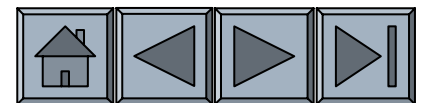




MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

Bölüm 8 – Katılaşmanın Prensipleri



Hedef

- Saf metallerde katılaşmanın prensipleri öğrenmek
- Katılaşma mekanizmalarını incelemek
- Metallerin birleştirilmesinde kaynaklama, brazing ve lehimlemenin nasıl kullanıldığını incelemek

İçerik

- 8.1 Teknolojik önem
- 8.2 Çekirdeklenme
- 8.3 Kontrollü çekirdeklenme uygulamaları
- 8.4 Büyüme Mekanizmaları
- 8.5 Katılma süresi ve dentrit boyutu
- 8.6 Soğuma Eğrileri
- 8.7 Döküm Yapısı
- 8.8 Katılma Hataları



İçerik

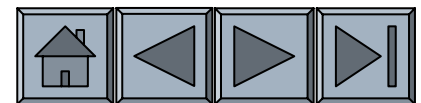
8.9 İmalat Parçalarında Döküm Prosesleri

8.10 Sürekli ve ingot döküm

8.11 Yönlenmiş katılaşma (DS), Tek Kristal Büyütme ve Epitaksiyel Büyüme

8.12 Polimer ve İnorganik Camların Katılaşması

8.13 Metalik Malzemelerin Birleştirilmesi.



Bölüm 8.1 Teknolojik Önem

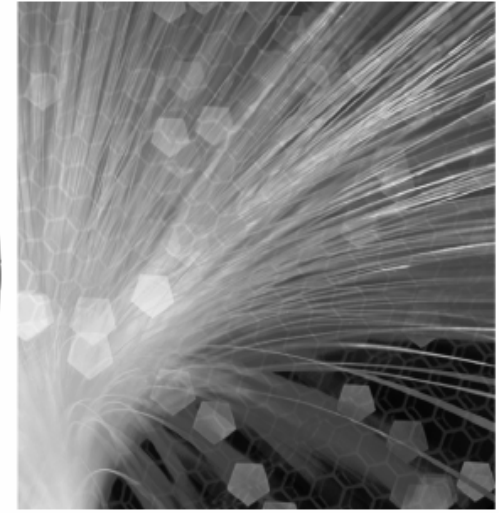
- **Primer/ilk işleme** – Ergimiş metalin ingot veya yarı ürün olarak kullanılacak slablara dökülmesidir.
- **İkincil işleme** – İngot ve slabları işlemede kullanılan haddeleme, ekstrüzyon gibi proseslerdir.



Bronz objenin resmi. Çin kaynaklı (bian hu) İsa'dan 3.yüzyıla ait bir obje.
(*Courtesy of Freer Gallery of Art, Smithsonian Institution, Washington, D.C.*)

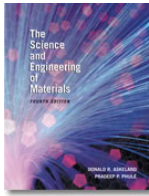


(a)



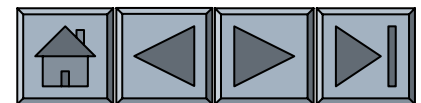
(b)

Şekil (a) Alüminyum alaşım jantlar. (b) iletişimde kullanılan optik fiberler (*Courtesy of PhotoDisc/Getty Images.*)



Bölüm 8.2 Çekirdeklenme

- **Çekirdeklenme** – Malzemede yeni bir fazın oluşmasını sağlayan fiziksel bir prosestir.
- **Kritik yarıçap (r^*)** – Katı parçacık kararlı hali büyümeden önce atomların bir araya gelerek minimum boyutu ortaya koymalarıdır.
- **Aşırı soğuma** – Çekirdeklenme oluşmadan önce sıvı metalin denge donma sıcaklığının altına soğuması gerektiği sıcaklıktır.
- **Homojen çekirdeklenme** – Yüksek aşırı soğuma miktarlarında çok sayıda atomun bir araya gelerek sıvıdan kritik boyutlu katıların oluşmasıdır (dışarıdan ara yüzeye ihtiyaç yoktur).
- **Heterojen Çekirdeklenme** – Empürite yüzeyleri yardımı ile sıvıdan kritik boyutlu katıların oluşmasıdır.



- ❑ Birçok malzeme üretimlerinin bir aşamasında sıvıdır.
- ❑ Sıvı, katılaşma sıcaklığının altına soğutulduğunda katılaşır.
- ❑ Malzeme katılaşmış durumda iken veya ısıtılarak ve mekanik işlemler uygulanmış halde kullanılabilir.
- ❑ Katılaşma sürecinde ortaya çıkan yapı, mekanik özellikleri etkiler. Özellikle tane boyutu ve şekli katılaşma ile kontrol edilebilir.

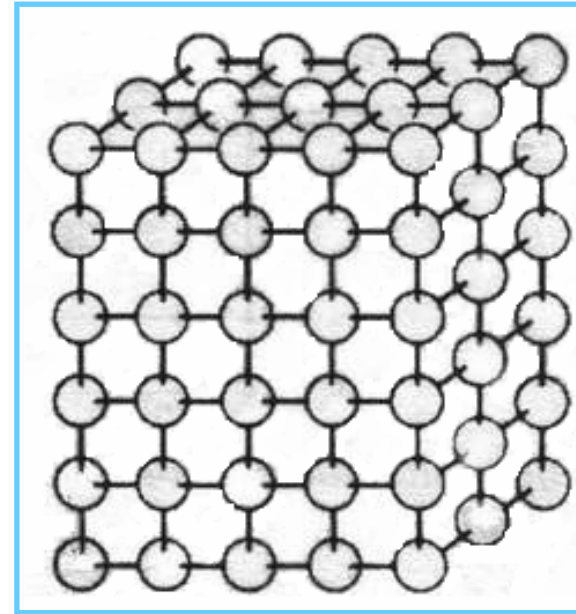
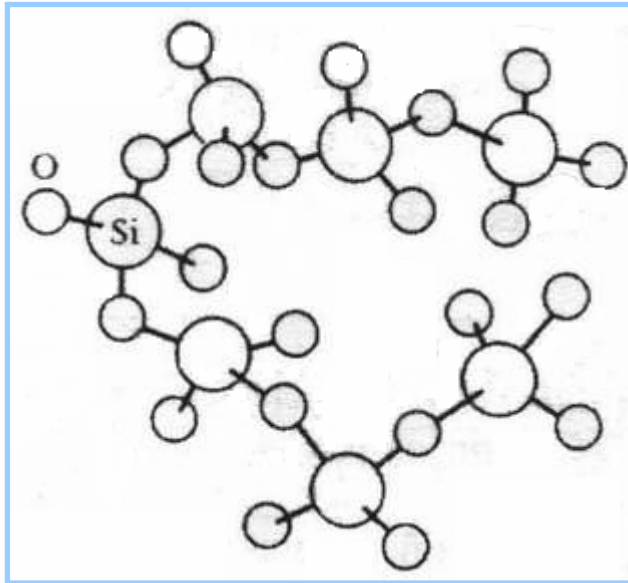
KATILAŞMA

Çekirdeklenme

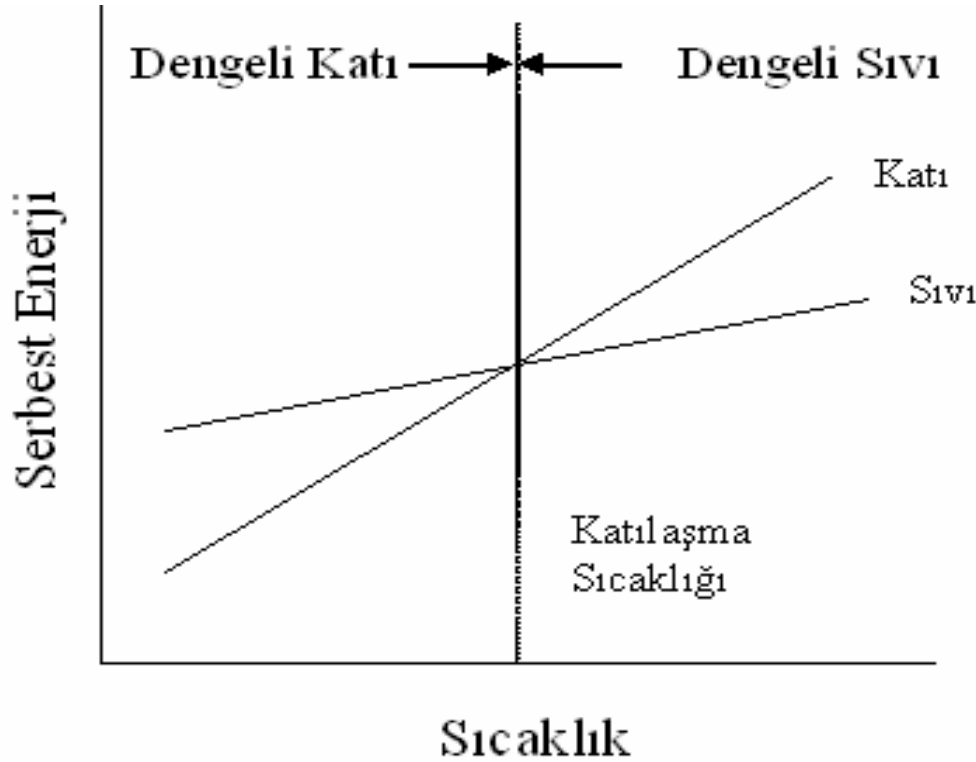
Büyüme

Çekirdeklenme



Katılaşma sırasında atomik diziliş, en düzenli kısa mesafeli düzenden uzun mesafeli düzene veya kristal yapıya kadar değişir.

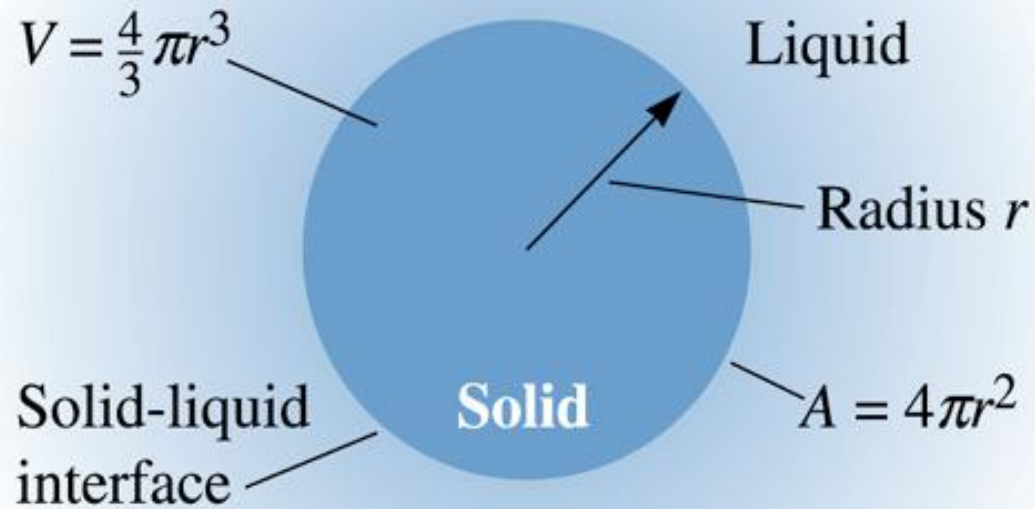


- ❑ Çekirdeklenme, küçük katı parçacıklarının sıvıdan embriyolaşması ile gerçekleşir.
- ❑ Çekirdek kararlı olmadan önce minimum kritik çapa gelmelidir.
- ❑ Katının büyümesi, atomların sıvıdan oluşan çekirdeklere geçmeleri ile olur ve bu şekilde büyüme sıvı bitene kadar devam eder.



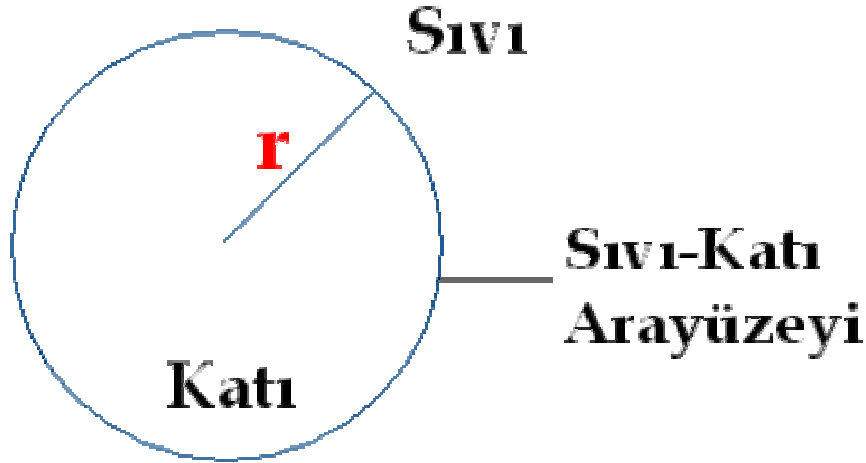
- ❑ Sıcaklık katıl ařma noktasından daha da ařađıya dűřtűđűnde giderek bűyűyen enerji farkı katıyı daha dengeli hale getirir.
- ❑ Katı ve sıvının arasındaki enerji farkı serbest hacim enerjisidir = ΔG_V (veya ΔG_V)

- ❑ Katının oluşması için katı ile sıvıyı ayıran bir arayüzeyin oluşturulması gerekmektedir.
- ❑ Yüzey serbest enerjisi, arayüzey enerjisi (σ) ile birleşmiştir.
- ❑ Yüzey alanı  Yüzey serbest enerjisi 
- ❑ S₁V₁ katılaşma noktasına soğutulduğunda s₁v₁ içerisindeki atomlar kümeleşerek katı malzemeye benzeyen, küçük bir bölge oluşturur ---- **Embriyo oluşumu**



**Sıvıdan katı
oluştığında ara
yüzey de oluşur.**

- Embriyo oluřumundan sonraki **toplam serbest enerji**:



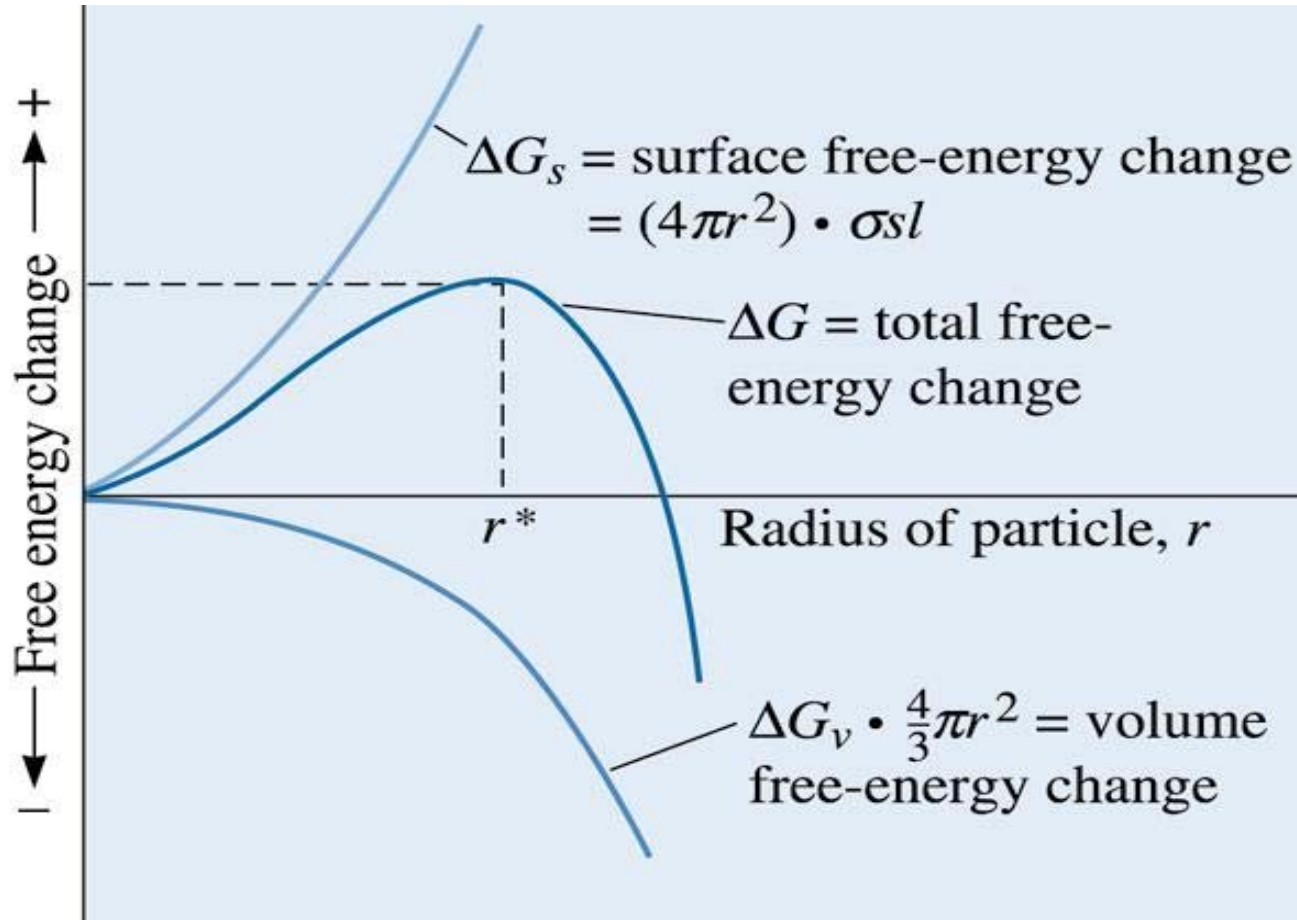
$$\text{Alan} = 4\pi r^2$$

$$\text{Hacim} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

Toplam Serbest Enerji

$$\Delta F = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta F_v + 4\pi r^2 \sigma$$

F_v : negatif deęiřen hacim serbest enerjisidir.

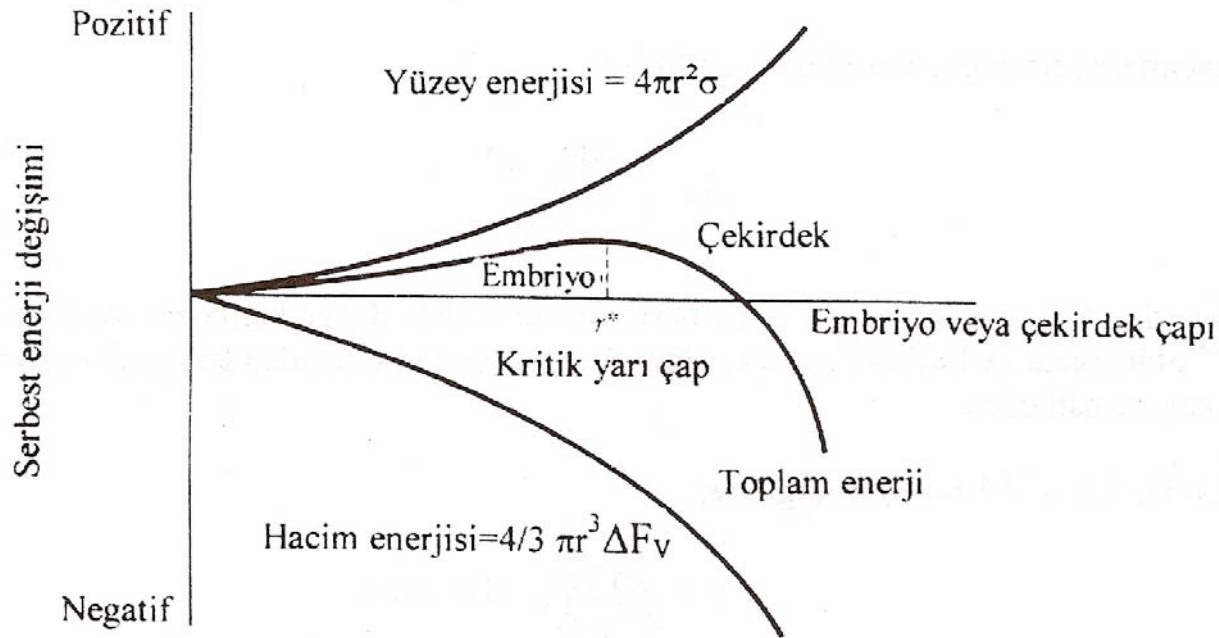


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning_® is a trademark used herein under license.

Katının boyutuna bağlı olarak katı-sıvı sisteminde toplam serbest enerji de değişir. *Katının yarıçapı kritik çaptan küçük ise embriyo, kritik yarıçaptan büyük ise çekirdektir.*

❑ Serbest enerjideki değişiklik embriyonun boyutuna bağlıdır.

❑ Sıvı-katı sisteminin toplam serbest enerjisi, katının boyutu ile değişir. Katı, kritik yarıçaptan küçük ise embriyo, büyük ise çekirdektir.

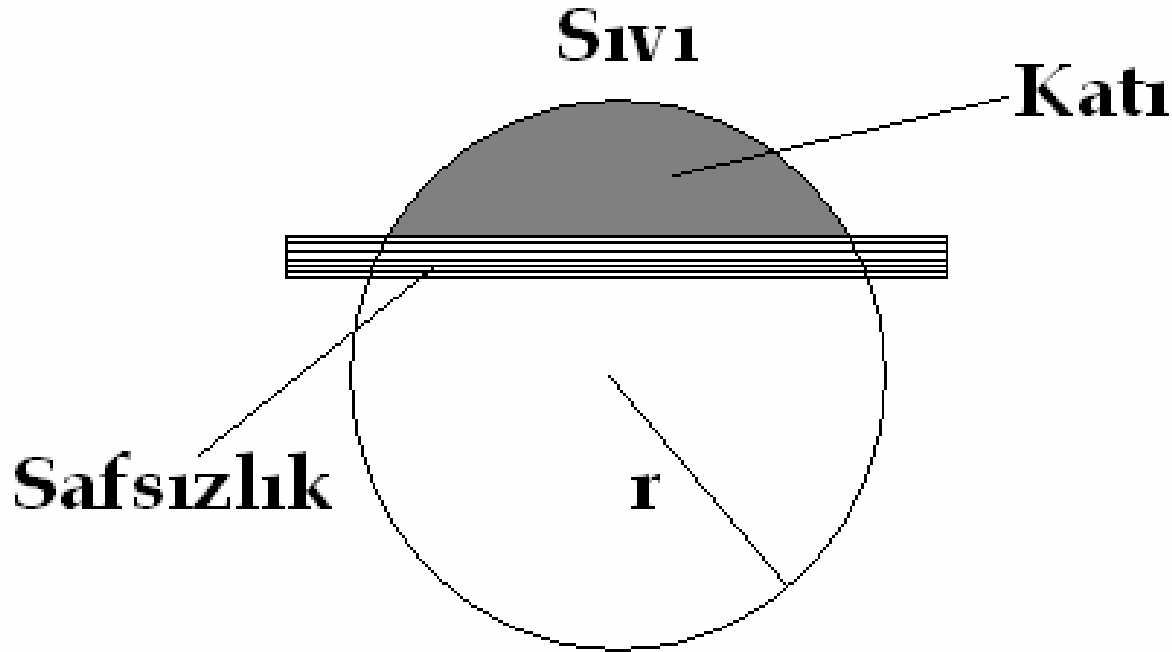


Homojen Çekirdeklenme

- ❑ Sıvının sıcaklığı denge katılaşma sıcaklığının daha altına soğutulduğunda, atomlar kümeleşerek, kritik yarıçaptan (r^*) daha büyük bir embriyo oluşturacaktır.
- ❑ Buna ek olarak alt soğuma, embriyonun kritik boyutunu geçmesini sağlayacak kadar büyük olduğundan homojen çekirdeklenme olur.

Heterojen Çekirdeklenme

- ❑ Sıvı metal içinde homojen çekirdeklenme, laboratuvar deneyleri dışında olmaz.
- ❑ Kritik boyuta oluşmak için, istenilen alt soğuma daha azdır ve böylece çekirdeklenme daha kolay oluşur. Bütün mühendislik metalleri ve alaşımlar, katılaşma sırasında heterojen çekirdeklenir



□ Sıvı ile temas halinde bulunan kalıp duvarları, yabancı maddeler (safsızlıklar) veya kati parçacıklar çekirdeklenme için uygun yüzey sağlayabilirler.

Çekirdeklenme ile Tane Boyu Mukavemetlenmesi

- ❑ Sıvı içerisinde impurite parçacıklar bilinçli olarak atılabilir.
- ❑ Metallere uygulanan bu işlemlerde bu parçacıklar tane inceltme veya aşılama olarak adlandırılır.

TABLE 8-1 ■ Values for freezing temperature, latent heat of fusion, surface energy, and maximum undercooling for selected materials

	Freezing Temperature (T_m)	Heat of Fusion (ΔH_f)	Solid-Liquid Interfacial Energy (σ_{sl})	Typical Undercooling for Homogeneous Nucleation (ΔT)
Metal	(°C)	(J/cm ³)	(J/cm ²)	(°C)
Ga	30	488	56×10^{-7}	76
Bi	271	543	54×10^{-7}	90
Pb	327	237	33×10^{-7}	80
Ag	962	965	126×10^{-7}	250
Cu	1085	1628	177×10^{-7}	236
Ni	1453	2756	255×10^{-7}	480
Fe	1538	1737	204×10^{-7}	420
NaCl	801			169
CsCl	645			152
H ₂ O	0			40



Örnek 8.1. Bakırın Katılaşmasında Kritik Yarıçap Hesabı

Homojen çekirdeklenme ile oluşan katı bakır kritik yarıçapını ve kritik çekirdeğin oluşumunda atomların sayısını hesaplayınız?

ÇÖZÜM

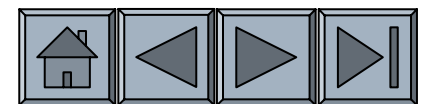
From Table 8-1:

$$\Delta T = 236^{\circ}\text{C} \quad T_m = 1085 + 273 = 1358 \text{ K}$$

$$\Delta H_f = 1628 \text{ J/cm}^3$$

$$\sigma_{sl} = 177 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2$$

$$r^* = \frac{2\sigma_{sl}T_m}{\Delta H_f \Delta T} = \frac{(2)(177 \times 10^{-7})(1358)}{(1628)(236)} = 12.51 \times 10^{-8} \text{ cm}$$



ÇÖZÜM (devam)

The lattice parameter for FCC copper is $a_0 = 0.3615 \text{ nm} = 3.615 \times 10^{-8} \text{ cm}$

$$V_{\text{unit cell}} = (a_0)^3 = (3.615 \times 10^{-8})^3 = 47.24 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

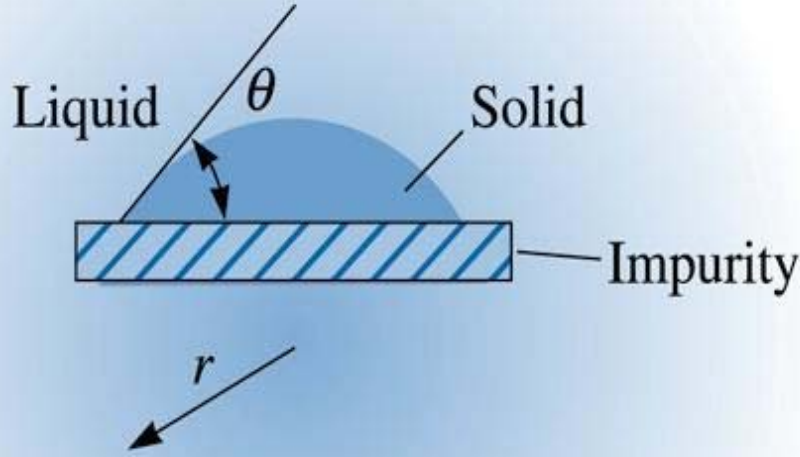
$$V_{r^*} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \left(\frac{4}{3}\pi\right)(12.51 \times 10^{-8})^3 = 8200 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$$

The number of unit cells in the critical nucleus is

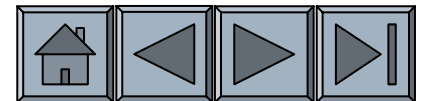
$$\frac{8200 \times 10^{-24}}{47.24 \times 10^{-24}} = 174 \text{ unit cells}$$

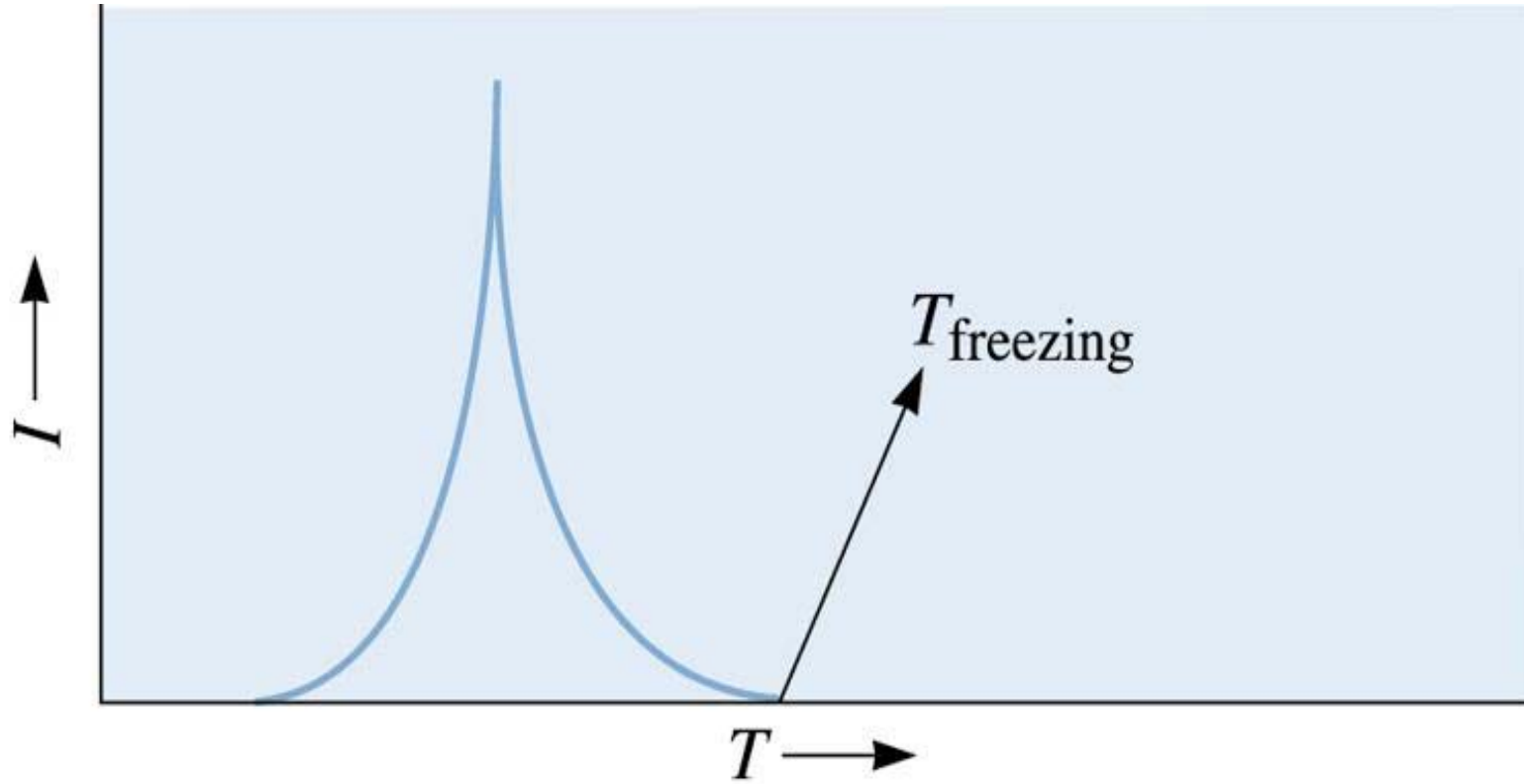
Since there are four atoms in each unit cell of FCC metals, the number of atoms in the critical nucleus must be:

$$(4 \text{ atoms/cell})(174 \text{ cells/nucleus}) = 696 \text{ atoms/nucleus}$$



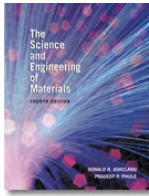
Empürite üzerinde oluşan katı yüzey enerjisinde çok az artış ile kritik yarıçapa erişir. Böylece, heterojen çekirdeklenme relatif olarak düşük aşırı soğumalarda oluşur.





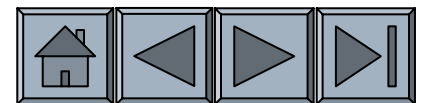
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning_® is a trademark used herein under license.

Sıvı sıcaklığına (T) bağlı olarak çekirdeklenme hızı (I)



Bölüm 8.3. Kontrollü Çekirdeklenmenin Uygulamaları

- **Tane Küçültme** –Dökümde tane sayısını artırmak için heterojen çekirdeklerin kontrollü olarak eklenmesidir.
- **Dispersiyon sertleştirmesi** –Dislokasyon hareketini önleyerek metalik malzemenin mukavemetinin küçük ikincil malzeme öbekleri ile artırılmasıdır.
- **Katı hal faz dönüşümü** –Katı haldeki faz dönüşümüdür.
- **Hızlı katılaşma prosesi** –katılaşma esnasında yüksek soğuma hızları ile özel malzeme yapılarının ortaya çıkarılmasıdır.



Bölüm 8.4 Büyüme Mekanizmaları

- **Özgül Isı** – Bir birim ağırlıktaki malzemenin sıcaklığını bir derece değiştirmek için gerekli ısı miktarıdır.
- **Katılaşma önü** – Katı ve sıvı arasındaki arayüzeyleir.
- **Düzlemsel büyüme** – Hiçbir aşırı soğuma mevcut olmaksızın katılaşma esnasında katı-sıvı arayüzeyinin pürüzsüz büyümesidir.
- **Dentritler** – Aşırı doymuş sıvı katılaştığında katının ağacımsı yapısıdır.

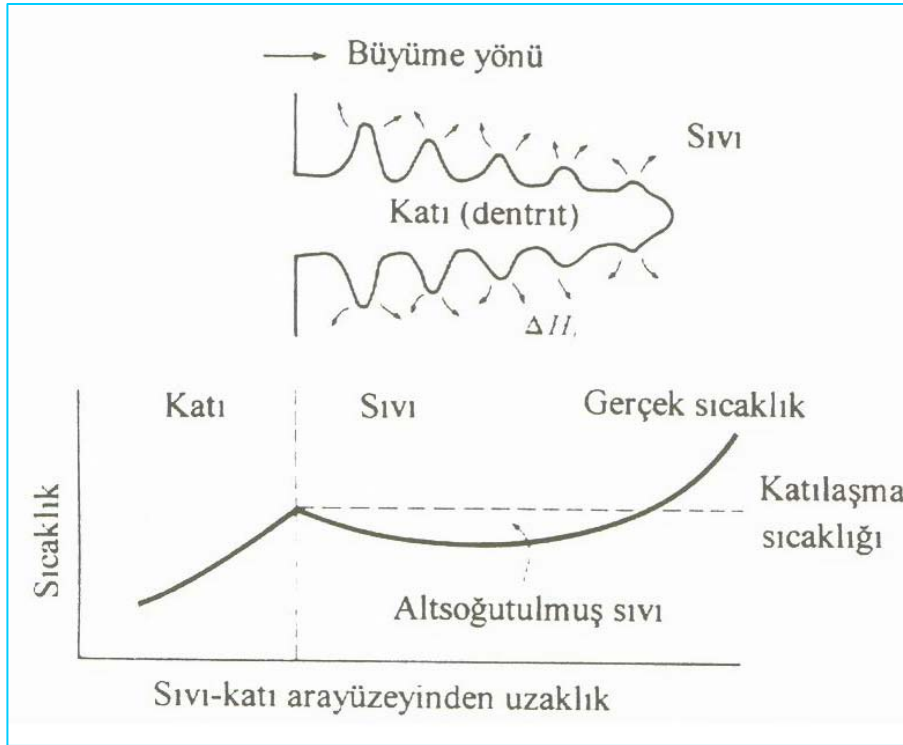
Düzlemsel Büyüme



Sıvının sıcaklığı katılma sıcaklığının üzerinde olduğunda katı-sıvı arayüzeyindeki şişkinlik tekrar eriyerek düzlemsel arayüzeyin korunmasına neden olur. Ergime ısı katıya doğru arayüzeyden uzaklaştırılır.

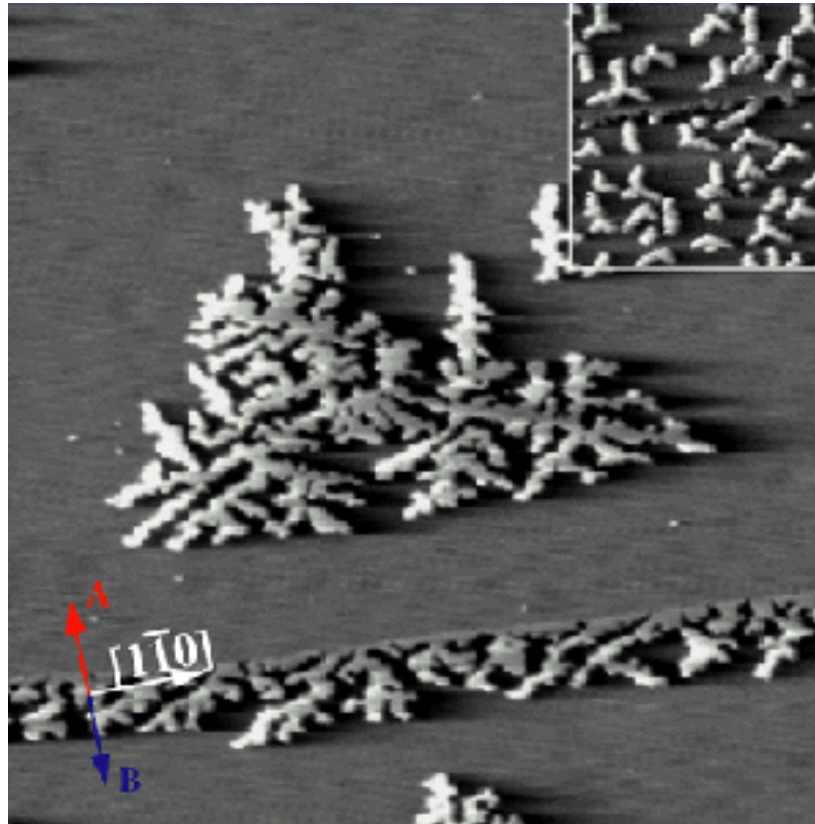
Dentritik Büyüme

❑ Çekirdeklenme zayıf olduğunda, katı oluşmadan önce, sıvı katılama sıcaklığının altında bir sıcaklığa soğur.

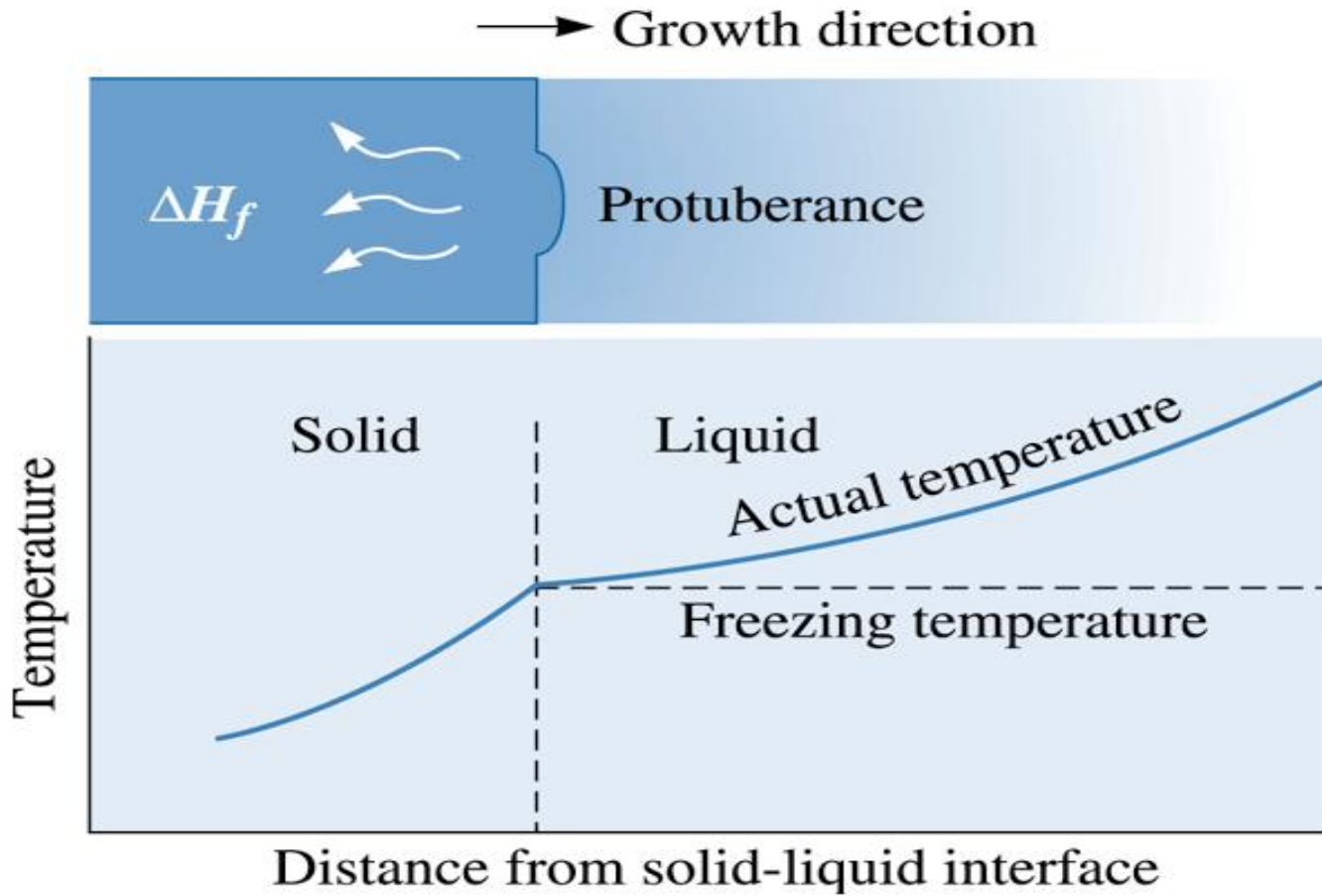


❑ Dentritik büyüme alt soğuyan sıvının katılama sıcaklığına kadar devam eder.

Gümüş Yapısında Dentritik Büyüme

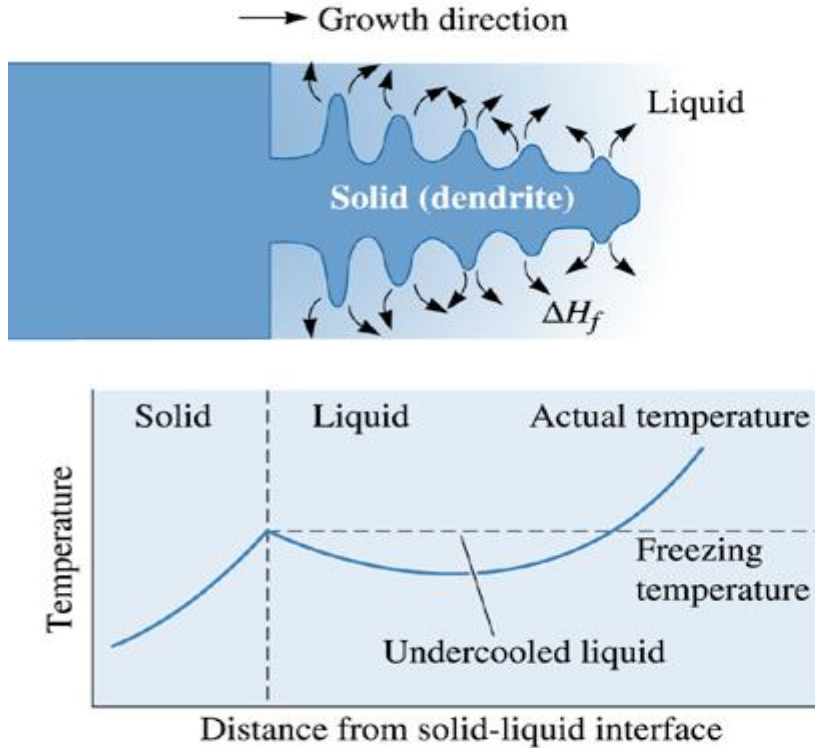


- ❑ Düzlemsel ve dentritik büyüme arasındaki farklılık, farklı gizli ısılara sahip sıvı gölcükleri nedeniyle ortaya çıkar.
- ❑ Düzlemsel büyümede sıvının içinde bulunduğu kap veya kalıp ısıyı absorbe eder.
- ❑ Dentritik büyümede ise alt soğutulmuş sıvı ısıyı absorbe eder.

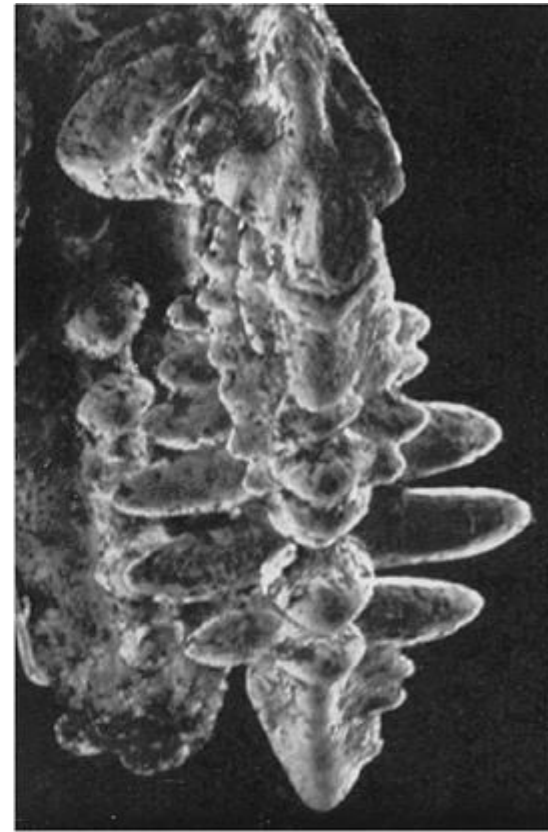


©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, Inc. is a trademark used herein under license.

Sıvının sıcaklığı donma sıcaklığının üstünde ise katı-sıvı arayüzeyinde çukıntı oluşmaz düzlemsel arayüzeyin oluşmasına sebep olur. Kalıntı (Latent) ısı katı vasıtasıyla ara yüzeyden uzaklaştırılır.



(a)



(b)

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

(a) Eğer sıvı aşırı soğutulmuş ise katı-sıvı arayüzeyindeki çıkıntı dentrit şeklinde büyür. Kalan ergime ısı sıvının sıcaklığı donma noktasına çıkarılarak uzaklaştırılır. (b) çelikteki dentritlerin elektron mikroskobu görüntüsü.

Bölüm 8.5 Katılma Zamanı ve Dentrit Boyutları

- **Chvorinov's kuralı** – Dökümün katılma zamanı dökümün hacim/yüzey alanı oranının karesi ile doğrudan orantılıdır.
- **Kalıp sabiti (B)** - Chvorinov's kuralındaki karakteristik sabittir.
- **İkincil dentrit Kolları aralığı (İDKA)** – İki en yakın ikincil dentrit kollarının merkezleri arasındaki mesafedir.



Katılaşma Zamanı

- ❑ Yüksek soğuma hızı, hızlı katılaşma veya kısa katılaşma zamanına neden olur.
- ❑ Basit bir dökümün tamamen katılaşması için gerekli olan zaman Chvorinov Kuralı uygulanarak hesaplanır.

$$t_s = B \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

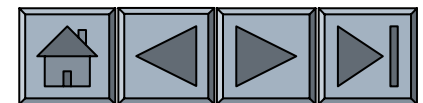
Metal ve kalıbın başlangıç sıcaklıklarına ve özelliklerine bağlıdır.

t_s : Dökümün katılaşması için gerekli zaman

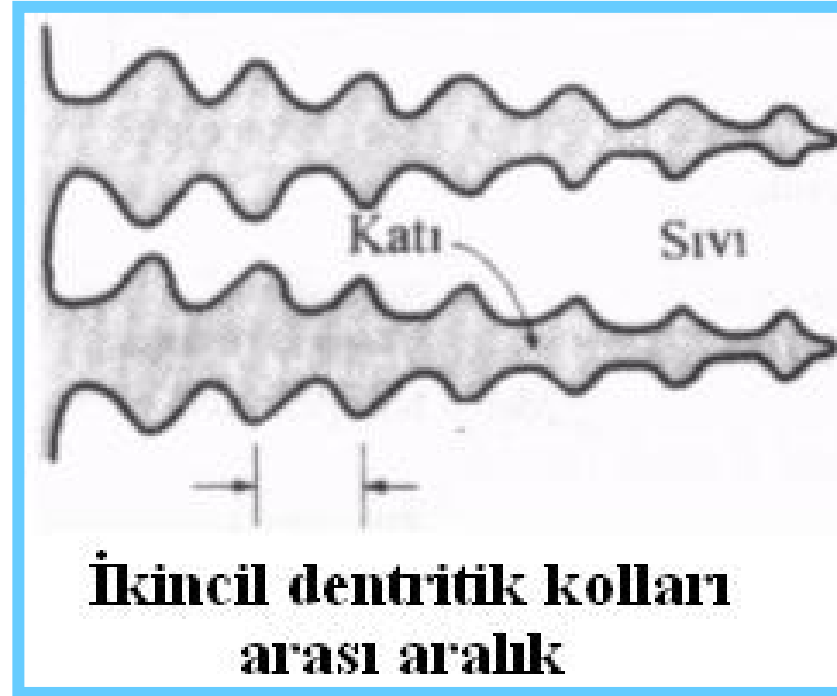
A: Kalıp ile temas eden dökümün yüzey alanı

B: Kalıp sabiti

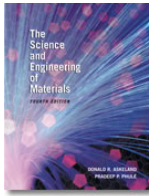
V: Dökümün hacmi



□ Katılma zamanı büyüyen dentritlerin boyutlarını da etkiler.



□ Dentrit büyüklüğü **ikincil dentrit kolları arasındaki aralık** (İDKA) ölçülerek belirlenir.



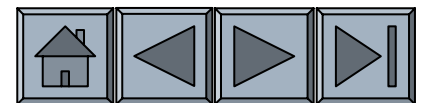
Döküm hızlı katılaştığında İDKA azalır.

Bunun nedeni; ısı transferi için daha az zaman bulunduğundan ergime ısısının atılması ile ilave dentrit kolları ortaya çıkar ve büyür. Daha ince ve yoğun dentritik şebeke, ergime gizli ısısının altsoğuyan sıvıya daha fazla iletilmesini sağlar.

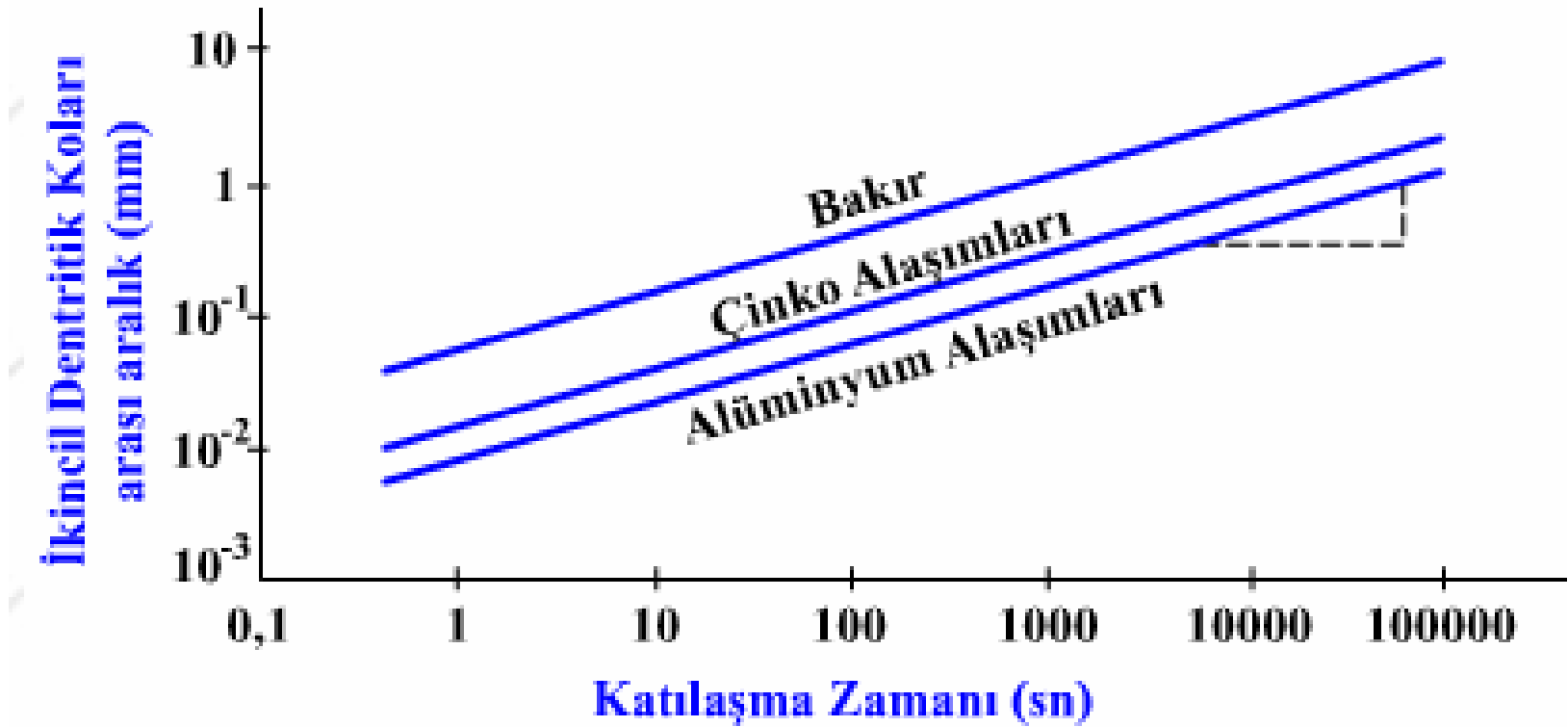
İDKA Katılama Zamanı

$$IDKA = kt_s^n$$

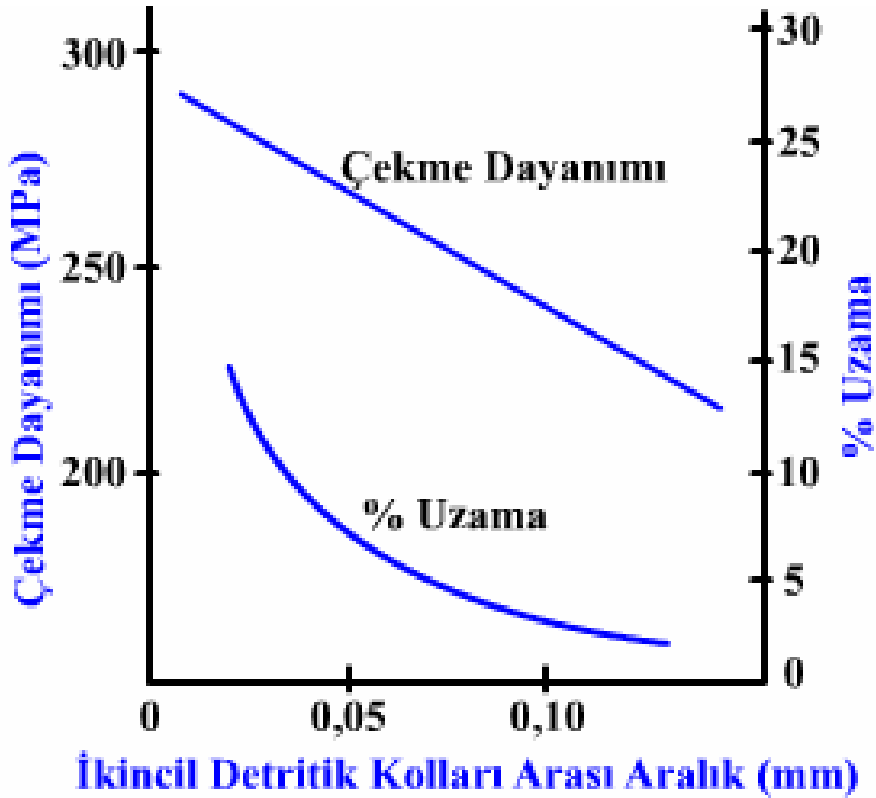
n ve k metal bileşimine bağlı sabitler.



Katılma zamanının Cu, Zn ve Al'nin İDKA üzerine etkisi



İDKA'nın Al döküm alaşımının özellikleri üzerine etkisi



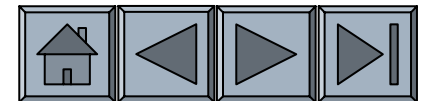
□ Küçük ikincil dentritik kol aralığı (İDKA), yüksek dayanım ve iyileştirilmiş süneklik sağlar.



Örnek 8.2. Gelişmiş Mukavemet için Dökümün Tekrar Tasarımı

Şirketiniz disk şekilli 2 in. kalınlığında ve 18 in. çapında piring parçalar üretmektedir. Size göre katılma %25 hızlı olsa çekme mukavemetindeki gelişim daha hafif bir döküme olanak verecektir.

Buna izin verecek tasarımı yapınız? Kalıp sabitinin 22 min/in.² olduğunu düşününüz.



ÇÖZÜM

d :çap x : kalınlık hacim ve yüzey alanı ve katılaşma süresi:

$$V = (\pi/4)d^2x = (\pi/4)(18)^2(2) = 508.9 \text{ in.}^3$$

$$A = 2(\pi/4)d^2 + \pi dx = 2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(2) = 622 \text{ in.}^2$$

$$t = B \left(\frac{V}{A} \right)^2 = (22) \left(\frac{508.9}{622} \right)^2 = 14.72 \text{ min}$$

The solidification time of the redesigned casting should be 25% shorter than the current time, or $t_r = 0.75t$, where:

$$t_r = 0.75t = (0.75)(14.72) = 11.04 \text{ min}$$



ÇÖZÜM (devam)

Döküm koşulları değişmediğine göre kalıp sabiti (B) The V/A oranı:

$$t_r = B \left(\frac{V}{A} \right)^2 = (22) \left(\frac{V}{A} \right)^2 = 11.04 \text{ min}$$

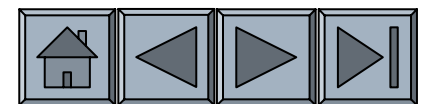
$$\left(\frac{V}{A} \right)^2 = 0.5018 \text{ in.}^2 \quad \text{or} \quad \frac{V}{A} = 0.708 \text{ in.}$$

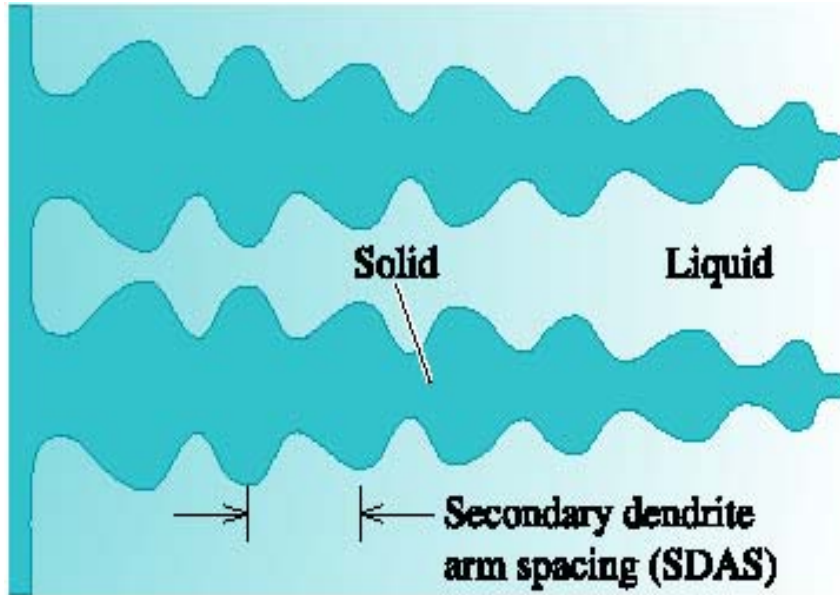
If x is the required thickness for our redesigned casting, then:

$$\frac{V_r}{A_r} = \frac{(\pi/4)d^2x}{2(\pi/4)d^2 + \pi dx} = \frac{(\pi/4)(18)^2(x)}{2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(x)} = 0.708 \text{ in.}$$

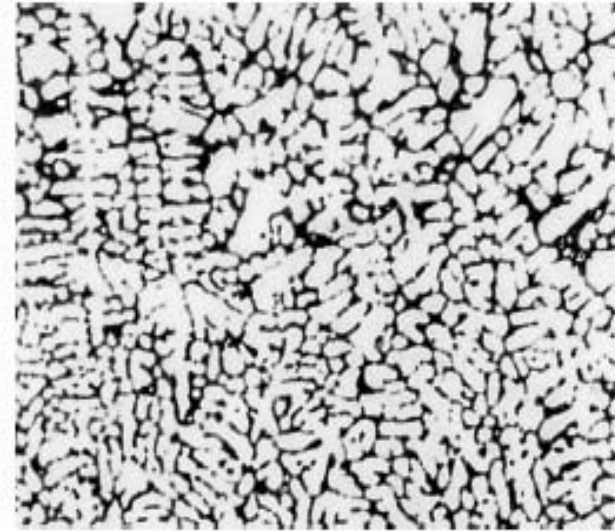
Therefore, $x = 1.68 \text{ in.}$

This thickness provides the required solidification time, while reducing the overall weight of the casting by nearly 15%.



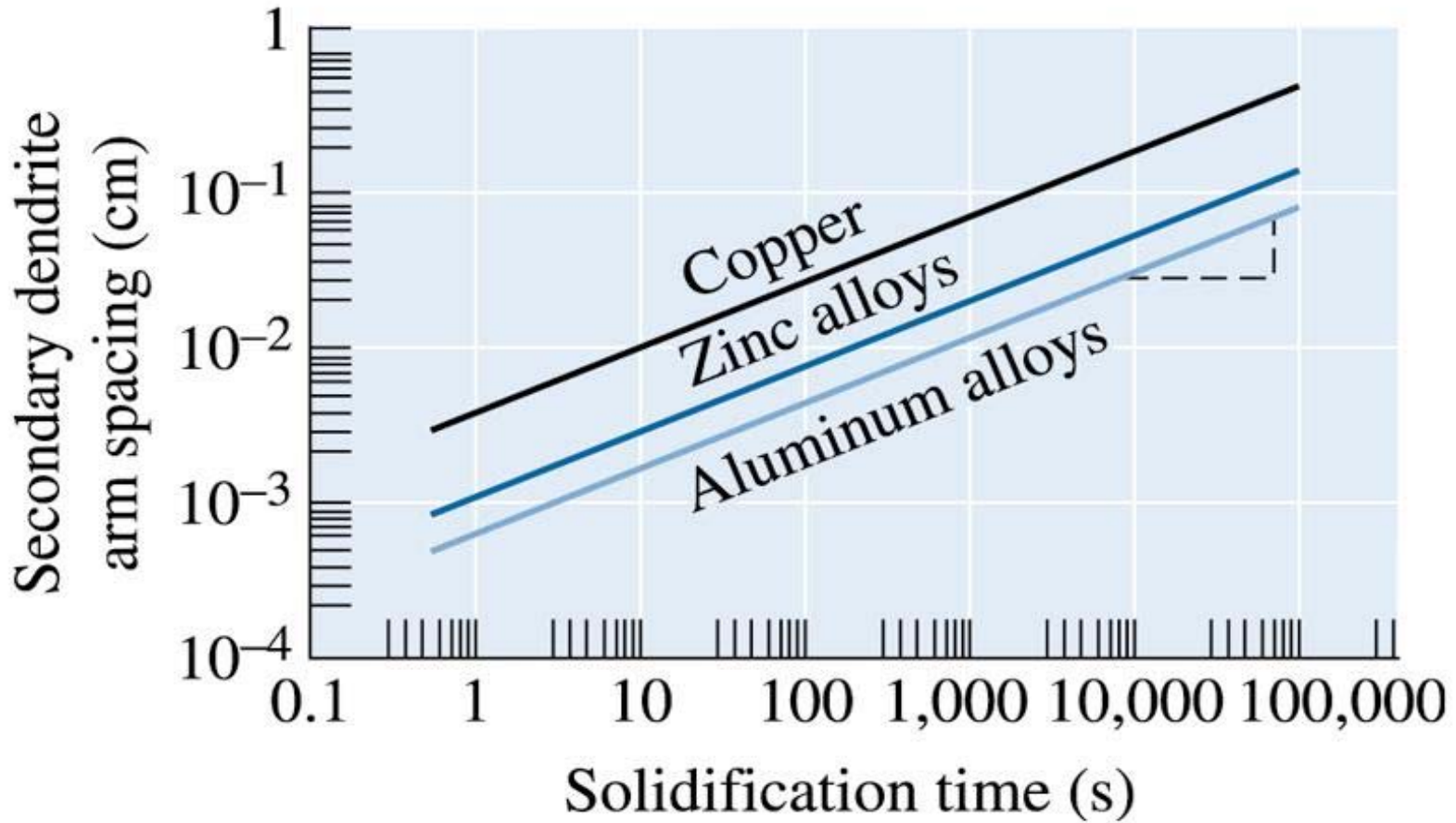


(a)



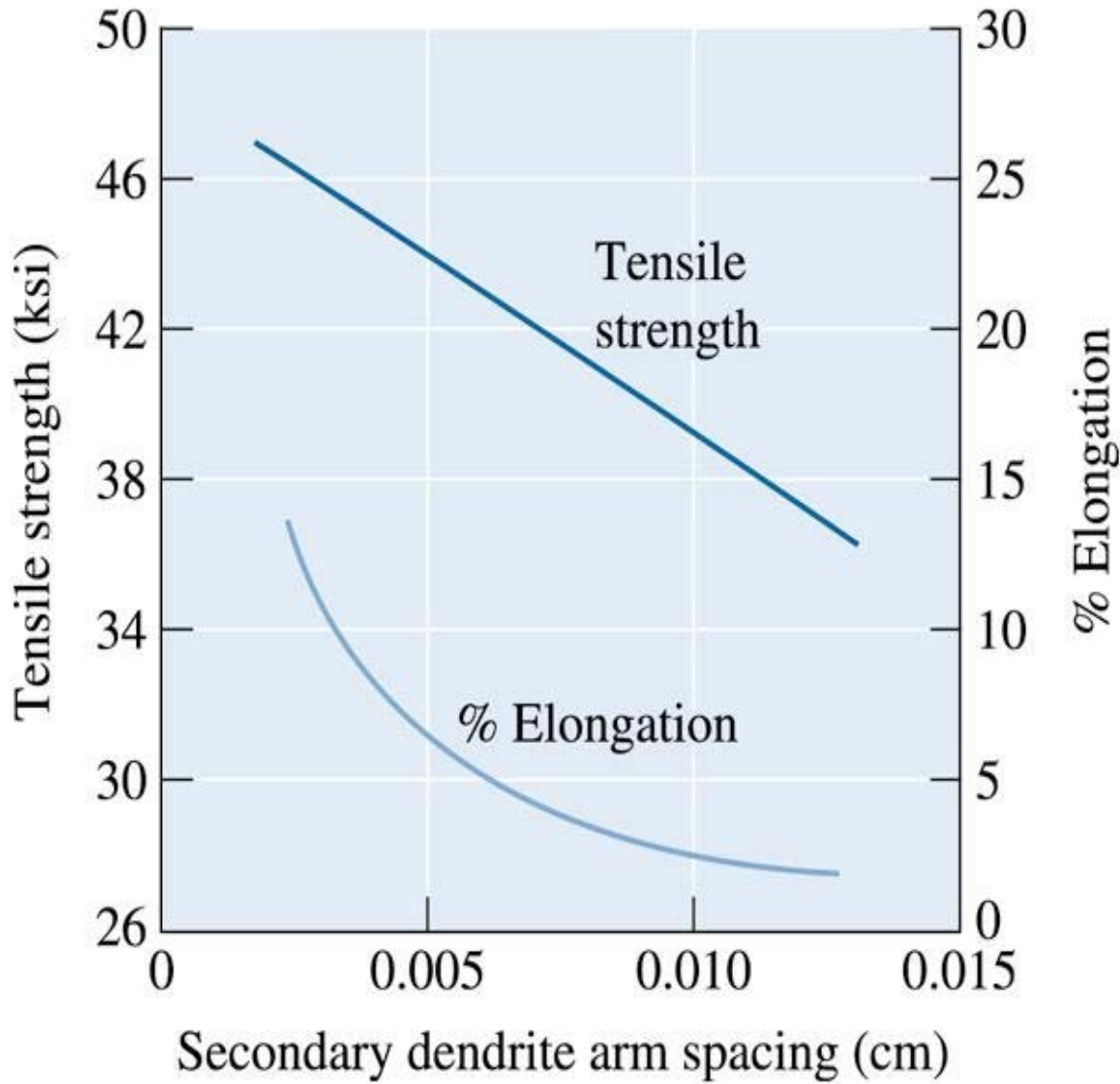
(b)

İkincil dentrit kolları aralığı (İDKA). (b) Alüminyum alaşımlarındaki dentritler (x 50). (From ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and Microstructure (1985), ASM International, Materials Park, OH 44073-0002.)



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

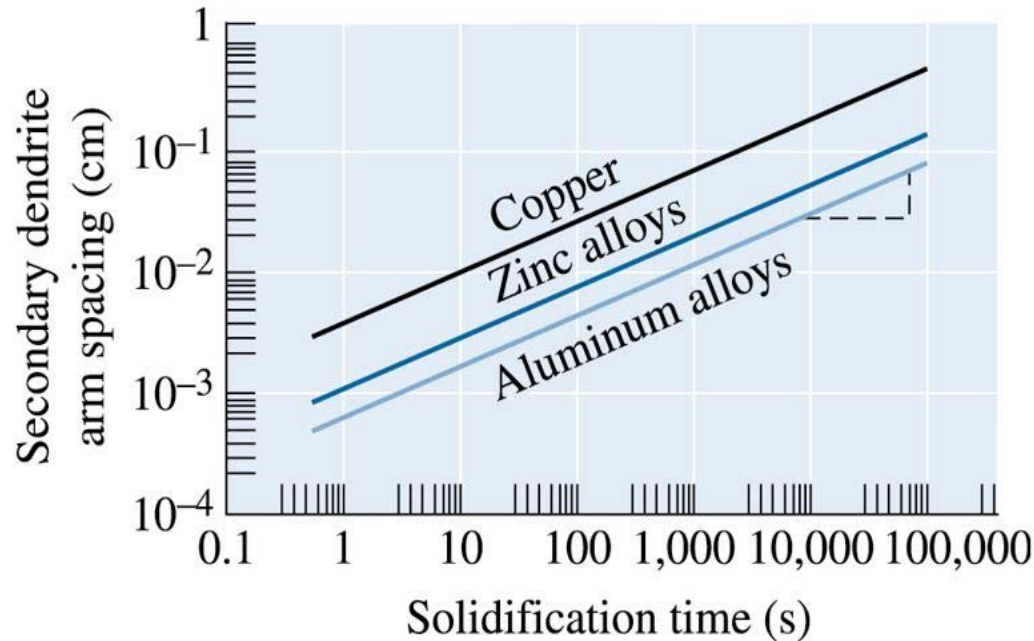
Bakır, çinko ve alüminyumda katılaşma süresinin ikincil dentrit kolları arasındaki uzaklığa etkisi.



Alüminyum döküm alaşımlarının özellikleri üstüne ikincil dentrit kolları arası mesafenin etkisi.

Örnek 8.3. Alüminyum Alaşımlarında İkincil Dentrit Kolları Arasındaki Mesafe

Katılaşma zamanı ve ikincil dentrit kolları arasındaki mesafe ilişkisini kullanarak B sabitini hesaplayınız?



Cu, Zn ve Al için katılaşma zamanı ikincil dentrit kolları arasındaki mesafe.

Example 8.3 SOLUTION

5 eşit birim dikey ve 12 eşit birim yatayda işaretlenmiştir.
Eğim:

$$m = \frac{5}{12} = 0.42$$

The constant k is the value of SDAS when $t_s = 1$ s, since:

$$\log \text{SDAS} = \log k + m \log t_s$$

If $t_s = 1$ s, $m \log t_s = 0$, and $\text{SDAS} = k$, from Figure 8-10:

$$k = 8 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}}{\text{s}^m}$$



Örnek 8.4. Katılaşma Zamanı

4 in. çapında alüminyum çubuk 5 dakikada yüzeyden 0,5 in katılaşmakta, 20 dakika sonra 1,5 in. katılaşmaktadır. Bu durumda ne kadar süre içinde tüm çubuk katılaşır?

ÇÖZÜM

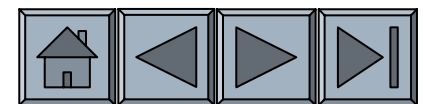
Ölçümlerden, sabitler $k_{\text{katılaşma}}$ ve c_1 .

Solidification is complete when $d = 2$ in. (half the diameter, since freezing is occurring from all surfaces):

$$2 = 0.447\sqrt{t} - 0.4995$$

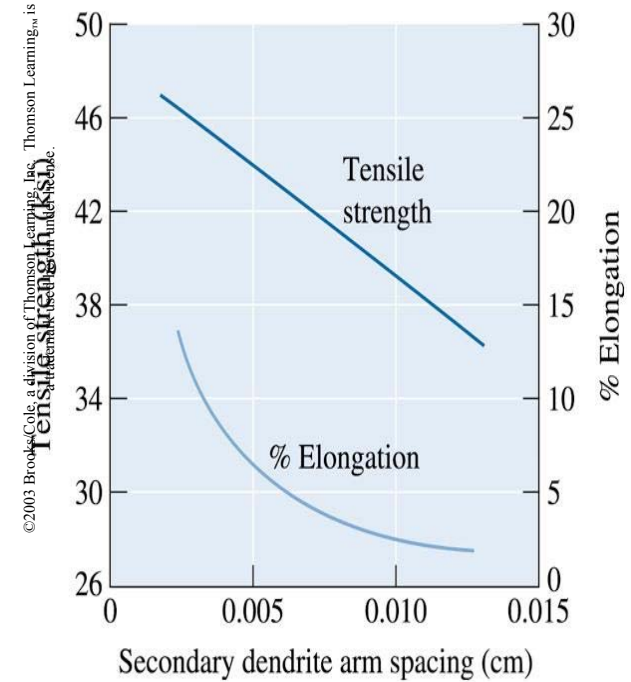
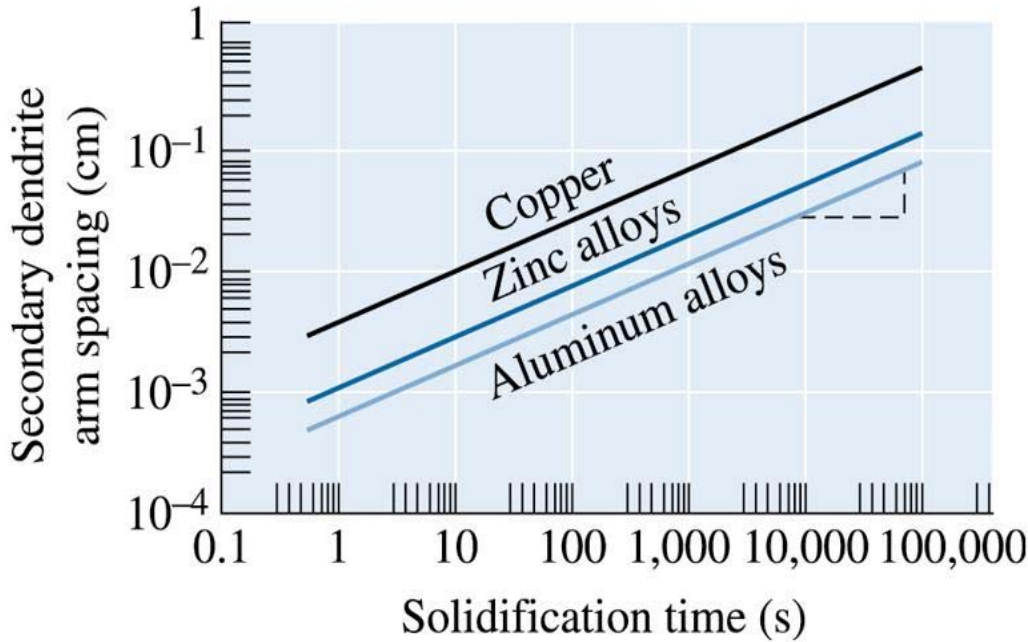
$$\sqrt{t} = \frac{2 + 0.4995}{0.447} = 5.59$$

$$t = 31.27 \text{ min}$$



Örnek 8.5. Alüminyum Alaşımı Döküm Tasarımı

Uzunluğu 12 in ve genişliği 8 in olan alüminyum alaşımının 40000 psi çekme mukavemeti üretmesi için gerekli kalınlığı hesaplayınız? Chvorinov's kuralındaki kalıp sabiti: 45 min/in². Önceki şekillerdeki verileri kullanınız.



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



ÇÖZÜM

Uzunluk 12 in.ve genişlik 8 in.:

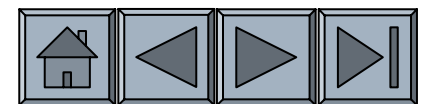
$$V = (8)(12)(x) = 96x$$

$$A = (2)(8)(12) + (2)(x)(8) + (2)(x)(12) = 40x + 192$$

$$5 \text{ min} = (45 \text{ min/in.}^2) \left(\frac{96x}{40x + 192} \right)^2$$

Alüminyum alaşım dökümün kalınlığı

$$x = 0.77 \text{ in.}$$

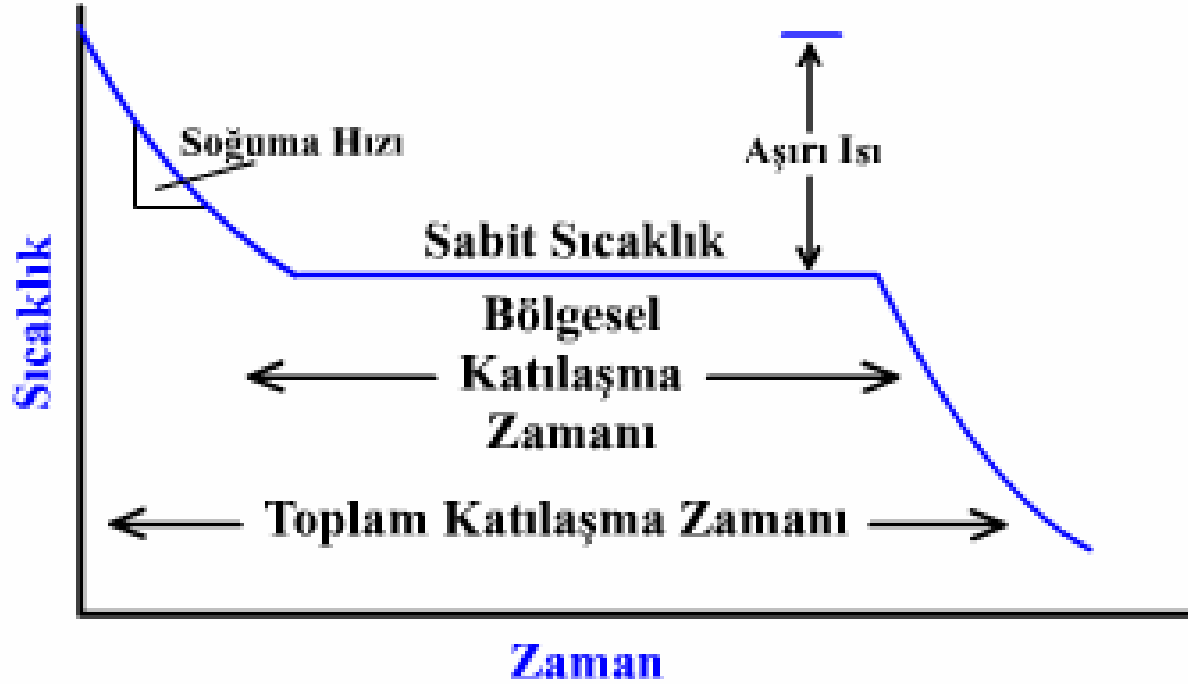


Bölüm 8.6 Soğuma Eğrileri

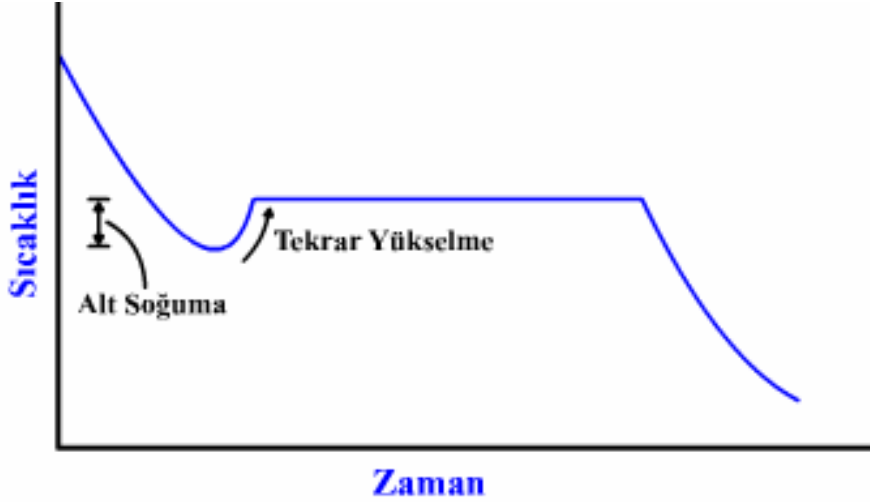
- ❑ **Recalescence** – Çekirdeklenme sonucunda çıkan ısı sonucu aşırı soğumuş metalin sıcaklığındaki artış.
- ❑ **Isıl alıkoyma** – Katılaşma esnasında kalıntı ısının evrimi sonucunda malzemenin soğuma eğrisindeki düzlük.
- ❑ **Toplam katılaşma zamanı** – Döküm yapıldıktan sonra tamamıyla katılaşması için gereken süre.
- ❑ **Lokal katılaşma zamanı** – Çekirdeklenme başladıktan sonra belirli bir bölgenin katılaşması için gerekli zaman.

Soğuma eğrileri

Alt soğumasız çekirdeklenmiş sıvı için soğuma eğrisi

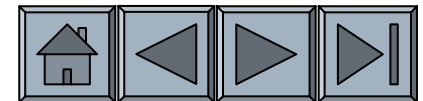


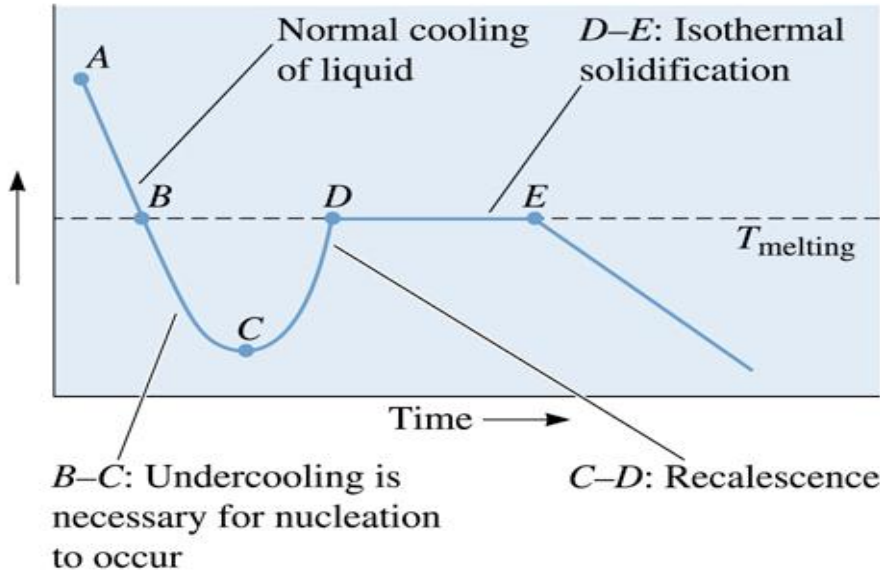
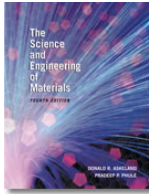
Soğuma eğrileri



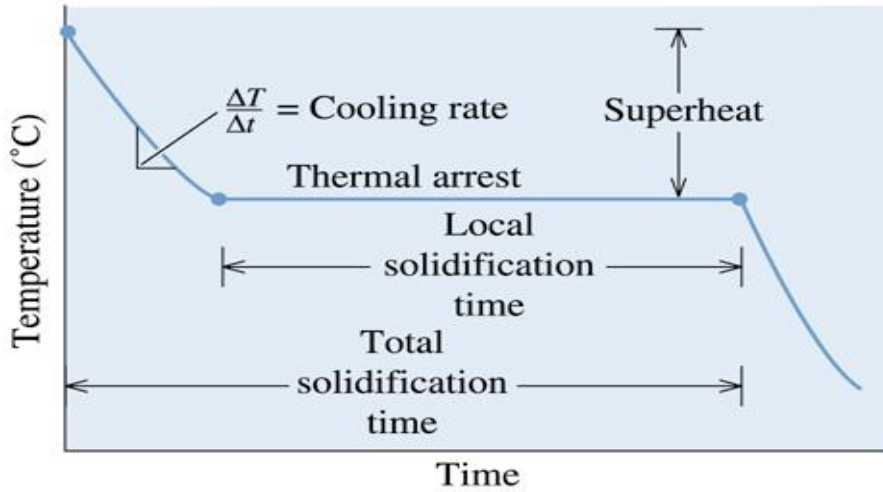
Çekirdeklenme için büyük alt soğuma gerektiren sıvı için soğuma eğrisi

- ❑ Zayıf çekirdeklenme nedeniyle alt soğuma meydana gelmiş ise katılaşma, katılaşma sıcaklığının altına iner. Katı çekirdeklendikten sonra büyüme meydana gelir. Ergime gizli ısı alt soğutulmuş sıvı tarafından absorbe edilir ve sıvının sıcaklığını katılaşma sıcaklığına yükseltir.
- ❑ Düzlemsel büyüme ile katılaşma tamamlanana kadar sıcaklık sabit kalır.





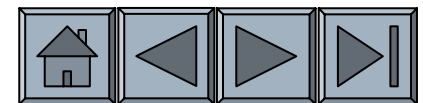
(a)



(b)

(a) Tam olarak aşılınmamış saf metalin soğuma eğrisi. Sıvı özgül ısı alındığında soğur. (A ve B noktaları arası). Aşırı soğuma gereksiz (B ve C arası). Çekirdeklenme başladığında (C), kalıntı ergime ısı salınır ve sıvının sıcaklığında artış yaşanır. Bu proses recalescence (C ile D noktası). Metal sabit sıcaklıkta katılaşmaya devam eder. (T ergime). E, noktasında katılaşma tamamlanmıştır. Katı döküm bu noktada soğumaya devam eder.

(b) Çok iyi aşılınmış ancak saf olmayan metalin soğuma eğrisi. Hiç bir aşırı soğuma ihtiyacı olmaz. Recalescence gözlenmez. Katılaşma ergime sıcaklığında başlar.



Bölüm 8.7 Döküm Yapısı

Çil bölgesi - Heterojen çekirdeklenme sonucu döküm yüzeyinde küçük, rastgele yönelmiş tanelerin oluşturduğu bölgedir.

Sütunsal bölge - Dökümün katılaşması esnasında rekabetçi büyümenin sonucu olarak yönelmiş oryantasyona sahip uzamış tanelere sahip bölgedir.

Eş eksenli bölge - Geniş yaygınlıkta çekirdeklenme sonucu dökümün merkezinde rastgele yönelmiş tanelerden oluşmuş bölgedir.

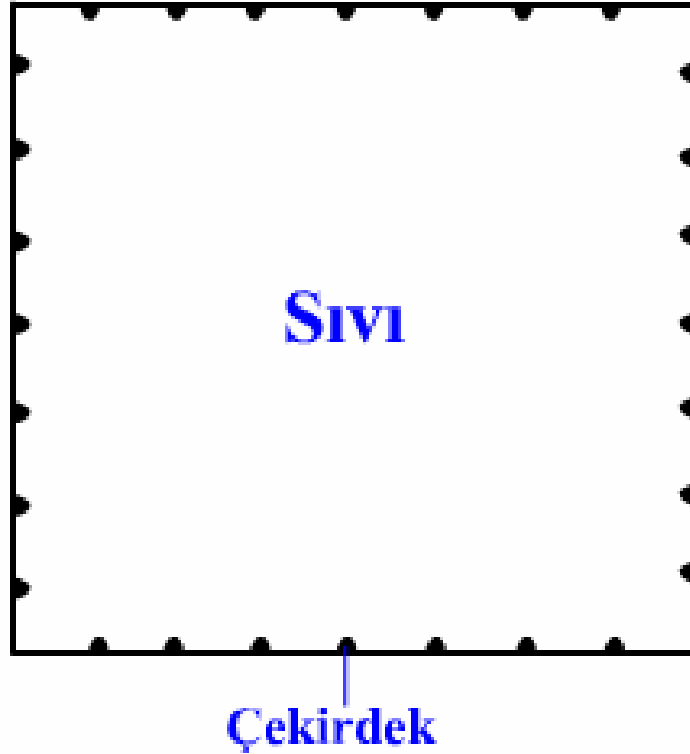
Döküm veya İngot (Kütük) Yapısı

- ❑ Ergitilmiş metalin kalıba dökülür ve katılaşmaya bırakılır. Kalıpta, son şekle sahip döküm parça üretilir.

Katılaşma sırasında döküm makro yapısının oluşması:

- ❑ Çekirdeklenme başlar
- ❑ Çil bölgesi oluşur
- ❑ Tercihli büyüme ile sütunsal oluşum
- ❑ İlave çekirdeklenme eşeksenli bölge oluşturur.

a) Çekirdeklenmenin Başlaması



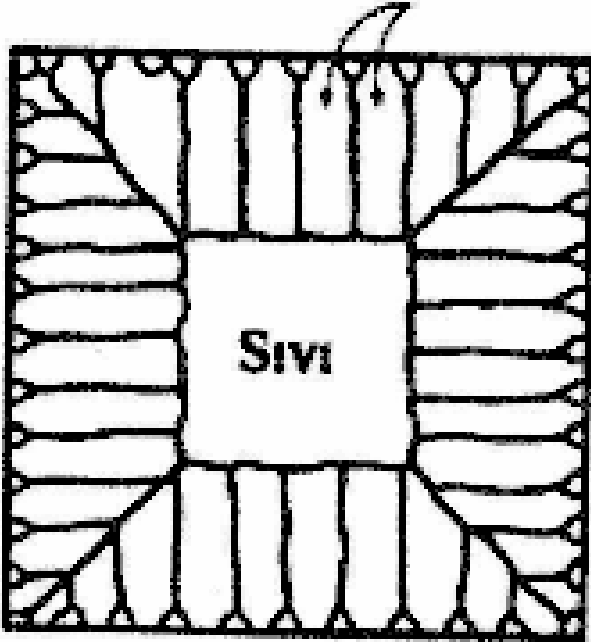
b) Çil Bölgesi Oluşumu



- ❑ Döküm yüzeyinde dar bir band halinde rasgele yönlenmiş tanelerin oluşturduğu bölgedir.
- ❑ Kalıp duvarları heterojen çekirdeklenmenin oluşabileceği pek çok yüzey sağlar.
- ❑ Taneler çekirdeklenmeye başlar ve kalıp duvarı boyunca büyür.

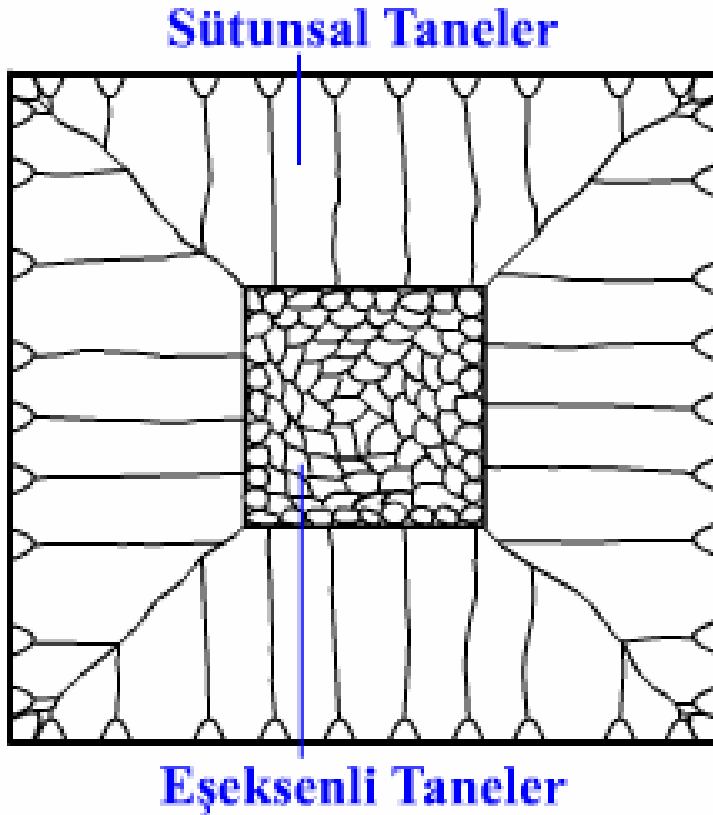
c) Tercihli Büyüme İle Sütunsal Oluşum

Sütunsal Taneler

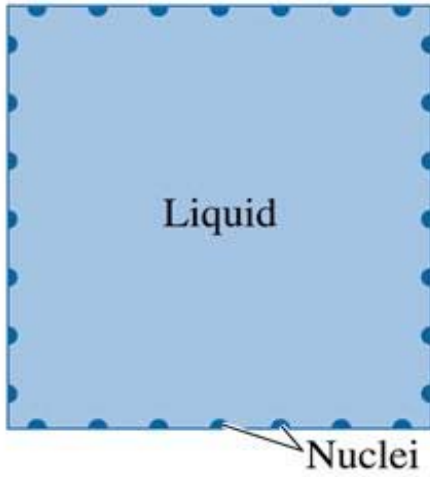


- ❑ Belli kristallografik yönde yönlendirilmiş uzun taneleri içerir.
- ❑ Dökümün ısı kalıp tarafından uzaklaştırıldığında, çil bölgesindeki taneler ısı akışına ters yönde veya dökümün en soğuk bölgesinden en sıcak bölgesine doğru büyür.
- ❑ Taneler kalıp duvarına dik yönde büyürler.

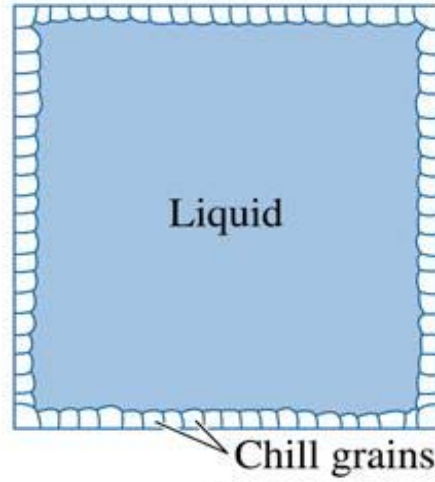
d) Eşeksenli Bölgelerin Oluşumu



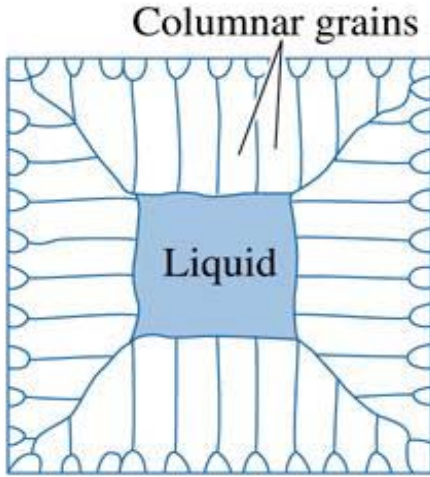
- ❑ Düşük döküm sıcaklığı, alaşım elementleri veya tane inceltme ile aşılacağı malzemelerin neden olduğu rastgele yönlendirilmiş taneleri içerir.
- ❑ Sütünsal tanelerin büyümesini durdururlar.
- ❑ Parçanın bir kısmının izotropik davranış göstermesine neden olur.



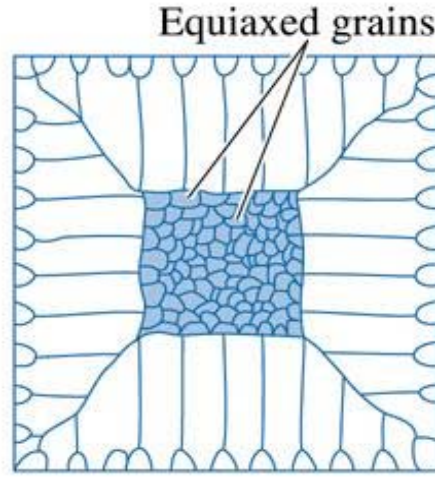
(a)



(b)

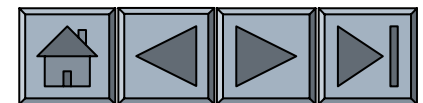


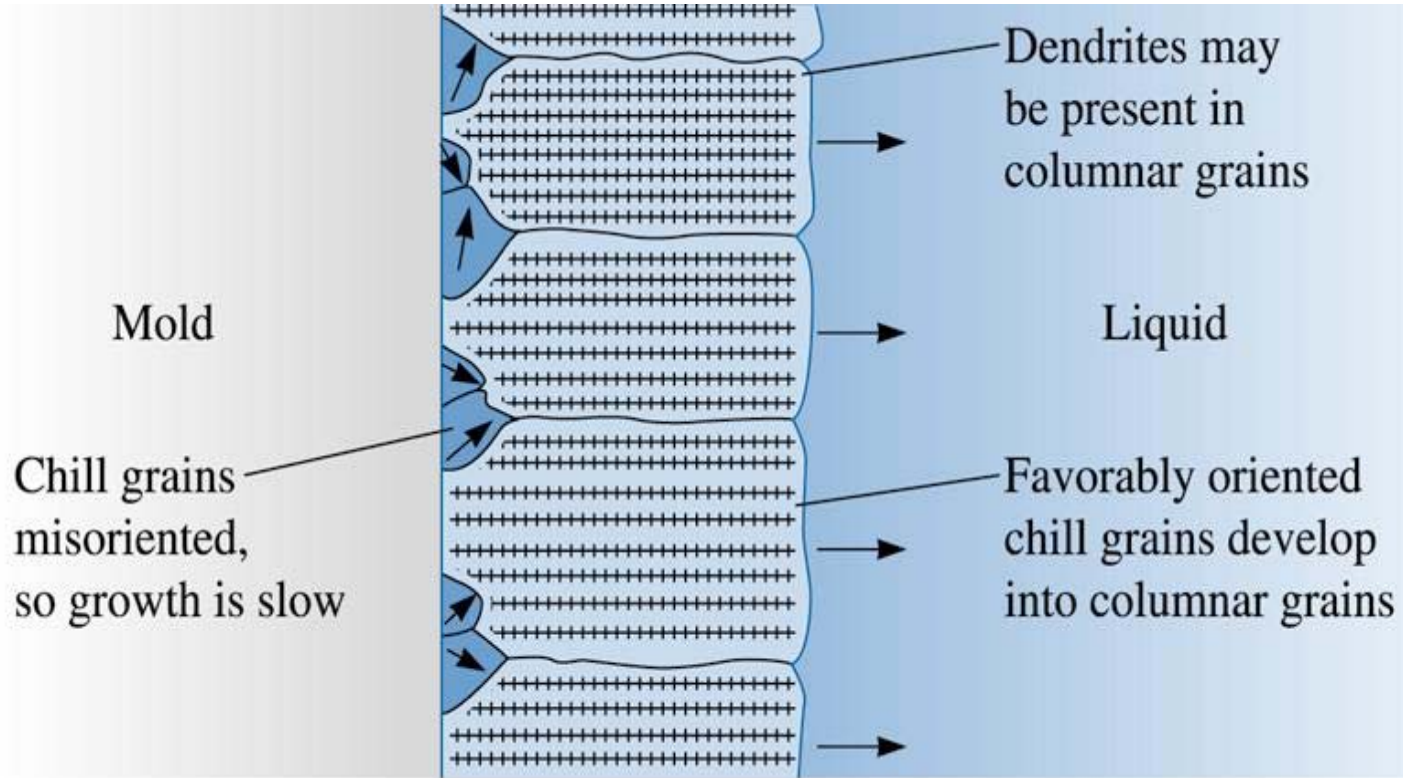
(c)



(d)

Katılaşma esnasında ingot yapısının oluşması: (a) Çekirdeklenme, (b) çil bölgesi, (c) yönlendirilmiş sütunsal büyüme, ve (d) ek çekirdeklenme, eş eksenli taneleri oluşturur.





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

Çil bölgesinde tanelerin rekabetçi büyümesi. Sadece bazı istenen oryantasyonlarda sütunsal taneler gelişir.

Bölüm 8.8 Katılma Hataları

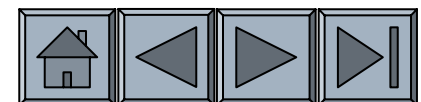
- **Çekilme** – Katılma esnasında dökümün büzülmesidir.
- **Mikroçekilme** – Katılma ile gelişen dentrit kolları arasında çekilme ile oluşan küçük, aralıklı olarak birbirinden ayrılmış gözenekler.
- **Gaz boşlukları** – Gazın sıvı içindeki çözünürlüğünün katıdan çok olması nedeniyle katılma esnasında hapsolmuş gaz baloncuklarıdır.
- **Sievert's kanunu** – Metal içinde çözünen gazın miktarı gazın etrafındaki kısmi basınç ile orantılıdır.



TABLE 8-2 ■ Shrinkage during solidification for selected materials

Material	Shrinkage (%)
Al	7.0
Cu	5.1
Mg	4.0
Zn	3.7
Fe	3.4
Pb	2.7
Ga	+3.2 (expansion)
H ₂ O	+8.3 (expansion)
Low-carbon steel	2.5–3.0
High-carbon steel	4.0
White Cast Iron	4.0–5.5
Gray Cast Iron	+1.9 (expansion)

Note: Some data from Ref. [9]

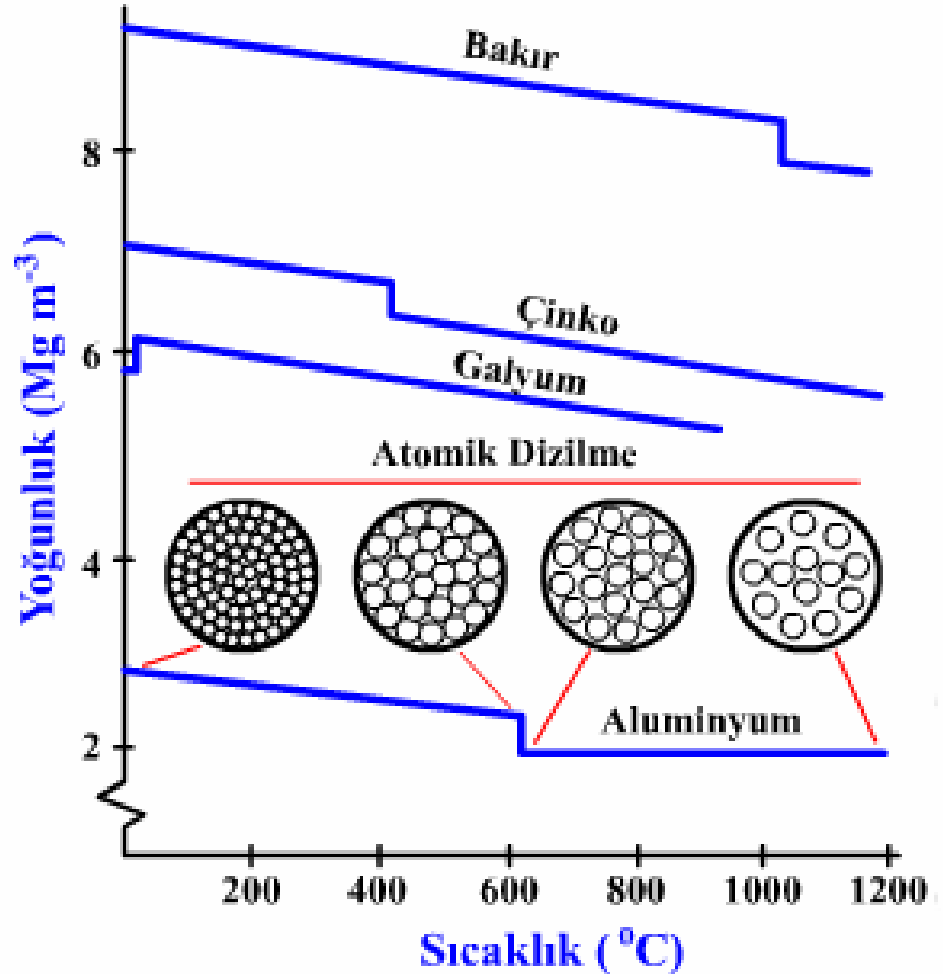


a) Çekilme

❑ Katı durum yoğunluğu > Sıvı durum yoğunluğu

❑ Yoğunluğun artması, katılaşma sırasındaki çekmeden kaynaklanır.

❑ Galyum tam tersi bir davranış göstermektedir.



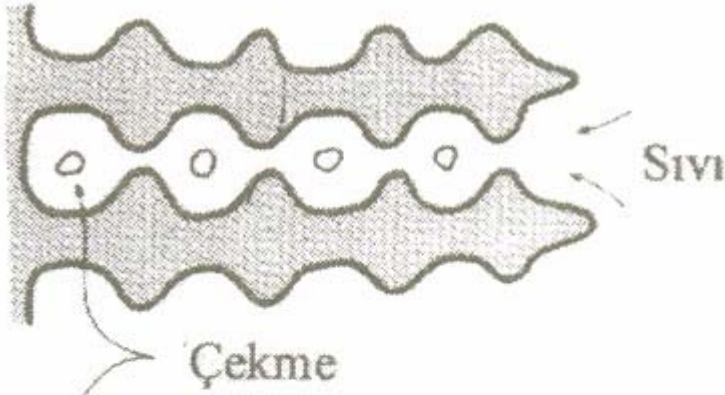
□ Katılma esnasında malzeme en fazla %7 kadar çekerek.

Bazı Malzemeler İçin Katılma Sırasında Çekme.	
Malzeme	Çekme (%)
Al	7,0
Cu	5,1
Mg	4,0
Zn	3,7
Fe	3,4
Pb	2,7
Ga	+3,2 (Genleşme)
H₂O	+8,3 (Genleşme)

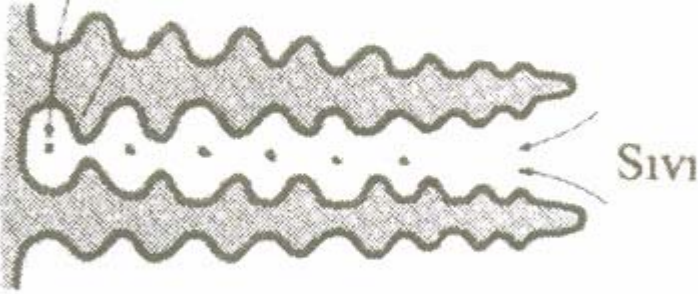
- ❑ Çekme her yönde aynı ise katı dökümün boyutu, kalıbın boyutundan küçük olabilir.
- ❑ Çekme boşluklarının beslenmesi için kullanılan besleyicideki sıvı en son katılaşmalıdır.

b) Dentritler Arası Çekme (Mikroçekme veya Çekme Boşluğu (Gözenek))

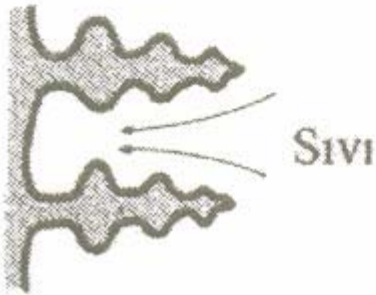
- ❑ Yoğun dentritik büyüme olduğunda oluşur.
- ❑ Sıvı metal, sıvının katılaşması için besleyiciden ince dentritik şebekeye doğru akmayabilir.
- ❑ Sonuçta dökümün her tarafında küçük çekme gözenekleri oluşur.



Dentrit kolları arasında çekme olabilir.



Küçük dentritler homojen şekilde dağılmış küçük çekme boşlukları oluşturur.



Birincil kısa kollar çekmenin önlenmesine katkıda bulunabilir.

c) Gaz Boşluğu

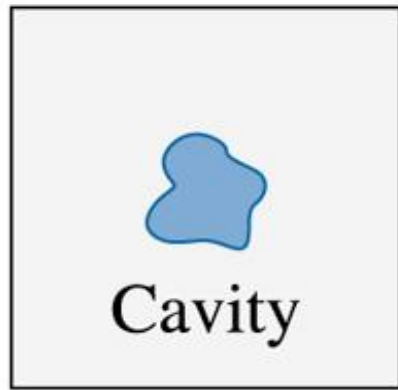
- ❑ Metaller sıvı durumdayken büyük miktarda gaz eritirler. Örneğin Al, H'yi eritir. Buna karşın Al katılaştığında katı metal içinde sadece H'in küçük bir kısmı kalır.
- ❑ Fazla H küçük boşluklar oluşturur.
- ❑ Gözeneklilik üniform olarak dökümün her tarafına dağılabilir.
- ❑ Dentrit kollar arasına hapsolabilir.

□ Sıvı metal içinde çözünebilen gaz miktarı Sievert kanunu ile bulunabilir.

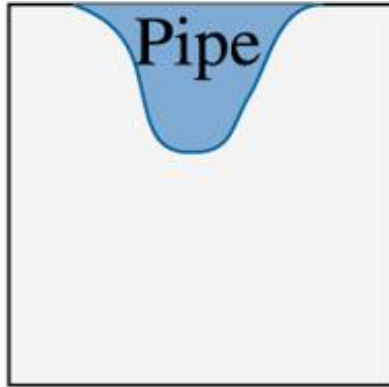
$$\text{Gaz Yüzdesi} = K \sqrt{P_{\text{gaz}}}$$

P_{gaz} : Metalle temas halindeki gazın kısmi basıncıdır.

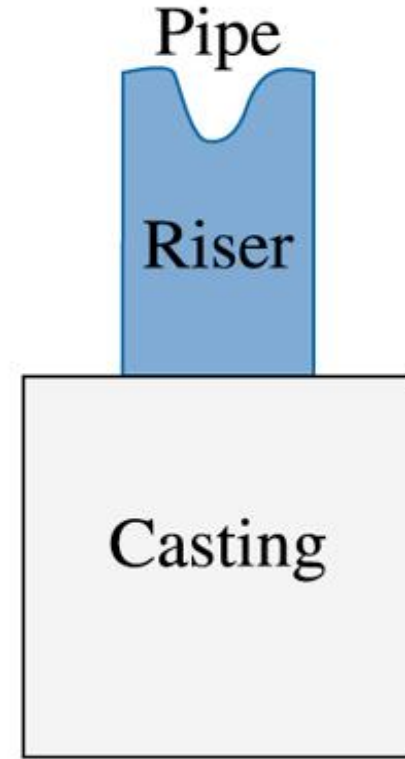
K: Gaz sabiti



(a)



(b)



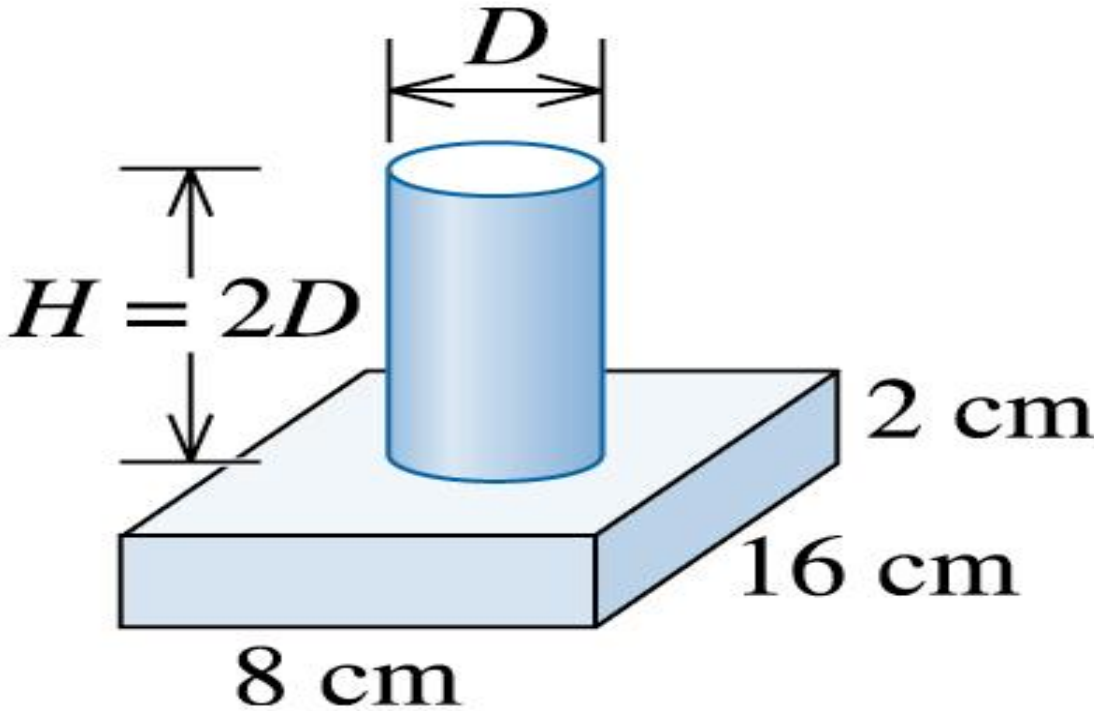
(c)

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

Makro çekilmeler. Yolluk bu çekilmeleri engellemek için kullanılır.

Örnek 8.6. Dökümde Yolluk Hesabı

Silindirik yolluk tasarlayın, yüksekliği çapının iki katı olsun ve 2x8x16cm'lik çekilmeyi kompanse edebilsin.



T döküm ve yolluğun geometrisi.

ÇÖZÜM

Döküm sonrası yolluğunda katılaşmalıdır. We know that the riser must freeze after the casting. Yolluğun katılaşması dökümün katılaşmasından %25 daha fazla zaman alır. Bu yüzden:

$$t_{\text{riser}} = 1.25t_{\text{casting}} \quad \text{or} \quad B \left(\frac{V}{A} \right)_r^2 = 1.25B \left(\frac{V}{A} \right)_c^2$$

Subscripts r and c stand for riser and casting, respectively.

The mold constant B is the same for both casting and riser, so:

$$\left(\frac{V}{A} \right)_r = \sqrt{1.25 \left(\frac{V}{A} \right)_c}$$

$$V_c = (2)(8)(16) = 256 \text{ cm}^3$$

$$A_c = (2)(2)(8) + (2)(2)(16) + (2)(8)(16) = 352 \text{ cm}^2$$

ÇÖZÜM (devam)

We can write equations for the volume and area of a cylindrical riser, noting that $H = 2D$:

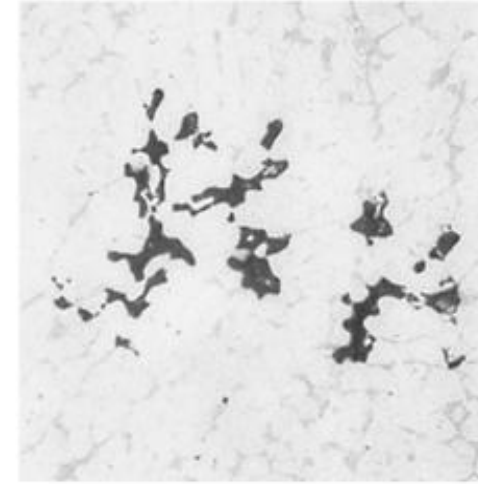
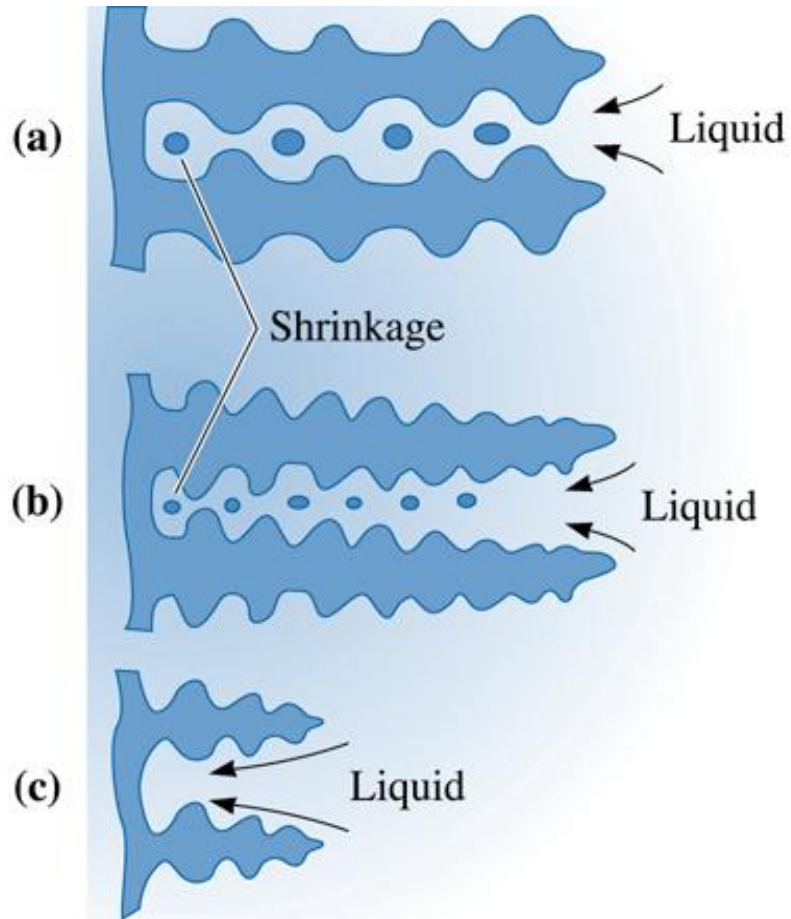
$$V_r = (\pi/4)D^2H = (\pi/4)D^2(2D) = (\pi/2)D^3$$

$$A_r = 2(\pi/4)D^2 + \pi DH = 2(\pi/4)D^2 + \pi D(2D) = (5\pi/2)D^2$$

$$\frac{V_r}{A_r} = \frac{(\pi/2)(D)^3}{(5\pi/2)(D)^2} = \frac{D}{5} > \sqrt{\frac{(1.25)(256)}{352}}$$

$$D = 4.77 \text{ cm} \quad H = 2D = 9.54 \text{ cm} \quad V_r = 170.5 \text{ cm}^3$$

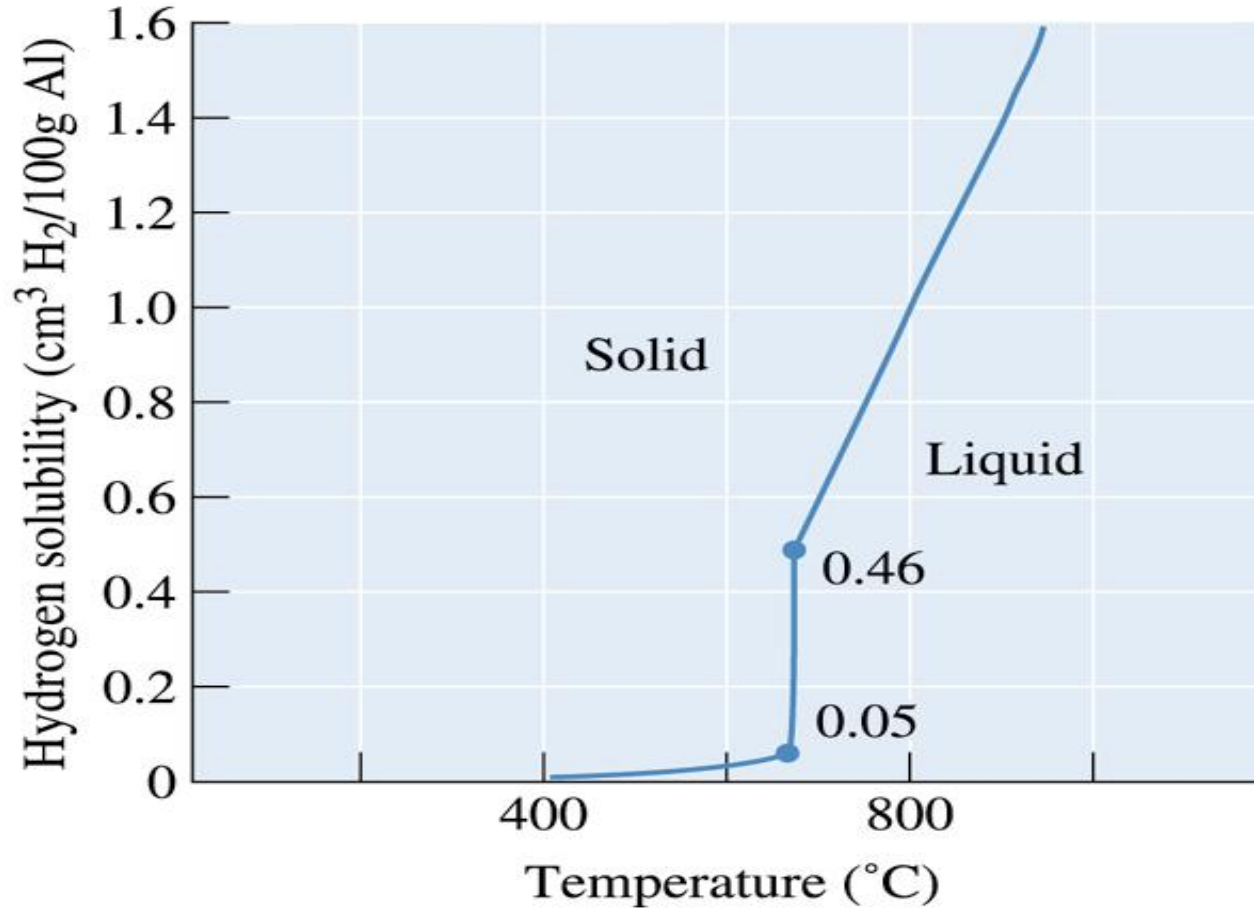
Although the volume of the riser is less than that of the casting, the riser solidifies more slowly because of its compact shape.



(d)

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

(a) Çekilme dentrit kolları arasında oluşur. (b) Küçük ikincil kol mesafesi küçük ve daha iyi dağılmış çekilme boşlukları oluşturur. (c) Kısa birincil kollar çekilmeyi engellemekte yardımcı olur. (d) alüminyum alaşımındaki dentritler arası çekilmeyi gösterir. (x 80)



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

Hidrojenin kısmi basıncı $H_2 = 1$ atm olduğunda alüminyumdaki hidrojen gazı çözünürlüğü.

Örnek 8.7. Bakırın Gaz Alma Prosesinin Tasarımı

Atmosferik basınçta ergime sonrası ergimiş bakır %0,01 ağırlıkça oksijen içerir. Dökümde gaz boşluğu olmayacağından emin olmak için, oksijen içeriğini dökümden önce ağırlıkça %0,00001 düşürmek gerekmektedir. Bu şartlarda, bakır için gaz alma prosesini tasarlayınız?



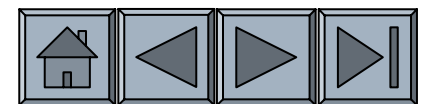
ÇÖZÜM

Sıvı bakır vakumlu bir potaya yerleştirilebilir ve oksijen vakum altında sıvıdan uzaklaştırılır. Bunun için gerekli vakum Sievert's kuralı:

$$\frac{\%O_{\text{initial}}}{\%O_{\text{vacuum}}} = \frac{K\sqrt{p_{\text{initial}}}}{K\sqrt{p_{\text{vacuum}}}} = \sqrt{\left(\frac{1 \text{ atm.}}{p_{\text{vacuum}}}\right)}$$

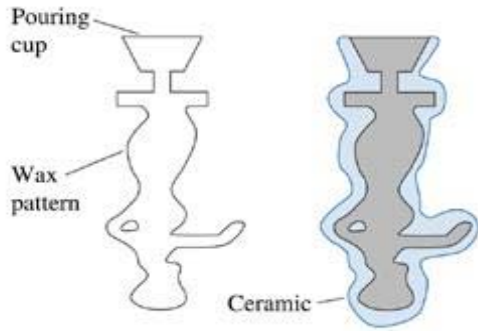
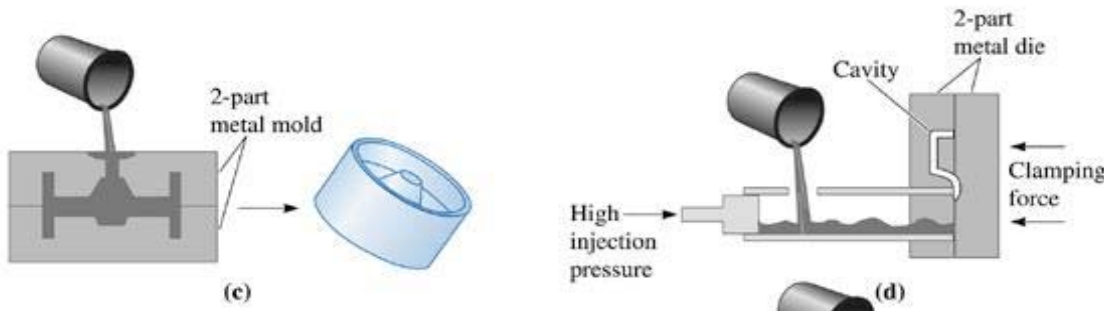
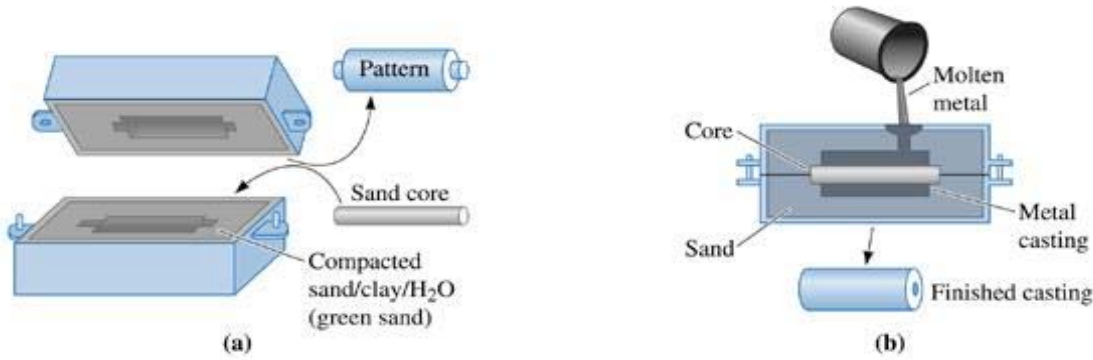
$$\frac{1 \text{ atm.}}{p_{\text{vacuum}}} = (1000)^2 \quad \text{or} \quad p_{\text{vacuum}} = 10^{-6} \text{ atm.}$$

Diğer yaklaşım %15 fosfor alaşımı eklemektir. Fosfor oksijen ile reaksiyona girerek P_2O_5 oluşturur ve bu oluşum sıvı yüzeyinde yüzer:

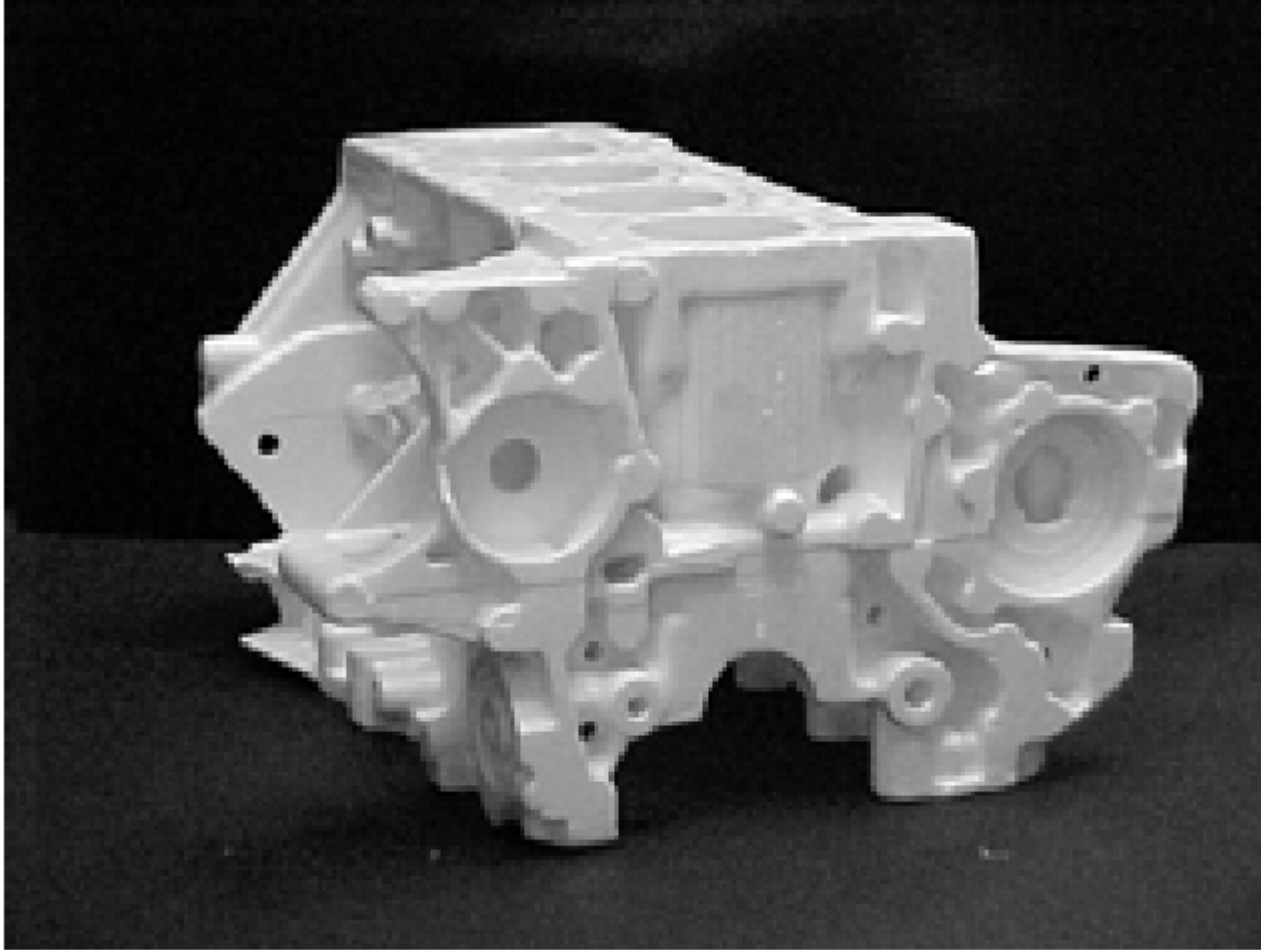


Bölüm 8.9 İmalat Parçaları için Döküm Yöntemleri

- **Kum kalıba döküm** – Kum kalıpların kullanıldığı döküm yöntemidir.
- **Hassas Döküm** – Çok karmaşık şekilli parçaların döküldüğü döküm yöntemidir. Türbin kanatları gibi. Kayıp mum döküm prosesi olarak da bilinir.
- **Kayıp köpük prosesi** – Döküm parçasını oluşturmak için polimer köpüğün patern olarak kullanıldığı döküm yöntemidir.
- **Kalıcı/metal kalıba döküm** – Kalıbın birçok kereler kullanıldığı döküm yöntemidir.
- **Basıncı Kalıba Döküm** – Ergimiş metalin kalıba basınç altında gönderildiği döküm yöntemidir.



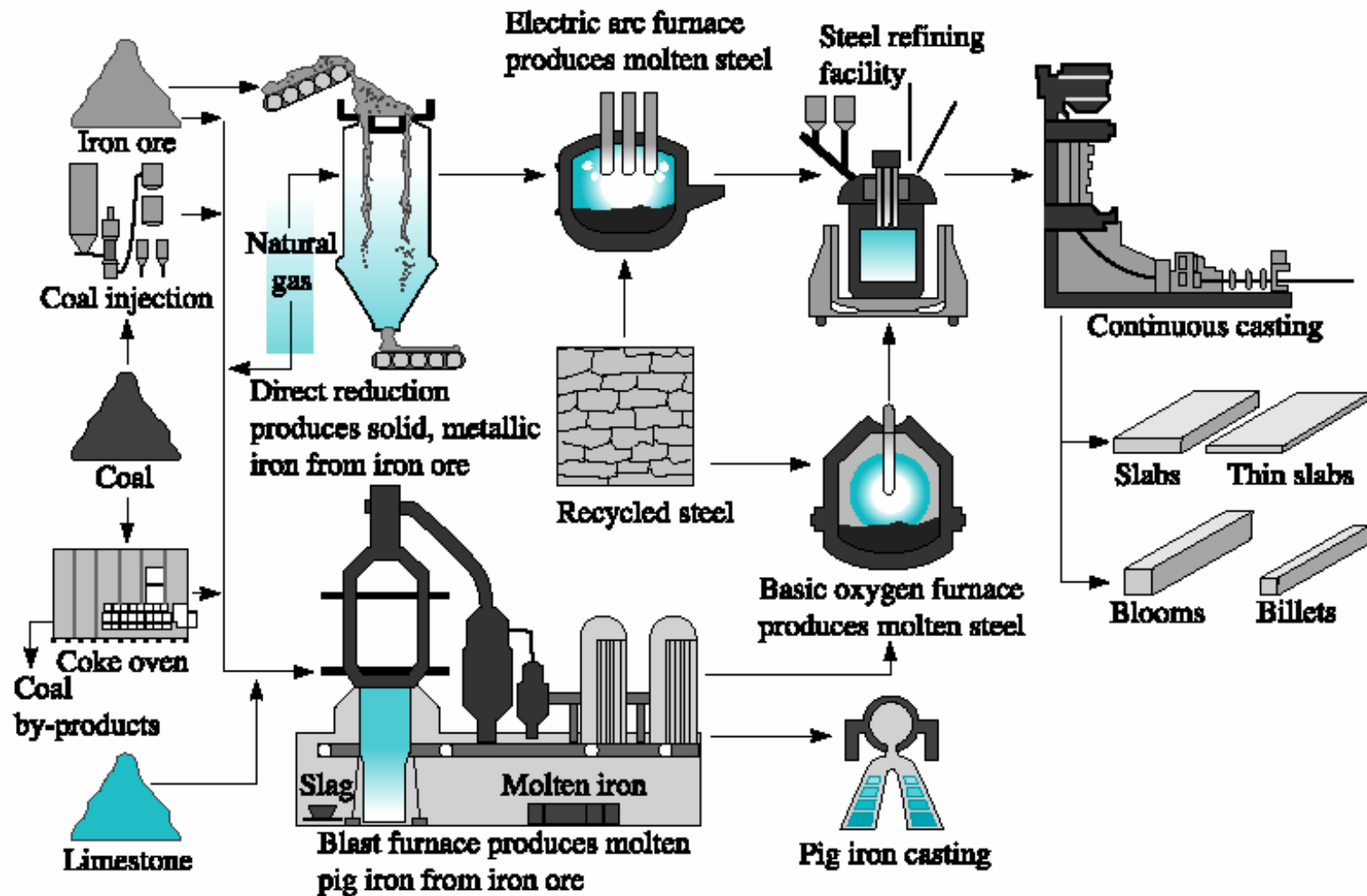
Dört tür döküm prosesi (a) ve (b) Yaş kalıp ve kil ile bağlanmış kumun kalıplanması. Kum çekirdekler dökümde iç boşlukların oluşumu için kullanılırlar. (c) Metal Kalıba döküm. (d) Basıncılı döküm. (e) Hassas döküm



Kayıp köpük tekniği ile üretilmiş motor bloğu. (*Courtesy of Paul Arch, Nova Chemicals.*)

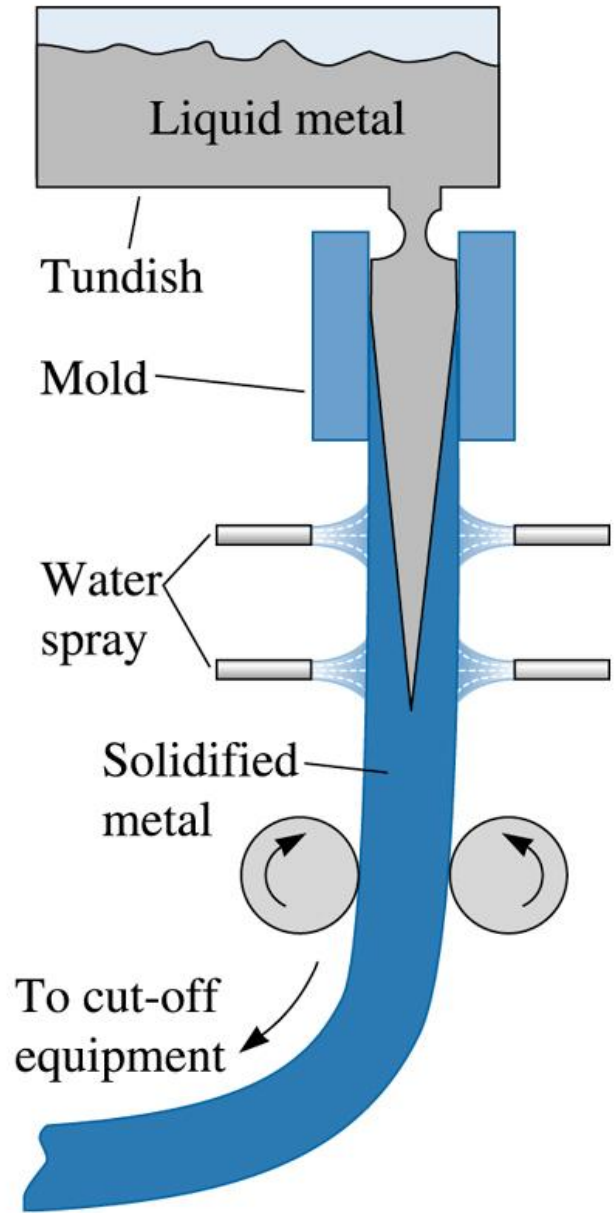
Bölüm 8.10 Sürekli ve İngot Döküm

- **İngot Döküm** – İngot dökme prosesidir. Bu sürekli döküm rotasından farklıdır.
- **Sürekli döküm** – Ergimiş metal veya alaşımı yarı ürüne dönüştüren prosestir.

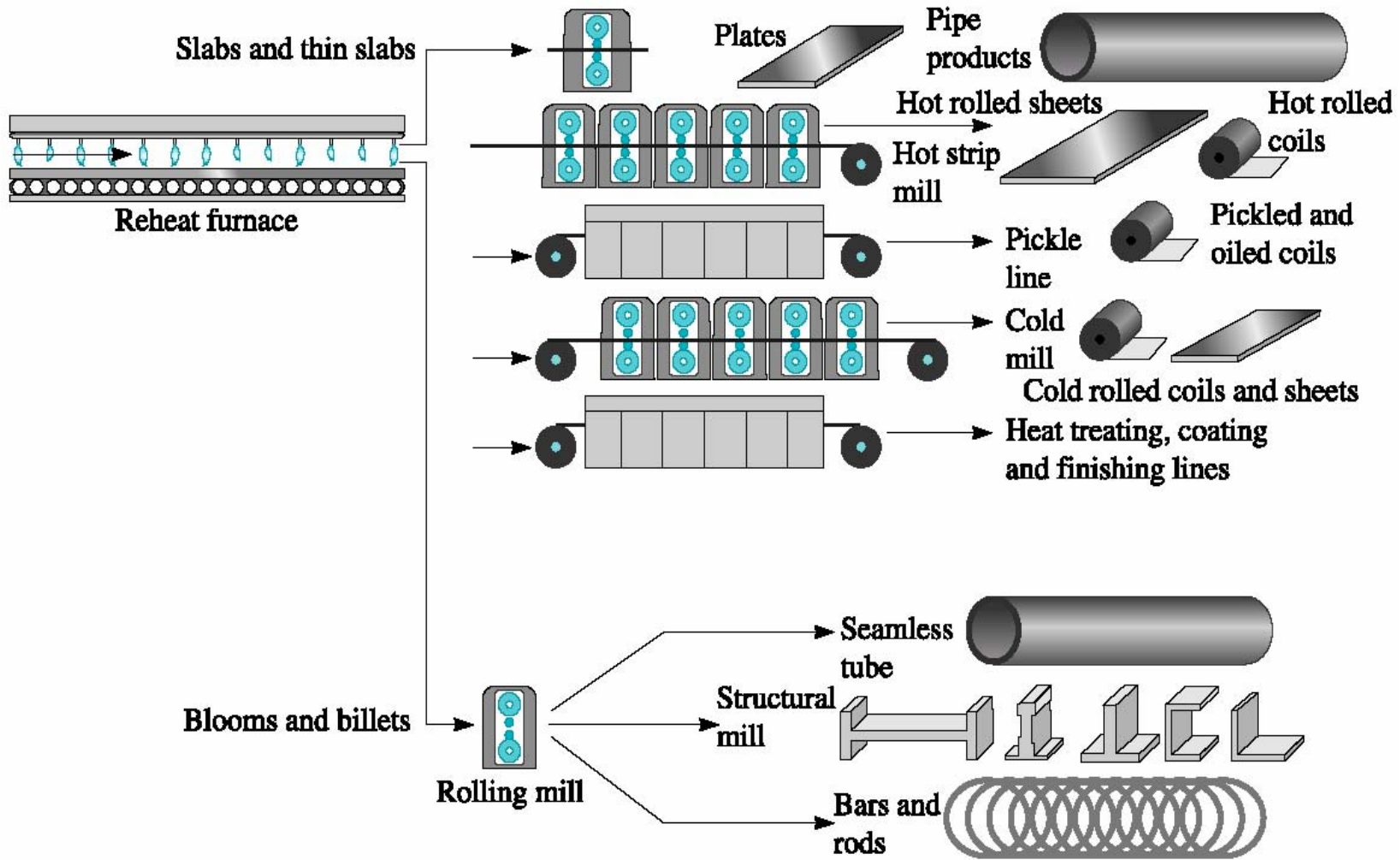


Demir cevheri, kok ve kireç kullanarak çelik üretimi.
(Source: www.steel.org. Used with permission of the American Iron and Steel Institute.)

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



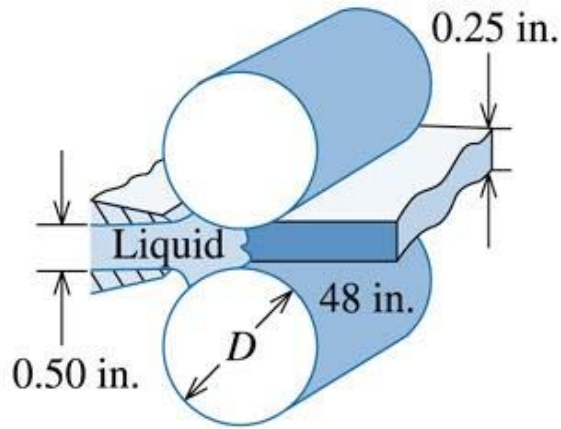
Dikey sürekli döküm, Sıvı metal tandiş ismi verilen bölgeden kısmen kalıpta katılaştırılır.



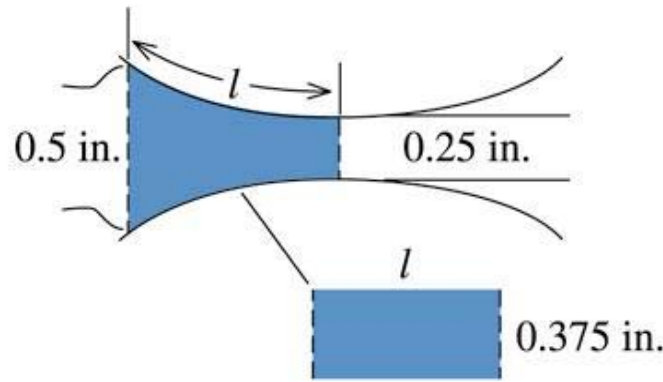
Çelik ve alaşımlarının ikincil üretim yöntemleri. (Source: www.steel.org. Used with permission of the American Iron and Steel Institute.)

Örnek 8.8. Sürekli Döküm Makinesi Tasarlama

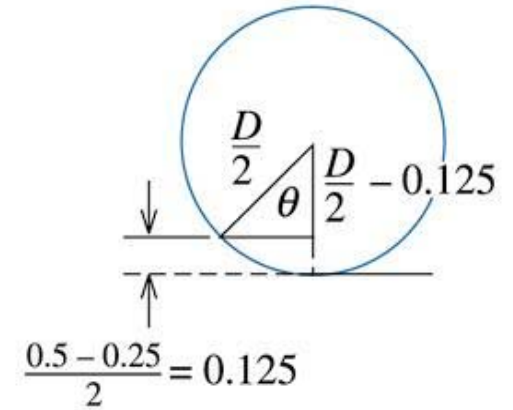
0.25-in.kalınlıkta, 48-in.-genişlikte alüminyum levha üretilmiştir. Levha üretimi esnasında sıvı metal iki büyük çelik merdane arasına verilmiş ve katılaştırılmıştır. Merdaneler kalıcı kalıp olarak kullanılmakta ve sabiti B 5 min/in.² olarak ele alınmaktadır. Bu döküm prosesinin gerçekleşmesi için gerekli merdaneleri tasarlayınız?



(a)



(b)



(c)

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

Alüminyumun yatay sürekli dökümü.



ÇÖZÜM

Ortalama kalınlık $(0.50 \text{ in.} + 0.25 \text{ in.})/2 = 0.375 \text{ in.}$

Hacim, $V = (\text{kalınlık})(\text{uzunluk})(\text{genişlik}) = 0.375/w$

Alan, $A = 2(\text{uzunluk})(\text{genişlik}) = 2/w$

$V/A = (0.375/w)/(2/w) = 0.1875 \text{ in.}$

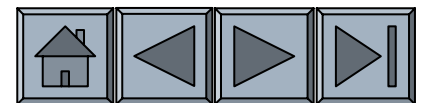
The length l is the fraction of the roll diameter that is in contact with the aluminum during freezing and can be given by

$$l = \frac{\pi D \theta}{360}$$

Then, by substituting for l and v in the equation for the time:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{\pi D \theta}{360 \pi D R} = \frac{\theta}{360 R} = 0.175 \text{ min}$$

$$R = \frac{\theta}{(360)(0.175)} = 0.0159 \theta \text{ rev/min}$$



ÇÖZÜM

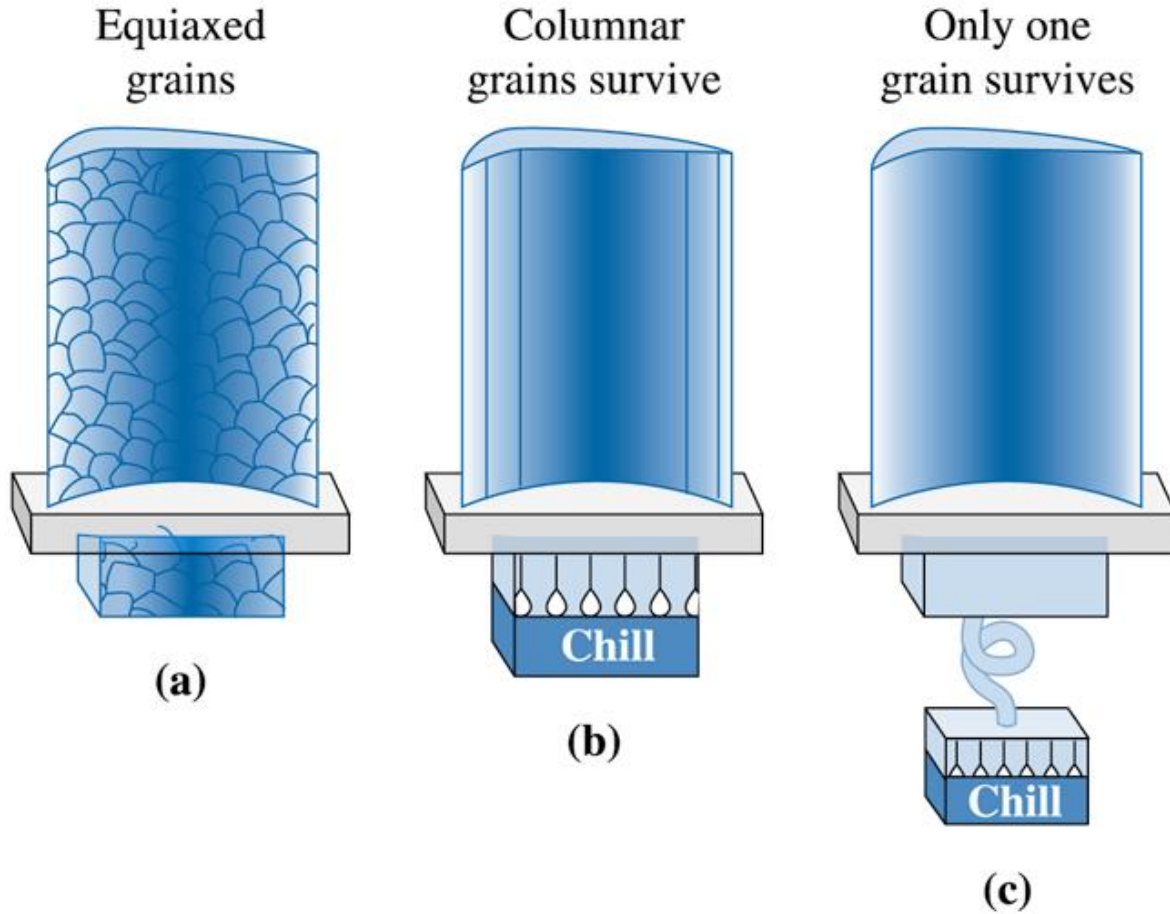
A number of combinations of D and R provide the required solidification rate. Let's calculate θ for several diameters and then find the required R .

D	θ	l	$R = 0.0159\theta$	$v = \pi DR$
24 in.	8.2771	1.7334 in.	0.1316 rev/min	9.923 in./min
36 in.	6.7560	2.1230 in.	0.1074 rev/min	12.149 in./min
48 in.	5.8502	2.4505 in.	0.0930 rev/min	14.027 in./min
60 in.	5.2322	2.7396 in.	0.0832 rev/min	15.683 in./min

Son tasarımı, yüksek verimlilik eldesi için en büyük merdane çapını isteriz. Fakat, merdaneler büyüdükçe onlarla birlikte makinenin tamamının da büyük olacağı unutulmamalıdır.

Bölüm 8.11 Yönlenmiş Katılma (YK), Tek Kristal Büyütme, ve Epitaksiyel Büyüme

- **Yönlenmiş katılma** – Belirlenen yönde soğuma ile tanelerin ters yönde büyümesini sağlayan katılma tekniğidir. Anizotropik oriyente olmuş mikroyapı oluşumuna sebep olur.
- **Bridgman prosesleri** – Yarı iletkenleri ve diğer tek kristallerin üretiminde kullanılan proseslerdir.
- **Epitaksiyel büyüme** – Epitaksi ile malzemelerin büyümesidir.
- **Homoepitaksi** – Aynı malzemeden oluşan kristal üzerine yüksek derecede oriyente olmuş malzemenin büyütülmesidir.
- **Heteroepitaksi** – Değişik alt malzeme kullanılarak yüksek derecede yönlenmiş malzeme üretimidir.



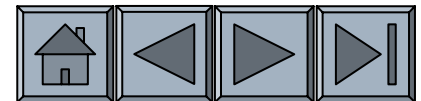
©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

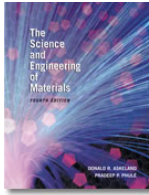
Turbin kanatlarında tane yapısının kontrolü (a) geleneksel eş eksenli taneler (b) yönlendirilmiş katılaşma ile sütunsal taneler, ve (C) tek kristal.



Döküm Yapısının Kontrolü

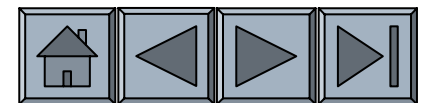
- ❑ Çok sayıda küçük eşeksiz tanelerden oluşan bir makro döküm yapısı oluşturmak için katılaşma kontrol edilir. Bu kontrol, dökümün izotropik özellikler ve tane boyutu mukavetlenmesinden dolayı, iyi dayanım elde edilmesini sağlar.
- ❑ Küçük dentritik yapı dökümün dayanımını artırır, mikro çekmeyi ve gaz gözenekliliğini azaltır.





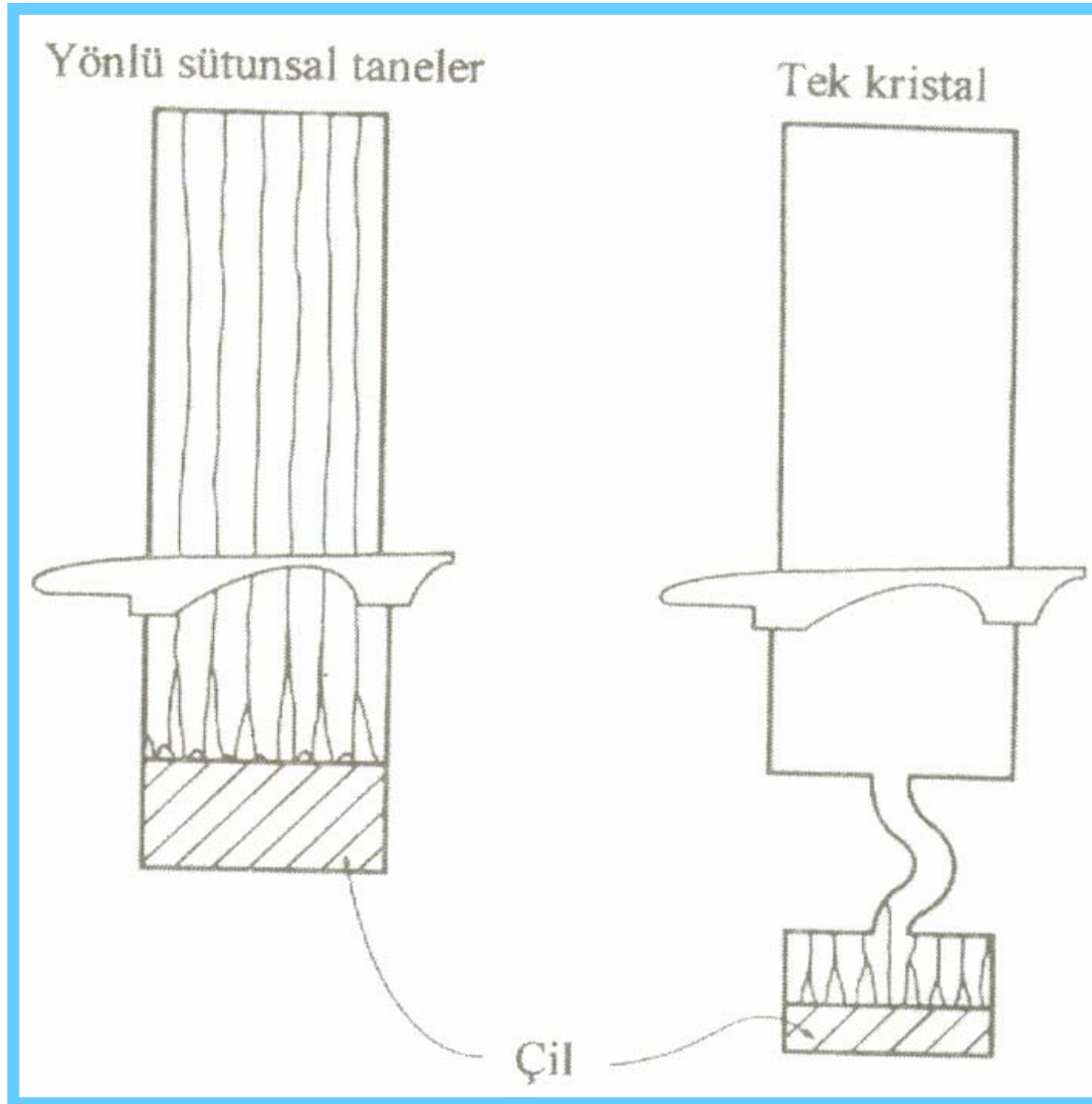
Yönlü Katılma (YK)

- ❑ Bıçaklar, türbin kanatları, paletler ve jet motorları tane sınırları boyunca hasara uğrarlar.
- ❑ YK ile iyi sürünme ve kopma dayanımı elde edilir.
- ❑ Kalıbın bir uçtan ısıtılıp diğer uçtan soğutulması ile elde edilen sütunsal taneler katılma yönüne paralel olarak gelişir ve tane sınırları bu yönde oluşur.
- ❑ Dik yönde ise tane sınırları bulunmamaktadır.



Tek Kristal (TK)

- Tane sınırı yoktur, optimum yönlenmedeki kristallografik düzlem ve doğrultulara sahiptir.
- Daha iyi özellikler elde edilebilir.



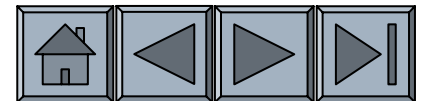


Katılaşma ve Metallerin Birleştirilmesi

Ergitme kaynağı ile birleştirmede katılaştırma önemlidir.

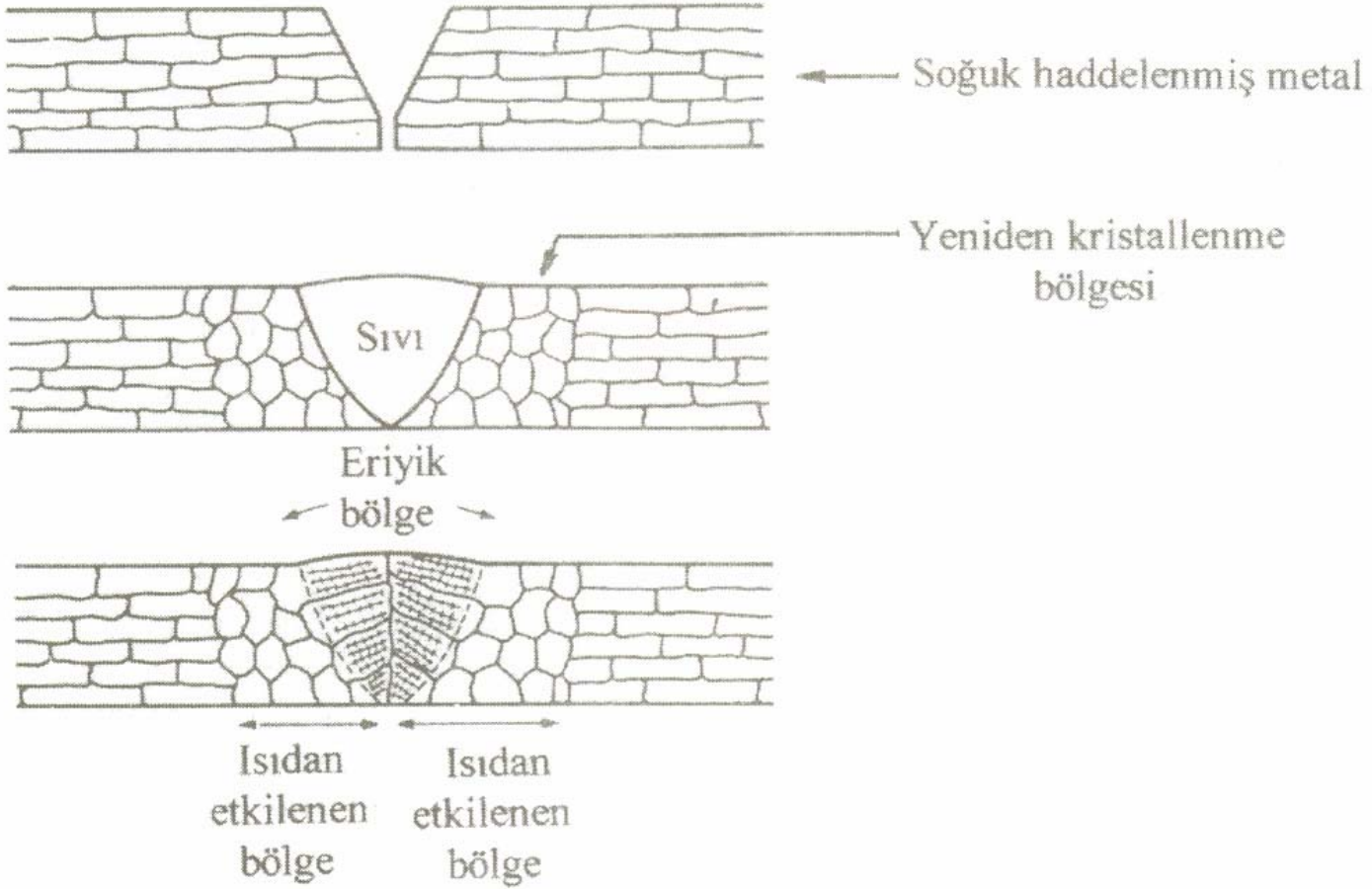
Ergitme-Kaynak İşlemleri

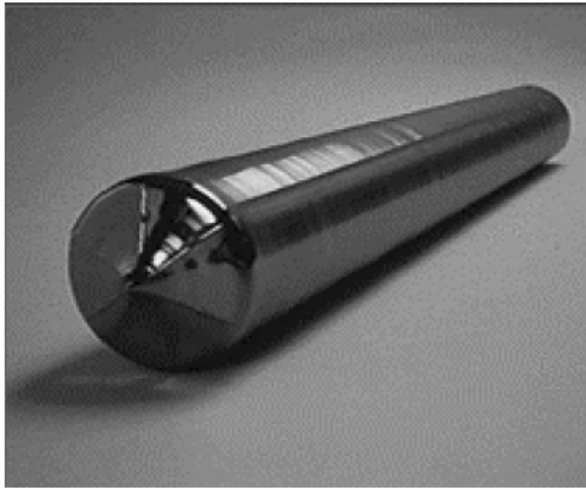
- Oksi-asetilen kaynağı
- Koruyucu metal ark kaynağı
- Gaz-tungsten ark kaynağı
- Gaz-metal ark kaynağı
- Toz altı ark kaynağı
- Direnç kaynağı
- Elektron ısı kaynağı
- Laser kaynağı



- Bağlantı yapılacak metalin bir kısmı ergitilir ve çoğu durumda ergiyik dolgu metali katılır.
- Sıvı metal havuzu (fusion zone) ergiyik bölge olarak adlandırılır.
- Ergiyik bölgenin soğumasının ardından orijinal metal parçaları birbirine bağlanır.

- ❑ Ergiyik bölgenin katılaşması esnasında çekirdeklenmeye ihtiyaç yoktur.
- ❑ Isı ergiyik bölgeden çok hızlı bir şekilde orijinal metal parçasına doğru uzaklaştırılır.
- ❑ Ergiyik bölgedeki sıvı kaynak kenarlarında katılaşma sıcaklığına soğur.
- ❑ Katı yapıda mevcut orijinal metalin katı taneleri üzerinde büyümeye başlar.
- ❑ Ergiyik bölgedeki katı tanelerin büyümesi epitaksiyel (çekirdeklenmeden büyüme) büyüme olarak adlandırılır.





(a)



(b)

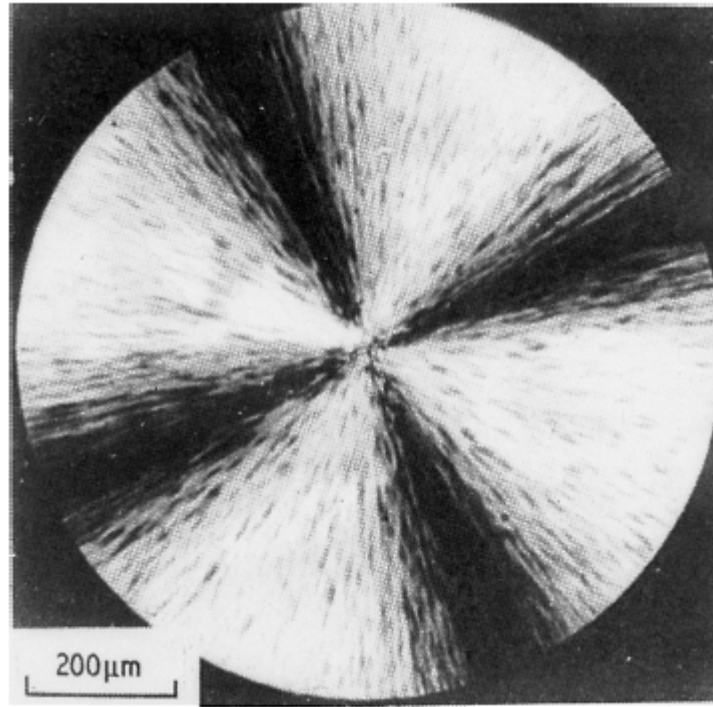


(c)

(a) Silisyum tek kristal
(b) silisyum wafer, ve (c)
Bridgman tekniđi
(*Courtesy of
PhotoDisc/Getty Images.*)

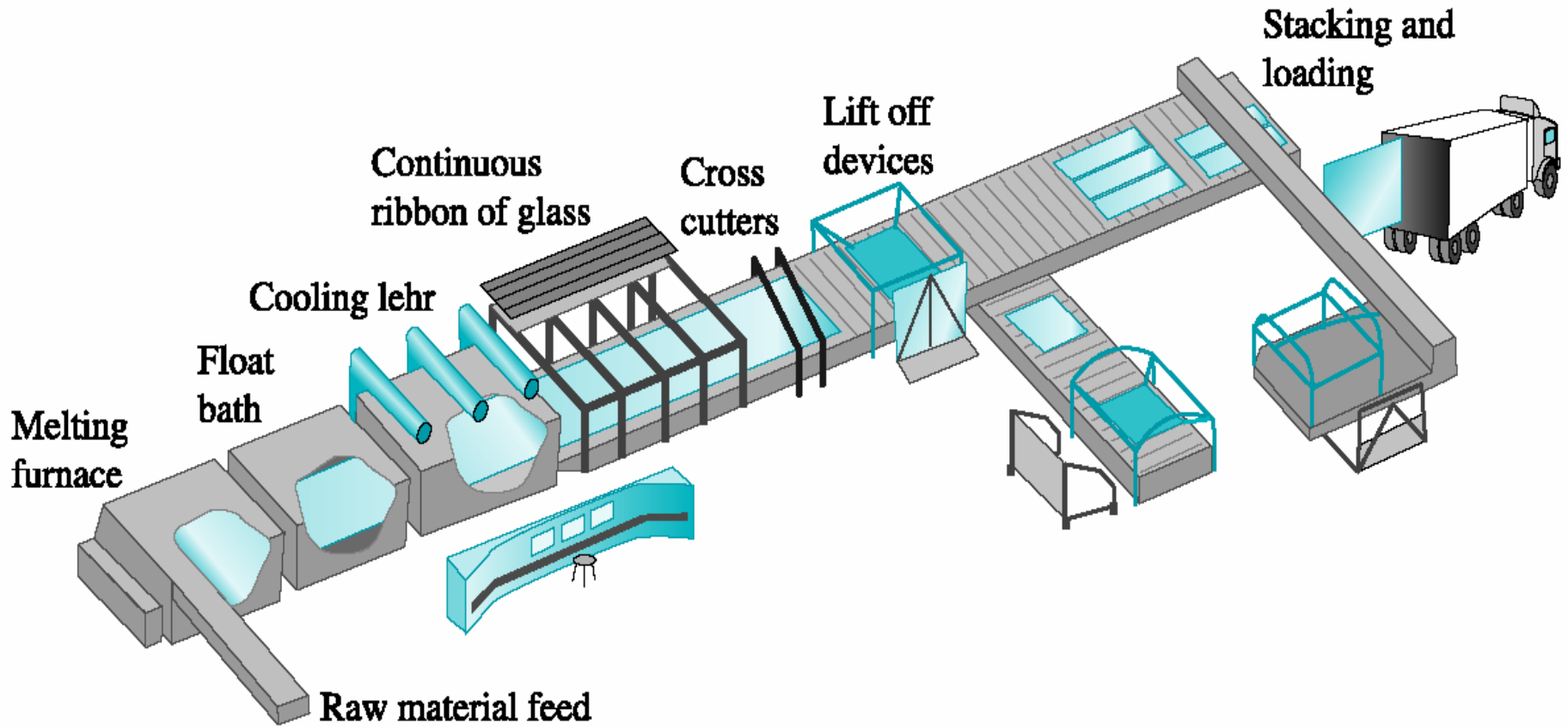
Bölüm 8.12 Polimer ve İnorganik Camların Katılaşması

- **Lamelar** – Malzeme içinde kristallerin levha şekilli düzenleridir.
- **Sfelürit, Spherulite** – Belli polimerler katılaştığında üretilen küresel şekilli kristallerdir.
- **Ön şekilli, Preform** – Fiber veya şişenin oluşturulması için kullanılan bileşen.



Lamelleri ayıran amorf sınır bölgeleri.

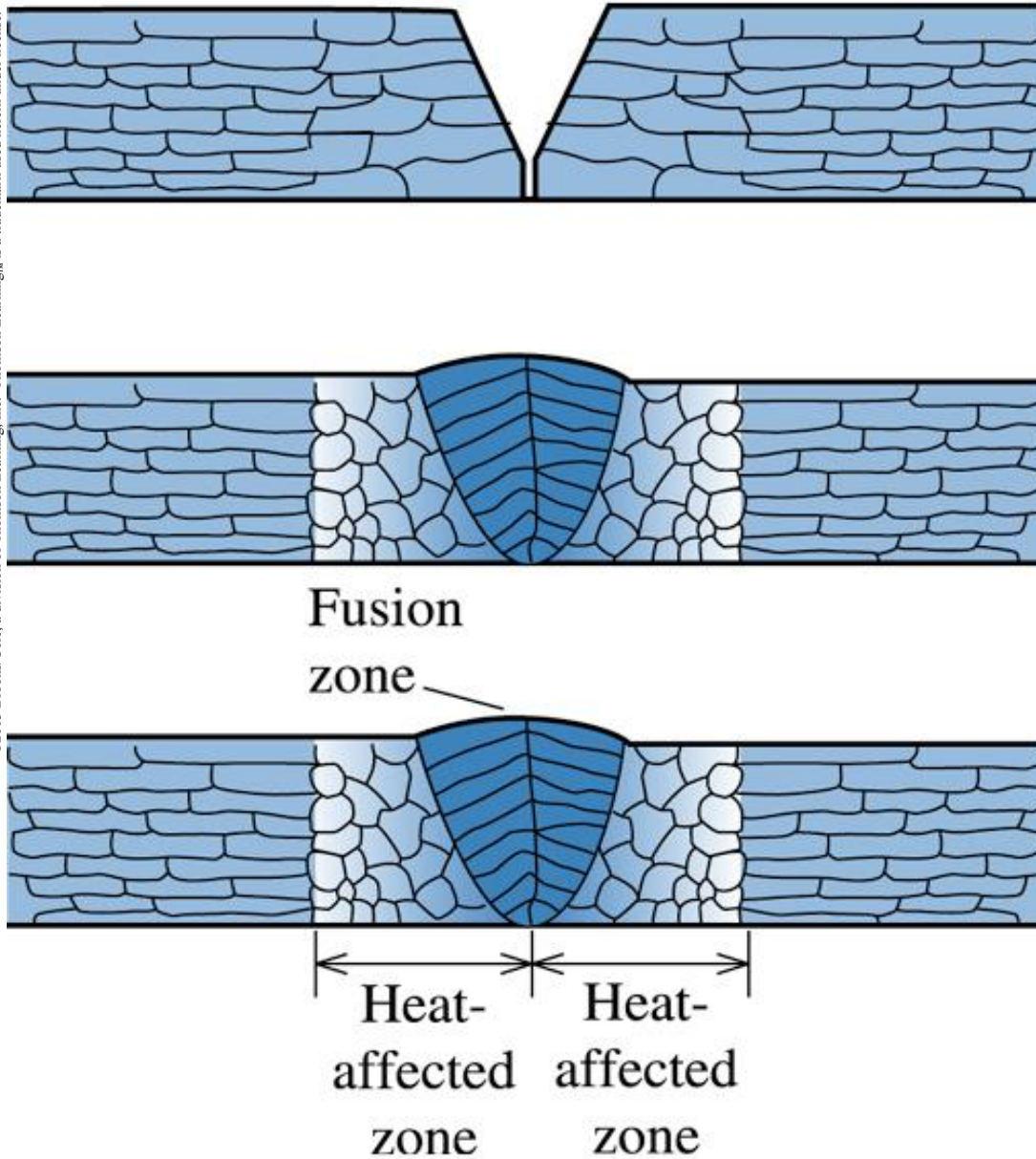
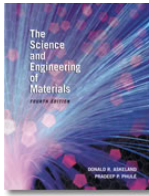
A spherulite in polystyrene (8000). (*From R. Young and P. Lovell, Introduction to Polymers, 2nd Ed., Chapman & Hall, 1991*).



Yüzen camların proses akışı. (Source: www.glassrecruiters.com.)

Bölüm 8.13 Metalik Malzemelerin Birleştirilmesi

- **Brazing** – Dolgu olarak bilinen alaşım kullanılarak iki malzemenin birini diğerine birleştirilmesi.
- **Lehimleme** – Dolgunun ergime sıcaklığının 450°C altında olduğu ve birleştirilen malzemelerde herhangi bir ergimenin olmadığı birleştirme işlemidir.
- **Füzyon kaynaklama** – İyi bir bağ oluşması için kaynaklanan malzemenin bir kısmının ergidiği birleştirme yöntemidir.
- **Füzyon bölgesi** – Kaynaklama esnasında ısıtılan bölgenin hepsinin sıvı olduğu yerdir. Bu bölgenin katılaşması ile birleşme sağlanır.



Füzyon kaynaklama esnasında füzyon bölgesi. (a) başlangıç hazırlanmış , (b) maksimum sıcaklıkta kaynaklama (c) katılaşma sonrası kaynak görüntüsü

