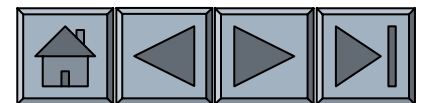




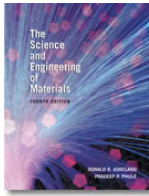
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Bölüm 7 – Deformasyon Sertleşmesi ve Tavlama



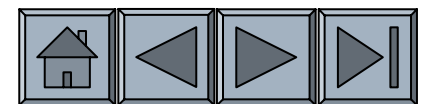
Hedefler

- ❑ Metal ve alaşımların mekanik işlemler ve ısı işlemlerle nasıl mukavemet kazandığını öğrenmek,
- ❑ Soğuk işlem ile metal ve alaşımların nasıl mukavemetinin arttığını öğrenmek,
- ❑ Tavlama işlemi ile nasıl sünekliğin arttığını öğrenmek,



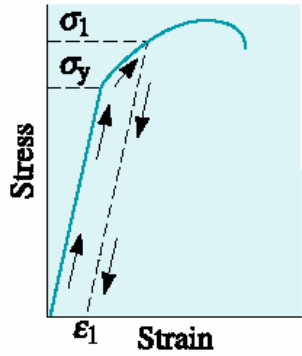
İçerik

- 7.1 Soğuk işlem ile gerilim-deformasyon eğrisi arasındaki ilişki.
- 7.2 Deformasyon sertleşmesi mekanizması
- 7.3 Soğuk işlem yüzdesine karşılık özellikler
- 7.4 Mikroyapı, doku mukavemeti ve kalıntı gerilimler
- 7.5 Soğuk işlem karakteristiği
- 7.6 Tavlamanın üç aşaması
- 7.7 Tavlamanın kontrolü
- 7.8 Tavlama ve malzeme işleme prosesleri
- 7.9 Sıcak işlem
- 7.10 Süperplastik şekillendirme (SPF)

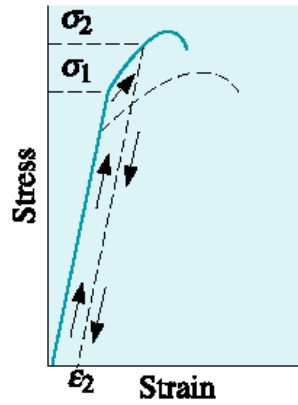


Bölüm 7.1. Soğuk işlem ile Gerilim-Deformasyon Eğrisi Arasındaki İlişki

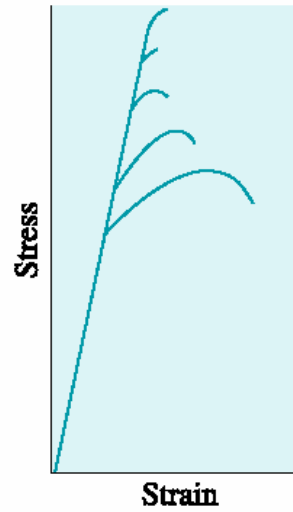
- Akma gerilimi
- Deformasyon sertleşmesi
- Deformasyon sertleşme katsayısı (n)
- Deformasyon hızı duyarlılığı (m)
- Bauschinger etkisi



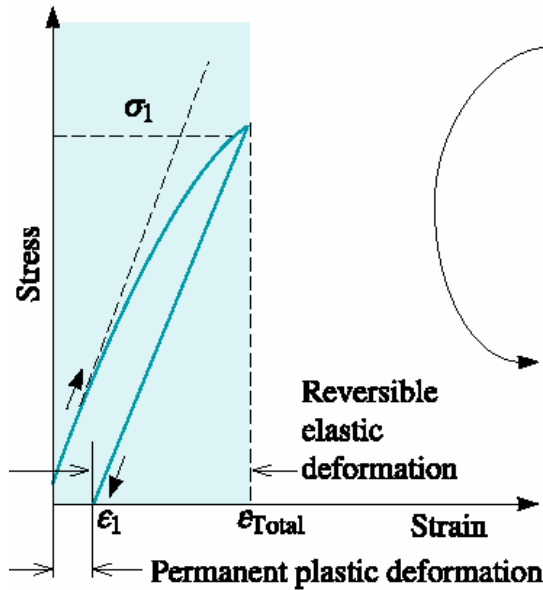
(a)



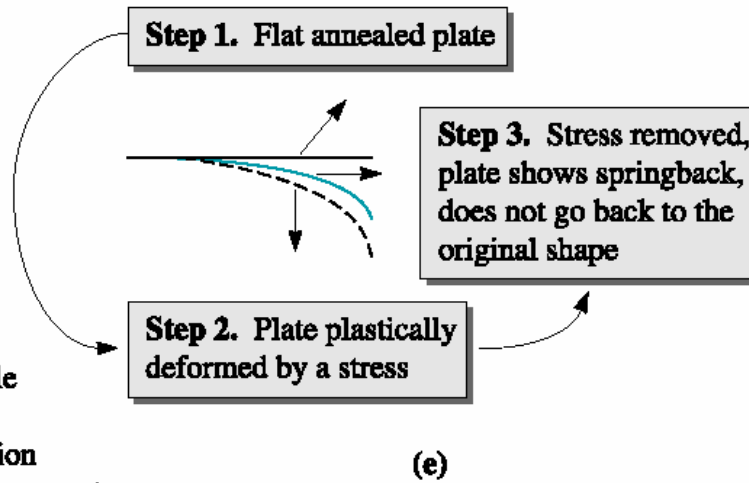
(b)



(c)

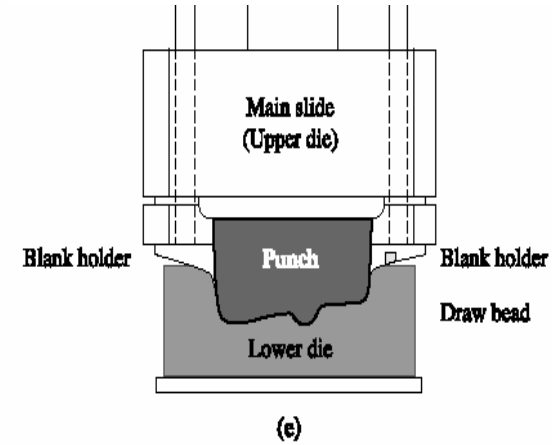
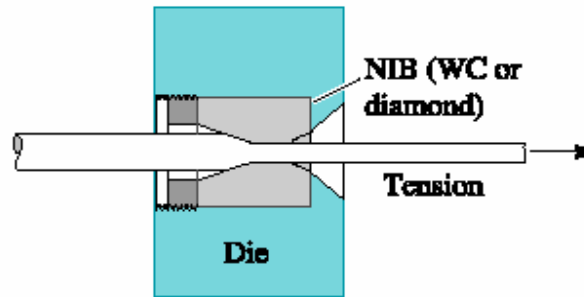
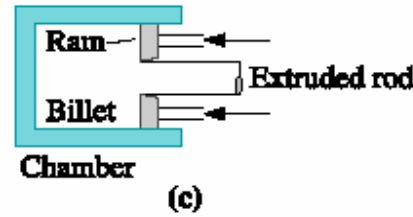
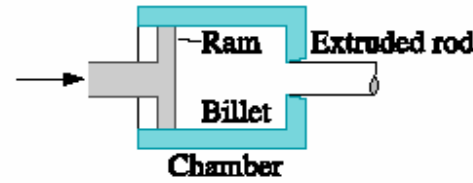
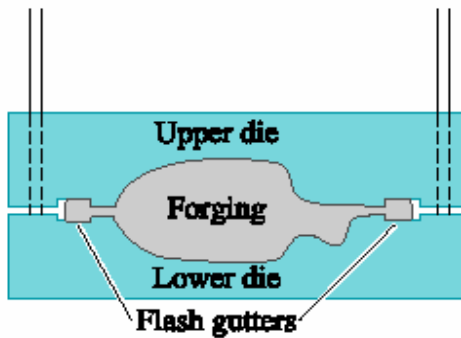
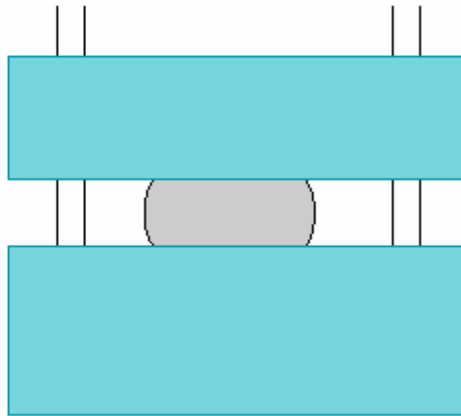
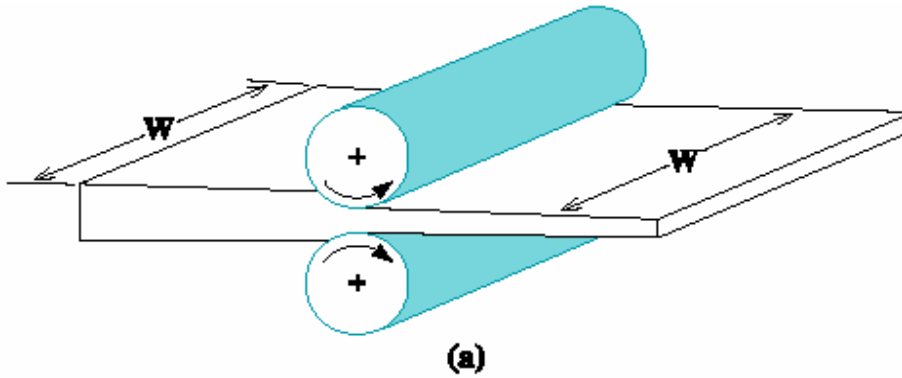


(d)



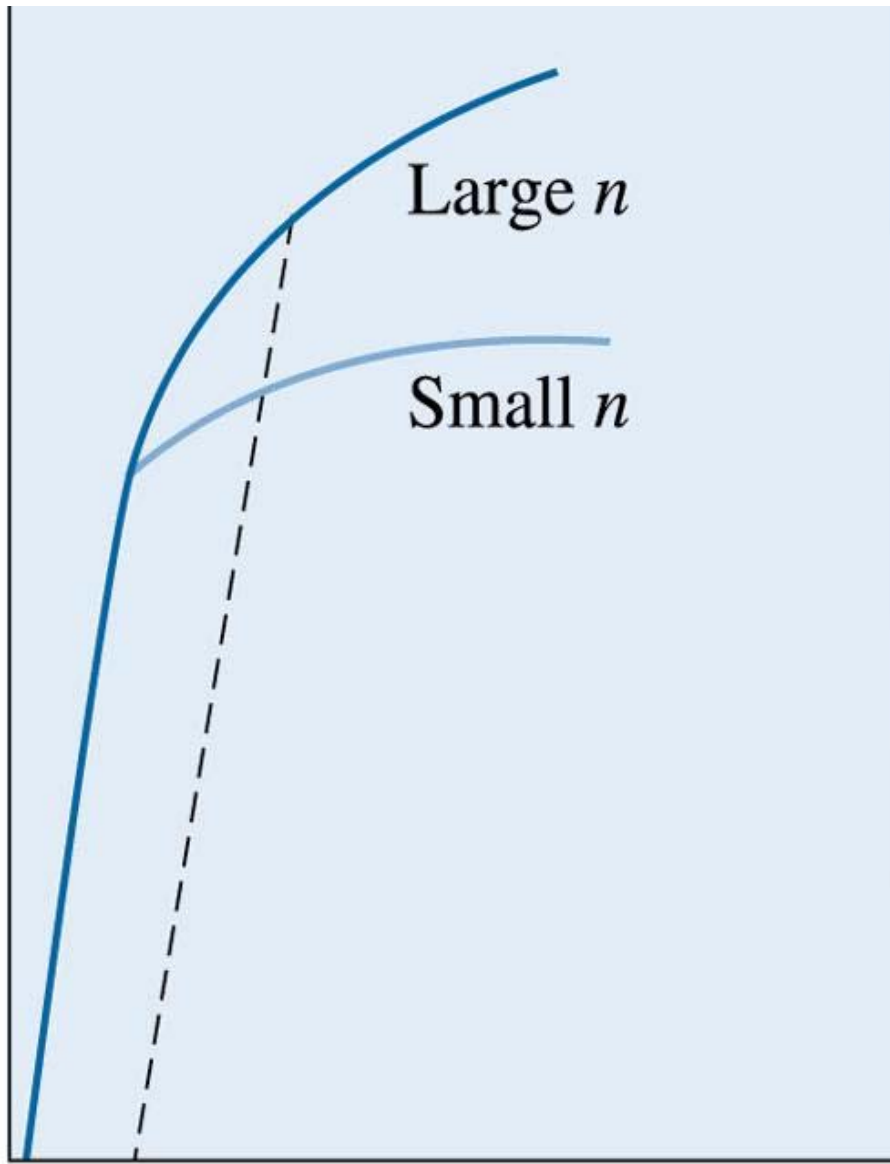
(e)

Gerilim –deformasyon eğrisinden deformasyon sertleşmesinin gelişimi

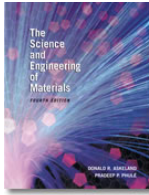


Soğuk işlemi sıcak işlem kadar etkin kılan imalat yöntemleri. Genel metal işleme yöntemleri.

\ln (True stress)



\ln (True strain)



Büyük ve küçük deformasyon sertleşme katsayısına sahip iki adet gerçek gerilim deformasyon eğrisi.

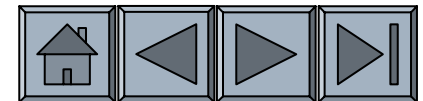
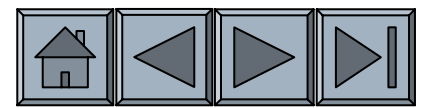
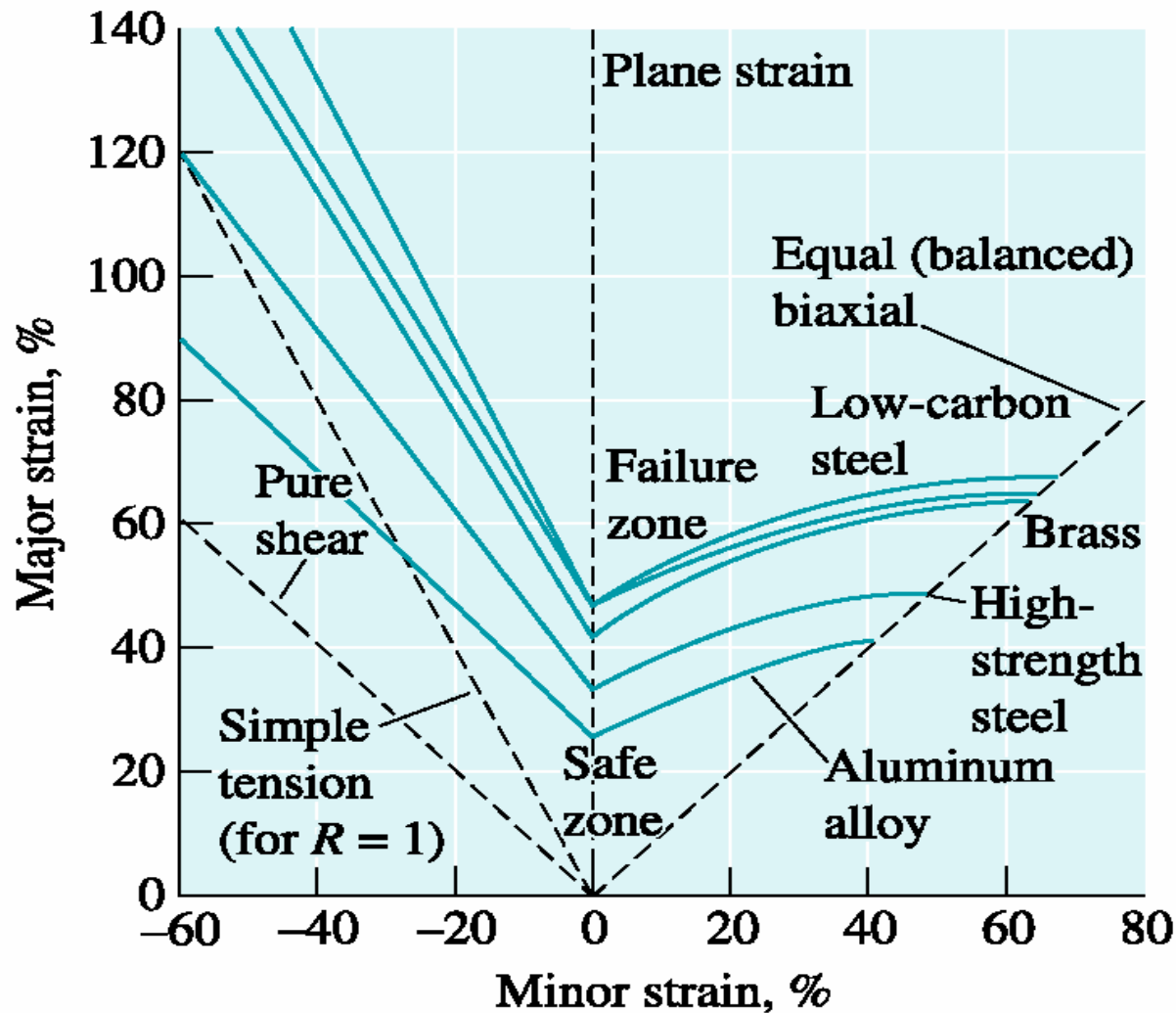


TABLE 7-1 ■ Strain-hardening exponents and strength coefficients of typical metals and alloys

Metal	Crystal Structure	n	K (psi)
Titanium	HCP	0.05	175,000
Annealed alloy steel	BCC	0.15	93,000
Quenched and tempered medium-carbon steel	BCC	0.10	228,000
Molybdenum	BCC	0.13	105,000
Copper	FCC	0.54	46,000
Cu-30% Zn	FCC	0.50	130,000
Austenitic stainless steel	FCC	0.52	220,000

Adapted from G. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill, 1961, and other sources.

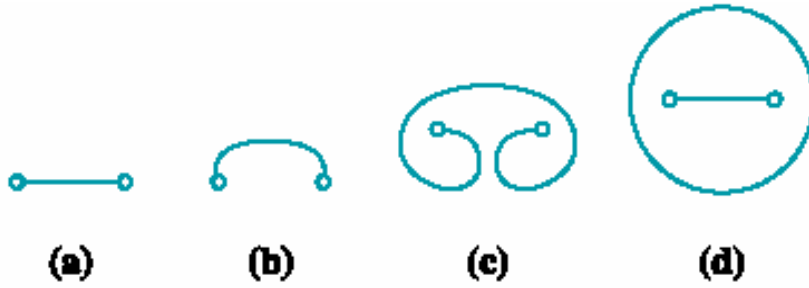




Değişik malzemeler için şekillendirme sınır diyagramı. (Source: Reprinted from Metals Handbook—Desk Edition, Second Edition, ASM International, Materials Park, OH 44073, p. 146, Fig. 5 © 1998 ASM International. Reprinted by permission.)

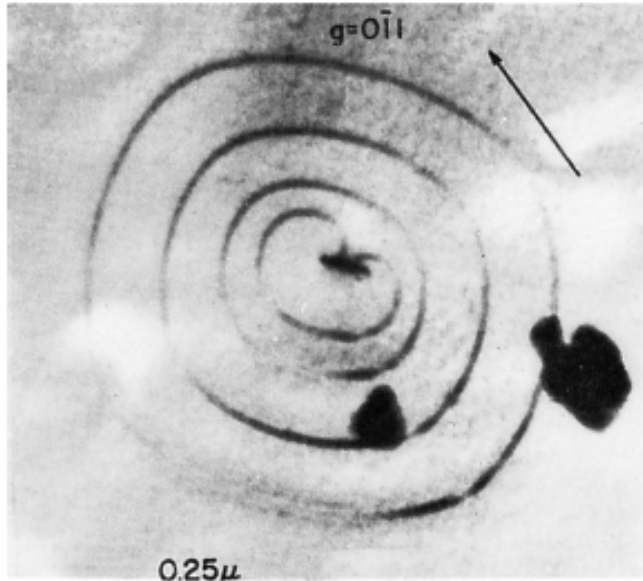
Bölüm 7.2. Deformasyon Sertleşme Mekanizması

- **Frank-Read kaynağı** – Uygulanan gerilim altında düğümlenmiş dislokasyon yeni dislokasyonlar üretir. Bu mekanizma deformasyon sertleşmesini sağlayan mekanizmalardan biridir.
- **Termoplastikler** – Büyük spagetti benzeri polimer ailesidir. (ör: polietilen, naylon).

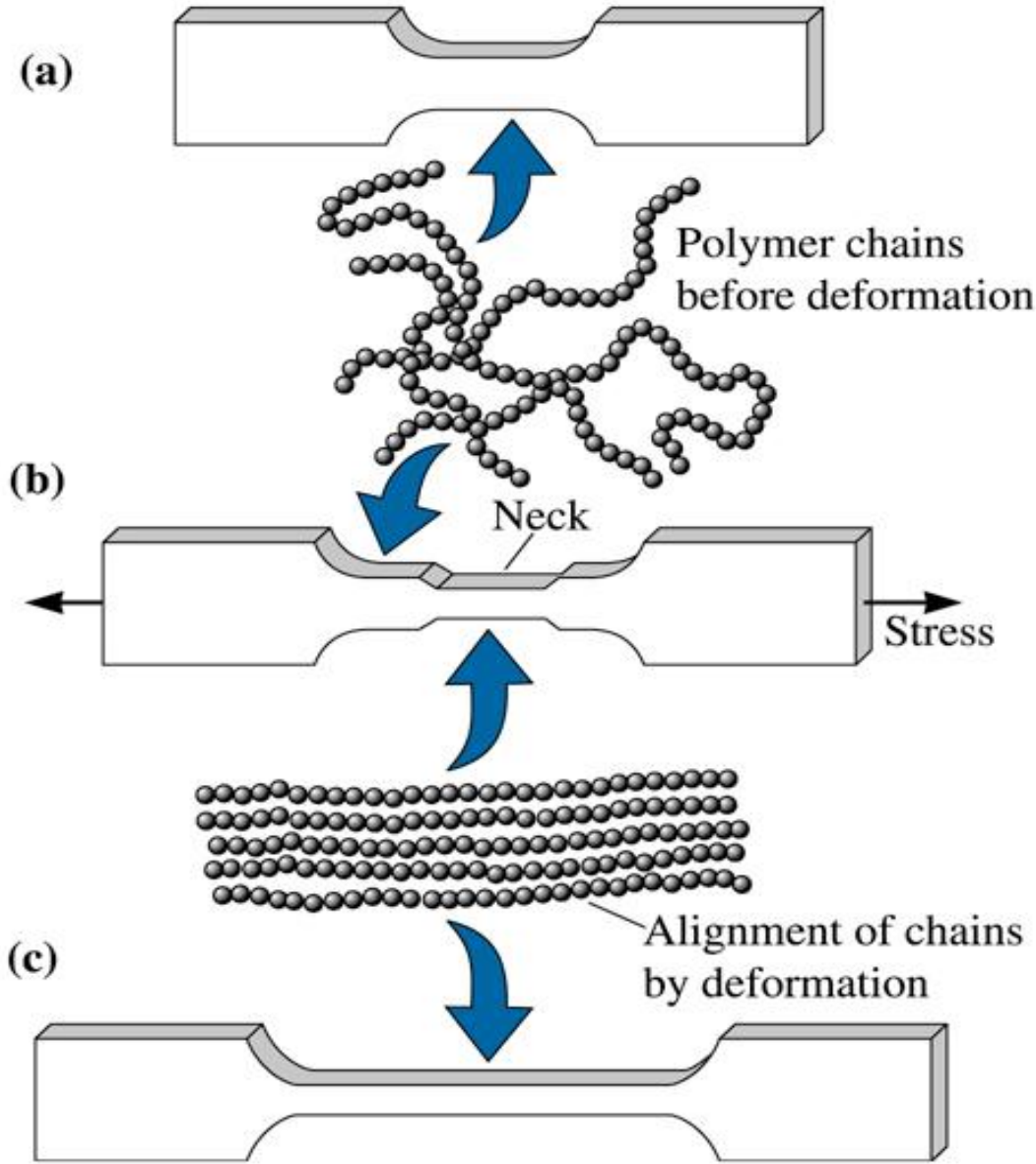


Frank-Read kaynağının dislokasyon oluşturması

(a) Latis hataları yüzünden son noktalarında düğümlenmiş/durdurulmuş dislokasyon. (b) Bu dislokasyon hareketine devam etmeye kalktığında dislokasyon yay şeklini alır ve sonunda kendini geriye eğer. (c) Sonuç olarak dislokasyon halkası oluşur ve (d) yeni dislokasyon oluşur. (e) Frank-Read kaynağının elektron mikrografı. (330,000). (Adapted from Brittain, J., "Climb Sources in Beta Prime-NiAl," Metallurgical Transactions, Vol. 6A, April 1975.)

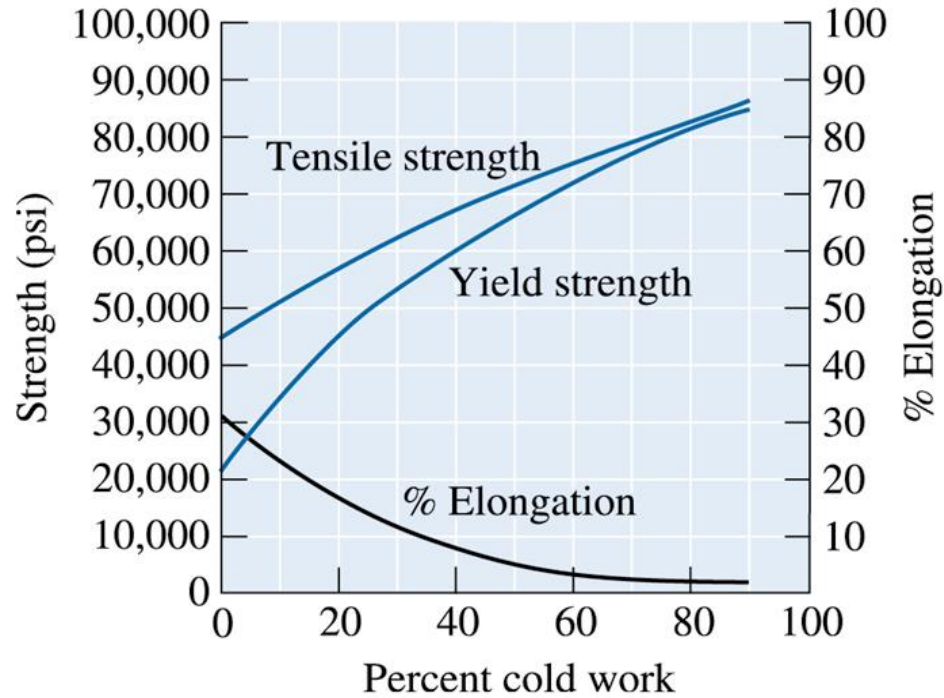


(e)



Deforme edilmemiş termoplastik polimer çubuk. (a) polimer zincirleri rastgele dizilmiş (b) Gerilim uygulandığında zincir lokal olarak düzene girerken boyun verme başlar. Boyun verme tüm ölçü uzunluğu düzene girinceye kadar devam eder. (c) Polimerin mukavemeti artar.

Bölüm 7.3. Soğuk İşlem Yüzdesi ile Özelliklerin Değişimi

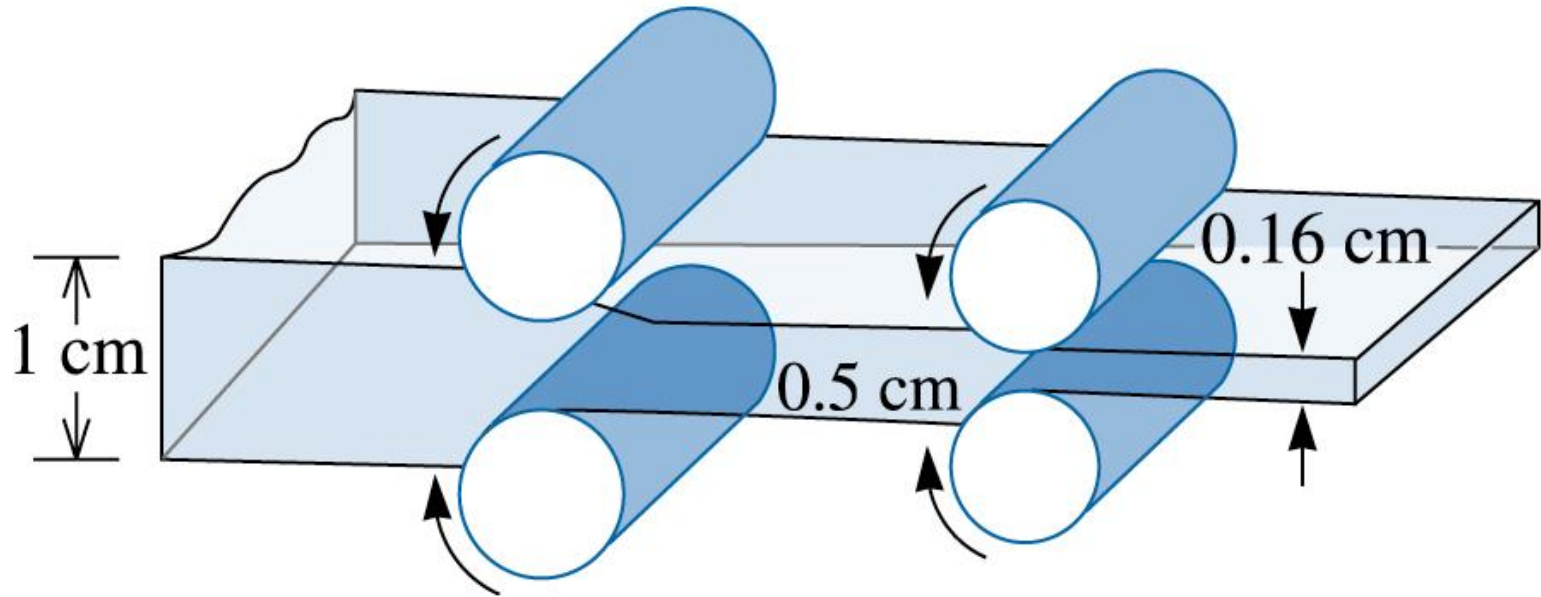


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning is a trademark used herein under license.

Bakırın mekanik özelliklerine soğuk işlemin etkisi.

Örnek 7.1. Bakır Plakanın Soğuk İşlemi

1 cm kalınlıktaki bakır plaka önce 0,50 cm daha sonra da 0,16cm'ye soğuk haddelenerek kalınlığı azaltılmıştır. 0,16 cm kalınlıktaki tabakaya uygulanan toplam deformasyonu ve çekme mukavemeti değerini 13. slayttaki şekilden yararlanarak bulunuz.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning,™ is a trademark used herein under license.

1 cm plakanın haddelenmesini gösteren diyagram.

ÇÖZÜM

Our definition of cold work is the percentage change between the original and final cross-sectional areas; it makes no difference how many intermediate steps are involved. Thus, the total cold work is actually

$$\% \text{ CW} = \left[\frac{t_0 - t_f}{t_0} \right] \times 100 = \left[\frac{1 \text{ cm} - 0.16 \text{ cm}}{1 \text{ cm}} \right] \times 100 = 84\%$$

and, from Figure 7-7, the tensile strength is about 82,000 psi.

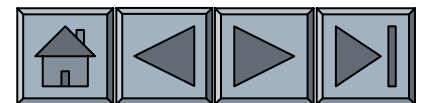


Örnek 7.2. Soğuk İşlem Prosedürünün Tasarımı

0,1cm'lik bakır plakanın en az 65000 psi çekme mukavemeti, 60000 akma mukavemeti ve %5 uzama göstermesi için gerekli imalat proseslerini tasarlayınız?

ÇÖZÜM

İmalat için soğuk işlem uygun bir proses olacaktır. Orijinal kalınlık istenen mekanik özellikleri verebilmek için %40-45'lik bir ezme ile sağlanabilir:



ÇÖZÜM (devam)

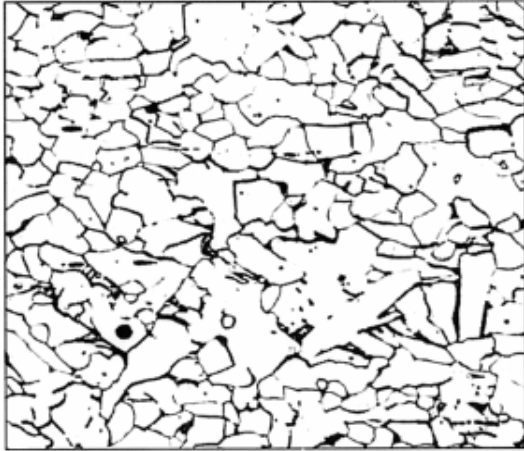
$$\% CW_{\min} = 40 = \left[\frac{t_{\min} \text{ cm} - 0.1 \text{ cm}}{t_{\min} \text{ cm}} \right] \times 100, \quad \therefore t_{\min} = 0.167 \text{ cm}$$

$$\% CW_{\max} = 45 = \left[\frac{t_{\max} \text{ cm} - 0.1 \text{ cm}}{t_{\max} \text{ cm}} \right] \times 100, \quad \therefore t_{\max} = 0.182 \text{ cm}$$

İstenen mekanik özelliklerde 0,1mm kalınlıklı plaka üretmek için 0,167-0,182cm'lik bakır plaka kullanılmalıdır.

Bölüm 7.4. Mikroyapı, Doku Mukavemetlendirmesi ve Kalıntı Gerilimler

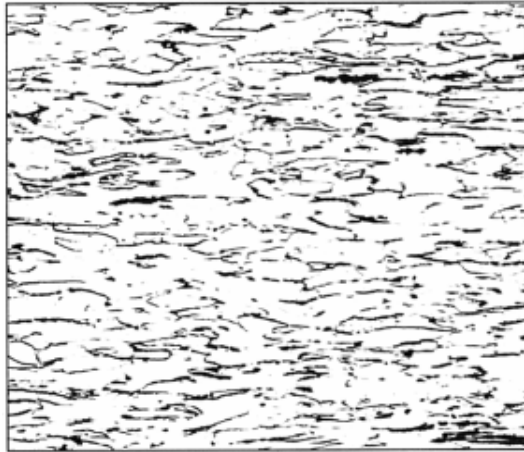
- Fiber doku, levha dokusu
- Pole figür analizi ve oriyantasyon mikroskopisi
- Kalıntı gerilimler, gerilim giderme tavı
- Cam tavlama, temperlenmiş cam



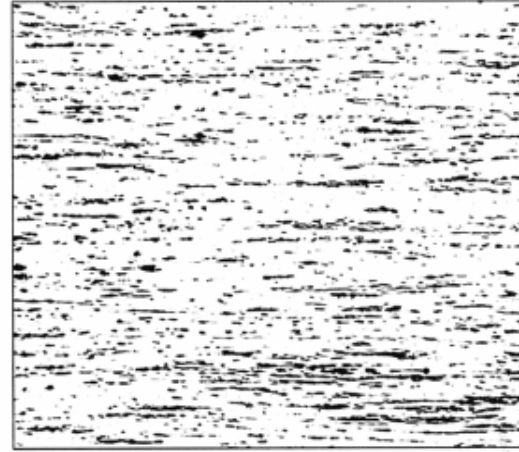
(a)



(b)

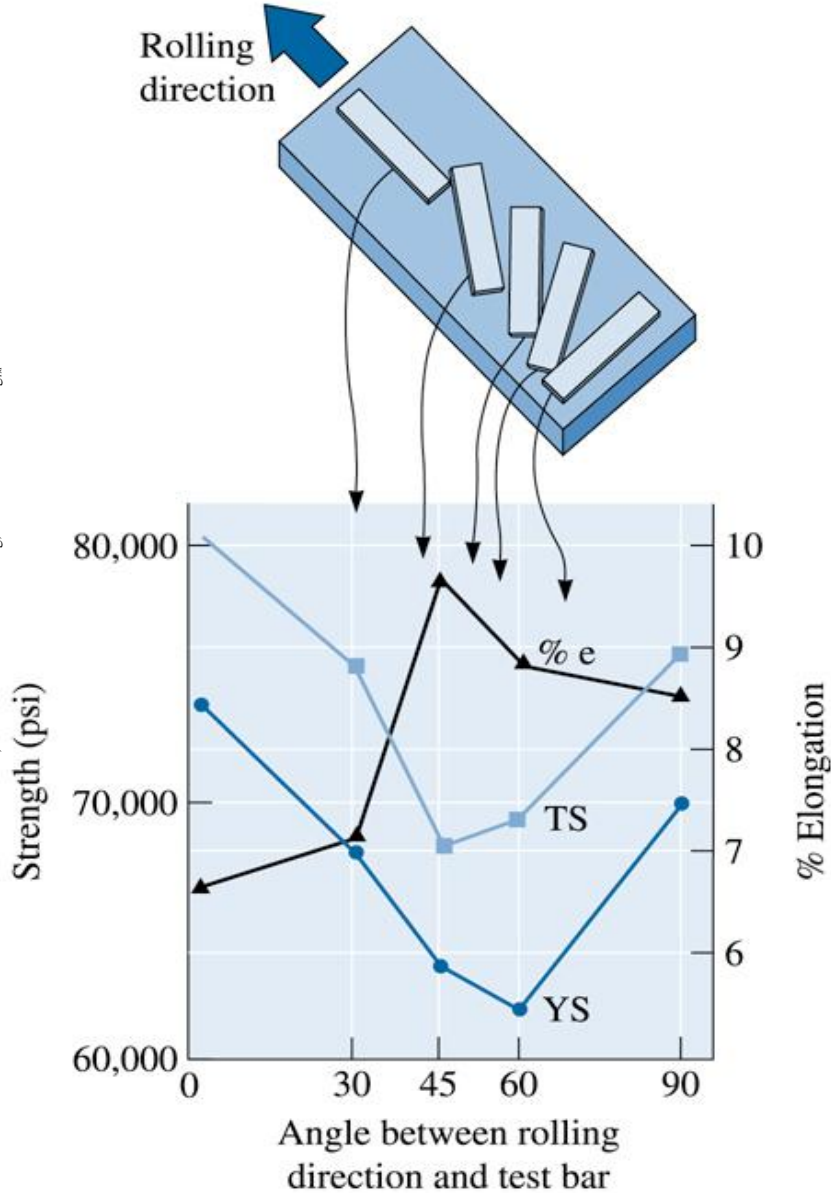


(c)



(d)

Düşük karbonlu çeliğin soğuk işleme ile üretilmiş lifli tane yapısı. (a) %10 soğuk işlenmiş, (b) %30 soğuk işlenmiş, (c) %60 soğuk işlenmiş ve (d) %90 soğuk işlenmiş (250). (Source: From ASM Handbook Vol. 9, Metallography and Microstructure, (1985) ASM International, Materials Park, OH 44073. Used with permission.)



Uçak-uzay uygulamalarında kullanılan Al-Li levhaların anizotropik davranışları.

Çizim çekme çubuklarının pozisyonlarını ve grafik ilgili çubuğun mekanik özelliklerini gösterir.

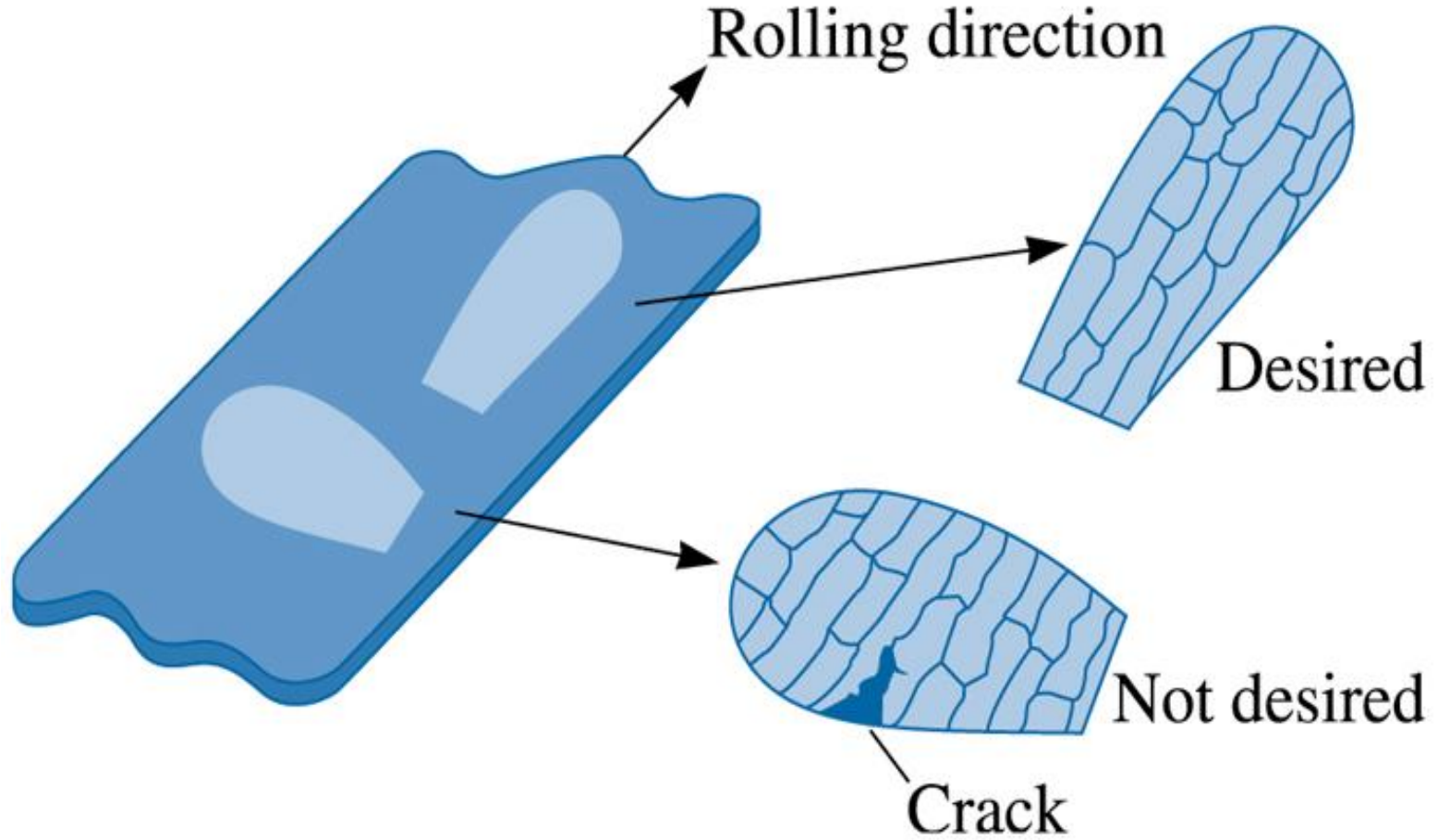
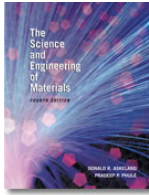
Table 7-2 ■ *Common wire drawing and extrusion, and sheet textures in materials[8]*

Crystal Structure	Wire Drawing and Extrusion (Fiber Texture) (Direction Parallel to Wire Axis)	Sheet or Rolling Texture
FCC	$\langle 111 \rangle$ and $\langle 100 \rangle$	$\{110\}$ planes parallel to rolling plane $\langle 112 \rangle$ directions parallel to rolling direction
BCC	$\langle 110 \rangle$	$\{001\}$ planes parallel to rolling plane $\langle 110 \rangle$ directions parallel to rolling direction
HCP	$\langle 1\bar{0}10 \rangle$	$\{0001\}$ planes parallel to rolling plane $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ directions parallel to rolling direction

Örnek 7.3. Zımbalama Prosesinin Tasarımı

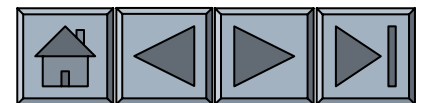
Otomobil ve kamyon motorlarının soğutulmasında kullanılan fanların üretim metotlarından biri de soğuk işlenmiş levhaların zımbalanması ve fan parçalarının bir araya getirilmesidir. Soğuk işleme eksenine dik yönde zımbalanan fanların yorulma çatlacağına maruz kaldıkları görülmüştür. Problemin nedenleri ile ilgili görüşlerinizi belirtiniz?

Örnek 7.3 (devam)



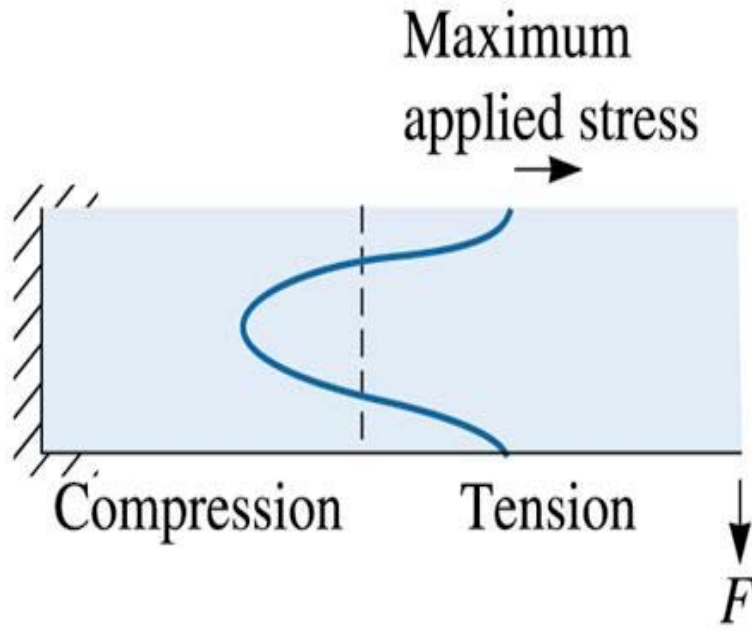
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

Numunelerin oryantasyonları

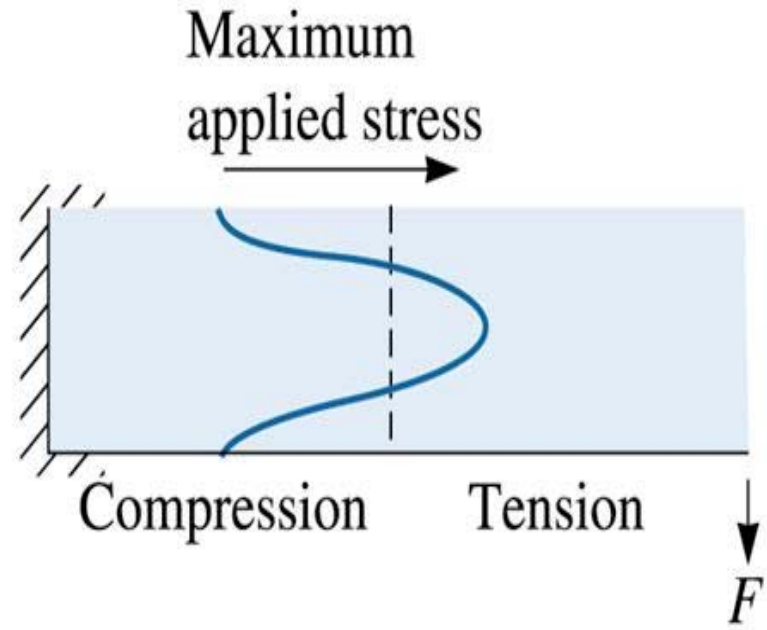


ÇÖZÜM

- Yanlış çelik seçilmiş olabilir.
- Fanları zımbalayan kalıplar aşınmış olabilir.
- Parça ve kalıp arasındaki boşluk yanlış olduğu için zımbalama esnasında yorulma çatlama sebepleri olacak çatlak başlangıcı sağlanmış olabilir.
- Hata levhanın anizotropik davranışı sebebiyle oluşmuş olabilir.



(a)



(b)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Kalıcı basma gerilimleri zararlı veya yararlı olabilir. (a) Kiriş üstüne uygulanan eğme kuvveti çekme gerilimi uygular. Kirişte var olan çekme kuvveti ile birlikte zayıf yük taşıma karakteristiği sergilenir. (b) Üst kalıcı basma gerilmesi içerir. Bu durumda yük taşıma özelliğini iyidir.

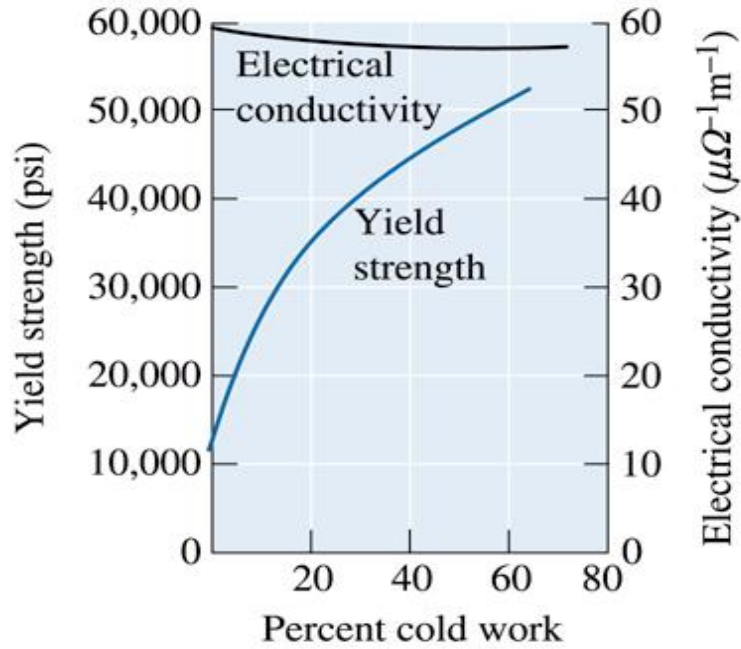
Örnek 7.4. Yorulma Dirençli Şaft Tasarımı

Şirketiniz yorulma mukavemeti 20000 psi olan binlerce şaft üretti. Bunlar dönerken yüksek eğme yüklerine tabii tutuldu. Satış mühendisleri ilk birkaç şaftın kısa zamanda yorulma nedeniyle kırıldığını haber verdi. Kalan şaftların yorulma kırılmasına maruz kalmaması için yorulma özelliklerini geliştirici prosesleri öneriniz?

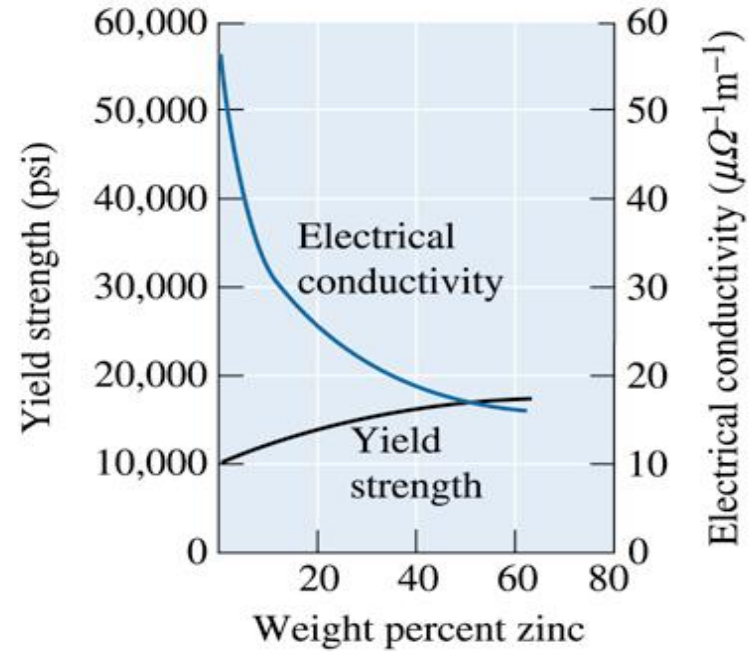
ÇÖZÜM

- Şaftların yüzey mukavemetini artırmak şaft ömrünü de artıracaktır. Örnek: karbürleme
- Şaftların soğuk işlenmesi
- Şaftların bilyalar ile yüzeylerinin sertleştirilmesi (bilyalama)

Bölüm 7.5. Soğuk İşlem Karakteristikleri



(a)



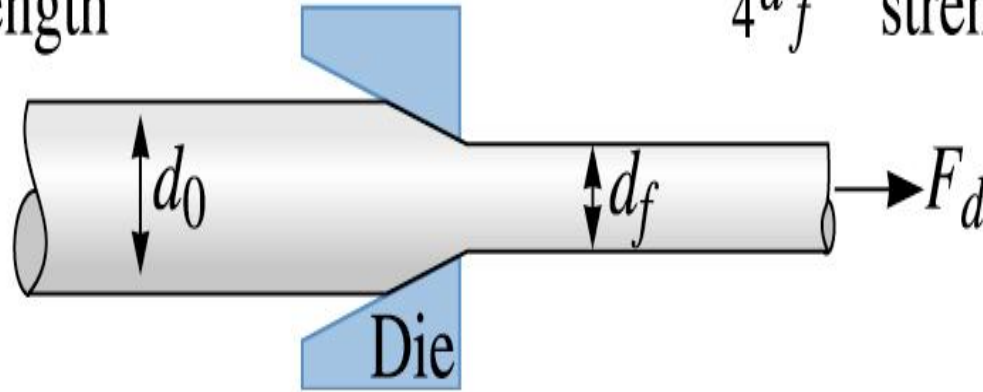
(b)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

Bakırın mukavemet karşılaştırması (a) soğuk işlem ve (b) çinko ile alaşımlama. Soğuk işlem mukavemetlendirme konusunda büyük etkiye sahipken elektrik iletkenliğine etkisi küçüktür.

$$\text{Stress} = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4}d_0^2} > \text{Original yield strength}$$

$$\text{Stress} = \frac{F_d}{\frac{\pi}{4}d_f^2} < \text{Final yield strength}$$

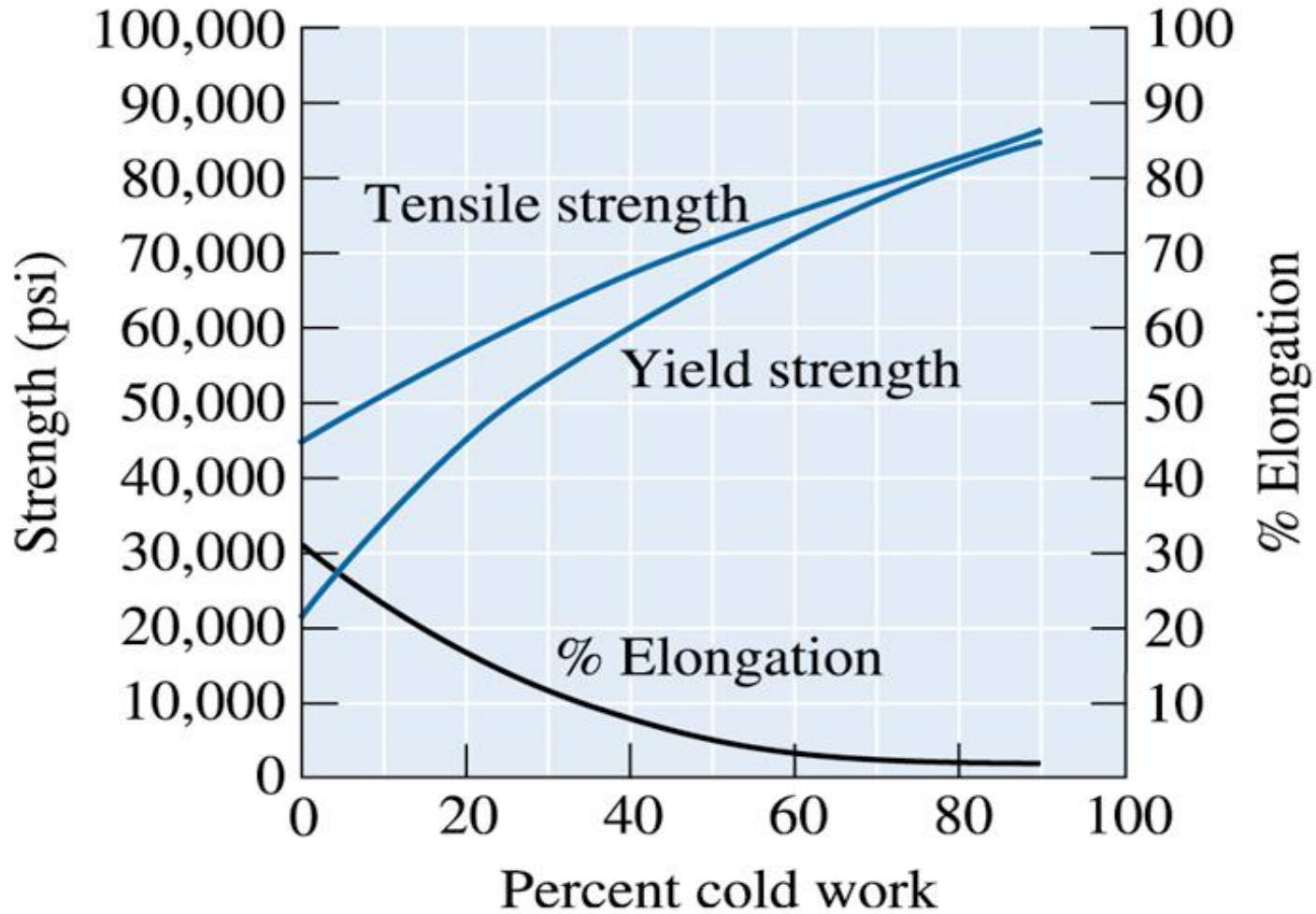


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

Tel çekme prosesi. Uygulanan kuvvet F_d hem orijinal hem de son çap üzerinde etkilidir. Böylece, son tel çapında elde edilen mukavemet başlangıçtan büyüktür. Çekme esnasında tel deformasyon sertleşmesine uğramaz ise,

Örnek 7.5. Tel Çekme Prosesinin Tasarımı

0,20 in çapında bakır telin çekilmesi için gerekli prosesi tasarlayınız? Bakırın mekanik özelliklerini 32. slayttaki şekilden elde edebilirsiniz.



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Bakırın mekanik özelliklerine soğuk işlemin etkisi.

ÇÖZÜM



TABLE 7-3 ■ *Mechanical properties of copper wire (see Example 7-5)*

d_0 (in.)	% CW	Yield Strength of Drawn Wire (psi)	Force (lb)	Draw Stress on Drawn Wire (psi)
0.25	36	58,000	1080	34,380
0.30	56	68,000	1555	49,500
0.35	67	74,000	2117	67,390
0.40	75	77,500	2765	88,010

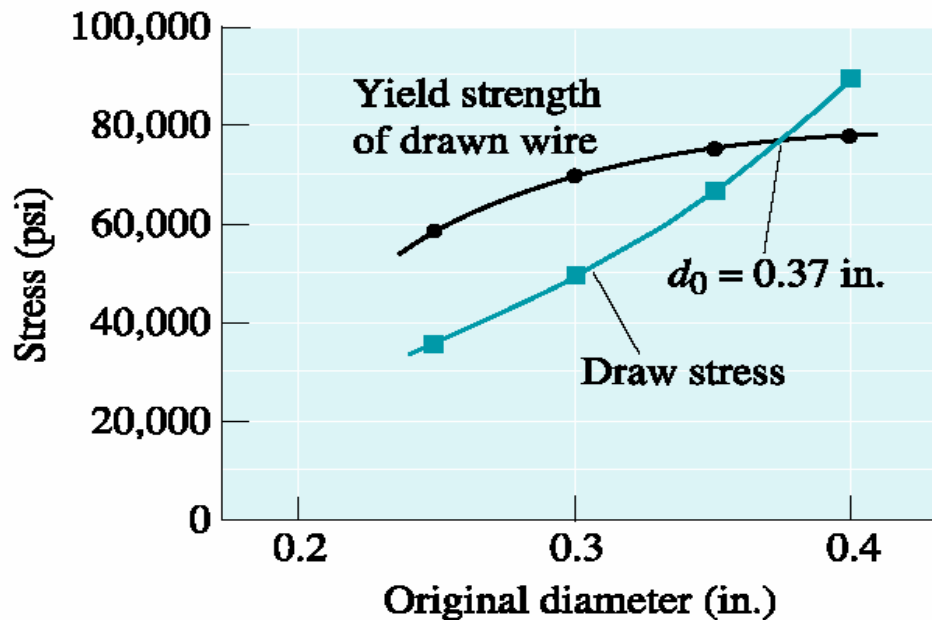
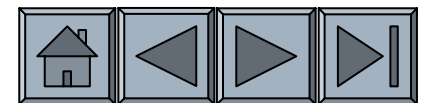


Figure 7-15

Yield strength and draw stress of wire (for Example 7-5).



Bölüm 7.6. Tavlamanın Üç Aşaması

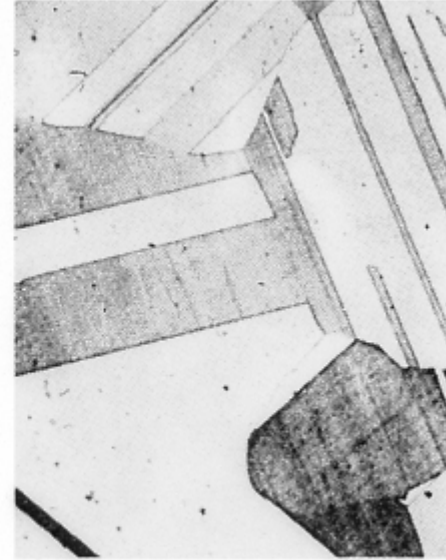
- **Toparlanma** – Düşük sıcaklık tavlama ısıtma işlemi deformasyon esnasında oluşan kalıntı gerilmeleri soğuk işlemle elde edilen deformasyonla kazanılan mukavemeti düşürmeden giderir.
- **Yeniden Kristallenme** – Soğuk işlem ile elde edilen deformasyon sertleşmesinin etkilerini elimine etmek için tasarlanmış orta sıcaklık ısıtma işlemidir.
- **Tane Büyümesi** – Tane sınırlarının alanını azaltmak için tane sınırlarının difüzyon ile hareketidir.



(a)

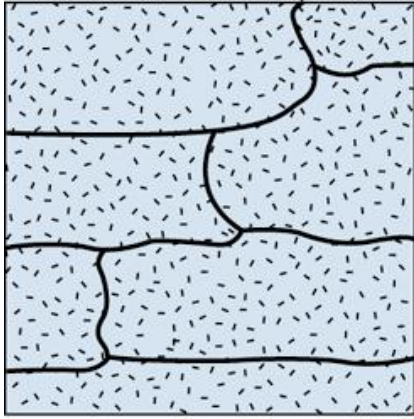


(b)

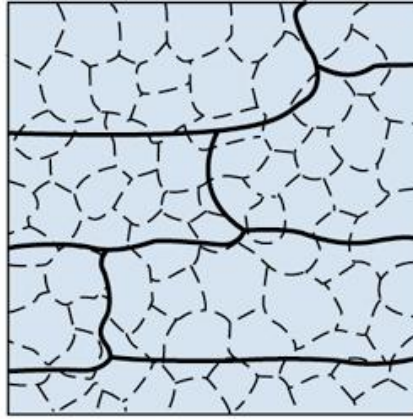


(c)

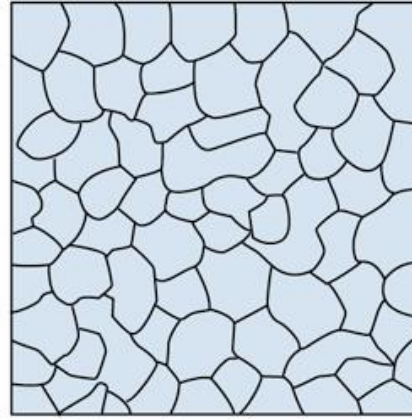
Pirinçte tane boyutu üzerine tavlama sıcaklığının etkisi. Mikroyapılarda ikiz sınırları da görülmüştür. (a) 400°C de tavllanmış, (b) 650°C de tavllanmış ve (c) 800°C de tavllanmış (75). (Adapted from Brick, R. and Phillips, A., The Structure and Properties of Alloys, 1949: McGraw-Hill.)



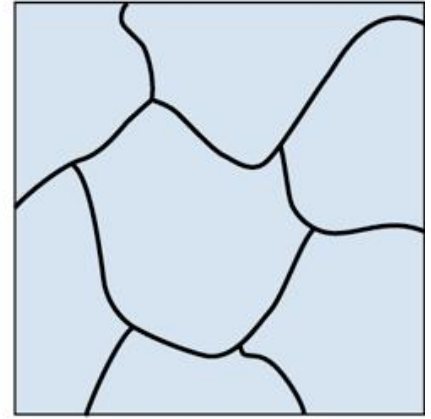
(a)



(b)



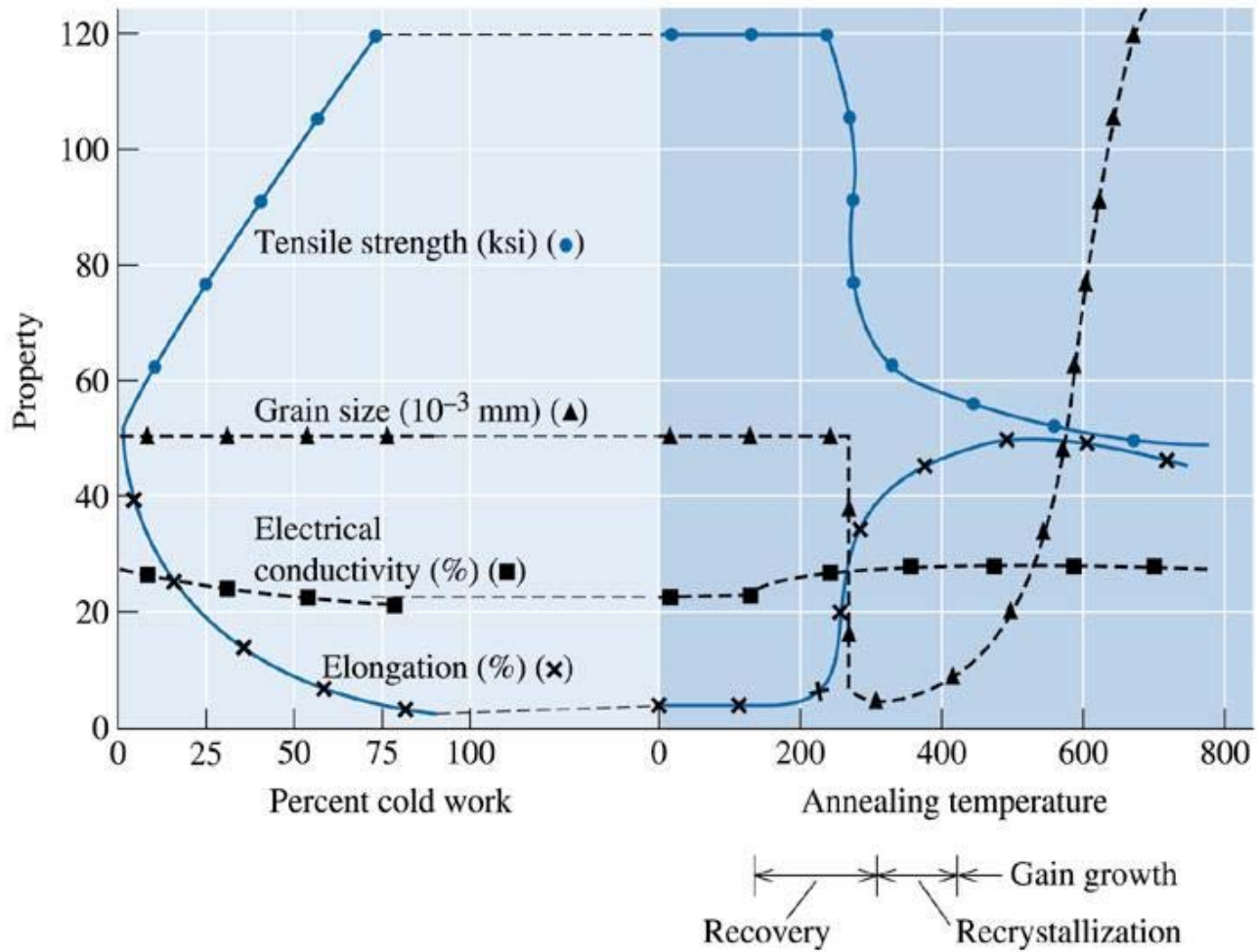
(c)



(d)

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

Soğuk işlem görmüş metallerin mikroyapıları üzerine tavlama sıcaklığının etkisi. (a) soğuk işlem görmüş (b) toparlanma sonrası, (c) yeniden kristalleşme sonrası ve (d) tane büyümesi sonrası

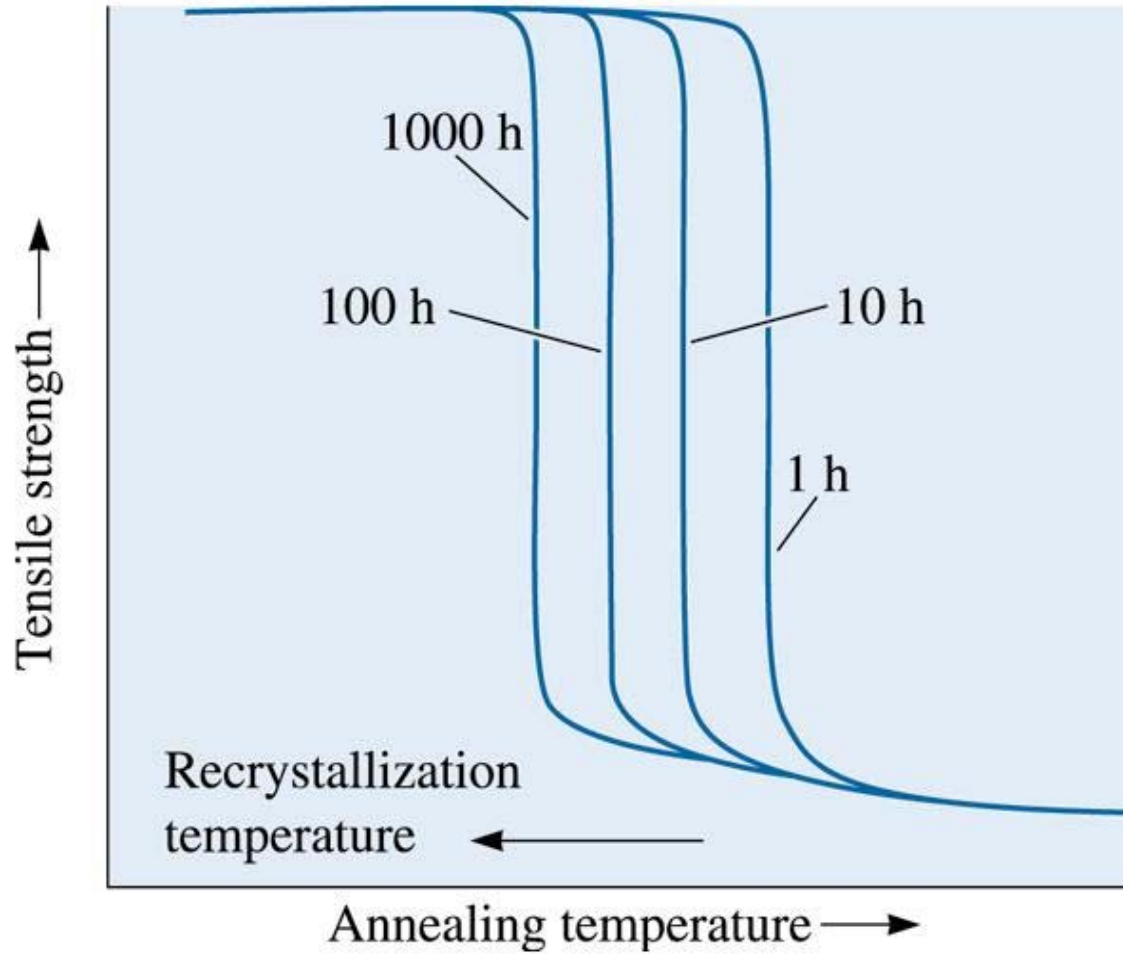


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning_{sm} is a trademark used herein under license.

Cu-%35 Zn alaşımının özellikleri üzerine soğuk işlemin etkisi ve %75 soğuk işlem gormuş alaşımın özellikleri uştune tavlama sıcaklığının etkisi.

Bölüm 7.7. Tavlamanın Kontrolü

Ilık işlem – Soğuk ve sıcak işlem arasındaki sıcaklıklarda metalik malzemelerin işlenmesi. (genellikle sıcaklık ergime sıcaklığının 0,3 ile 0,6 K dır).



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

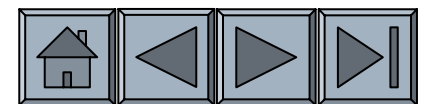
Uzun tavlama sıcaklıkları yeniden kristallenme sıcaklığını düşürür. Yeniden kristallenme sıcaklığı sabit bir sıcaklık değildir.



TABLE 7-4 ■ *Typical recrystallization temperatures for selected metals*

Metal	Melting Temperature (°C)	Recrystallization Temperature (°C)
Sn	232	-4
Pb	327	-4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

(Source: Adapted from Structure and Properties of Engineering Materials, by R. Brick, A. Pense, and R. Gordon, 1977. Copyright © 1977 The McGraw-Hill Companies. Adapted by permission.)

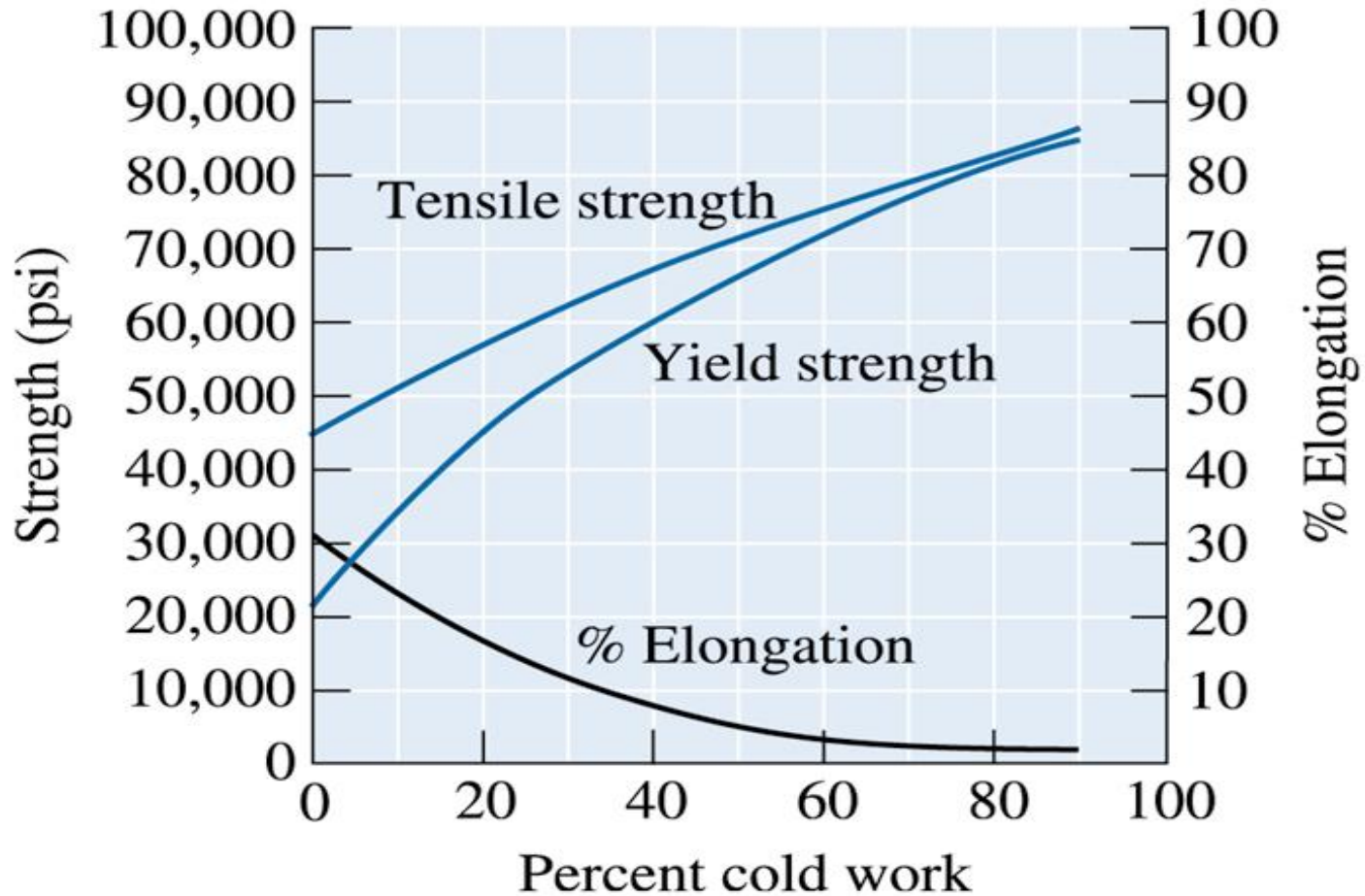


Bölüm 7.8. Tavlama ve Malzeme İşleme

Isıdan etkilenmiş bölge (HAZ) –Kaynak bölgesine yakın olan hacimde kaynaklama esnasında ısınma ile kritik bir sıcaklığın üstüne geçilip yapısal değişimlerin yaşandığı bölgedir. Kritik sıcaklığın üstünde tane büyümesi veya yeniden kristallenme oluşabilir.

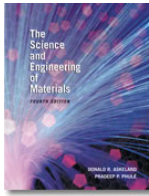
Örnek 7.6. Bakır Şerit Üretimi için Proses Tasarımı

0,1cm kalınlığında 6 cm genişliğinde ve 60000 psi akma mukavemetine ve %5 uzama değerine sahip bakır şerit üretmek istiyoruz. Sadece 6 cm genişliğinde ve 5 cm kalınlığında şerit alabiliyoruz. İstedığımız ürünü üretmek için gerekli süreci tasarlayınız?



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

Bakırın mekanik özellikleri üstüne soğuk işlemin etkisi.

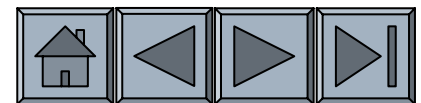


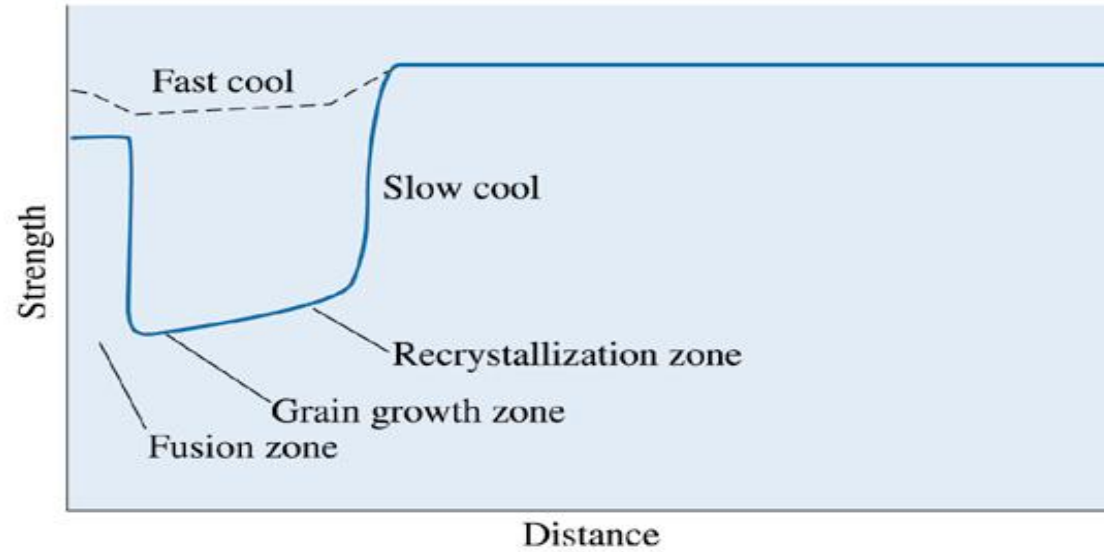
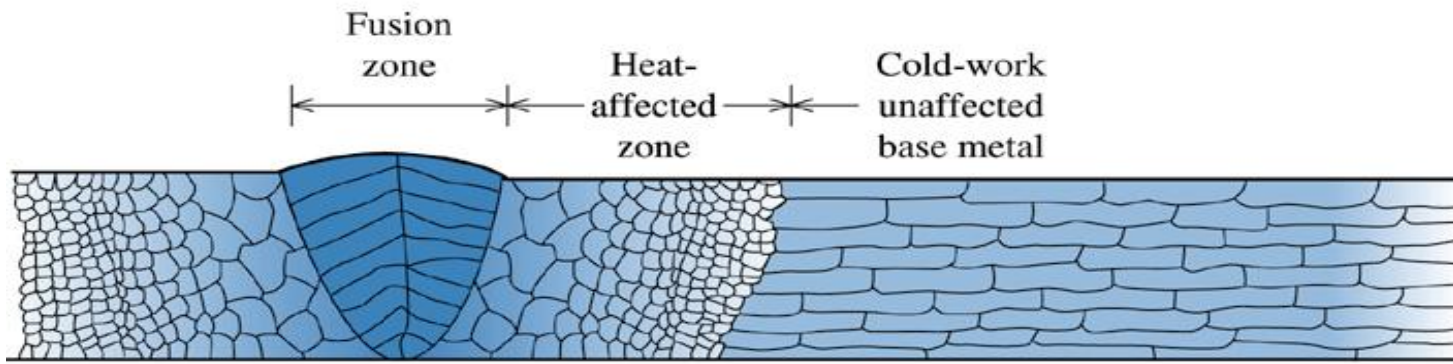
ÇÖZÜM

Başlangıç kalınlığı önceki örnekten hatırlanacağı gibi 60000 psi için 0,167 cm ve 0,182 cm idi. Biz 5 cm kalınlıklı malzemeyle başlayacağımız için bu malzeme kalınlığının 0.167 ve 0.182 cm ye haddelenmesi gerekmektedir. Daha sonra tavlama gereklidir. Ama 5cm den 0,182 cm haddeleyebilir miyiz bunun tartışılması gereklidir. Bu durumda gerekli soğuk ezme miktarı;

$$\% CW = \left[\frac{t_o - t_f}{t_o} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.4\%$$

Önceki şekle göre maksimum %90 ezme uygulanabilir. Bu durumda haddeleme ve tavlama işlemlerinden oluşan bir dizi döngüye ihtiyaç vardır.



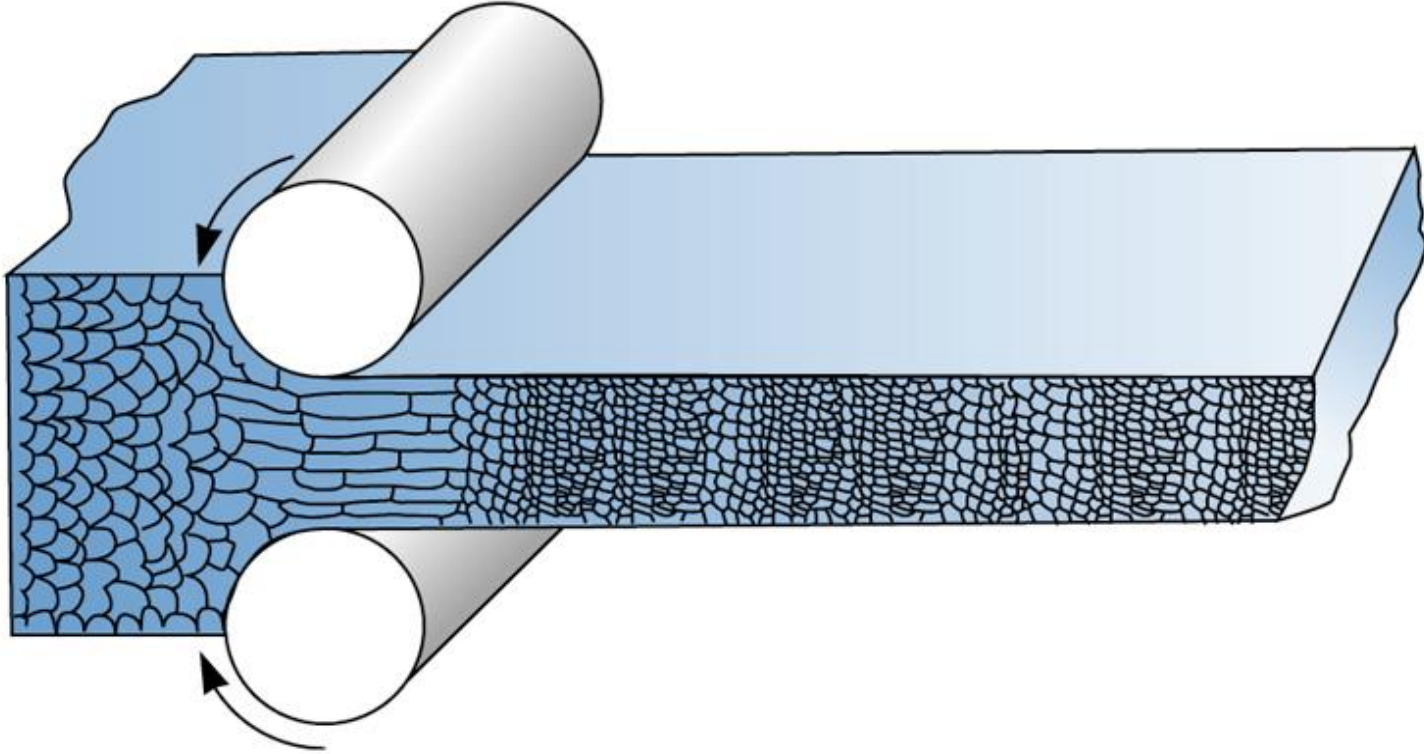


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

Soğuk işlenmiş metalde füzyon kaynak etrafındaki yapı ve özellikler. Not: sadece ısıdan etkilenmiş bölgenin sağ tarafı gösterilmiştir. Isıdan etkilenmiş bölgenin mekanik özelliklerindeki değişime ve yeniden kristallenme ve tane büyümesine dikkat ediniz.

Bölüm 7.9. Sıcak İşlem

- Mukavemetlendirme işlemlerindeki boşluklar
- Hataların giderilmesi
- Anizotropik Davranışlar
- Yüzey İşlemleri ve Boyutsal Kararlılık



©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learningsm is a trademark used herein under license.

Sıcak işlem esnasında uzamış anizotropik taneler hemen yeniden kristallenir. Sıcak işlem sıcaklığı uygun olarak kontrol edilirse, sonuç tane boyutu çok ince olabilir.

Örnek 7.7. Bakır Şerit Üretimi için Proses Tasarımı

0,1 cm kalınlıklı, 6 cm genişliğinde ve 60000 psi akma dayanımına sahip ve en az % 5 uzamalı bir bakır şerit üretilmek istenmektedir. Ancak, 6cm genişliğinde ve 5cm kalınlığında malzeme satın alınabilmektedir. Daha önceki örnekten daha az adım gerektiren süreci tasarlayınız.

ÇÖZÜM

Önceki örnekte, birkaç adımda ancak istenen kalınlığa inilebileceği belirtilmiştir. Sıcak işlem ile istenen ortalama kalınlığa inilebilecektir:

$$\% \text{ HW} = \left[\frac{t_o - t_f}{t_o} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.182 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.4\%$$

$$\% \text{ HW} = \left[\frac{t_o - t_f}{t_o} \right] \times 100 = \left[\frac{5 \text{ cm} - 0.167 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \right] \times 100 = 96.7\%$$

Tasarım:

1. 5 cm şeridi %96.4 ezme ile 0,182 cm'e indirebiliriz.
2. Daha sonra %45'lik ısıtma işlemi ile 0,182 cm'den 0,1 cm'ye inilecektir. Böylece istenen mekanik özellikler sağlanabilecektir.

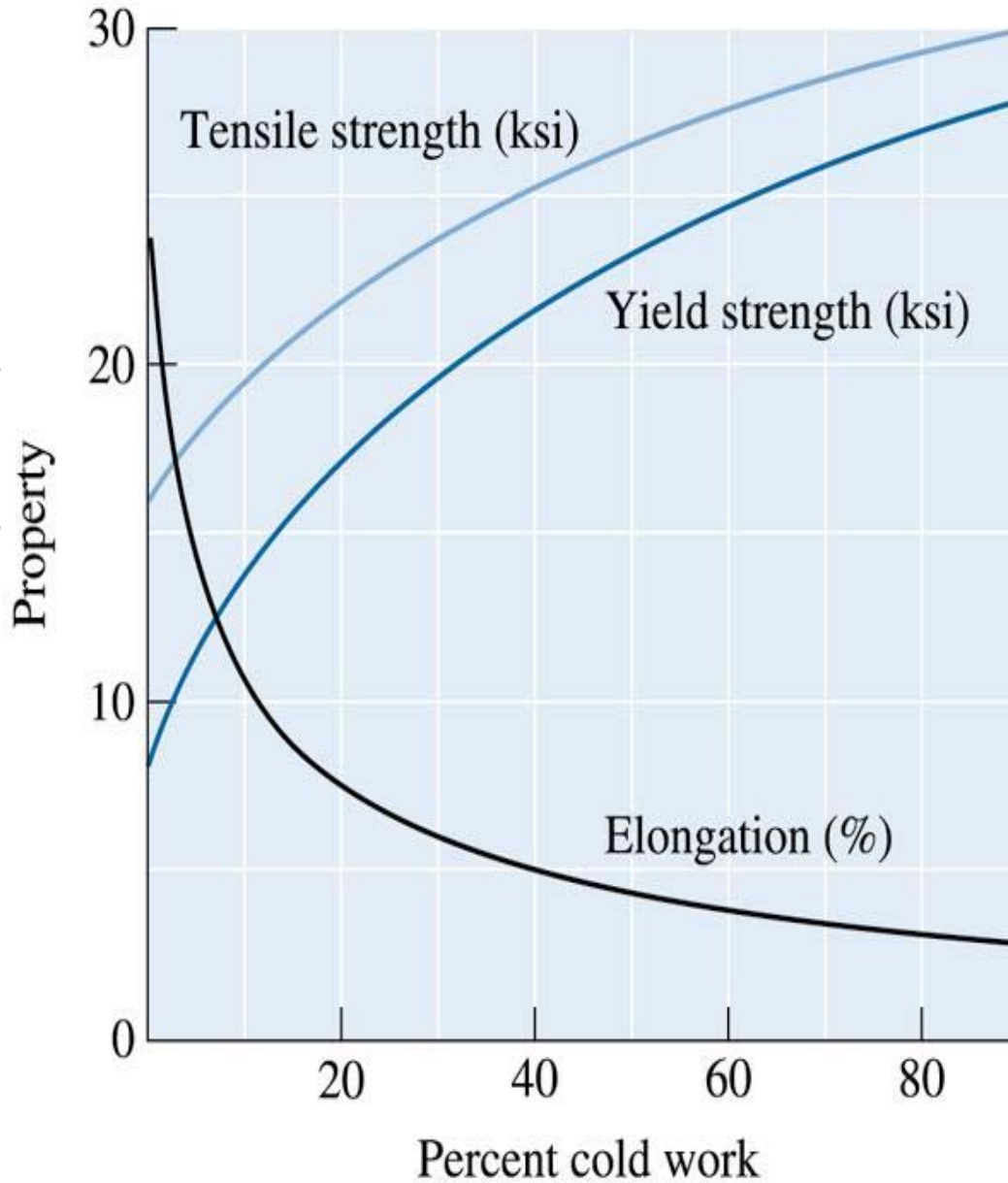
Bölüm 7.10. Süperplastik Şekillendirme (SPF)

Süperplastisite: Metalik veya seramik malzemelerin oldukça büyük miktarlarda homojen olarak deforme edilmesidir.

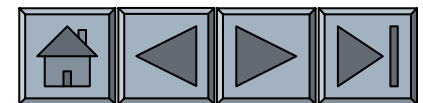
Deformasyon oranı: Malzemenin deformasyona uğradığı hızdır.

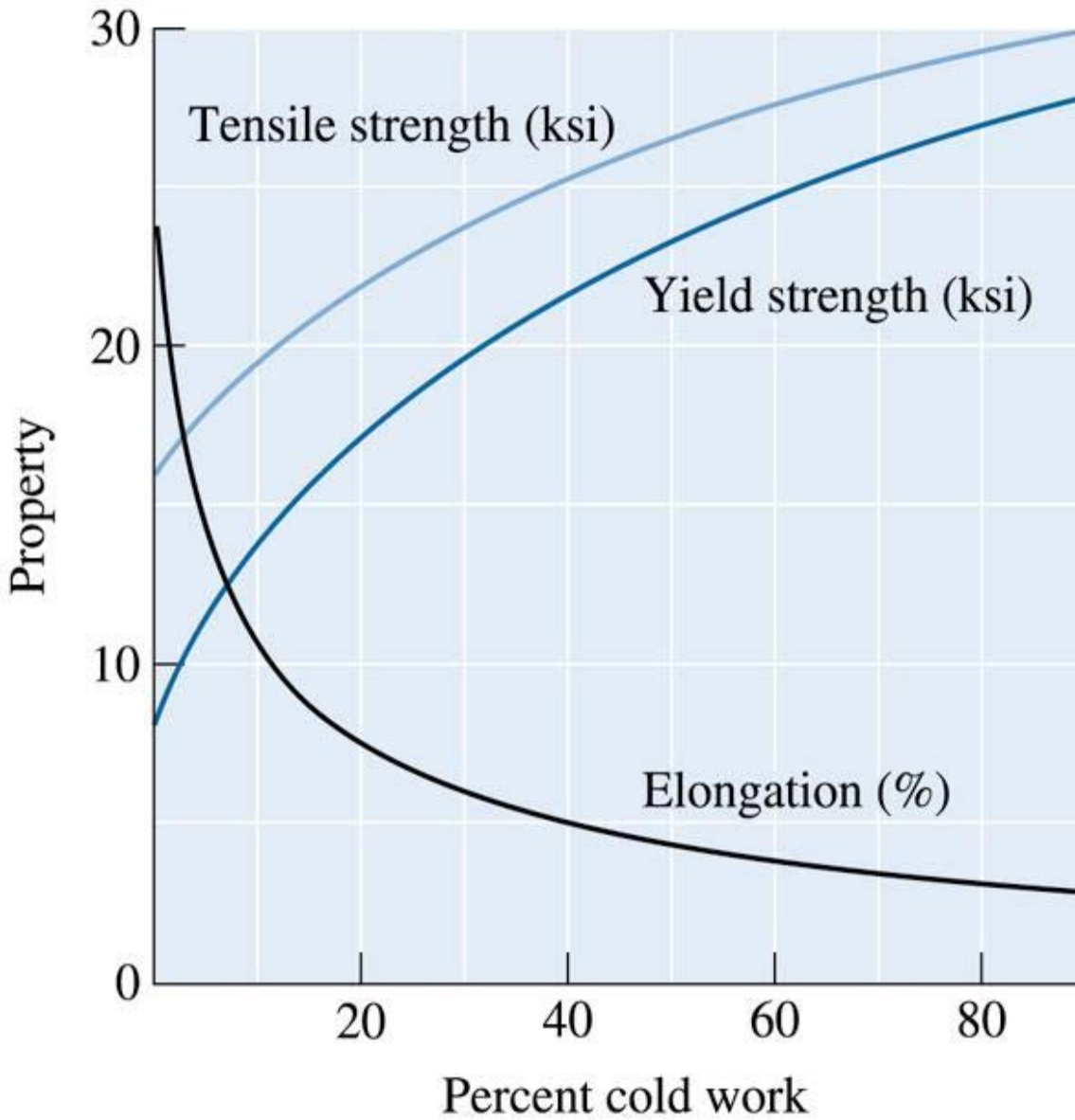
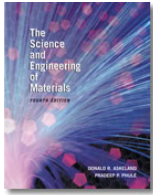
TABLE 7-5 ■ Superplastic characteristics of several materials[13,14]

Alloy	Superplastic Temperature	% Elongation (At Strain Rate Listed Here)	Strain Rate (s^{-1})	Strain Rate Sensitivity m	Flow Stress (MPa)
Ti-6% Al-4% V	927	1000–2000	2×10^{-4}	0.8	10
Al-4.5% Cu-0.5% Zn (Supral 100)	450	600–1000	10^{-3}	0.38	9
Al-4.5% Zn-4.5% Ca	565	500	10^{-3}	0.3	2.8
Fe-26% Cr-6.5% Ni	900	1000	5×10^{-5}	—	28
3mol.%Ytria-97%Zirconia	1450	>160	$\sim 10^{-4}$	0.53	—
Al ₂ O ₃ + 0.05%MgO + 0.05%Ytria	1550	65	$\sim 10^{-4}$	—	—
80wt.% of (3mol.%Ytria, 97%Zirconia) + 20wt.%Al ₂ O ₃	1650	~500	$\sim 10^{-3}$	0.5	—

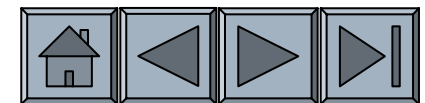


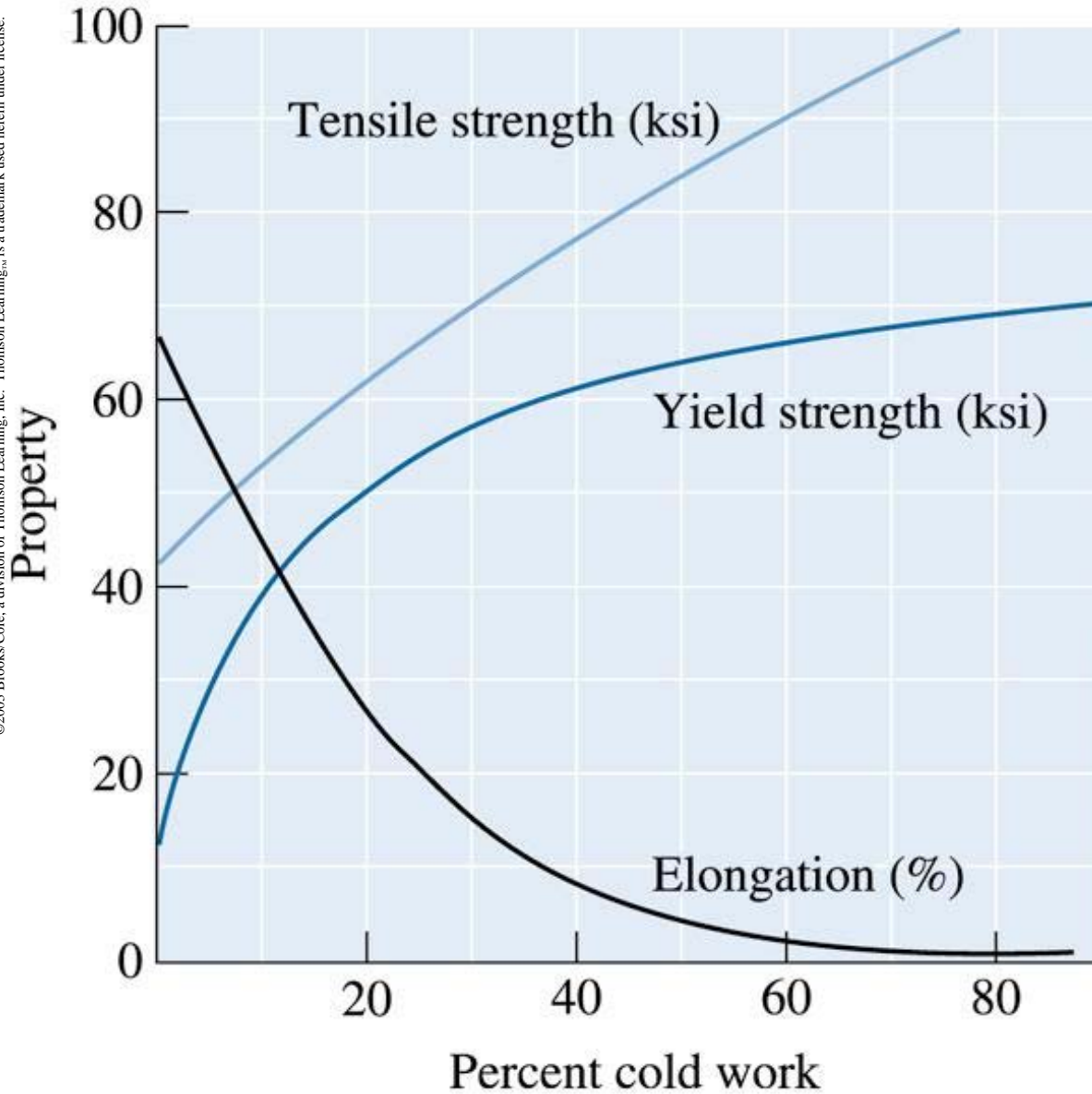
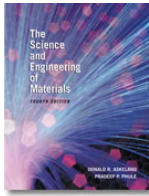
**Gerçek gerilim-
deformasyon eğrisidir.**



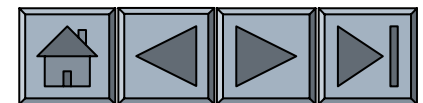


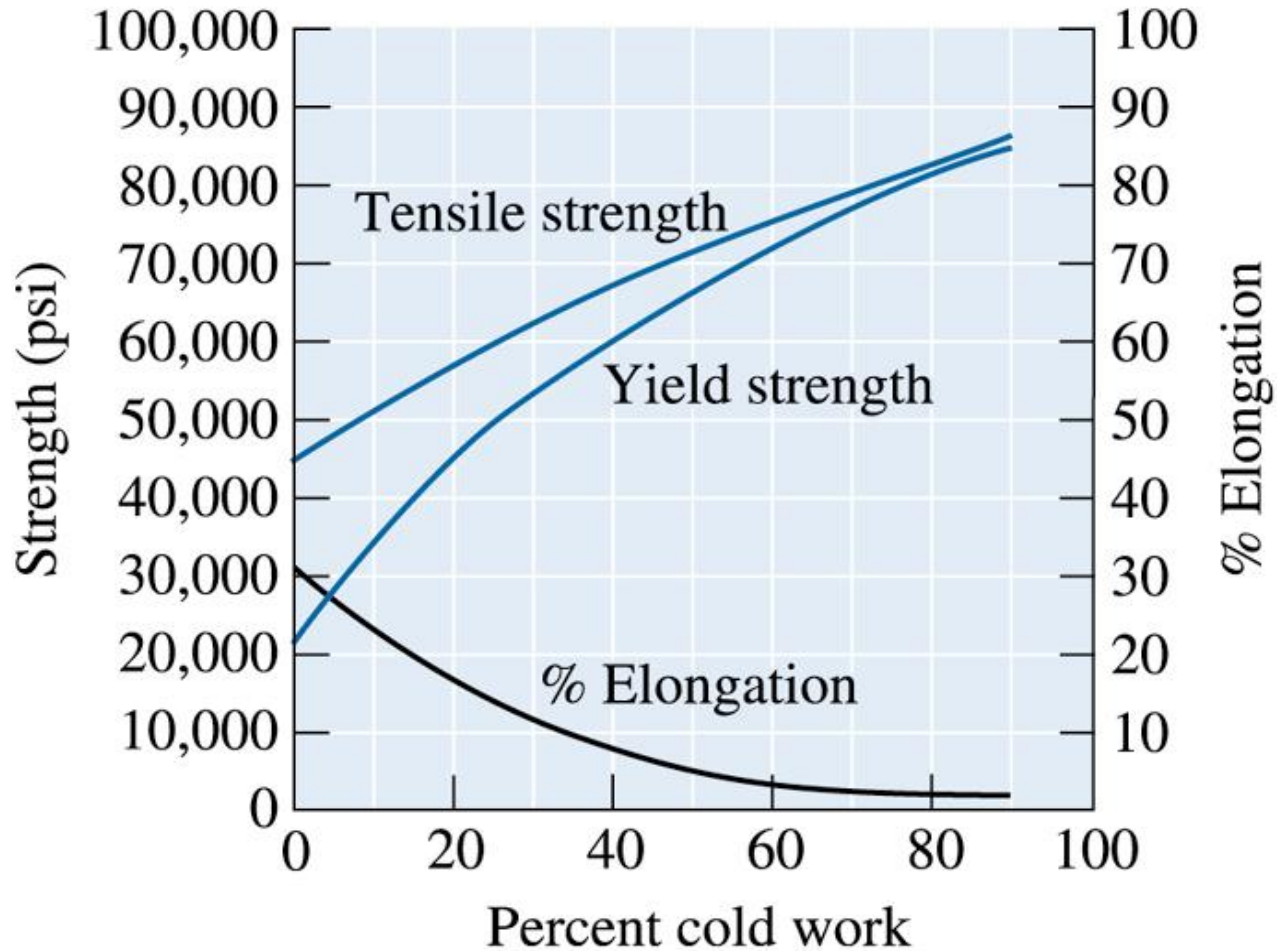
3105 alüminyum alaşımının özellikleri üzerine soğuk işlemin etkisi.





Cu-%30Zn pirinç için soğuk işlemin özellikler üzerine etkisi.





©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning,™ is a trademark used herein under license.

Bakırın mekanik özellikleri üzerine soğuk işlemin etkisi.