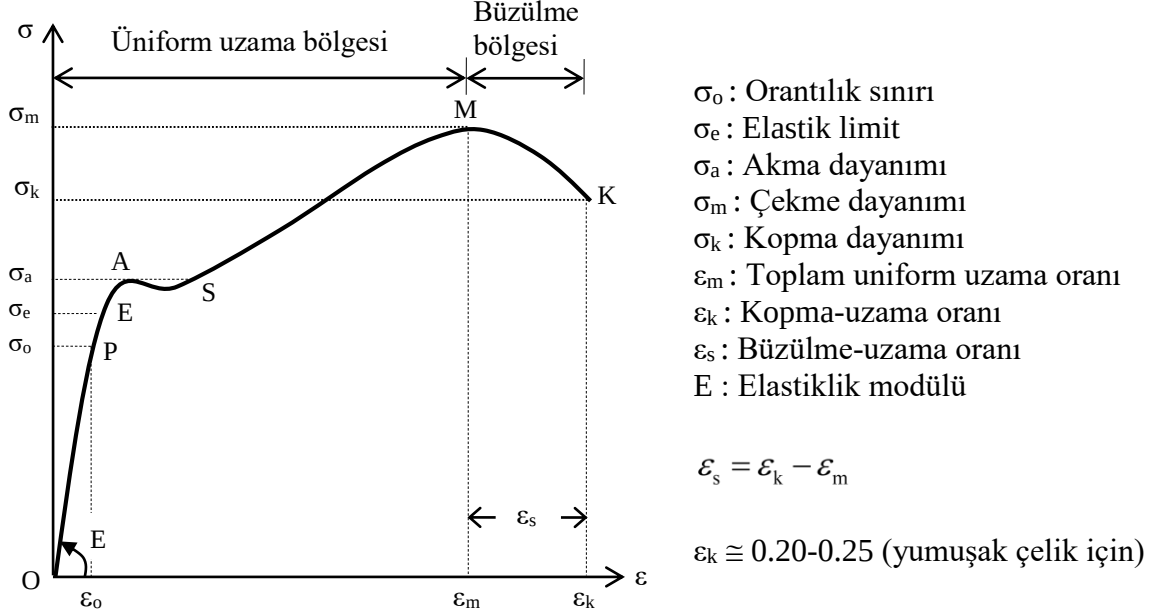


YUMUŞAK ÇELİK İÇİN GERİLME-ŞEKİLDEĞİŞTİRME DİYAGRAMI

Yumuşak çelik için gerilme-şekildeğiştirme diyagramı(σ - ϵ) ve önemli karakteristikleri aşağıdaki gibi verilebilir.

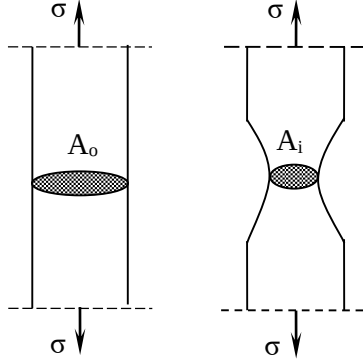


Yumuşak çelik P noktasına kadar lineer-elastik davranır. Bu bölgede Hooke yasası geçerlidir. Yani, $\sigma = \epsilon \times E$ dir. $\sigma \leq \sigma_0$

E noktası elastik limite tekabül etmektedir. Bu noktada uygulanan gerilme kaldırılınca cisim orijinal boyutlarına döner. Elastik sınırın aşıldığı A noktasında akma başlar. Yani, bir kısım atomlar kalıcı yer değiştirir. Bu noktada uygulanan gerilme kaldırılınca, toplam şekil değiştirmenin bir kısmı elastik olarak geri dönerken bir kısmı kalıcıdır. S noktasında akma durur. M noktası malzemenin nihai dayanımına karşılık gelir. Bu noktaya kadar oluşan şekil değiştirmelerin numune uzunluğu boyunca üniform olduğu kabul edilir. Bu noktadan itibaren numunenin en zayıf kesitinde şekil değiştirme yoğunlaşır ve büzülmenin başladığı boyun bölgesi oluşmaya başlar. Numune bu boyun bölgesinde, K noktası, kopar. Bu noktaya karşılık gelen gerilme *kopma dayanımı* olarak bilinir.

Cisim elastik sınıra kadar yüklenip boşaltıldığında ilk boyutlarına döner. Yani kalıcı şekil değiştirme olmaz. Cisim elastiklik sınır ötesinde bir gerilme değerine kadar yüklenip kuvvet kaldırıldığında oluşan şekil değiştirmenin bir kısmı elastik, geri kalan kısmı plastiktir. Plastik şekil değiştirme malzeme içyapısının kalıcı biçimde değişmesi demektir. İçyapıdaki değişiklik uygulanan gerilmenin düzeyine bağlı olarak kademeli gerçekleşir. İlk yüklemde ulaşılan gerilme değeri aşılmadığı sürece cisimde bundan sonraki yüklemelerde plastik şekil değiştirme olmaz. Yani, malzeme elastik davranır. Bu yüklemiş işlemi malzemenin soğuk işlenmesine neden olur. Yükleme neticesinde malzemenin elastik davrandığı gerilme sınırı yükselir. Aynı zamanda orantılık sınırı ve elastik sınır yükselir ancak akma gerçekleşirse akma bölgesi yok olur. Bu arada malzemenin kopma-uzama oranı, yani sünekliği, azalır. Bu olay malzemenin soğuk işlenmesi olup *pekleşme* olarak bilinir. Yumuşak çeliğe ait (σ - ϵ) eğrisinde S ve M noktaları arası pekleşme bölgesidir. Pekleşmiş malzeme kullanıldığında emniyet gerilmesi yükseltilmiş olduğundan daha az malzeme gerekir. Bu, dolayısıyla, daha ekonomik çözümdür.

Malzeme nihai dayanıma kadar her noktasında aynı miktarda şekil değiştirme yapar. Bu değerden sonra üniformluk kalkar ve kopma kesitinde büzülme ve aşırı uzama görülür; malzeme içinde kayma düzlemleri birbirinden ayrılmaya başlar ve nihayet cisim K'da kopar. (σ - ϵ) eğrisinde M noktası ile K noktası arası büzülme-uzama oranı, ϵ_s , ve kopmanın gerçekleştiği kesitte meydana gelen daralma, ϕ , büzülme oranı olarak bilinir.

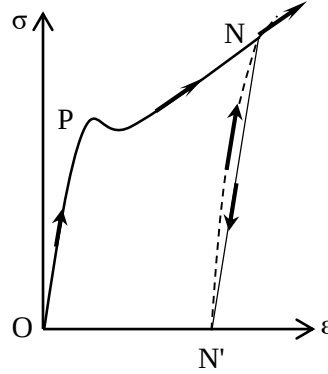
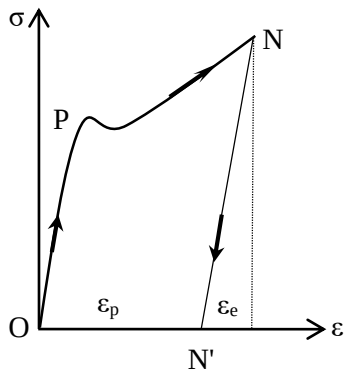


Büzülme oranı, ϕ

$$\phi = \frac{A_o - A_i}{A_o}$$

Burada A_o şekil değiştirme öncesi numune kesit alanı, A_i şekil değiştirme sonrası numune kesit alanıdır.

Numune elastiklik sınır üzerinde yüklenip boşaltıldığında (σ - ϵ) eğrisinde geriye dönüş yolu aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi NN' olmaktadır. N ve N' noktaları arasındaki doğrunun eğimi OP doğrusunun eğimine yaklaşık olarak eşittir. Toplam şekil değiştirmenin elastik kısmı (ϵ_e) yük kaldırıldıktan sonra geri döner, bir kısmı (ϵ_p) kalıcıdır. Numune akma dayanımı üzerinde yüklenip ve boşaltılırsa ve tekrar yüklendiğinde izlenen yol noktalı eğri ile gösterilen kısımdır.



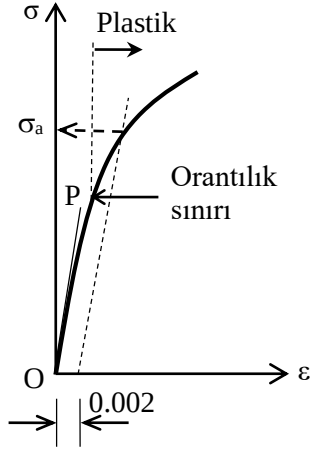
Şekilden görüleceği gibi, tekrar yüklemede cisim sanki farklı bir malzemeymiş gibi bir davranış gösteriyor. N noktasına kadar elastik davranıyor ve orada kayma şekil değiştirmesi başlıyor. Bu olay şekil değiştirme sertleşmesi veya pekleşme olarak bilinir. Akma sınırı üzerinde yüklenen çeliğin akma sınırı yükselirken sünekliği azalır. Buna karşın elastiklik modülü ve çekme dayanımı değişmez.

Kopma-uzama oranı, ϵ_k , büzülme oranı ϕ , ve kırılma-kopma işi, W_k , cismin enerji kapasitesinin birer göstergesidir. Enerji kapasitesi düşük malzemeler gevrekler; yani, malzeme darbe etkilerine karşı dayanıklı değildir. Malzemeler genellikle hem dayanımı hem de darbe direnci yüksek olması istenir. Bu iki karakteristik birbiriyle çelişir. Dayanımı en yüksek cisimlerin genellikle kırılma enerjilerinin de en yüksek olacağı anlamına gelmez.

Soğuk çekme sertleştirilmesi imalat sırasında metallerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Soğuk çekmeye maruz kalan metal plastik olarak şekil değiştirdiği için daha sert ve daha sağlam hale gelir. Çoğu metaller oda sıcaklığında sertleşir.

Soğuk çekme ile sertleştirilmiş çeliğin hem elastik limiti hem orantılık sınırı yükselir. Ayrıca akma bölgesi yok olur. Bununla birlikte çeliğin sünekliği soğuk çekme sertleşmesi nedeniyle önemli derecede azalır.

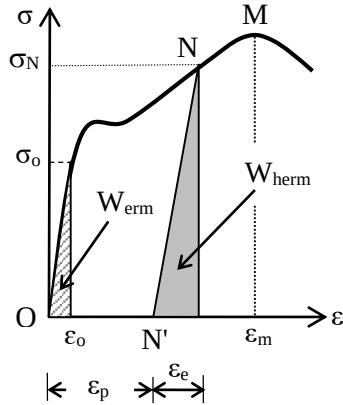
Akma Dayanımı Belirgin Olmayan Metaller İçin Akma Dayanımının Belirlenmesi:



Akma sınırı, gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde doğrusallıktan sapmanın başladığı ilk nokta olarak kabul edilebilir. Şekilde P ile gösterilen bu nokta bazen “orantılık sınırı” olarak da tanımlanır. Bazı metallerde bu nokta tam belirgin değildir. Bu nedenle genel kabul 0.002 kalıcı şekildeğiştirme noktasından gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin elastik kısmına çizilen paralelin eğriyi kestiği noktaya karşılık gelen gerilme değeri “akma dayanımı, σ_a ” olarak tanımlanır. Bazı çeliklerde ve malzemelerde elastik-plastik geçişi oldukça belirgindir ve bu geçiş bölgesine “akma bölgesi” adı verilir.

ENERJİ KAPASİTESİ

Malzemenin enerji depolama kapasitesi darbe etkisi yaratan yükleme bakımından son derece önemlidir. Genel anlamda iş veya enerji kuvvet ile mesafe çarpımına eşittir. Elastik olarak depolanan şekildeğiştirme enerjisi mekanik olarak geri alınabilir. Buna karşın, plastik enerji, ısı enerjisi gibi, mekanik olmayan enerjiye dönüşen enerjidir.



Enerji kapasitesi (σ - ϵ) diyagramında eğri altında kalan alandır. Yumuşak çelik için verilen diyagramda W_{er} ile gösterilen alan elastik rezilyansdır. Plastik bölgede N noktasında gerilme kaldırıldığında geriye dönüş NN' boyunca olur ve geri alınan enerji W_{her} ile gösterilen alandır. Bu “hiper-elastik rezilyans” olarak bilinir ve aşağıdaki gibi hesaplanırlar:

$$W_{erm} = \frac{1}{2} \sigma_0 \times \epsilon_0 = \frac{1}{2} \sigma_0 \times \frac{\sigma_0}{E} = \frac{\sigma_0^2}{2 \times E} \text{ (Elastik rezilyans)}$$

$$W_{herm} = \frac{\sigma_N^2}{2 \times E} \text{ (Hiper-elastik rezilyans)}$$

Hem elastik sınırın altında hem üstünde, $\epsilon_e = \frac{\sigma}{E}$ daima elastik şekil değiştirmeyi verir.

Yumuşak çelik için kopma işi (W_k)

Yumuşak çelik için kopma işi yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır.

$$W_k = \frac{\sigma_a + \sigma_m}{2} \times \epsilon_k \quad \text{Burada } \sigma_a \text{ ve } \sigma_m \text{ sırasıyla akma sınırı ve çekme dayanımıdır.}$$

Rezilyans modülüne bazen malzemenin “elastik enerji dayanımı” da denir. Bu elastik sınır içinde kalmak koşuluyla enerji yüklemesine maruz kalacak malzeme seçimi açısından önemlidir. Yüksek rezilyans modülü için malzemenin ya elastik dayanımı yüksek ya da elastiklik modülü düşük olması gerekir.

Bir malzeme tekrarlı yüklemeye maruz kaldığında, herbir yükleme ve boşaltma çevriminde, bir kısım enerji absorbe edilir veya kaybolur. Bu elastik bölgede dahi geçerlidir. Bu enerji kaybı, genelde, “histeresis” olarak bilinir. Elastik bölge için buna “elastik histeresis” denir. Gerilme-şekildeğiştirme diyagramında, histeresis kaybı ardışık yükleme-boşaltma çevrimlerinin oluşturduğu kapalı alanlar biçiminde oluşur.

Emniyet Katsayısı

Malzemenin dayanımı eğer maruz kalınan yükü taşıması için gerekli gerilmeden büyükse emniyet durumu sözkonusudur. Gerçek dayanımın gerekli dayanıma oranına *emniyet katsayısı* denir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\text{Emniyet katsayısı, } n = \frac{\text{Gerçek gerilme}}{\text{Gerekli gerilme}} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

Emniyet Gerilmesi:

Yapı elemanları maruz kaldıkları yükü belli bir emniyetle taşımaları istenir. Bunun için emniyet gerilmesi aşağıdaki bağıntı vasıtasıyla hesaplanır.

$$\text{Emniyet gerilmesi, } \sigma_{em} = \frac{\text{Malzemenin dayanımı}}{\text{Emniyet katsayısı}}$$

YUMUŞAK ÇELİK İÇİN GERÇEK GERİLME-ŞEKİLDEĞİŞTİRME EĞRİSİ

Nihai (maksimum) dayanımdan sonra elde edilen daha düşük bir kopma gerilmesi mühendislik gerilmesi tanımıyla ilgilidir. Mühendislik hesaplarında A_0 orijinal kesit alanı kullanılır. Oysaki kesit alanı kuvvet arttıkça sürekli değişir. Bu nedenledir ki “gerçek gerilme” ve “gerçek şekildeğiştirme” aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

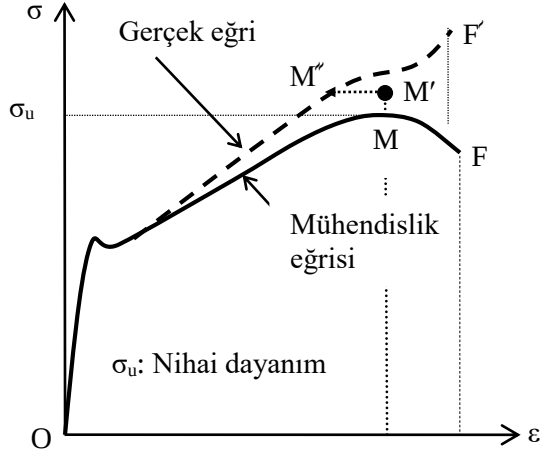
$$\sigma_g = \frac{F}{A_i} \text{ (Gerçek gerilme)} \quad \varepsilon_g = \int \frac{dl}{l_0} = \ln \left(\frac{l_i}{l_0} \right) = \ln \left(\frac{A_0}{A_i} \right) \text{ (Gerçek şekildeğiştirme)}$$

Burada, A_0 ilk alanı, A_i herhangi bir anda F kuvveti uygulandığındaki alanı göstermektedir.

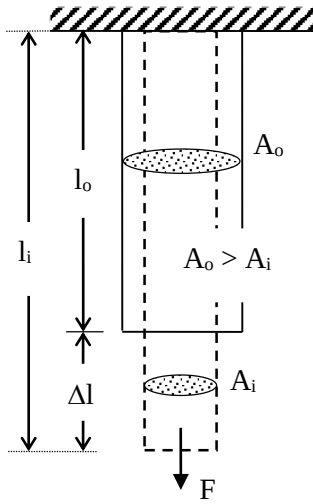
Deformasyon sırasında hacim değişimi olmadığı varsayımı ile yani, $A_i \times l_i = A_0 \times l_0$ koşuluyla gerçek gerilme ve gerçek şekildeğiştirme aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir:

$$\sigma_g = \sigma \times (1 + \varepsilon) \quad \varepsilon_g = \ln (1 + \varepsilon)$$

Bu iki ifade boyun bölgesi oluşmaya başlayana kadar geçerlidir. Bu noktadan sonra gerçek gerilme ve şekildeğiştirme gerçek kuvvet, kesit alanı ve uzunluk ölçüm değerleri dikkate almak suretiyle hesaplanmalıdır.



Yanda verilen şekil mühendislik gerilmesi-şekildeğiştirme eğrisi ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini göstermektedir. Boyunlanma mühendislik eğrisi üzerinde M noktasında başlar. M noktası gerçek eğri üzerinde M' noktasına karşılık gelmektedir.



A_0 kuvvet uygulanmadan önce elemanın kesit alanını, A_i kuvvet uygulandıktan sonra herhangi bir andaki kesit alanını göstermektedir.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Mühendislik veya tabii gerilme})$$

$$\sigma_g = \frac{F}{A_i} \quad (\text{Gerçek gerilme})$$

$A_0 > A_i$ olduğu için $\sigma_g > \sigma$ dir.

Gerilme gibi, şekil değiştirmeler de değişmektedir.

$$F \rightarrow F + dF$$

$$A \rightarrow A - dA$$

$$\varepsilon_g \rightarrow \varepsilon_g + d\varepsilon_g \quad d\varepsilon_g = \frac{dl}{l}$$

$$l \rightarrow l + dl$$

Gerçek şekil değiştirme, $\varepsilon_g = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$ şeklinde elde edilir.

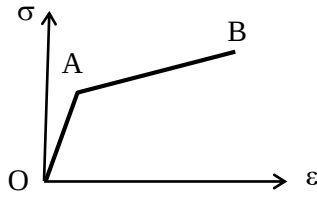
$$l_i = l_0 + \Delta l = l_0 + \varepsilon \times l_0 = l_0 \times (1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon_g = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln \frac{l_0 \times (1 + \varepsilon)}{l_0} = \ln (1 + \varepsilon) \Rightarrow \varepsilon_g = \ln (1 + \varepsilon)$$

$$A_0 \times l_0 = A_i \times l_i \Rightarrow A_i = \frac{A_0 \times l_0}{l_i} \therefore \text{Deformasyon esnasında hacim değişimi olmaz.}$$

$$\sigma_g = \frac{F}{A_i} = \frac{F \times l_i}{A_0 \times l_0} = \sigma \times \left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0} \right) = \sigma \times (1 + \varepsilon) \Rightarrow \sigma_g = \sigma \times (1 + \varepsilon) \text{ olur.}$$

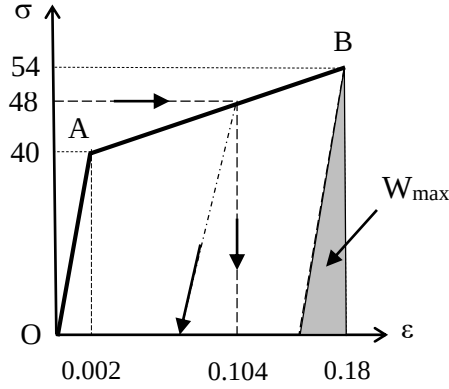
Örnek: Kesit alanı 150 mm^2 olan bir çelik çubuk üzerinde yapılan çekme deneyi sonucu (σ - ϵ) diyagramı şekildeki gibi elde edilmiştir. 12 cm ölçü boyu üzerinde uzamalar aşağıdaki gibidir.



	Yük (kgf)	Uzama (mm)
A	6000	0.24
B	8100	21.6

- Orantılılık sınırını, elastisite modülünü, çekme dayanımı ve kopma-uzama oranını bulun.
- Aynı çelikten yapılmış 3 m uzunluğunda ve 500 mm^2 kesitli bir çubuğa 24 ton yük yüklenip boşaltılırsa son boyu ne olur?
- Çubuğun depolayabileceği maksimum elastik enerji ne kadardır?
- Kopma işini hesaplayınız.

Cözüm:



$$A_o = 150 \text{ mm}^2$$

$$l_o = 120 \text{ mm} \quad \sigma = \frac{F}{A_o} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l_o}$$

	$\sigma \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$	ϵ
A	40	0.002
B	54	0.18

$$\text{a) } \sigma_o = \sigma_A = 40 \text{ kgf/mm}^2 \quad E = \frac{40}{0.002} = 20\,000 \text{ kgf/mm}^2 \quad \sigma_m = \sigma_B = 54 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\epsilon_k = 0.18 \quad (l_o = 10 \times d_o \text{ koşulu sağlandığına göre})$$

$$\text{b) } A = 500 \text{ mm}^2 \quad F = 24 \text{ ton} \quad \sigma = \frac{F}{A} = \frac{24\,000}{500} = 48 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{AB doğrusunun eğimi, } m = \frac{54 - 40}{(0.18 - 0.002)} = \frac{14}{0.178} \cong 78.65$$

$$\sigma = 48 \text{ kgf/mm}^2 \text{ denklemde sağlatılırsa, } \epsilon \cong 0.104 \text{ bulunur.}$$

$$\Delta l = 0.104 \times 3 = 0.312 \text{ m} \quad l = l_o + \Delta l = 3 + 0.312 = 3.312 \text{ m}$$

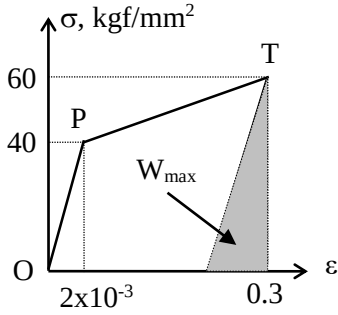
$$\text{Yük kaldırılırsa, } \epsilon_{el} = \frac{\sigma}{E} = \frac{48}{20\,000} = 2.4 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{el} = 3\,000 \times 2.4 \times 10^{-3} = 7.2 \text{ mm} \quad l = l - \Delta_{el} = 3312 - 7.2 \cong 3305 \text{ mm}$$

$$\text{c) B'de maximum elastik enerji, } W_{\max} = \frac{\sigma_B^2}{2E} = \frac{54^2}{2 \times 20\,000} \cong 0.073 \text{ kgf/mm}^2$$

$$\text{d) } W_k = \frac{0.002 \times 40}{2} + \frac{40 + 54}{2} \times (0.18 - 0.002) = 8.406 \text{ kgf} \times \text{mm/mm}^3$$

Örnek: 100 cm uzunluğunda bir metal çubuğa ait (σ - ϵ) diyagramı şekildeki gibidir.



- Elastisite modülünü, elastik rezilyans modülünü ve depolanabilecek maksimum elastik enerjiyi bulunuz.
- 50 kgf/mm² lik bir çekme gerilmesi altında çubuğun uzama miktarını hesaplayınız. Yük boşaltıldığında çubuğun yeni boyu ne olur?
- Bu metali 20 cm uzatmak için ne büyüklükte bir gerilme uygulanmalıdır?
- Bu metal çubuğu koparmak için harcanan enerji ne kadardır?

Çözüm:

$$a) \quad E = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o} = \frac{40}{2 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2 \quad W_e = \frac{\sigma_o^2}{2 \times E} = \frac{40^2}{2 \times 2 \times 10^4} = 0.04 \text{ kgf/mm}^2$$

$$W_{\max} = \frac{\sigma_T^2}{2 \times E} = \frac{60^2}{2 \times 2 \times 10^4} = 0.09 \text{ kgf/mm}^2 \text{ bulunur.}$$

- b) $\sigma=50 \text{ kgf/mm}^2$ olduğu için yükleme P-T arasındadır.

PT doğrusunun eğimi, $m = \frac{60 - 40}{0.30 - 2 \times 10^{-3}} = 67.114$ dir. O halde

$$m = \frac{60 - 50}{0.30 - \epsilon} = 67.114 \quad \Rightarrow \quad \epsilon = 0.151 \text{ bulunur.}$$

Uzama miktarı, $\Delta l = \epsilon \times l = 0.151 \times 1000 = 151 \text{ mm}$

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E} = \frac{50}{2 \times 10^4} = 2.5 \times 10^{-3} \quad \Delta l_e = \epsilon_e \times l = 2.5 \times 10^{-3} \times 1000 = 2.5 \text{ mm}$$

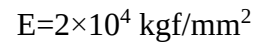
Çubuğun yeni boyu, $l_y = l_o + \Delta l - \Delta l_e = 1000 + 151 - 2.5 = 1148.5 \text{ mm}$

$$c) \quad \Delta l = 20 \text{ cm} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l_o} = \frac{200}{1000} = 0.2$$

$$m = \frac{60 - \sigma}{0.3 - 0.2} = 67.114 \quad \sigma = 53.29 \text{ kgf/mm}^2 \text{ olmalıdır.}$$

$$d) \quad W_k = \frac{1}{2} \times 40 \times 2 \times 10^{-3} + \frac{40 + 60}{2} \times (0.30 - 2 \times 10^{-3}) = 14.94 \text{ kgf/mm}^2 \text{ dir.}$$

c) Çubuk 100 mm yerine 200 mm uzamış olsaydı çubuğun yeni boyunu hesaplayınız.



8

$$\frac{44 - \sigma_N}{\varepsilon_m - \varepsilon} = 53 \quad \frac{44 - \sigma_N}{0.23 - 0.10} = 53 \quad \sigma_N = 37.11 \text{ kgf/mm}^2$$

$$F = \sigma_N \times A_0 = 37.11 \times 78.5 \cong 2913 \text{ kgf}$$

b) $\varepsilon_e = \frac{\sigma_N}{E} = \frac{37.11}{2 \times 10^4} = 1.86 \times 10^{-3}$ (elastik şekilde değişim)

$$\Delta l_e = \varepsilon_e \times l_0 = 1000 \times 1.86 \times 10^{-3} \cong 1.86 \text{ mm}$$

$$l_i = l_0 + \Delta l - \Delta l_e = 1000 + 100 - 1.86 \cong 1098 \text{ mm}$$

c) $\Delta l = 200 \text{ mm}$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{200}{1000} = 0.20 < \varepsilon_m = 0.23 \quad \therefore \text{O halde, yükleme B-M arasında.}$$

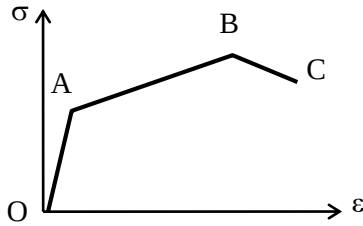
L noktasında:

$$\frac{44 - \sigma_L}{0.23 - 0.20} = 53 \quad \sigma_L = 42.41 \text{ kgf/mm}^2 \quad \varepsilon_e = \frac{42.41}{2 \times 10^4} = 2.12 \times 10^{-3}$$

$$\Delta l_e = \varepsilon_e \times l_0 = 1000 \times 2.12 \times 10^{-3} \cong 2.12 \text{ mm}$$

$$l_i = l_0 + \Delta l - \Delta l_e = 1000 + 200 - 2.12 \cong 1198 \text{ mm}$$

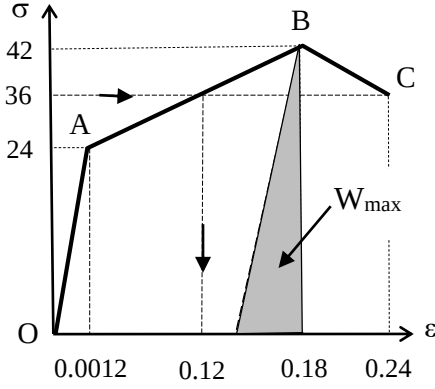
Örnek: 16 mm çapında bir metal numune üzerinde yapılan çekme deneyinde elde edilen (σ - ε) diyagramı aşağıdaki gibidir. A, B ve C noktalarındaki yükler ve $l_0=16 \text{ cm}$ ölçü boyu üzerinde ölçülen uzamalar aşağıdaki gibi belirlenmiştir.



	Yük (kgf)	Uzama (mm)
A	4800	0.192
B	8400	28.8
C	7200	38.4

- Metalin orantılılık sınırı, elastisite modülünü, çekme dayanımını, maksimum üniform uzama oranını ve kopma-uzama oranını hesaplayın.
- Kopma sonunda metalin ölçülen çap 12 mm olduğuna göre büzülme oranını ve kopma anındaki gerçek gerilmeyi bulun.
- Kopma işini ve metal çubuğun depolayabileceği maksimum elastik enerjiyi hesaplayın.
- Bu metalden yapılmış 6 m uzunluğundaki bir çubuğun 12 ton yükü akmaya kıyasla 2 kat emniyetle taşıyacak şekilde kesit alanını bulun. Çubuk bu yük altında ne kadar uzar?
- 36 ton yük altında çubuğun boyu ne kadar olur? Yük kaldırılınca çubuğun yeni boyunu hesapla.
- Yük kaldırıldıktan sonra çubuğun akma sınırını, çekme dayanımını, maksimum üniform uzama oranını ve kopma-uzama oranını hesaplayın.

Cözüm:



$$A_o = \frac{\pi \times d_o^2}{4} = \frac{\pi \times 16^2}{4} = 64 \times \pi = 201 \cong 200 \text{ mm}^2$$

$$l_o = 160 \text{ mm} \quad \sigma = \frac{F}{A_o} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_o}$$

	$\sigma \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$	ε
A	24	0.0012
B	42	0.18
C	36	0.24

a) $\sigma_o = \sigma_A = 24 \text{ kgf/mm}^2$ $E = \frac{24}{0.0012} = 20\,000 \text{ kgf/mm}^2$ $\sigma_m = \sigma_B = 42 \text{ kgf/mm}^2$
 $\varepsilon_m = \varepsilon_B = 0.18$ $\varepsilon_k = 0.24$ ($l_o = 10 \times d_o$ koşulu sağlandığına göre)

b) $A_o \cong 200 \text{ mm}^2$ $A_i = \frac{\pi \times 12^2}{4} \cong 113 \text{ mm}^2$ $\phi = \frac{A_o - A_i}{A_o} = \frac{200 - 113}{200} = 0.435 \text{ (%43.5)}$
 $\sigma_g = \frac{F}{A} = \frac{7200}{113} = 63.7 \text{ kgf/mm}^2$

c) Max elastik enerji B'de gerçekleşir. $W_{\max} = \frac{\sigma_B^2}{2E} = \frac{42^2}{2 \times 20\,000} \cong 0.044 \text{ kgf/mm}^2$

Kopma işi, (σ - ε) eğrisi altında kalan alandır. Bu alan hesaplanırsa,

$$W_k = \frac{0.0012 \times 24}{2} + \frac{24 + 42}{2} \times (0.18 - 0.0012) + \frac{42 + 36}{2} \times (0.24 - 0.18) = 8.25 \text{ kgf} \times \text{mm/mm}^3$$

d) $\sigma_{em} = \frac{\sigma_a}{n} = \frac{24}{2} = 12 \text{ kgf/mm}^2$ $A = \frac{F}{\sigma_{em}} = \frac{12\,000}{12} = 1\,000 \text{ mm}^2$
 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{12}{20\,000} = 0.6 \times 10^{-3}$ $\Delta l = l_o \times \varepsilon = 6\,000 \times 0.60 \times 10^{-3} = 3.6 \text{ mm}$

e) $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{36\,000}{1\,000} = 36 \text{ kgf/mm}^2$ Grafikten $\Rightarrow \varepsilon \cong 0.12$ $\Delta l = 0.12 \times 6 = 0.72 \text{ m}$

$l = l_o + \Delta l = 6 + 0.72 = 6.72 \text{ m}$ Yük kaldırılırsa, $\varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E} = \frac{36}{20\,000} = 1.8 \times 10^{-3}$

$\varepsilon_{el} = 6\,000 \times 1.8 \times 10^{-3} = 10.8 \text{ mm}$ $l = 6720 - 10.8 \cong 6\,709 \text{ mm}$

f) Yükleme-boşaltmadan sonra,

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_a = 36 \text{ kgf/mm}^2 \\ \sigma_m = 42 \text{ kgf/mm}^2 \\ \varepsilon_m = 0.18 - 0.12 + 1.8 \times 10^{-3} = 0.0618 \\ \varepsilon_k = 0.24 - 0.12 + 1.8 \times 10^{-3} = 0.1218 \end{array} \right.$$