci ile ilgilidir. Akma sınırı da aynı şekilde tanımlanabilir. Akma sınırı yüksek, dolayısıyla mukavemeti yüksek bir malzemenin sertliğinin de çok yüksek olması beklenir.

Bu amaçla yapılan araştırmalar sonucunda yalnız çelikler için geçerli olan aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\sigma_c = 0,35.HB$$

HB: Brinell sertlik değeri (kgf/mm²)

σ_c : Çekme mukavemeti

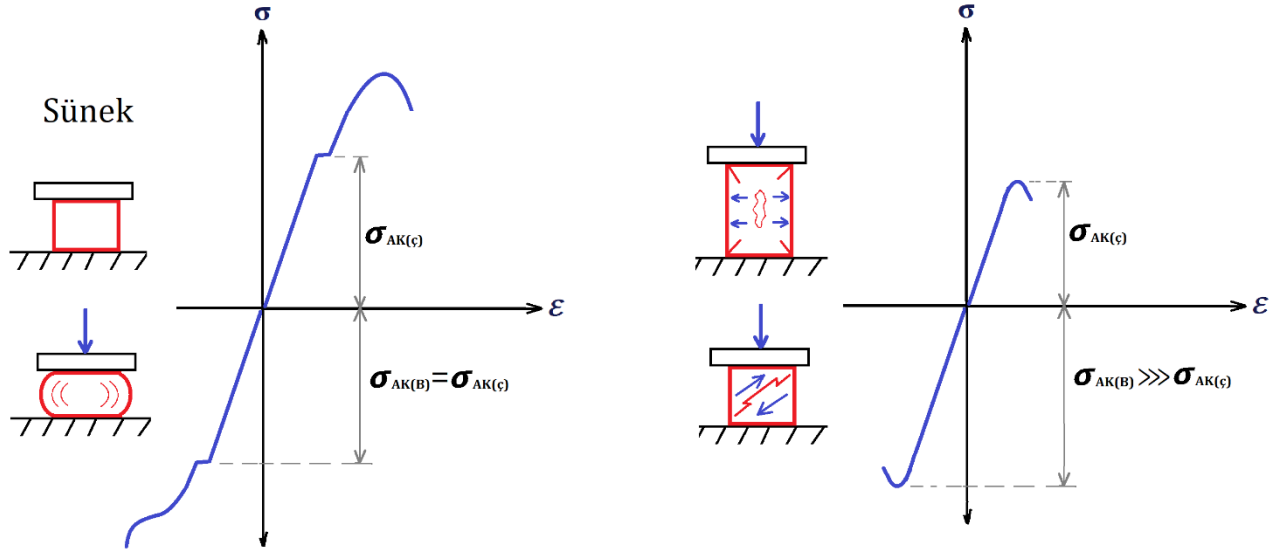
B. BASMA ETKİSİNDE DAVRANIŞ VE BASMA DENEYİ

Malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru etki eden kuvvetler basınç gerilmesi oluşturur. Basma deneyindeki küp veya silindir biçimindeki numuneler iki paralel çelik tabla arasına yerleştirilir. Tablalara uygulanan kuvvetle oluşan şekil değiştirmeler ekstansiyometre yardımıyla ölçülür. Basma etkisi altında parçanın boyu kısalır, yanal doğrultuda genişler. Başlangıçtaki şekil değiştirmeler elastik, yani tersinirdir. Gerilmelerle doğru orantılıdır. Çekme ve basma etkisinde elastik sabitler genellikle eşittir. Ancak yük arttıkça orta bölgeler serbestçe genişler, uç kısımlarda ise tabla ile numune arasındaki sürtünme kuvveti yanal genişlemeyi sınırlar. Orta kısımlarda genişleme olurken, atomlar arası uzaklık artmaya zorlanır. Bu da yanal çekme gerilmeleri doğurur. Bu durumda basınç hali eksenel yönde basınç, yanal yönde çekme kuvvetinden oluşan çok eksenli gerilme haline dönüşür.

İzotop sünek malzemelerde basınç altında davranış çekmedekine benzer, elastik modülleri ve akma sınırları eşittir. (Gerçekte akma olayı maksimum kayma gerilmesi etkisinde oluşur. Eksenel yüklenmede maksimum kayma gerilmeleri 45° Açı yapan düzlemler boyunca etki eder ve değeri eksenel gerilmenin yarısına eşittir.)

Akmadan sonra deney parçasının orta kısmı belirgin olarak genişler. Uçlar sürtünme etkisiyle dar kalır. Sonuçta fıçı biçimini alır. Kesit büyüdüğünden gerilme sürekli artar, yani kırılma görülmez.

Basınç etkisindeki σ - ϵ diyagramı, çekme etkisindeki σ - ϵ diyagramının orijine göre simetriği sayılır. İzotropik yapıli malzemelerde akma gerilmeleri çekme ve basmada eşittir. Sünek malzemelerde basma deneyine gerek yoktur. Gevrek malzemelerde ise çekme ve basma mukavemetleri arasında büyük fark vardır.

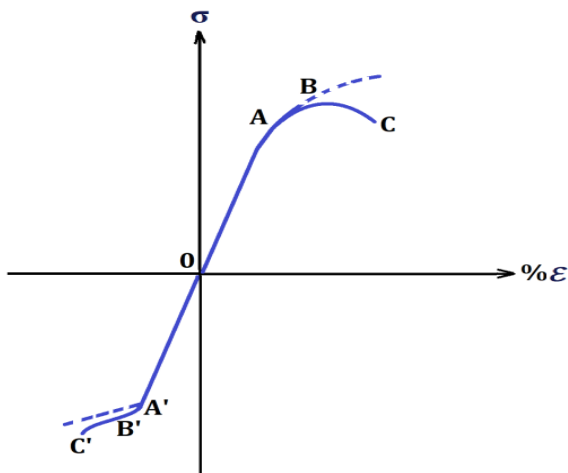


Gevrek malzemelerde düşük basma gerilmeleri altında şekil değiştirmeler tersinir ve gerilmeler orantılıdır. Elastisite modülü çekmedekine eşittir. Ancak elastik sınırla kırılmanın olduğu mukavemet değerleri çok farklıdır. Basma etkisinde kırılma, kayma veya çekme gerilmelerinin etkisinde oluşur. Malzemenin türünü ve basma mukavemetini etkiler.

Basma deneyi de çekme deneyi cihazlarında yapılır. Genellikle gevrek ve yarı gevrek nitelikli malzemelerin sünekliğini tespit etmek için uygulanır. Diğer bir avantaj ise çok küçük numunelere kolaylıkla uygulanabilmesidir.

Basma Diyagramı

Basma diyagramında da önce basma gerilmesinin % Ş.D. ile orantılı olduğu elastik bölge (OA') görülür. Hooke Kanununa göre gerilme ile % Ş.D. arasındaki orantıya sahip olan metalik malzemelerde basma diyagramının ilk parçası olan elastik bölge, çekme diyagramının elastik kısmının (OA) uzatmasıyla elde edilir. Elastik sınırda sonra basma diyagramında da plastik deformasyon bölgesi (A'C') gözlenir.



Basma diyagramının plastik deformasyon bölgesinin ilk kısmı (A'B') çekme diyagramının plastik deformasyon bölgesinin ilk kısmına benzer bir eğimle (A'B') ilerler. Fakat daha sonra basma eğrisinin eğimi (B'C') artar. Bunun nedeni basma deneyi esnasında numune kesitin devamlı olarak artmasıdır. Özellikle plastik deformasyon sonuna doğru numune kesiti çok arttığından plastik deformasyon sonuna doğru numune kesiti çok arttığından basma gerilmelerinde de ani yükselmeler olur.

* Basma deneyinde, numune kesitinin deformasyonu sırasında devamlı arttığı göz önüne alınarak hesaplanan gerçek basma diyagramında gerçek gerilme değerleri mühendislik gerilme değerlerinden düşüktür.

Basma deneyinden elde edilen veriler

Basma gerilmeleri, çekme gerilmelerine benzer şekilde basma kuvvetlerinin numunenin orijinal kesit alanına bölünmesiyle elde edilir.

Basma Akma Gerilmesi: Akma yükünün A_o ' a bölünmesiyle elde edilir.

$$\sigma_{Ak,b} = \frac{P_{AK}}{A_o}$$

Bariz şekilde akma göstermeyen malzemelerin akma gerilmeleri, teknolojik basma diyagramı üzerinde % 0,2 ye kadar kalıcı deformasyona denk gelen gerilme değeri olarak tanımlanır. Basma deneyinde gerçek gerilmeler, çekme deneyindeki gibi hesaplanır:

$$\sigma_{b,g} = \frac{P_i}{A_i}$$

P_i : Herhangi bir i noktasındaki basma yükü

A_i : Herhangi bir i noktasındaki numune kesit alanı

$$\sigma_{b,g} = \sigma_b(1 - \varepsilon_b)$$

$\sigma_{b,g}$: Gerçek basma gerilmesi

σ_b : Teknolojik basma gerilmesi

ε_b : Basmada teknolojik % Ş.D. oranı

* Burada ε ' nin negatif değerlerde olduğu göz önüne alınmalıdır.

% Şekil değişimi (% Yığılma): Basma deneyi için %Ş.D., numunenin boyundaki azalma miktarının orijinal boya oranının % olarak ifadesidir. Basma etkisinde numunenin boyu azaldığı için % Ş.D. negatif değerdedir.

$$\% \varepsilon_b = \frac{l_1 - l_o}{l_o} \times 100$$

l_i : Deney sonrası boy

l_o : Orijinal boy

$$\varepsilon_{b,g} = \int_{l_o}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_o} = -\ln \left(\frac{l_o}{l_1} \right) \quad (l_o > l_1)$$

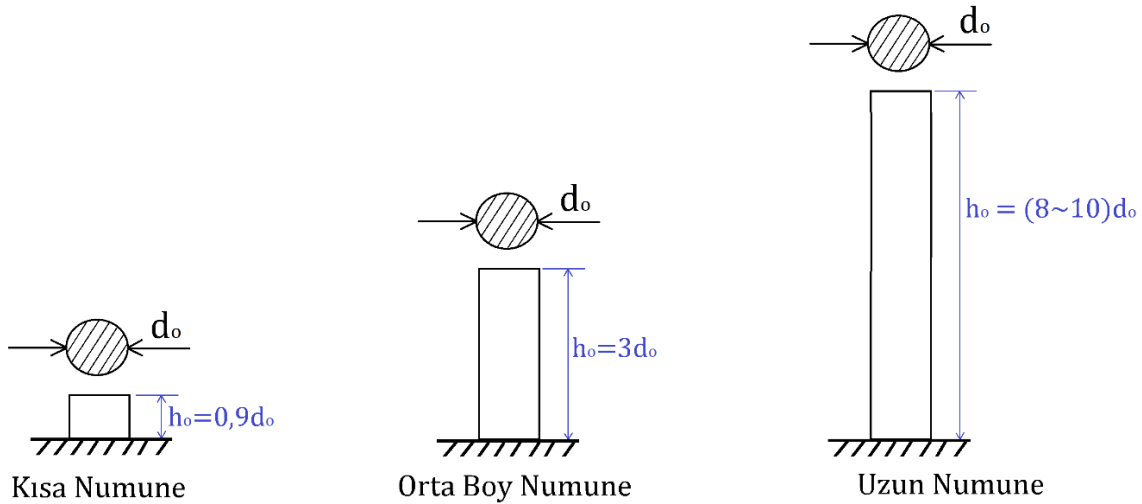
$$\varepsilon_{b,g} = \ln(1 - \varepsilon_b)$$

Basmada malzemenin deformasyon kabiliyeti veya sünekliği % Ş.D. ile tayin edilir. Malzemenin sünekliği, genellikle numune yüzeyinde ilk görülebilir çatlağın olduğu deformasyon olarak tanımlanır. Basma deneyi ile metalik numunelerin sünekliği tespit edilirken asıl kısıtlama uygulanan gerilmenin numune üzerinde genellikle üniform olmamasıdır. Deney cihazındaki basma plakaları ile numune arasındaki sürtünme kuvvetinin

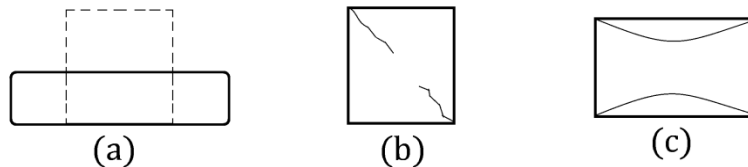
etkisi ile numunede şişme olur. Şişme olduğunda numunedeki deformasyon homojen değildir. Şişme, numune ile basma plakaları arasındaki sürtünmeyi azaltmak için yağlama yaparak en aza indirilebilir.

$$\% \text{ Kesit Değişimi: } \% \text{ K. D.} = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100 = \frac{A_1 - A_0}{A_0} \times 100$$

Basma Numuneleri: Basma numunelerinde üniform bir gerilme elde edebilmek için genellikle daire kesitli numuneler tercih edilir. Basma numunelerinde en önemli nokta numune çapı (d_o) ile yüksekliği (h_o) arasındaki orandır. Bu oranın çok büyük olması numunenin deney sırasında bükülmesine ve gerilmenin numune üzerinde homojen olarak dağılmamasına neden olur. Bu nedenle üst sınır olarak $h_o/d_o \leq 10$ oranı tavsiye edilir. Basma numunesinin yüksekliğinin çapa göre çok kısa olması da istenmez. Bu nedenle $h_o/d_o \geq 1,5$ oranı da alt sınır olarak tercih edilmektedir. $h_o/d_o < 1,5$ ise numune ile basma plakaları arasındaki sürtünme deney sonuçlarına etki edecek değerlere yükselir. Metalik malzemeler için genellikle $h_o/d_o = 2$ oranı tercih edilir.

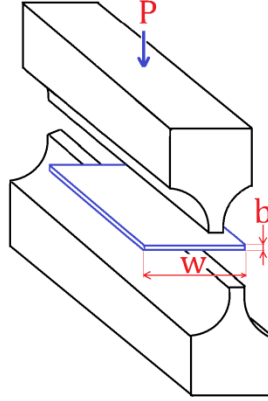


Basmada Kırılma Şekilleri: Basma deneyinde parçaların deformasyonu ve kırılması çeşitli şekillerde olabilir. Sünek malzemeler deney sonrasında kırılmadan deforme olurlar ve şişme göstererek yığılırlar (a). Gevrek malzemelerde ise kırılma genellikle kayma ile numunenin iki parçaya ayrılması şeklinde olur (b). Pirinç gibi yarı gevrek malzemelerin kırılması ise koni şeklinde olur (c).



Düzlem Şekil Değişimli Basma Gerilmesi: Kalınlığı çok az olan metalik malzemelerden silindirik şeklinde basma numunesi hazırlamak zordur. Bu nedenle ince levha veya sac gibi malzemelerin basma deneyi düzlem şekil değişimli basma deneyi ile yapılır. Deneyde saçtan

kesilen bir şerit, genişliği boyunca iki basma plakası arasında basılır. Basma plakalarının basma yüzeylerinin genişliği dar olup boyu ise basılan şerit şeklindeki malzemenin genişliğinden daha fazladır.



Basma plakaları arasında basılan malzemenin eninde bir genişleme olmadan kalınlığı azalır. Basma işlemi genellikle kademeli olarak yapılır. Her basma kademesinde uygulanan yük ve malzemenin deformasyon sonrası kalınlığı ölçülür ve sonraki yükleme aşamasına geçilir.

$$\sigma_{db} = \frac{P}{W_b}$$

P: Uygulanan yük

W: Basılan malzemenin genişliği

b: Basma plakasının kalınlığı

% Ş.D. ise kalınlık değişiminden hesaplanır.

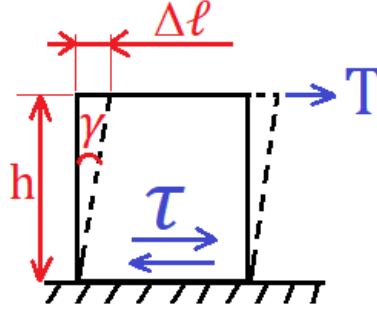
$$\% \varepsilon_b = \frac{t_1 - t_0}{t_0} \times 100$$

t₁: Deney sonrası kalınlık

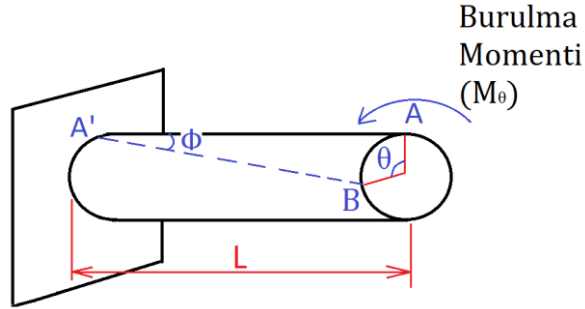
t₀: Orijinal kalınlık

IV. KAYMA ETKİSİNDE DAVRANIŞ VE BURULMA DENEYİ

Basit kayma etkisinde boyutsal değişim olmaz, yalnızca açısal değişim gözlenir.

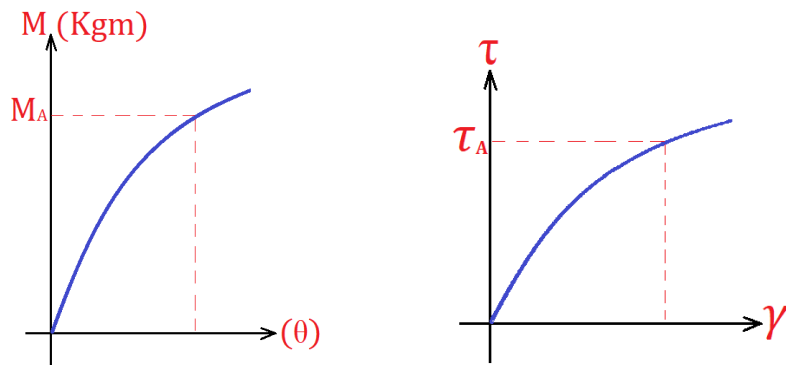


Burulma Deneyi: Burulma deneyi malzemenin kayma elastiklik modülü (G), kayma akma gerilmesi ve kırılma modülü gibi özelliklerini belirlemek amacıyla yapılır. Çekme deneyi gibi geniş bir kullanım alanı yoktur. Ancak plastik deformasyonla ilgili teorik çalışmalarda tercih edilir.



Deney cihazı iki ucundan sıkıştırılmış deney numunesine bir ucu sabit kalacak şekilde ucundan burulma momenti uygulayan bir cihazdır. Cihaz üzerinde uygulanan burulma momentine karşılık burulma açısını gösteren bir gösterge mevcuttur.

Elde edilen verilerle M-θ diyagramı çizilir. Diyagram çekme diyagramına benzer ve bu diyagram kullanılarak gerilme-deformasyon diyagramı elde edilir.



Burulma Deneyinden Elde Edilen Veriler

i. Kayma Uzaması (γ): Burulma deneyinde kırılmaya kadarki burulma sayısı malzemenin deformasyon kabiliyeti hakkında bir fikir verir. Ancak bu sayı boyuttaki (özellikle numune uzunluğundan) bağımsız değildir. Numune boyu uzadıkça burulma sayısı artar. Bu nedenle objektif bir değerlendirme için kopmaya kadarki kayma uzaması kullanılır. Burulma deneyinde deformasyon numune üzerindeki aynı yatay doğrultudaki bir noktanın (A) sabit uçtaki noktadan (A') burulma etkisi altında yer değiştirdiği miktarda (AB) hesaplanır.

$$\text{Kayma Uzaması } (\gamma) = \tan \Phi = r(\theta/L)$$

Burulma deneyinde uygulanan burulma momenti etkisinde numunede kayma gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler etkisiyle de numune kayma uzaması şeklinde deformasyona uğrar.

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

r: Numune yarıçapı

θ : Burulma açısı

L: Numune boyu

ii. Kayma Gerilmesi (τ):

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

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

M_b : Burulma Momenti (Nmm)

W_b : Mukavemet Momenti (mm³)

İçi dolu dairesel kesitli numuneler için; $W_b = \frac{\pi d^3}{16}$

Boru şeklindeki numuneler için; $W_b = \frac{\pi d_1^3}{16(d_1^3 - d_2^3)}$

$$\tau = \frac{16M}{\pi D^3} \quad (\text{İçi dolu dairesel kesitli numunelerde})$$

M: Uygulanan moment

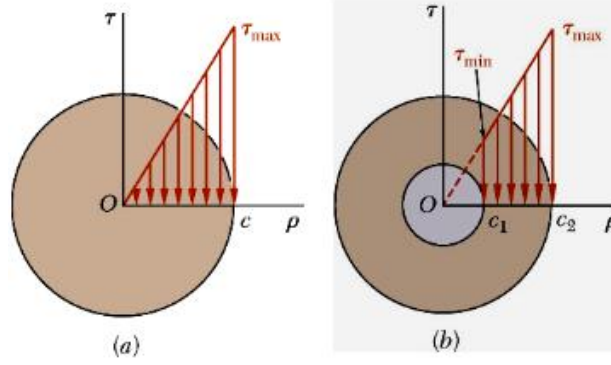
D: Numune çapı

$$\tau = \frac{16M \cdot d_1}{\pi(d_1^4 - d_2^4)} \quad (\text{Boru şekilli numunelerde})$$

d₁: Dış çap

d₂: İç çap

Bu formüllerle hesaplanan kayma gerilmeleri numunede meydana gelen maksimum kayma gerilmeleridir. Yuvarlak numunelerde (a) kayma gerilmeleri numunenin merkezinde "0", yüzeyde ise maksimum değerdedir. Dolayısıyla formüllerle hesaplanan gerilmeler yüzeydeki maksimum gerilmelerdir.



iii. Kayma Akma Gerilmesi (τ_{AK}): Burulma diyagramının lineer kısmından hesaplanır. Bariz şekilde akma göstermeyen malzemelerde burulma diyagramı üzerinden $\theta=0,002$ °/mm burulma açısına tekabül eden burulma momentinden (M_A) hesaplanabilir.

iv. Kayma Elastiklik Modülü (G): Burulma diyagramının lineer kısmından hesaplanır. Burulma diyagramının elastik bölgesinde, kayma gerilmesi kayma uzamasıyla orantılı olarak artar (Hooke Kanunu). Elastik bölgede kayma gerilmesinin kayma uzamasına oranı kayma elastiklik modülünü verir.

$$\tau = G \cdot \gamma \quad \Rightarrow \quad G = \frac{\tau}{\gamma}$$

(Hooke Kanunu)

G: Kayma elastiklik modülü

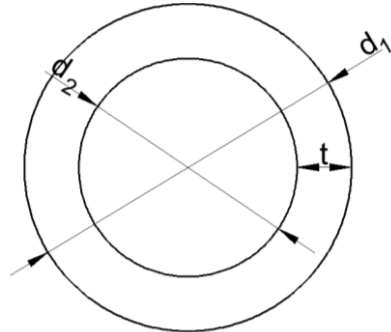
τ : Kayma gerilmesi

γ : Kayma uzaması

v. Kırılma Modülü: Burulma diyagramındaki maksimum burulma momentinden hesaplanan maksimum kayma gerilmesidir.

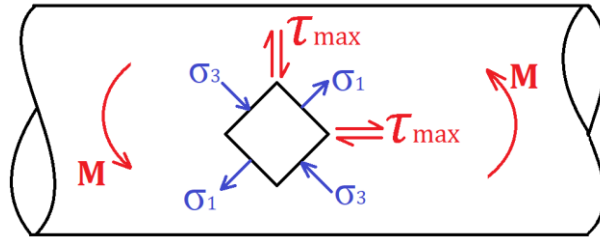
Kayma Numuneleri:

Kayma testi yuvarlak kesitli numunelere uygulanabilir. Kayma gerilmesinin merkezden yüzeye doğru artması nedeniyle genellikle boru şeklindeki numuneler tavsiye edilir. Çünkü boru şeklindeki numunelerde uniform kayma gerilmeleri elde edilir.



Boru şeklindeki burulma numunelerinde et kalınlığının çok fazla veya çok az olması deney sonuçlarını etkiler. Bu nedenle ölçü boyunun (L) numunenin dış çapına (d) oranı $L/d \approx 10$ olmalıdır. Ayrıca numune çapının (d) et kalınlığına (t) oranı $d/t \approx 8-10$ olmalıdır.

Kaymada Kırılma Şekilleri

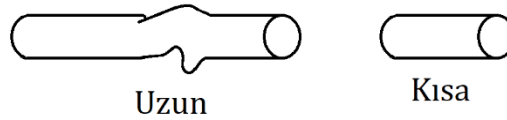


Burulmada maksimum kayma gerilmeleri numunenin yatay ve düşey eksenleri boyunca meydana gelir. Çekme (σ_1) ve basma (σ_3) gerilmeleri ise numunenin eksenleri ile 45° lik açı yapan düzlemler boyunca meydana gelirler.

Burulma deneyinde sünek bir malzeme maksimum kayma gerilmeleri yönünde, gevrek bir malzeme ise maksimum çekme gerilmesine dik doğrultuda kırılır.



Boru şeklindeki sünek bir malzemenin kırılması ise uzun numuneler için numunenin bükülmesi sonucunda şeklinin bozulması ile, kısa numuneler için ise maksimum kayma gerilmesi yönünde olur.



Örnek Problemler

① Üzerine 400 Nm değerinde bir burulma momenti etki eden 50 mm çapındaki bir silindirik çubukta oluşabilecek maksimum kayma gerilmesini bulunuz.

$$M=400 \text{ N.m}=400.000 \text{ N.mm}$$

$$\tau = \frac{16M}{\pi d^3} = \frac{16(400.000)}{\pi(50)^3} \cong 16,30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

② 4 mm çapındaki silindirik bir milin taşıyabileceği maksimum kayma gerilmesi 600 N/mm^2 ise bu milin taşıyabileceği maksimum burulma momentini hesaplayınız.

$$\tau = \frac{16M}{\pi d^3} \rightarrow M = \frac{\tau \pi d^3}{16} = \frac{600 \cdot \pi \cdot 4^3}{16} \cong 7539,8 \text{ N.mm}$$

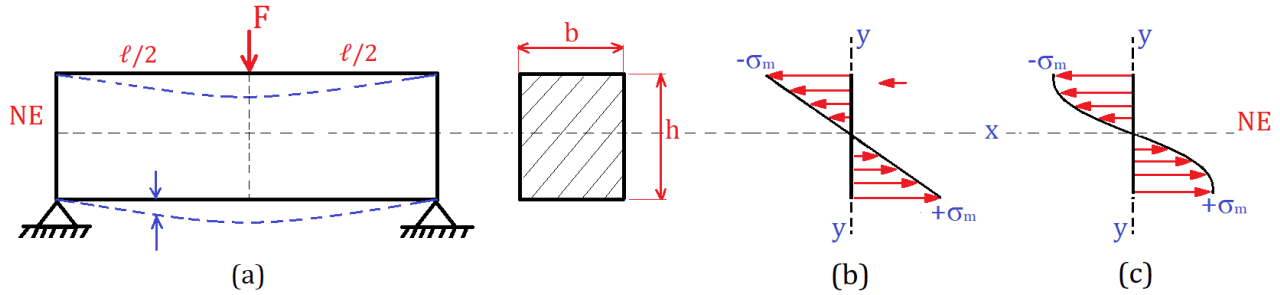
③ Silindirik bir milin emniyetle taşıyabileceği maksimum kayma gerilmesi ve burulma momenti değerleri sırasıyla 200 N/mm² ve 105.000 Nmm olduğuna göre bu milin çapını hesaplayınız.

$$\tau = \frac{16M}{\pi d^3} \rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{16M}{\pi \tau}} = \sqrt[3]{\frac{16(105000)}{\pi \cdot 200}} \cong 13,879 \text{ mm}$$

V. EĞME ETKİSİNDE DAVRANIŞ VE EĞME DENEYİ

Temel çekme, basma, kayma etkisinde davranış dışında kiriş gibi bazı yapı elemanları eğme etkisine maruz kalırlar. Eğme momenti şeklinde etki eden dış zorlamalar malzeme içerisinde çekme, basma ve kayma gerilmeleri oluşturur. Numuneye kuvvet etkidiğinde numune kesitinin bir kısmında basma, geri kalan kısmında ise çekme gerilmeleri gözleniyorsa numune eğme halindedir. Bu gerilmelerin büyüklük ve yayılışları mukavemet bilgileri kapsamında belirlenebilir. Bu gerilmelerden herhangi birisi kritik değere ulaşırsa malzemenin dayanımı sona erer.

Eğme Deneyi: İki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının, yön değiştirmeksizin ortasına bir eğme kuvveti uygulandığında oluşan biçim değişmesidir. Eğme deneyinde iki ucundan mesnetlenmiş dikdörtgen veya dairesel kesitli çubuklar veya kirişler kullanılır.



(a) Tek noktada etkili eğme deneyi

(b) Lineer gerilme yayılışı

(c) Lineer olmayan gerilme yayılışı

Şekle göre orta noktada düşey doğrultuda etki eden F kuvvetinin neden olduğu eğme momenti kiriş kesitinde yayılı normal gerilmeler oluşturur. Düşük yükler altında gerilmelerin dağılımı lineerdir (b). Kirişin en alt lifinde $+\sigma_m$ en büyük çekme gerilmesi, en üst lifinde $-\sigma_m$ en büyük basma gerilmesi etki eder. Ortada nötr eksen üzerinde gerilme sıfırdır.

En büyük gerilmelerin değeri:

$$\sigma_m = \frac{3F\ell}{2bh^2}$$

ℓ : Mesnetler arası uzaklık

b : Kesitin eni

h : Kesit yüksekliği

Sünek malzemelerde σ_m gerilme değeri σ_a' ya eşit olunca akma başlar, gerilme dağılımının lineerliği bozulur ve (c) deki gibi eğrisel biçim alır. Bu noktada Hooke Kanunu geçersizdir. Ve gerilme hesapları için σ_m denklemi geçersizdir.

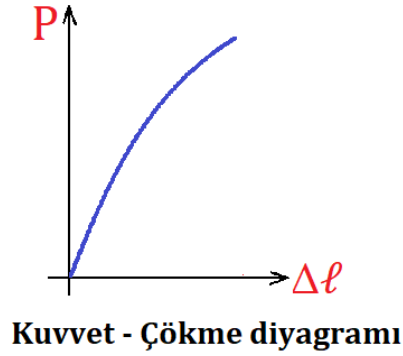
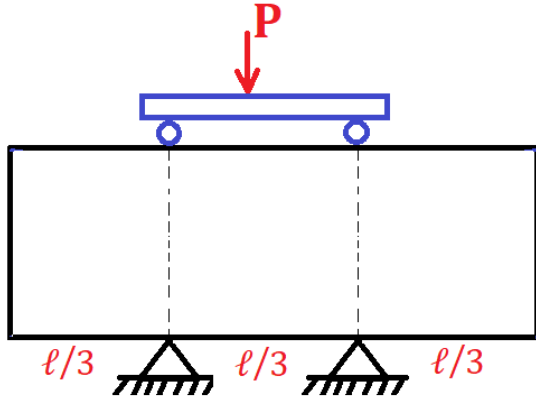
Gevrek numunelerde genellikle kırılma oluncaya kadar lineer elastik deformasyon geçerlidir. Bu durumda kirişi kırmak için uygulanan F_k kırma kuvveti ölçülür ve σ_m denkleminde yerine konularak kırma oluşturulan maksimum çekme gerilmesi elde edilir.

Eğme çubuğu dairesel kesitli olursa F kuvvetinin etkisinde oluşan maksimum çekme gerilmesi,

$$\sigma_m = \frac{8F\ell}{\pi d^3}$$

ℓ : Mesnetler arası uzaklık
d: Dairesel kesitin çapı

Bazı standartlara göre eğme testi iki noktada etkili olarak gerçekleştirilir.



Kuvvet - Çökme diyagramı

İki noktada eğme testinde F kuvvetinin oluşturduğu maksimum çekme gerilmesi,

$$\sigma_m = \frac{F\ell}{bh^2}$$

ℓ : Mesnetler arası uzaklık
b: Kesitin eni
h: Kesit yüksekliği

bağıntısıyla hesaplanır.

Eğme testinde kalitatif sonucu yanında, eğme momenti (M_e), eğilme dayanımı (σ_e), esneklik modülü (E_e) ve eğilme miktarı (Y) gibi kantitatif değerler de hesaplanır. Kantitatif deneyler genellikle gevrek malzemeler için hesaplanır.

Eğme deneylerinde, eğme momenti ve eğilme dayanımının hesabı için numunenin kırıldığı andaki maksimum yükü (F_{max}) ölçmek gerekir. Eğilme miktarı (Y) ise deney esnasında yükün uygulandığı noktada numunenin başlangıçtaki duruma göre düşey eksenindeki değişme miktarıdır. F_{max} ve Y değerleri deney cihazına bağlı özel göstergelerden okunur.

Eğme Deneyinden Elde Edilen Veriler

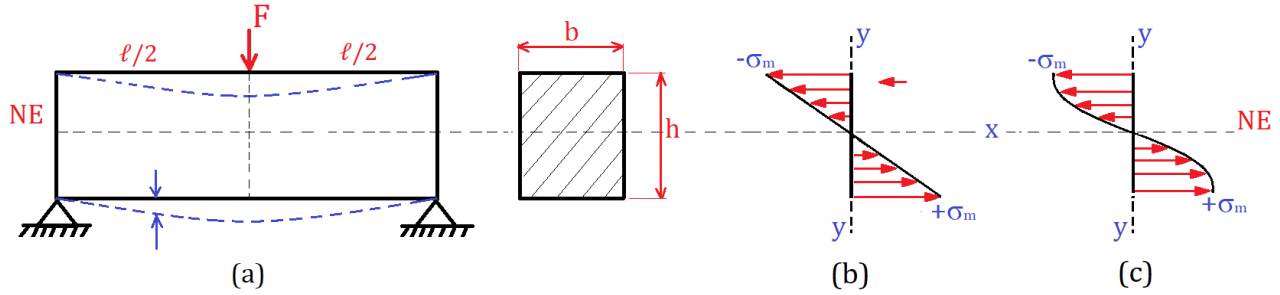
Eğme Momenti (M_e): Şekildekine benzer eğme düzeneklerinde kuvvet iki mesnete oturtulmuş deney numunesinin tam ortasına etki ettirilir. Bu nedenle eğme momenti;

$$M_e = \frac{FL}{4}$$

F: Uygulanan kuvvet (kgf)
 ℓ : Mesnetler arası uzaklık

Eğilme Dayanımı (σ_e) veya Kırılma Modülü (KM):

(a) dan görüleceği gibi eğilmeye maruz kalmış bir çubukta, Y-Y doğrultusu boyunca farklı gerilmeler oluşur. X-X eksenini boyunca simetrik kesite sahip çubuklarda, çubuğun nötr (x-x) düzleminde herhangi bir y mesafesindeki bir düzlemde oluşan eğilme gerilmesi



$$\sigma_e = \frac{MY}{I}$$

M: Eğme momenti: Uygulanan kuvvet (kg)

Y: Nötr ekseninden uzaklık

I: Çubuğun nötr eksenine göre atalet momenti

Gerilmeler nötr ekseninden başlayarak en dış düzlemlerde (liflerde) en yüksek değere ulaşırlar. Nötr eksenin bir tarafında basma, diğer tarafında çekme gerilmeleri oluşur.

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{I/c} = \frac{M}{z}$$

M: Eğme momenti: Uygulanan kuvvet (kg)

I/c: Kesit modülü

z: Karşı kayma momenti

Σ_{max} eğilme dayanımı veya kırılma modülü olarak adlandırılır. I/c oranına genellikle kesit modülü veya karşı kayma momenti adı verilir

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (\text{Dairesel kesit})$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{Dikdörtgen kesit})$$

Elastisite Modülü (E_e):

Gerilmenin deformasyonla doğru orantılı olduğu bölgede (elastik bölgede), σ_e eğme gerilmesinin neden olduğu y eğilme miktarına ilişkin (ϵ) deformasyon oranına bölünmesi ile elde edilir.

$$\epsilon = \frac{6YD}{L^2} \quad (\text{Dairesel kesit})$$

$$\epsilon = \frac{6YH}{L^2} \quad (\text{Dikdörtgen kesit})$$

ϵ : Elastik deformasyon oranı

Y: Eğilme miktarı (mm)

L: Mesnet merkezleri arası uzaklık (mm)

D: Numune çapı (mm)

H: Numune kalınlığı (mm)

Bu durumda elastisite modülü;

$$E_e = \frac{\sigma_e}{\varepsilon} = \frac{4FL^3}{3\pi YD^4} \quad (\text{Dairesel kesit})$$

$$E_e = \frac{\sigma_e}{\varepsilon} = \frac{FL^3}{4YBH^3} \quad (\text{Dikdörtgen kesit})$$

Çeşitli kesitlerdeki numuneler için aşağıdaki genel formül de kullanılabilir;

$$E = \frac{FL^3}{48IY}$$

**Eğme deneyi esnasında elastik bölgede aşağıdaki bağıntı da geçerlidir.

$$\frac{M}{I} = \frac{E}{R}$$

M: Eğme Momenti

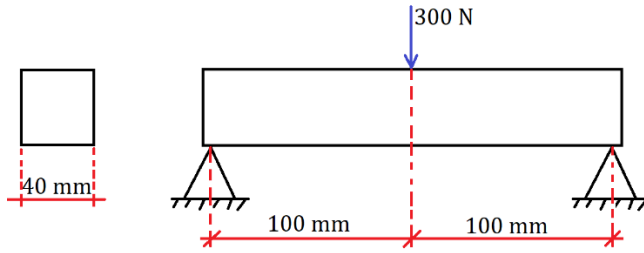
I: Nötr eksene göre atalet momenti

E: Elastisite modülü

R: Eğilme esnasında numunenin eğrilik yarıçapı

Örnek Problemler

① Şekildeki iki ucu mesnetli kare kirişin tam ortasına 3000 N değerinde bir kuvvet uygulanmaktadır. Kirişte oluşacak maksimum eğme gerilmesini hesaplayınız (h = 40 mm).



$$F = 3000 \text{ N}$$

$$\ell = 200 \text{ mm}$$

$$b = h = 40 \text{ mm}$$

$$M = \frac{F \cdot \ell}{4} = \frac{3000 \cdot 200}{4} = 150.000 \text{ Nmm}, \quad c = \frac{b}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ mm},$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{40^4}{12} \text{ mm}^4$$

$$\sigma_e = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{150000 \cdot 20}{40^4/12} \cong 14,06 \text{ N/mm}^2$$

② Dikdörtgen kesitli bir kirişin yüksekliği genişliğinin 2 katıdır. Bu kiriş, 50.000 Nmm' lik bir eğilme momenti taşıyacaktır. Kirişin emniyetle taşıyabileceği gerilme 150 N/mm² olduğuna göre kirişin genişliğini hesaplayınız.

$$\sigma_{em} \geq \frac{M \cdot c}{I}, \quad c = \frac{2b}{2} = b, \quad I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b(2b)^3}{12} = \frac{8b^4}{12} = \frac{2b^4}{3} \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{em} \geq \frac{M \cdot c}{I} \quad 150 \geq \frac{50000 \cdot b}{\frac{2b^4}{3}} \quad b^3 \geq \frac{50000}{150 \cdot \frac{2}{3}} \quad b^3 \geq 500,$$

$b \geq 7,93$ —> $b = 8\text{mm}$ olabilir.

VI. KIRILMA VE KIRILMA TOKLUĞU DENEYLERİ

Malzemelerin gerilme altında iki veya daha fazla parçaya ayrılmasına KIRILMA denir. Kırılma karakteri malzemeye göre farklılık gösterir ve genellikle uygulanan gerilmeye, sıcaklığa ve deformasyona hızına bağlıdır.

Kırılma birincisi çatlak oluşumu, ikincisi çatlak ilerlemesi adı verilen iki aşamada gerçekleşir. Kırılma karakteri ne olursa olsun bu iki aşama gözlenir. Malzemenin kırılma öncesi durumuna ve kırılmaya neden olan yükleme şartlarına bağlı olarak kırılma birkaç sınıfa ayrılır.

I. Gevrek Kırılma: Malzemenin çok az veya hiçbir plastik deformasyon bırakmadan kırılmasına denir. Camlar, seramikler ve bazı metaller gevrek olarak kırılabilir.

II. Sünek Kırılma: Malzemelerde kırılma öncesi plastik deformasyon meydana gelirse bu tip kırılma sünek kırılmadır. Sünek kırılmanın meydana gelebilmesi için cisimde belirli bir miktar plastik deformasyon şarttır.

III. Sürünme Kırılması: Yüksek sıcaklıklarda, sabit gerilme altında malzemenin sürünme deformasyonu sonucunda kırılmasına denir.

IV. Yorulma Kırılması: Malzemelerin elastik sınır veya çekme dayanımı altındaki alternatif yükler altında zamanla kırılmasıdır. Genel olarak sünek kırılmaya benzese de çatlak ilerlemesi sünek kırılmadan farklıdır.

KIRILMA TİPLERİ

Mikroskobik açıdan incelendiğinde kırılma, malzemeyi meydana getiren bir tanenin kırılması veya kristalografik düzlemler üzerinde veya bu düzlemleri kesen atomlar arası bağların kopması yani atomlar arası kohezyon kuvvetinin sıfıra inmesi sonucunda olur. Malzemenin kırılması mikroskobik açıdan aşağıdaki şekillerde sınıflandırılır.

A. Klivaj (Cleavage) Kırılması: Kırılma klivaj düzlemleri olarak bilinen düzlemler boyunca meydana gelirse buna klivaj kırılması denir. Klivaj düzlemleri en düşük yüzey enerjisine sahip düzlemlerdir. Bu tip kırılma, klivaj düzlemine dik normal gerilmelerin kritik bir değeri aşması ile klivaj düzlemine dik atom bağlarının koparılması sonucu oluşur. Tek eksenli gerilme halinde çatlak, çekme yönüne dik olarak ilerleme eğilimindedir. Bu nedenle klivaj kırılmaları düz bir görünüm gösterir. Ancak çok taneli yapılarda klivaj düzlemlerinin oryantasyonu her malzemede farklı olduğu için bir taneden diğerine geçilirken çekme doğrultusuna dik olmaz. Dolayısıyla bir taneden daha büyük boyuttaki klivaj kırılmaları düz görünüm göstermez, tane değiştikçe kırılma yönü de değişir.

B. Kayma Kırılması: Kayma gerilmesinin kritik bir değeri aşması ile atom düzlemlerinin kayması esnasında atom bağlarının kopmasıyla meydana gelir. Bölgesel ve homojen olmayan bir plastik deformasyondan ibarettir.

Metalik malzemelerde plastik deformasyon, kaymaya karşı direnci az olan atom düzlemlerinin kayması ile meydana gelir. Bu düzlemlere kayma düzlemleri adı verilir. Bu nedenlerle metallerde kayma gerilmesinin bulunduğu kısımlarda ilerleme eğilimindedir.

KIRILMA MEKANİĞİ

Kırılma mekaniği, çatlak gibi gerilme konsantrasyonu artırıcı faktörler göz önüne alınarak kırılma problemlerini inceler. Kırılma mekaniğinde kırılma ile ilgili parametre kırılma tokluğudur (gerilme şiddet faktörü). K ile gösterilir. Gerilme şiddet faktörü (K), çatlak civarında gerilme olanını belirleyen bir parametre olup, malzemenin geometrisi, yükleme şekli, çatlak yeri ve oryantasyonuna bağlıdır.

GRIFFITH TEORİSİ

Gevrek bir malzemede bir çatlak bulunması halinde, malzemenin kırılmadan dayanabileceği gerilmeyi tayin eden ilk bağıntıdır.

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi a}}$$

σ_f : Kırılma gerilmesi

γ : Yüzey enerjisi

E: Elastiklik modülü

a: Çatlak boyunun yarıları

* Griffith' in denklemine göre, kırılmaya neden olan gerilme miktarı (σ_f) mevcut çatlak boyutu (2a) ile ters orantılıdır.

Denklemden yüzey enerjisi terimi yerine, genellikle kırılma işini gösteren bir parametre kullanılırsa;

$$G_c = 2\gamma \rightarrow \sigma_f = \sqrt{\frac{G_c E}{\pi a}}$$

G_c : Kırılma için gerekli toplam iş

Gerilme Şiddet Faktörü: Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasında bir gerilme şiddet faktörü (K) parametresi geliştirilmiştir. Gerilme şiddet faktörü, uygulanan gerilmenin çatlak boyut ve şeklinin ve geometrik faktörün bir fonksiyonudur.

$$\sigma_f \sqrt{\pi a} = \sqrt{E G_c} \quad \text{eşitliğinden;}$$

$\sigma_f \sqrt{\pi a}$ değeri $\sqrt{E G_c}$ değerine ulaştığında çatlak ilerleyeceğini ifade eder. Dolayısıyla $\sigma_f \sqrt{\pi a}$ teriminin çatlak ilerlemesi için gerekli kuvvet ölçüsü olduğu düşünülerek bu terim gerilme şiddet faktörü olarak adlandırılır.

Yani; $K = \sigma_f \sqrt{\pi a}$ ile gösterilir. K'nın kritik bir K_c değerinde kırılma olur; $K_c = \sqrt{E G_c}$

Kritik gerilme şiddet faktörü (K_c) kırılma tokluğu olarak adlandırılır. Kırılma tokluğunu tespit edebilmek için gerilme şiddet faktörü ölçülür. $K = K_c$ olduğunda çatlak ilerler ve kırılma olur.

A. KIRILMA TOKLUĞU DENEYİ:

Kırılma tokluğu çeşitli deneylerle test edilebilir. Bu deneylerde, deney yapılacak malzemenin şekli ve miktarına göre farklı şekillerde numuneler hazırlanır. Herhangi bir parça için kırılma analizi yapılacaksa o parçanın kendisinden numune almak gerekir. Ayrıca numune alınan parçanın yükleme şekli de göz önüne alınarak numune hazırlanmalı ve aynı yönde yüklenerek deney yapılmalıdır. Ayrıca deney sonrasında kırılma yüzeyi de dikkatle incelenmelidir.

Kırılma tokluğu deneyi ile gerilme şiddet faktörü tayininde kullanılan kırılma yükü, numunenin şekline bağlı olarak farklı değerler alır. Bu nedenle kırılma tokluğu denklemi;

$$K_c = Y\sigma\sqrt{a}$$

K_c : Kırılma tokluğu

Y : Numune şekil ve boyutlarına bağlı geometrik faktör

σ : Kırılma gerilmesi

a : Çatlak boyu

KT Deneyi: Darbe deneyinde ve çentikli darbe deneyinde çentikler makine ile hazırlandığı halde, kırılma tokluğu deneyinde doğal çatlak oluşumu istenir. KT deneyi için önce çentikli numune hazırlanır. Daha sonra numunede yorulma deneyi ile çentik dibinde belirli bir boyda doğal çatlak oluşumu sağlanır. Çatlak yorulma deneyi ile oluşturulduktan sonra numune bir çekme cihazında çekilir. Genellikle düşük bir deformasyon hızı seçilir.

Uygulanan yük arttıkça malzeme önce elastik olarak deformasyona uğrar. Burada çatlağın açılma miktarı yük ile doğrusal olarak artar. Yük, elastik sınırı aştığında malzemenin kırılma özelliğine bağlı olarak farklı durumlar meydana gelir.

Eğer malzeme gevrekse yük, elastik sınırı aşar aşmaz numune kırılır ve yük aniden düşer. K_c hesaplanırken maksimum yük kullanılır. Sünek malzemelerde, yük elastik sınırı aştığında, çatlağın açılma miktarı yük arttıkça artar. Bu durum numune kırılıncaya kadar devam eder.

KIRILMA TOKLUĞUNA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

- i. Deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$): Deformasyon hızı arttıkça K_c azalır.
- ii. Sıcaklık (T): Sıcaklık arttıkça K_c artar.
- iii. Akma Gerilmesi (σ_a): Akma gerilmesi artarsa K_c azalır.

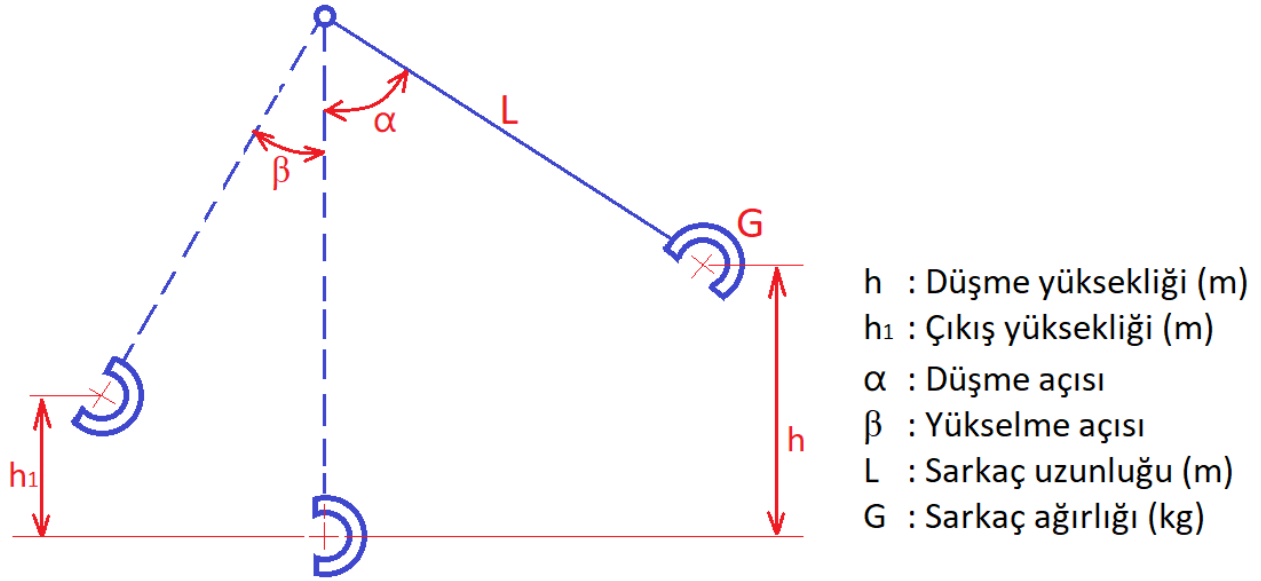
Bu faktörlerin etkileri birbirinden bağımsız değildir. Örneğin deformasyon hızı artarsa malzemenin akma gerilmesi de artar. Eğer deney sıcaklığı yükseltirirse bu durumda da malzemenin akma gerilmesi azalır.

B. DARBE TOKLUĞU DENEYLERİ

Malzemelerin özellikle gevrek kırılmaya müsait koşullardaki mekanik özellikleri hakkında fikir edinilmesi amacıyla uygulanır. Çekme deneyi ile elde edilen σ - ϵ diyagramında yüksek

uzama değerleri gösteren malzemelerin sünek olacağı tahmin edilir. Bu tahmin, YMK veya hegzagonal malzemeler için genellikle doğrudur. Ancak, HMK sistemindeki malzemelerde çekme deneyi sonuçları ile darbe deneyi sonuçları arasında farklılık gözlenir. Çekme deneyinde sünek özellik gösteren malzeme darbe deneyinde gevrek özellik gösterebilir.

Deney Prensipleri: Darbe deneyinde numunenin dinamik bir zorlama altında kırılması için gereken enerji miktarı belirlenir. Bulunan değer malzemenin darbe direnci (darbe mukavemeti) olarak tanımlanır.



Bu deneylerde sarkaç tipi cihazlardan faydalanılır. Ağırlığı G olan sarkaç h yüksekliğine çıkarıldığında sahip olduğu potansiyel enerji $G \cdot h$ ’ a eşittir. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında, düşey bir düzlem üzerinde hareket ederek numuneyi kırar ve ters yönde h_1 yüksekliğine yükselir. Bu durumda numunenin kırılmasından sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji $G \cdot h_1$ ’e eşittir.

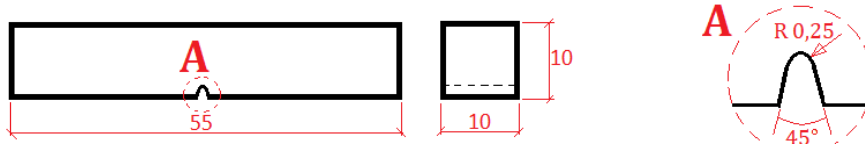
Sarkacın numune ile temas ettiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerji farkı, o numunenin kırılması için gereken enerjiyi başka bir ifadeyle malzemenin darbe direncini verir.

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

h ve h_1 yükseklikleri sarkacın ağırlık merkezinden itibaren hesaplanır ve darbeyi yapan çekicinin bütün kütlesinin teorik olarak ağırlık merkezinde toplandığı kabul edilir. Bu noktanın numuneye temas etmesine zen gösterilir.

$$\text{entik Darbe Tokluğu} = A_c = E_k / A \text{ (kgf.m/cm}^2\text{)}$$

Darbe deneylerinde kullanılan numuneye genellikle çentik açılır. Burada amaç malzeme bünyesindeki muhtemel gerilme konsantrasyonlarını darbe esnasında çentik tabanında suni olarak oluşturulmasıdır.



Çentikli bir numune zorlandığı zaman çentiğin tabanına dik bir gerilme meydana gelir. Kırılmanın başlaması bu gerilmenin etkisiyle olur. Kırılmanın gerçekleşmesi için bu normal gerilmenin kristalleri bir arada tutan kuvvetlerden (kohezif dayanımdan) daha yüksek olması gerekir.

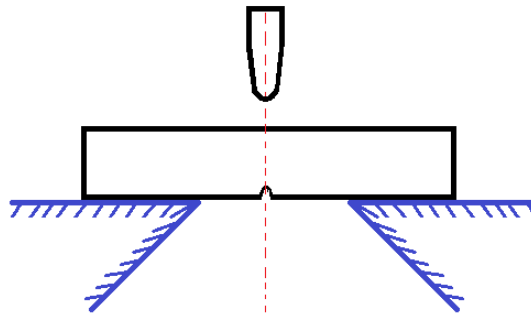
Bu durum numune plastik şekil değişimine fırsat bulamadan meydana gelirse buna gevrek kırılma denir. Kırılan yüzey düz görünümündedir.

Deney esnasında numune kırılmadan önce çoğu zaman plastik şekil değiştirme meydana gelir. Kuvvet etkisi altında normal gerilmeye ek olarak kayma gerilmeleri de etki etmeye başlar. Kayma gerilmeleri kayma dayanımını aştığında elastik özellik sona erer, plastik şekil değişimi başlar. Önce plastik şekil değişimi sonra kırılma meydana gelir. Buna sünek kırılma denir. Kırılma yüzeyi girintili çıkıntılıdır.

Çentikli darbe deneyleri iki türde yapılır;

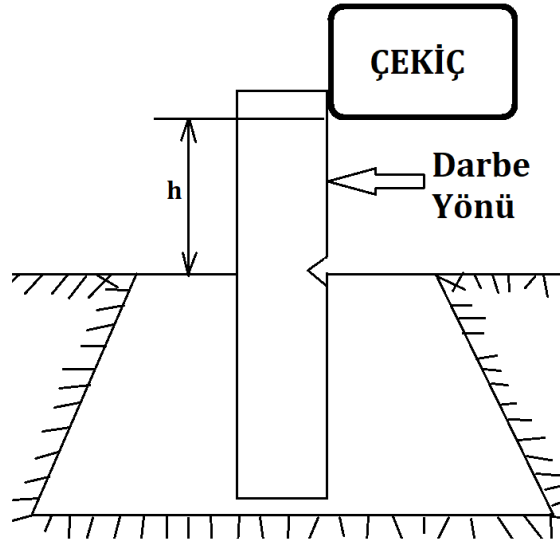
I. Charpy Darbe Deneyi

Yatay ve basit kiriş halinde iki mesnete yaslanan numunenin çentik tabanına bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapılması ve çentik tabanında meydana gelen çok eksenli gerilmeler etkisiyle numunenin kırılması için harcanan enerjiyi tespit etmeye yarar.



II. İzod Darbe Deneyi

Dikey ve konsol kiriş haline bir kavrama çenesine tespit 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 enerji tespit işlemidir.

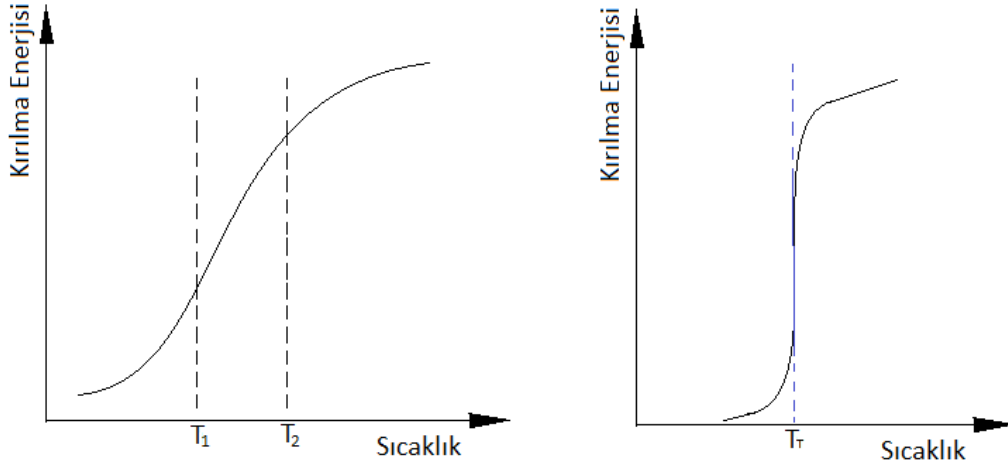


DENEYİN UYGULANIŞI:

- 1) Öncelikle sarkaç, daha önceden tespit edilen potansiyel enerjiye sahip olabileceği h yüksekliğine çıkarılır. Daha sonra numune uygun şekilde yerleştirilir. Deney basit olduğu ve şartlar değiştikçe malzeme farklı özellik gösterdiği için numunenin cihaza uygun şekilde yerleştirilmesi doğru sonuç alma açısından önemlidir. En sık uygulanan charpy deneyinde numune mesnetlere tam yaslanacak şekilde ve çekicinin salınım düzlemi ile çentiğin simetri düzlemi çakışacak şekilde yerleştirilir.
- 2) Bazı malzemelerde darbe dayanımı sıcaklıkla değişir. Kırılma anında deney numunesinin sıcaklığı aksi belirtilmedikçe belirtilen sıcaklıktan $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan fazla fark göstermemelidir.
- 3) Cihazın aksamaları arasında enerji kaybına yol açacak herhangi bir sürtünme olup olmadığını anlamak için test yapılmadan önce cihaz birkaç kez boşta çalıştırılarak sürtünme olup olmadığı kontrol edilmelidir.

DARBE DİRENCİNİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ

Belirli bir malzeme için değişik sıcaklıklarda yapılan darbe deneyleri, o malzemenin darbe direnci hakkında daha anlamlı bir netice sunar. Değişik sıcaklıklarda yapılan seri deney, aşağıdaki şekildekine benzer bir eğri verir. Bu eğriden de anlaşılacağı gibi sıcaklık düştükçe malzemenin darbe direnci de düşmektedir. Darbe direncinde düşme aniden olabildiği gibi belirli bir sıcaklık aralığında da olabilir. Darbe direncinin aniden düştüğü sıcaklığa geçiş (Transition) sıcaklığı adı verilir. Grafikteki eğri üzerinde bu sıcaklığı tayin etmek oldukça güçtür. Bu durumda tek bir sıcaklık yerine T_1 ve T_2 gibi sıcaklıklar arasında kalan bir geçiş aralığı tanımlanır.



T_1 sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda malzeme gevrek davranış gösterir. Kırılma klivaj düzlemleri boyunca olup, kırılma yüzeyi kristalin (granüler=ince taneli) bir görünüştür. Bu sıcaklıklarda darbenin tesiri ile ilk çatlak kolayca meydana gelir ve çatlak, malzeme içinde büyük bir hızla yayılır.

T_2 sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda ise malzeme sünek bir davranış gösterir. Bu sıcaklıklarda darbenin tesiriyle 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 durumlarda kırılma, yırtılma şeklinde olup kırılma yüzeyi lifli bir görünüş sergiler.

Geçiş aralığında her iki davranış birden görülür. Deney sıcaklığı T_1 sıcaklığına yaklaştığında gevrek davranış duruma hakim olur. Mühendislik uygulamalarında T_1 sıcaklığı T_2 ye nazaran daha büyük önem taşır. Çünkü deneyi yapılan malzeme bu sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda kullanılmaz. Geçiş sıcaklığı olarak da , genellikle bu T_1 sıcaklığı alınır.

T_1 sıcaklığının tayininde ise, genellikle şu üç kriterden faydalanılır;

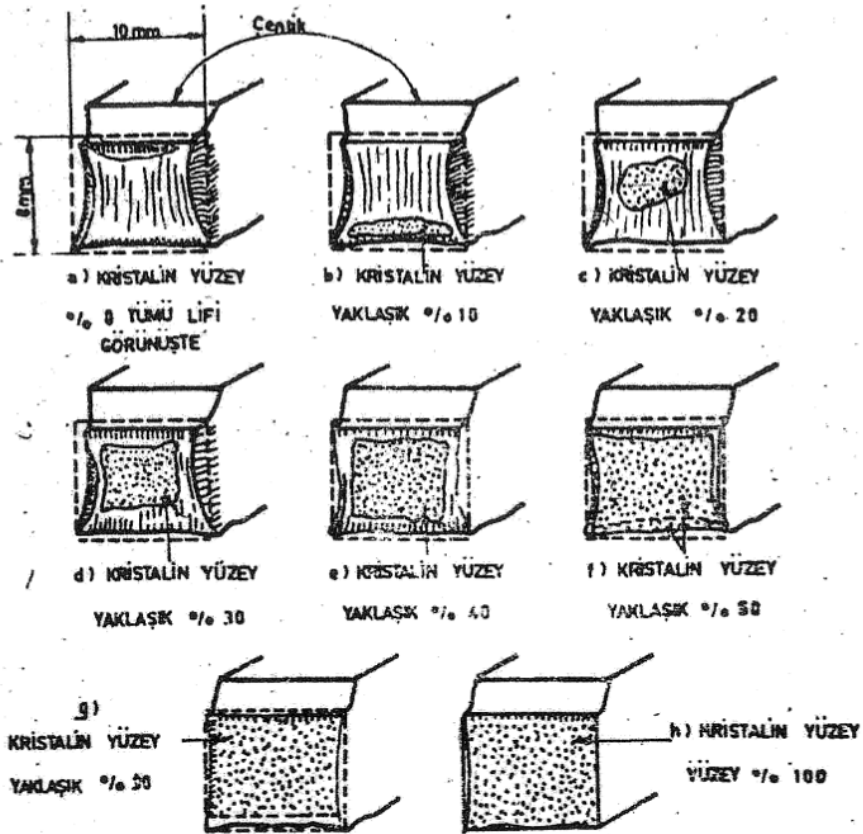
- 1- Kırılma enerjisi
- 2- Kırılma yüzeyinin görünüşü
- 3- Kırılmadan sonra çentik tabanında meydana gelen enlemesine büzülme miktarı

Kırılma enerjisi kriter olarak seçildiğinde genellikle 2-3 kg-m (15-20ft-lb) lik kırılma enerjisine takebül eden sıcaklık, geçiş sıcaklığı olarak kabul edilir.

Kırılma yüzeyi görünüşü kriter olarak alındığında kırılma yüzeyinde kristalin (granüler) şekilde gözüken alanın tüm kesit alanına oranı, yaklaşık olarak tespit edilmeye çalışılır. Aşağıdaki şekilde geçiş aralığından kırılma yüzeylerinin değişik görünüşleri gösterilmektedir. (a) sünek davranışa, (h) ise çok gevrek davranışa ait görünüşü yansıtmaktadır. Kesitte % 50 kristalin (granüler) görünüşü veren sıcaklık, geçiş sıcaklığı olarak alınabilir.

Yine (a ve b) sünek davranış halinde, çentik tabanında belirli miktarda enlemesine büzülme görülür. (h) Gevrek davranış halinde ise plastik biçim değiştirme olmadığından, çentik tabanında enlemesine büzülme görülmez. Bu büzülme miktarı kriter olarak seçildiğinde %1 mertebesinde büzülme gösteren sıcaklık, geçiş sıcaklığı olarak kabul edilebilir.

Malzemelerin geçiş sıcaklığı mühendislik uygulamalarında özellikle malzeme seçimi sırasında oldukça önemli bir kriter olur. Geçiş sıcaklıkları düşük olan malzemeler daha çok tercih edilirler. Düşük sıcaklıklarda çalışacak malzemelerde bu özellik oldukça büyük önem taşır. Geçiş sıcaklığı malzemeden malzemeye değişebileceği gibi aynı malzemede kimyasal bileşim, tane boyutu, mikroyapı, soğuk işlem derecesi gibi faktörlerin tesiriyle de değişebilir.



Geçiş sıcaklığı aralığında kırılma yüzeylerinin değişik şematik görüntümleri

Örnek Problemler

① En dar yerinin kesiti 8 cm^2 olan çentik açılmış bir çelik çubuk 600 N ağırlığındaki çekicinin 200 cm yüksekte düşürülmesi sonucu kırılıyor. Numune kırıldıktan sonra çekiç ters yönde 30 cm yükseliyor. Bu malzemenin çentik darbe dayanımını hesaplayınız.

Malzemeyi kırmak için yapılan iş; $E_{k1} = G_{h1} - G_{h2} = 600 (2 - 0,3) = 600 \cdot 1,7 = 1020 \text{ Nm}$

$$\text{Çentik Darbe Tokluğu, } \sigma_c = \frac{E_k}{A} = \frac{1020}{8} \cong 127,5 \frac{\text{Nm}}{\text{cm}^2}$$

② Kenarları 20 mm kare kesitli çentikli darbe numunesine 4mm' lik V çentik açılmıştır. Kırılma esnasında malzemenin absorbe ettiği enerji 160 joule olduğuna göre bu malzemenin darbe direnci ne kadardır?

$$A=16 \times 20 = 320 \text{ cm}^2 = 320 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$E_k = 160 \text{ J} = 0,16 \text{ kJ}$$

$$\text{Darbe Direnci, } = \frac{E_k}{A} = \frac{0,16}{320 \cdot 10^{-6}} \cong 500 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2}$$

③ Bir tasarımda alternatif 3 malzeme arasında seçim yapılacaktır. Malzemelere ait kırılma toklukları (K_c) ile bu malzemelerde ölçülen en büyük çatlak uzunlukları (μm) tablolarda verilmiştir. Buna göre, bu malzemeyi kırılmaya zorlayacak en büyük gerilme 500 MPa ise bu malzemelerden bu şartlarda kırılmadan dayanabilecek olanlarını bulunuz.

Malzeme	K_c (MPa/ $\sqrt{\text{m}}$)	Kusur Boyutu (μm)	a (m)
A	40,0	3000	$1500 \cdot 10^{-6}$
B	47,5	6200	$3600 \cdot 10^{-6}$
C	52,5	7500	$3750 \cdot 10^{-6}$

$$\text{A Malzemesi, } \sigma_f = \frac{K_c}{\sqrt{\pi a}} = \frac{40}{\sqrt{\pi \cdot 1500 \cdot 10^{-6}}} \cong 583 \text{ MPa} > \mathbf{500 \text{ MPa}}$$

$$\text{B Malzemesi, } \sigma_f = \frac{K_c}{\sqrt{\pi a}} = \frac{47,5}{\sqrt{\pi \cdot 3600 \cdot 10^{-6}}} \cong 481 \text{ MPa} < 500 \text{ MPa}$$

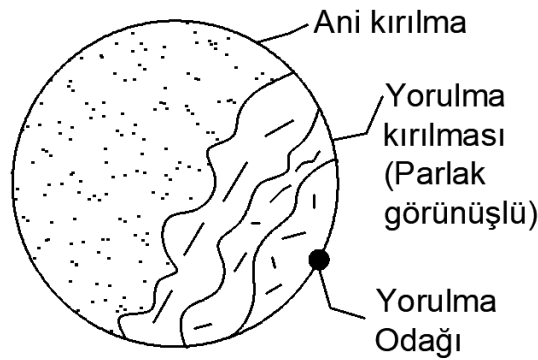
$$\text{C Malzemesi, } \sigma_f = \frac{K_c}{\sqrt{\pi a}} = \frac{52,5}{\sqrt{\pi \cdot 3750 \cdot 10^{-6}}} \cong 484 \text{ MPa} < 500 \text{ MPa}$$

VII. YORULMA

Tekrarlanan yükler altında çalışan malzemelerde gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen belirli bir tekrarlanma sonunda genellikle yüzeyde bir çatlak oluşumu ve bunu takiben kopma olayı gerçekleşir. Bu olaya yorulma adı verilir.

Yorulmaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısıl genleşme ve büzüşmeden doğan ısıl gerilmeler de neden olabilir.

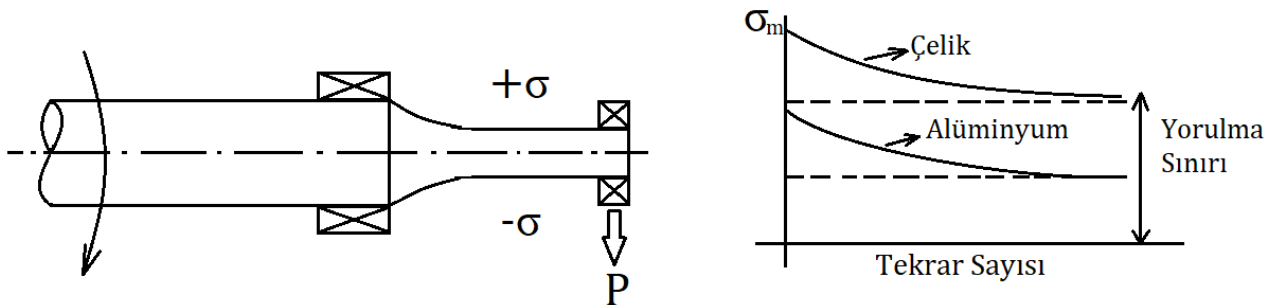
Yorulmada çatlama genellikle yüzeydeki bir pürüzde, çentikte veya kılcal bir çatlakta başlar. Çünkü bu tip hatalar civarındaki gerilmeler ortalama gerilmelerden daha büyüktür. Bu gerilmeler etkisinde yerel plastik şekil değişimi meydana gelir.



Yorulma kırılmasının yüzey görünümü tipiktir. Yüzeyde çatlağın başladığı yorulma odağı ile onu çevreleyen aynı merkezli eğriler ve bunların yanında taneli bir bölge gözlenir. Çatlak ilerlerken karşılıklı yüzeylerin sürekli sürtünmesi sebebiyle yorulma kırılması yüzeyi parlak görünümlüdür. Çatlak ilerleyip geri kalan dolu kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince de ani kırılma meydana gelir. Kırılma yüzeyi taneli görünümdedir.

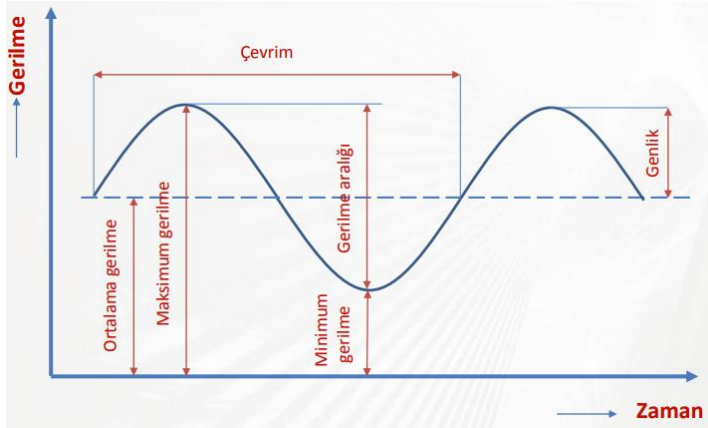
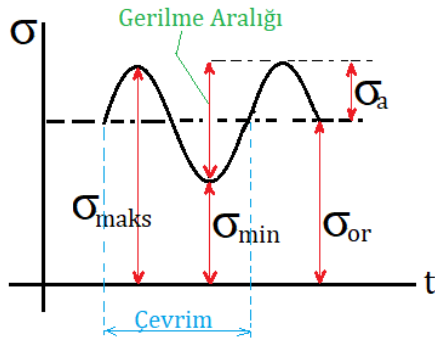
Yorulma Deneyi:

Yorulma deneyi ile belirli bir tekrar sayısı için malzemenin güvenle dayanabileceği gerilme sınırı saptanır. Hazırlanan numunelere belirli bir büyüklükte tekrarlı gerilmeler uygulanır. Bu gerilme etkisinde kırılmanın oluştuğu U tekrar sayısı ölçülür. Bu gerilme genlikleri ile bunlara karşılık gelen N tekrar sayıları bir eğri halinde çizilir. Elde edilen bu eğrilere Wöhler Eğrileri adı verilir.



Yorulma Deneyi ile İlgili terimler:

i. Çevrim: Yorulma deneyinde zamanla sinüzoidal bir değişim gösteren gerilmeler uygulanır. Σ -t eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına bir çevrim denir.



ii. Maksimum Gerilme (σ_{maks}): Uygulanan gerilmeler arasında en yüksek matematiksel değere sahip olandır.

iii. Minimum Gerilme (σ_{min}): Uygulanan gerilmeler arasında en düşük matematiksel değere sahip olandır.

iv. Ortalama Gerilme (σ_{ort}): Maksimum ve minimum gerilmelerin matematiksel ortalamasıdır.

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

v. Gerilme Aralığı: Maksimum ve minimum gerilme değerleri arasındaki farktır.

$$\sigma_{maks} - \sigma_{min}$$

vi. Gerilme Genliği (σ_a): Gerilme aralığının yarısına eşittir.

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

vii. Gerilme Oranı (R):

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}}$$

viii. Yorulma Sınırı (σ_s): Özellikle Fe alaşımlı metallerin ve çeliklerin yorulma eğrileri 10^6 tekrar sayısından sonra yatay hale gelir. Bu değere yorulma sınırı veya sürekli mukavemet adı verilir. Bu sınırın altındaki tekrarlı gerilmeler kırılma oluşturmaz.

ix. Yorulma Mukavemeti (σ_y): Demir dışı malzemelerin yorulma eğrilerinde sürekli olarak azalma görülür. Eğri yatay hale gelmez. Bu tür malzemeler için belirli bir ömür seçilir. Bu genellikle 10^8 tekrar sayısına karşılık gelir. Bu tekrar sayısına karşı gelen gerilme değeri eğriden tespit edilir. Bu gerilmeye yorulma mukavemeti adı verilir.

x. Yorulma ömrü (N): Benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme altında çatlama gösterdikleri (N) çevrim sayılarının ortalamasıdır.

SABİT YORULMA DİYAGRAMI (SMITH DİYAGRAMI)

Bu diyagramlarda belirli bir N yorulma ömrü için maksimum gerilme (σ_{maks}), minimum gerilme (σ_{min}) veya gerilme genliğinin (σ_a) ortalama gerilmeye göre (σ_{or}) değişimini verilir.

VIII. SÜRÜNME (SÜNME) VE GERİLME GEVŞEMESİ DENEYLERİ

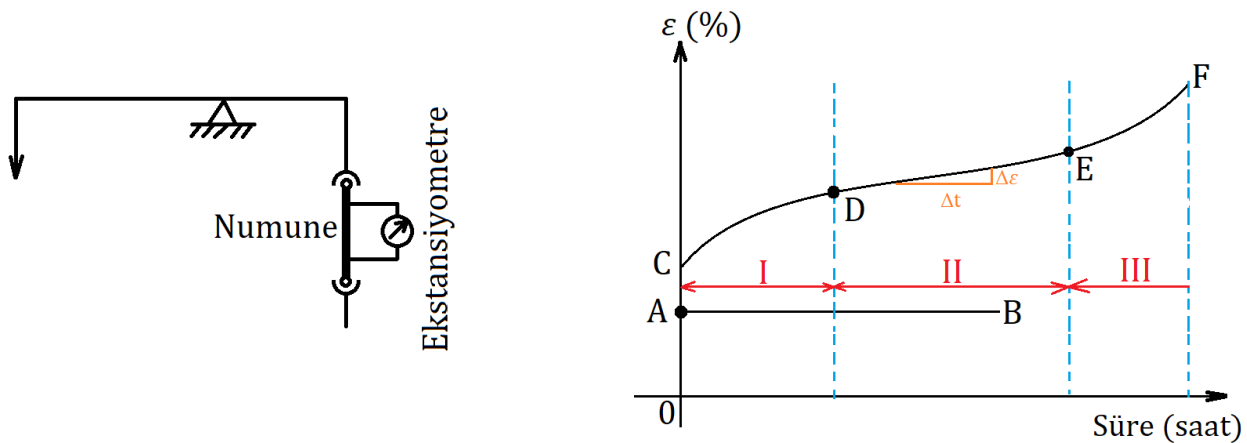
Sabit bir sıcaklıkta, sabit bir gerilme altında malzemelerde zamanla meydana gelen plastik deformasyona sürünme adı verilir. Sürünme, ani olmayan fakat zamanla meydana gelen bir deformasyon türüdür. Yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleştiğinden yüksek sıcaklık deformasyon mekanizması olarak bilinir.

Uygulamada sürünme olayına buhar kazanları, buhar tirbünleri, jet motorları gibi aksamalarda sıklıkla rastlanır.

Sürünme kopma ile sonuçlanabileceği gibi bir parçayı belirli bir deformasyon sonucunda çalışma boyutlarının toleransları dışına çıkararak da kullanılmaz hale getirebilir.

A. SÜRÜNME DENEYİ

Deney Prensipleri: Malzemeye elastik sınır altında kalacak şekilde sabit bir σ gerilmesi belirli bir sıcaklıkta uygulanır ve malzemedeki şekil değişimi tespit edilir.



Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneyde gerilmenin etkisiyle ani bir elastik uzama (OA) meydana gelir ve gerilme değişmediği sürece uzama sabit kalır (AB)

Aynı σ gerilmesi yüksek bir sıcaklıkta uygulanacak olursa, ilk olarak OA' dan büyük olmak üzere bir OC uzaması oluşacaktır. Bunun nedeni sıcaklığın artması ile elastiklik modülündeki düşüştür. OC uzaması, tümüyle elastik olabileceği gibi elastik + plastik de olabilir. Sıcaklık ve gerilme etkisiyle uzama, zamana bağlı olarak devamlı artış gösterir ve CDEF eğrisini izler. Eğrinin herhangi bir noktasındaki eğimi ϵ_s° sürünme hızını verir.

$$\varepsilon_s^o = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t}$$

Tipik bir sürünme eğrisi başlıca 3 bölgeden oluşur.

I. Bölgede; numune gerilme etkisiyle ani bir uzama gösterir.

II. Bölgede; sürünme hızı sabit kalır.

III. Bölgede; sürünme hızı tekrar artar, sonuçta malzeme kopar.

I. Bölgede, malzeme gerilmenin etkisi altındadır. Bu nedenle iç yapıda dislokasyonlar etkin olup malzemede şekil değiştirme sertleşmesi (pekleşme) gerçekleşir.

II. Bölgede, pekleşme hızı ile toparlanma hızı birbirine eşittir. Bu bakımdan bu bölgeye “kararlı sürünme bölgesi” adı verilir. Malzemenin sürünmeye karşı direnci bu bölgede en yüksek düzeydedir.

III. Bölge, numunenin boyun vermesiyle başlar. Kopma bu bölgenin sonunda meydana gelir.

Sürünme olayında malzemenin şekil değiştirmesi ve şekil değişiminin neden olduğu pekleşme birbirlerine ters yönde etki eder.

Malzemenin yüksek sıcaklık davranışları hakkında en iyi bilgiyi veren deney, basit olmasına rağmen deney süresi uzundur. Deney süresini kısaltmak için deneyler hızlandırılmış koşullarda (yüksek sıcaklık ve yüksek gerilme uygulanarak) gerçekleştirilebilir.

Deney Cihazı: Sürünme test cihazında üç ana kısım bulunmalıdır:

- Elektrikli bir fırın ve sıcaklık kontrol ünitesi
- Uzamaları ölçmek için bir eksansiyometre
- Kuvvet uygulama düzeneği

Sürünme deneyi esnasında;

- Fırın içerisindeki sıcaklık deney süresince sabit tutulmalıdır.
- Numunenin ölçü boyu uzunluğunca sıcaklık farkı 5°C' i geçmemelidir.
- Sıcaklık ölçümü 1°C hassasiyetle yapılabilmelidir.

Deneyin Uygulanışı ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

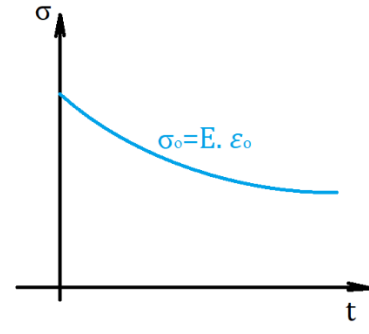
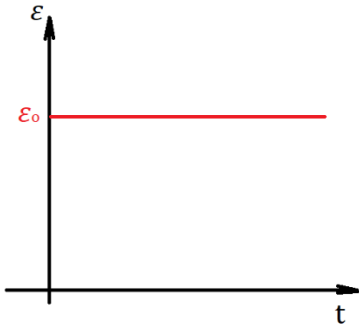
Numune cihaza sabitlendikten sonra deney sıcaklığına yavaş yavaş çıkılır. Isıtma sonunda sıcaklığın numunede denge durumuna gelmesi için yük uygulamadan önce numune deney sıcaklığında bir süre daha sabit tutulur.

Numuneye belirtilen tüm kuvvet uygulanmadan önce kuvvetin en fazla %10' u kısa süreyle uygulanır. Bu arada cihaz kontrol edilir. Bundan sonra tüm kuvvet uygulanır.

Malzemenin sürünme dayanımı gerçek kopmanın olduğu dayanım şeklinde tanımlanabileceği gibi parçanın belirli bir sıcaklıktaki hizmet ömrü sonrasında, belirli bir plastik deformasyona neden olan gerilme şeklinde tanımlanabilir.

B. Gerilme Gevşemesi Deneyi

Sabit şekil değiştirme uygulanan bir malzemede gerilmenin zamanla azalmasına gerilme gevşemesi denir. Gevşeme de sürünme gibi zamana bağlı bir davranıştır. Gerilme gevşemesi deneyinde malzemeye ϵ_0 kadar bir ilk uzama uygulanır ve boy sabit tutulursa gerilme zamanla azalır.



Gerilme Gevşemesi Deneyi

Bu deney genellikle çekme cihazında yapılır. Çekme veya basma deneyi yapılırken numuneye belirli bir yük yüklendiğinde yeri belirli bir gerilme durumuna gelindiğinde deney cihazı aniden durdurularak numune boyu sabit tutulur ve numunenin gevşemesine bağlı olarak yükün veya gerilmelerin zamana göre dağılımı tespit edilir.

Kaynakça

1. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, William D. CALLISTER, David D. RETHWISCH.
2. Malzeme Bilimi, Prof. Dr. Kaşif ONARAN.
3. Malzeme Bilimi Problemleri, Prof. Dr. Kaşif ONARAN.
4. Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, E. Sabri KAYALI, Cahit ENSARİ, Feridun DİKEÇ.
5. Malzeme Bilimine Giriş, Lawrence H. Van VLACK.
6. Malzeme Biliminin Temelleri, Doç.Dr. Hüseyin UZUN, Prof.Dr. Fehim FINDIK, Prof.Dr. Serdar SALMAN.
7. Mechanics of Materials, Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston.