



# Alüminyum Test Eğitim ve Araştırma Merkezi

Mart 2017



Alüminyumun Sıvı Metal Hareketleri  
ve  
Ürün Kalitesine Etkisi  
(sıvı-çekirdeklenme-büyüme)

Prof. Dr. Fevzi Yılmaz  
FSMVÜ

Mart 2017

# GÜNDEM

- 1. Alüminyum hurdaların karakteristik özellikleri ve nihai ürüne etkileri
- 2. Hurdalardan gelen kirleticilerin sıvı metal hareketlerine etkisi
- **3. Fırın içi sıvı metal hareketlerinin nihai ürün kalitesine etkisi**
- **4. Fırın içi sıcaklık ve basıncın nihai ürün kalitesine etkisi**
- 5. Fırın içi degazing (degassing) işlemlerinin önemi, kullanılan yöntemler ve avantaj/dezavantajları, uygulanmasında karşılaşılan problemler
- 6. Fırın içi kompozisyonun optimize edilmesi ve önemi

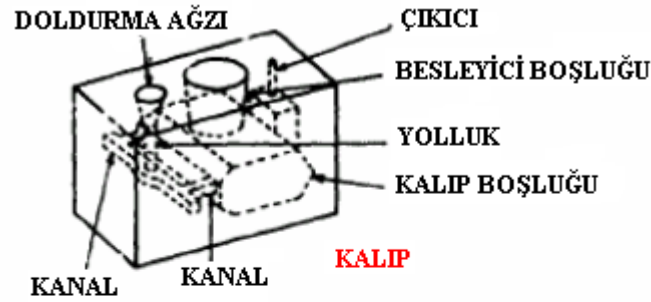
# DÖKÜM ve KATILAŞMA

## Ne Zaman Döküm?

Kompleks parçalar döküm ve/veya kaynakla üretilir. Sayı döküm seçeneğini öne çıkartır. Talaşlı imalat da seçeneklerden biridir. Döküm özellik avantajı sergileyebilir.

1. Tolerans
2. Yüzey hazırlama
3. Boyut limiti
4. Malzeme
5. Döküm maliyeti
6. Bulunabilme
7. Öngörülen sayı
8. Minimum-maksimum cidar kalınlığı

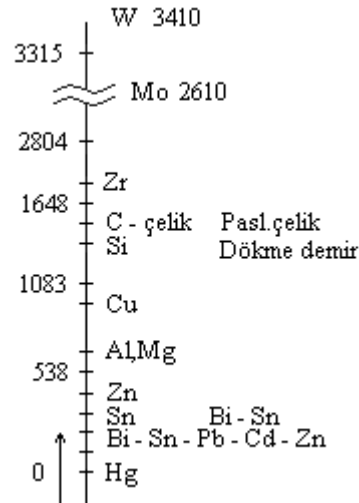
# DÖKÜM



- **Yüzey Hazırlama;**

Döküm	Pürüzlülük R <sub>a</sub> μm.
Kokil döküm	0,5 – 2,5
Hassas döküm	1,25 – 2,5
Kabuk kalıba döküm	6,25 – 17
Kuma döküm	6,25 – 25

- **Malzeme (Sıcaklıklar ölçü alınırsa 1650 °C maksimum döküm sıcaklığıdır. Üst sıcaklıkta bulunan metaller ve seramikler döküm yoluyla şekillendirilemezler).**



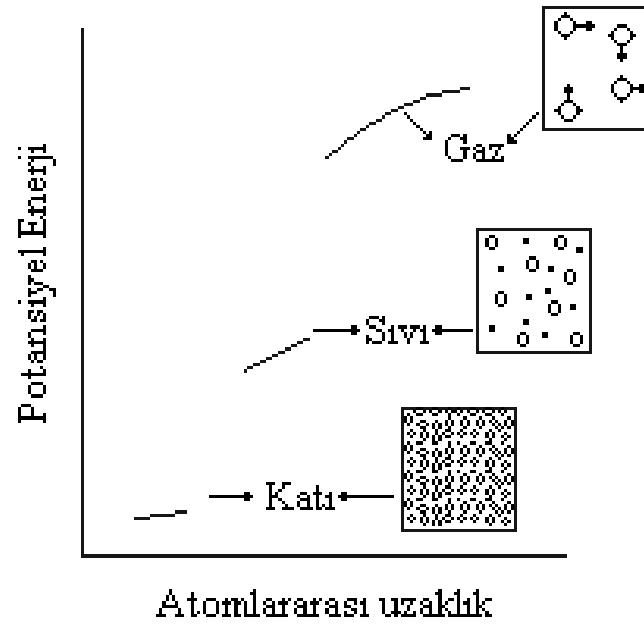
- Döküm Maliyeti;

Proses	Gereksinim
Kuma döküm	Ağaç model
Hassas döküm	Metal kalıp (mum model için)
Santrifüj döküm	Metal kalıp
Sabit kalıba döküm	Soğutmalı metal kalıp
Basınçlı döküm	Soğutmalı metal kalıp
Kabuk kalıba döküm	Kabuk yapmak için metal master

## Katılaşma

- 1) Sabit sıcaklıkta, saf metal ve ötektik
- 2) Bir sıcaklık aralığında (Katı eriyikler)
- 3) Bir sıcaklık aralığında ve sabit sıcaklıkta oluşur.

# Sıvı Metal Yapısı



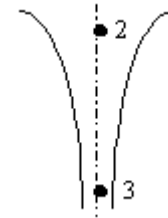


- Gaz sıcaklığı artarsa  $E_p$  artar, parçacıklar arası uzaklık artar.
- Sıvı halde kondensasyon sonucu  $E_p$ 'nin bir kısmı sıvılaşma gizli ısısı olarak açığa çıkmıştır,  $E_p$  düşer.
- Katı halde katılaşma gizli ısısı açığa çıktığından  $E_p$  çok düşüktür.
- Gaz metaller elektriği ve ısıyı iletmezler. Bunun sebebi elektron bulutunun bulunmamasıdır.
- Gaz kanunları  $PV = n RT$
- Katı halde;  $n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$  kristal kanunları

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

-Sıvı hal için geçerli matematiksel ilişkiler

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad h_1 + \frac{v^2}{2g} + \frac{\rho_1}{w} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{\rho_2}{w}$$



-Sıvı hal = Yoğun gaz = Düzensiz katı

# Ergimede Hacim Değişimi

Ergime sırasında birçok metal % 3 – 6 arasında hacim artışı gösterir.

Metal	Kristal yapısı (Crystal structure)	Ergime noktası (Melting point) °C	Ergimede hacim değişimi (%)
Al	YMK	660	6,0
Zn	HMK	420	4,2
Cu	YMK	1083	4,15
Fe	HMK/YMK	1537	3,0
Bi	Rombohedral	271	- 3,35

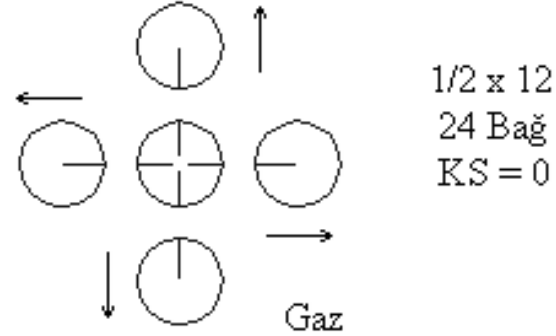
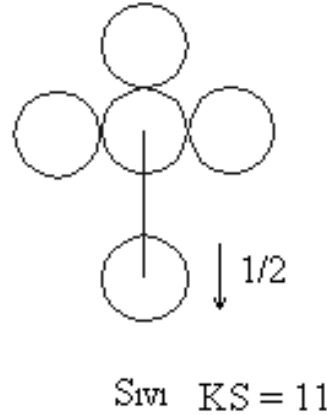
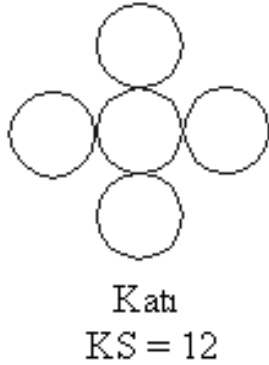
# Ergime Gizli Isısı

Metal	Kristal	Ergime °C	Ergime gizli ısısı (kcal/mol)	Kaynama °C	Buharlaştırma gizli ısısı (kcal/mol)	$\frac{\text{BuharG.}}{\text{ErgimeG.}}$
Al	YMK	660	2,5	2480	69,6	27,8
Fe	HMK/YMK	1536	3,63	3070	81,3	22,4

Ergime gizli ısısı ve buharlaştırma gizli ısısı arasında 15 – 28 kat gibi bir fark vardır. YMK Al'da; atomları birbirinden koparmak ve ayırarak bağımsız gaz kürecikleri haline sokmak için ergimeye göre 28 kat fazla ısı kullanılır.

YMK alüminyumda koordinasyon sayısı 12'dir. Gazlaşma bu 24 yarım bağı kopartılmasıdır (24 kat fazla enerji kullanılır).

# Top Modeli İle Tanımlama



$$\begin{aligned} &1/2 \times 12 \\ &24 \text{ Bağ} \\ &KS = 0 \end{aligned}$$

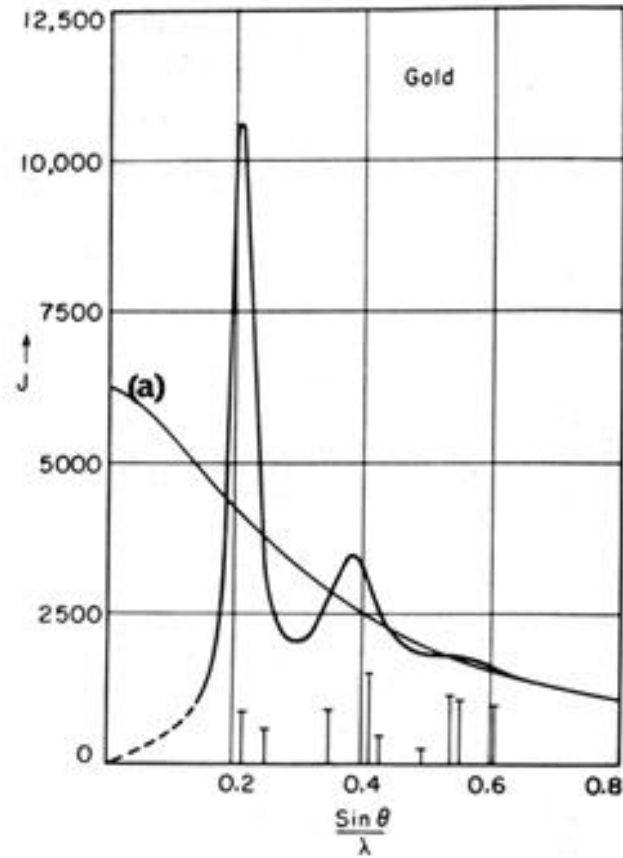
## Ergitme Entropisi

Ergime sırasındaki büyük dönüşüm (entropi), düzen kaybı çok yüksek.

Al'da oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar entropi değişimi  $7,51 \text{ Kcal.mol}^{-1}$  iken, ergime entropisi  $2,75 \text{ Kcal.mol}^{-1}$  dir.

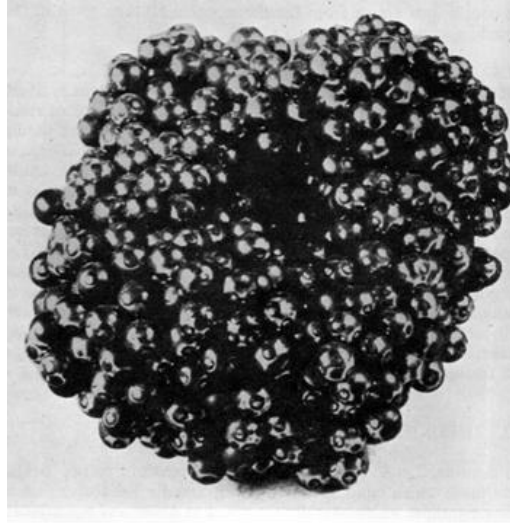
# Sıvı Yapıların Difraksiyon Çalışmaları

- Difraksiyon çalışmaları sıvı halde katı yapısına benzeyen bölgesel oluşumlar (düzenli difraksiyon paterni) görülmüştür.
  1. Sıvı içerisindeki atomlar arası uzaklık katıdan fazladır.
  2. Sıvı içerisindeki koordinasyon sayısı katıdan düşüktür (8 – 11).



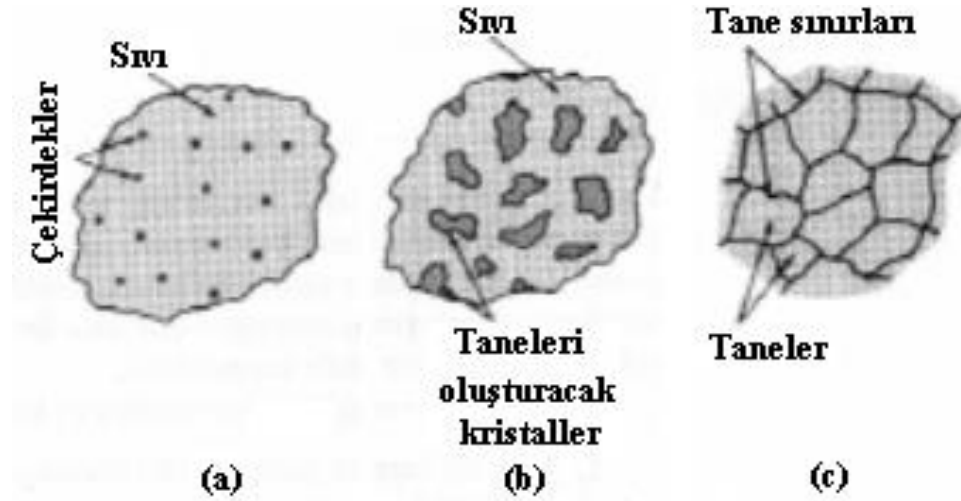
Altın 1100 °C sıvı difraksiyon paterni

- Sıvı – katı dönüşümünde (çekirdeklenme) sıvının yapısı etkilidir.
- Sıvıların en önemli özelliklerinden biri ise akışkanlıktır (sıcaklık arttıkça artar).



Sıvı içinde sıkı paketlenmiş atomlardan oluşmuş bir çekirdek modeli

# METALLERDE SIVI-KATI DÖNÜŞÜMÜ

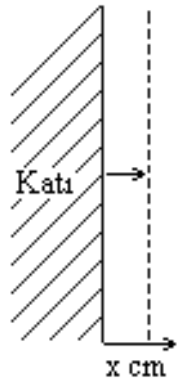




# Tanımlar

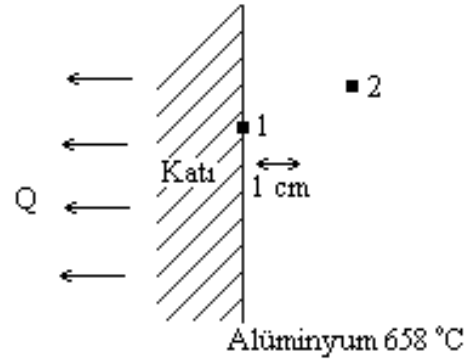
- **Büyüme hızı:** Sıvı katı ara yüzeyinin ilerleme hızıdır (cm/sn,  $\mu\text{m}/\text{sn}$ ). Tek kristallilerde büyüme hızı  $10^{-3}$  cm/sn. İngot katılaşmasında bu hız  $10^{-2}$  cm/sn.
- **Sıcaklık gradyanı:** katı-sıvı ara yüzeyinin önünde sıcaklık yükseliyorsa gradyant pozitif sıvı içinde ara yüzeyden itibaren sıcaklık düşüyorsa gradyant negatiftir. Tek kristal büyümesinde sıcaklık gradyanı her cm. için birkaç derece (tek rakamlı), döküm ve ingotlarda bu  $10^x$  (çift rakamlı) mertebesindedir. Kaynak bölgesi katılaşması ile yönlenmiş katılaşma deneylerinde sıcaklık gradyanı birkaç yüz  $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  mertebesindedir ( üç rakamlı).

Büyüme Hızı



Sıvı  $R = 1 \text{ cm/sn}$

Sıcaklık Gradyantı (G)



1: 658 °C

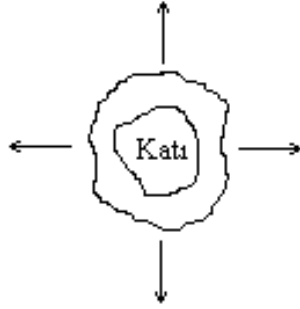
2: 700 °C

$$G = (700 - 658)/1 = 42 \text{ °C/cm}$$

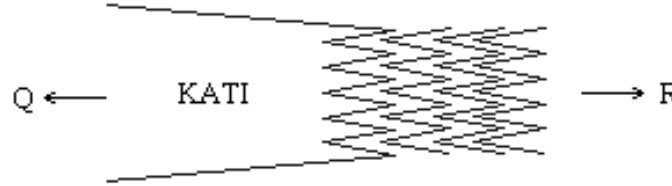
Metal kalıpta büyüme hızı daha fazladır.

- **Yapısal aşırı soğuma:** İlerleyen katı sıvı ara yüzey önünde çözünen zengin tabakanın sebebiyet verdiği aşırı soğumadır.
- **Ani soğutma ve boşaltma:** İlerleyen katı sıvı ara yüzeylerini incelemek ve kristal büyümesini daha rahat yorumlamak için yapılan deneydir. Katılaşmakta olan metal veya alaşım aniden suya atılırsa (ani soğutma) katı – sıvı ara yüzeyi önündeki sıvı pota veya kalıp ters çevrilip boşaltılırsa ara yüzey ortaya çıkar. Buna boşaltma denir.

- **Yönlenmiş katılaşma:** Isının sadece bir yönden alınması sonucu sıvı – katı dönüşümünün tek yönlü olması hali.



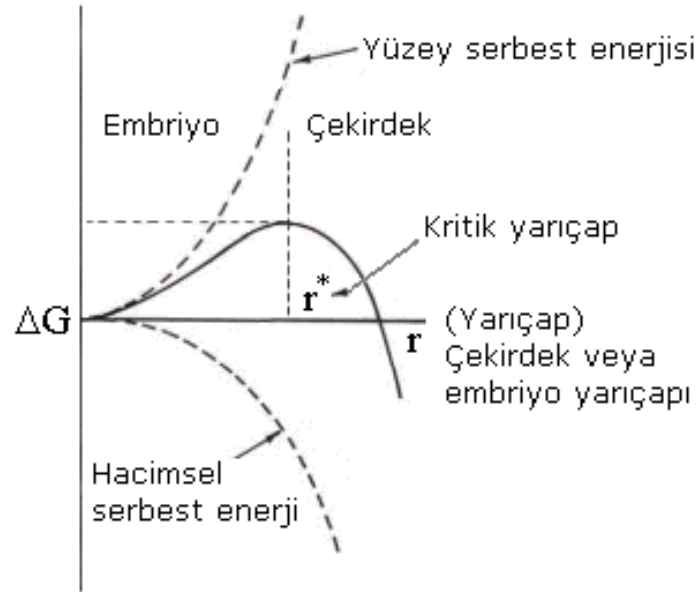
Çok yönlü veya Yönsüz katılaşma



Yönlenmiş katılaşma

# Çekirdeklenme

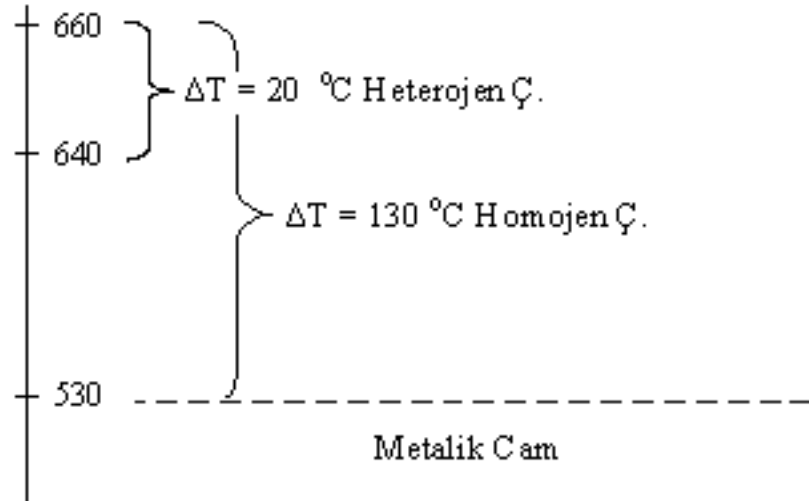
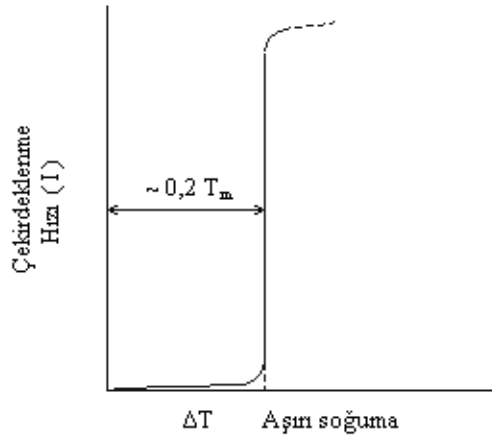
- Çekirdeklenme: Sıvıda katı embriyolar (200-500 atom) oluşur. Bunlara belirli büyüklüğe (500'den fazla) eriştiklerinde çekirdek denir.



$$4\pi R^2\sigma + \frac{4}{3}\pi \cdot R^3\Delta G_1$$

Sıvı içinde katı küresel embriyonun oluşumu ile serbest enerjilerde görülen değişim

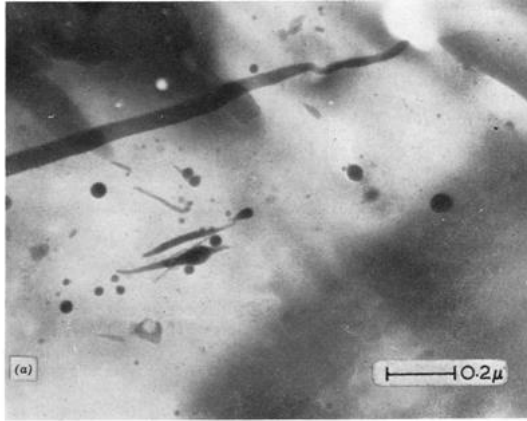
- Yapılan hesaplamalar homojen çekirdekleşmenin oluşması için gereken aşırı soğumayı  $0,2 T_m$  olarak vermektedir. Kendi kendilerine atomlar bir araya gelerek katı çekirdeği oluştururlar.



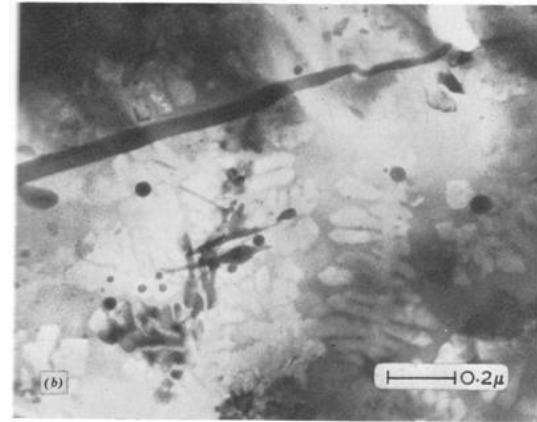
Homojen çekirdeklenme hızı-aşırı soğuma ilişkisi

$$\Delta T = T_m - T_c$$

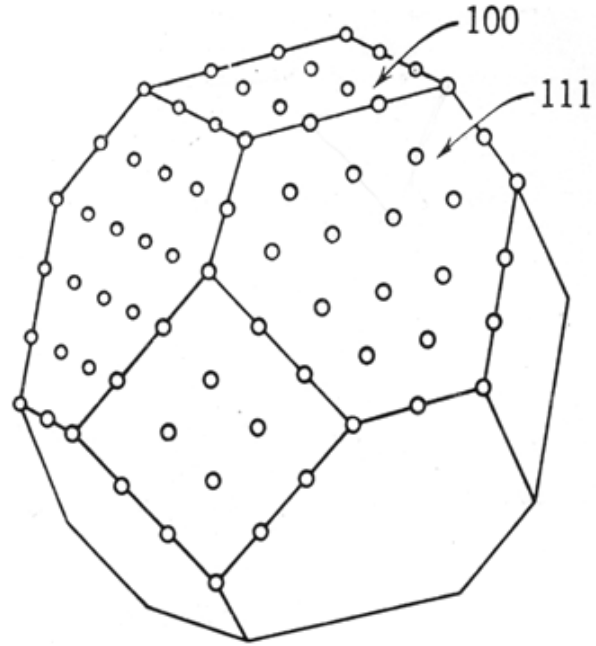
- Al için  $T_{erg}$  932 °K (659+273 °C) , homojen çekirdeklenme için aşırı soğuma sıcaklığı 186 °C dir. Turnbull 130 °C olarak vermiştir.  $\Delta T/T_m = 0,140$  dir. Eğer Al aşırı soğutması 130 °C'den fazla olsaydı örneğin 150 °C, o zaman çekirdek oluşacak vakit bulamayacak katı kristal yapısı da oluşmayacaktı. Oluşan yapı sıvı hale benzeyen amorf yapıda metalik camdır.



Çözünen dağılımının olmadığı kristalsiz camsı yapı



Elektron mikroskopunda çekilmiş germanyum içeren telliyum mikroyapısı, ani soğuma a) amorf yapı b) tavlama sonrası dentrit oluşumu

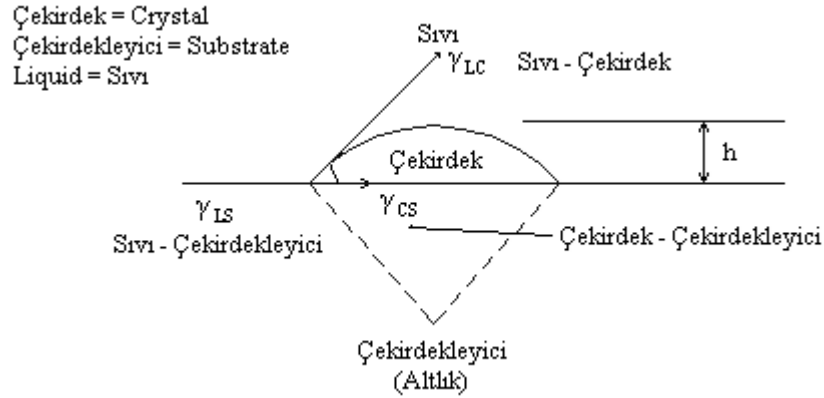


Kübik bir metalin kritik çekirdekleşmesi için mümkün yapı



# Heterojen Çekirdekleşme

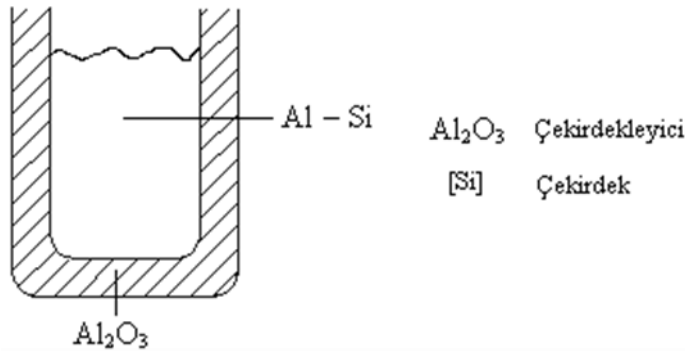
- Heterojen Çekirdekleşmede şapka kuralı geçerlidir.



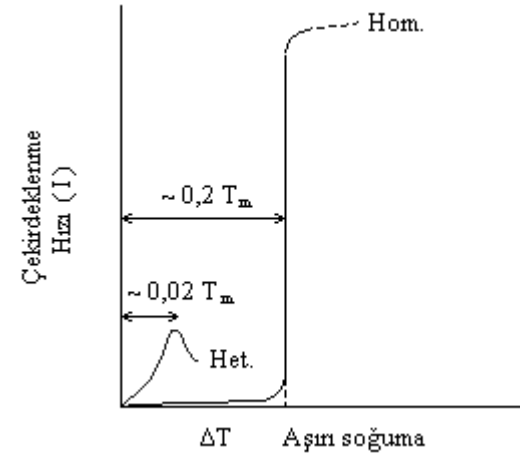
Düz bir yüzeyde küresel damlanın oluşumu

- Heterojen çekirdeklenme de kap kenarı sistemde mevcut yabancı partiküller, sıvı içerisine kaçmış oksitler, cüruflar çekirdekleyici (altlık) görevi oynar. Çekirdekler bu yabancı cisimler üzerinde oluşur.
- Doğal olarak böyle çekirdeklenme daha az aşırı soğuma gerektirir. Eğer çekirdekle çekirdekleyici ara yüzey enerjisi düşükse  $\theta$  açısı düşecektir. Çekirdeklenme kolaylaşacaktır.  $\theta$  açısı  $180^\circ$  ise altlık malzemenin çekirdek oluşumuna etkisi yoktur. Şartlar homojen çekirdeklenmeye yakındır.
- Açısal ilişki 
$$\cos \theta = \frac{\gamma_{LS} - \gamma_{CS}}{\gamma_{LC}}$$

- Örnek olarak Al sıvısında TiC ve AlB<sub>2</sub> çok yüksek çekirdeklenme etkisi gösterir. Halbuki Fe<sub>3</sub>C Al sıvısında çekirdeklenmeye hiç yardım etmez.
- Çekirdeklenme etkisi kafes uyumsuzluğunun fonksiyonudur. Çekirdekleyici ile çekirdek kafes parametreleri arasındaki fark  $\Delta a$  kafes parametresi  $a$  ise ( $\delta = \Delta a/a$ ) Uyumsuzluk parametresi
- Uyumsuzluk çoksa çekirdekleyicilik azdır.



Çekirdekleyicilerin yardımı nedeniyle heterojen çekirdeklenmede aşırı soğutma  $0,02 T_m$  kadardır.



Homojen/heterojen çekirdeklenme hızı-aşırı soğuma ilişkisi

# Dinamik Çekirdeklenme

- Statik şartlarda homojen ve heterojen çekirdeklenme açıklandı. Eğer döküm kalıbı sarsma ve manyetik etki veya ultrasonik titreşim altında ise çok sayıda çekirdek oluşur. Bu çekirdeklerin bir çoğu ilk oluşan çekirdekten büyüyen kristal parçacıklarının kopması ile oluşur. Daha az aşırı soğuma gerekir.
- Dökme demir sıvılarında Si, çelikte Ti, Al'de B ve birçok bileşik çekirdekleyicilik amacıyla ilave edilir. Sıvı metal katılaşmadan önce bindeler mertebesinde çekirdekleyicilerle zenginleştirilir ve bu sayede ince yapılı ve mukavemetli döküm elde edilir.

# KRİSTAL BÜYÜME

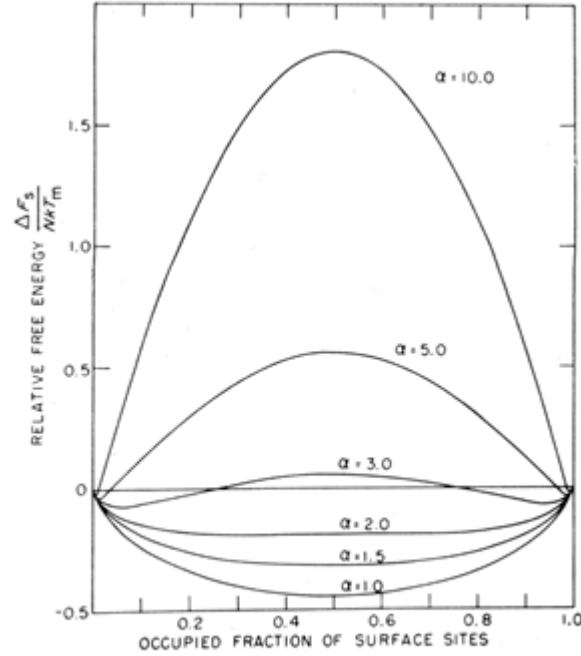


Fig. 3.1 Relative change in surface free energy as a function of the fraction of surface sites which are occupied.  $\alpha$  depends on the crystal face, the type of crystal and the phase from which the crystal is growing (Jackson<sup>1</sup>).

Ara yüzey büyümesi

GROWTH

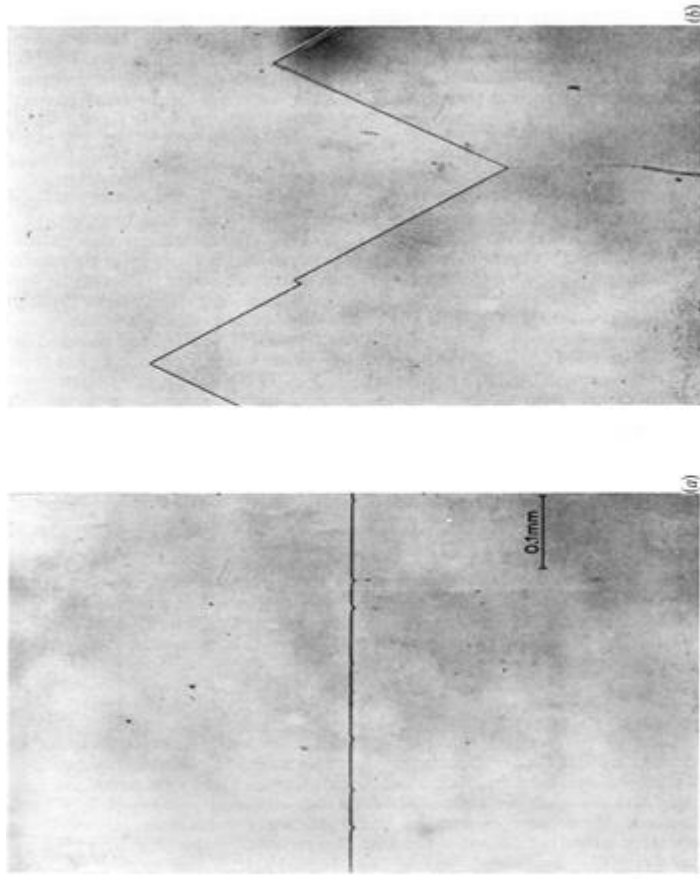
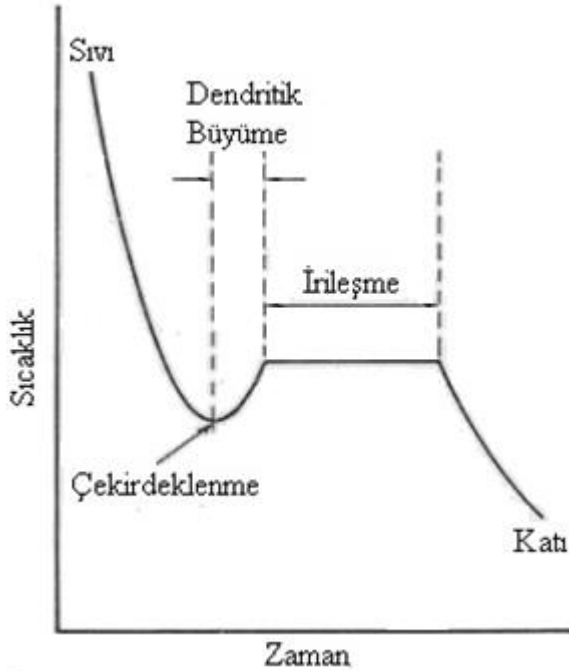
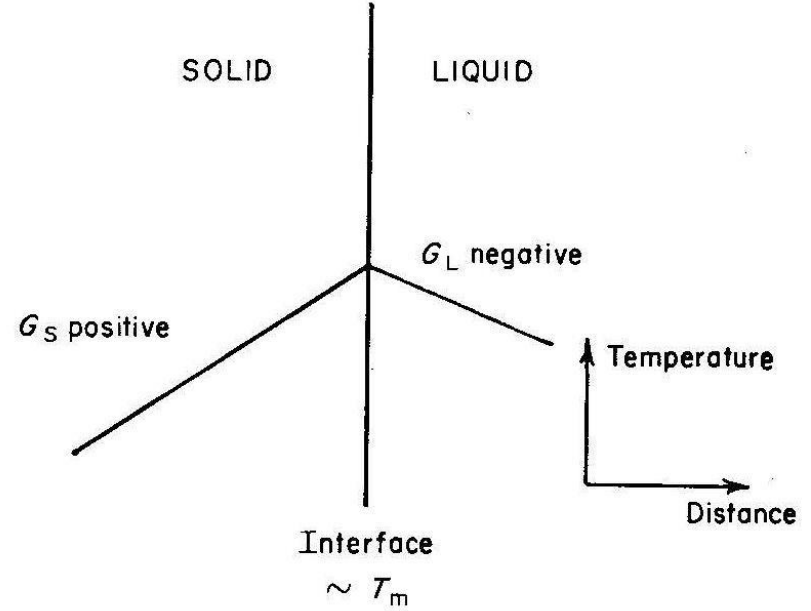


Fig. 3.2 (a) Planar 'rough' interface in carbon tetrachloride ( $\lambda \sim 1$ ). The small depressions on the interface indicate the positions of grain boundaries. (b) Faceted interface in solid ( $\lambda \sim 1$ ) (Jackson and Hunt<sup>6</sup>).

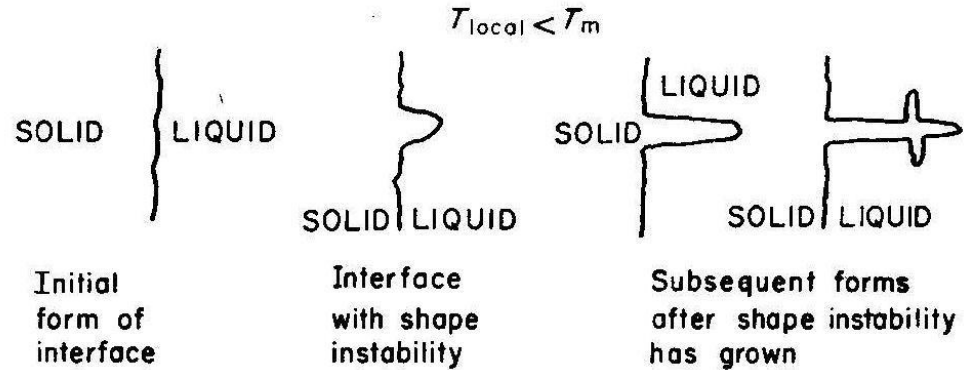
# METALLERDE DENDRİTİK BÜYÜME



Saf metaller için farklı büyüme olaylarının meydana geldiği bölgeleri gösteren soğuma eğrisinin tipik bir şekli.



(a)





## Ara yüzey büyümesi üçe ayrılır;

### 1. Normal büyüme mekanizması

Çekirdeğin yüzeyinde aşırı soğuma ile lineer olarak artan bir büyümedir.

Metallerin bir çoğu bu şekilde büyür, aşırı soğuma azdır. Büyüme hızı  $R = \mu \cdot \Delta T$

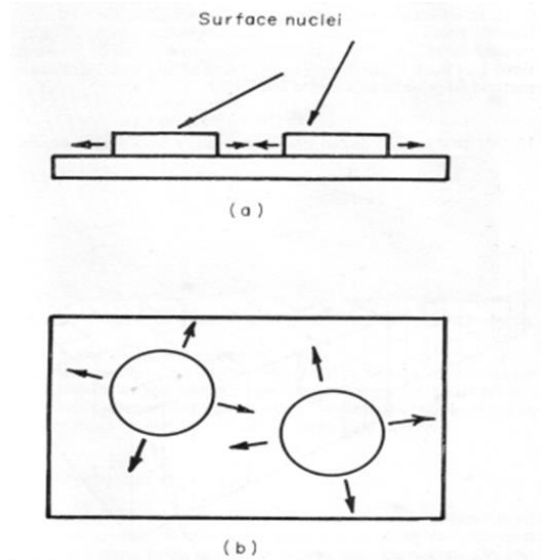
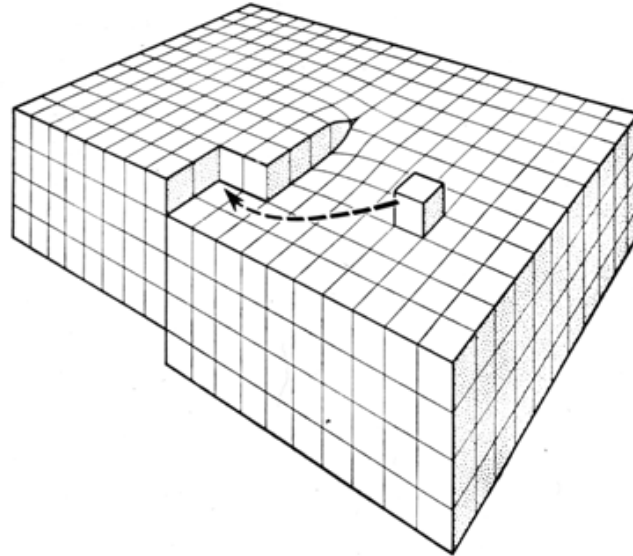


Fig. 3.3 Schematic view of the formation of disc-shaped nuclei on a crystal surface: (a) view parallel to the surface; and (b) view normal to the surface.

## 2. Çekirdek yüzeyinde yeni tabakaların oluşumuyla büyüme

Bu büyüme oldukça yavaştır. Özellikle düşük aşırı soğumalarda ihmal edilir. Büyüme hızı  $R = \mu_2 \exp(-b/\Delta T)$



*Fig. 3.4 Schematic view of a crystal containing a screw dislocation running normal to the upper surface. This surface is a spiral ramp and cannot be eliminated by adding atoms as shown (Read<sup>28</sup>).*

### 3. Hatalar üstünde büyüme

Burada büyüme hızı aşırı soğuma ilişkisi formülde verilmiştir. Özellikle dislokasyon ve ikiz hataları üzerinde büyüme görülür. Seramiklerde bu tür büyüme fazlaca gözlenmiştir.  $R = \mu_3 \cdot \Delta T$

Büyüme büyük ölçüde metal – ametal veya seramik malzemenin dönüşüm entropisine bağlıdır. Eğer dönüşüm entropisi (sıvı – katı) 2'den azsa büyüme kolaydır. Eğer 2'den yüksekse büyüme zordur. Hata yardımı gerekir.

Metallerde  $\alpha$  (büyüme entropisi) 2'den azdır ve normal büyüme görülür. Seramiklerde  $\alpha > 2$ 'dir. Hatalar yardımıyla ve tekrarlı çekirdeklenme yardımıyla büyüme görülür.

- $\alpha = k \frac{L}{T_m}$  Metaller  $\alpha \leq 2$  Seramikler

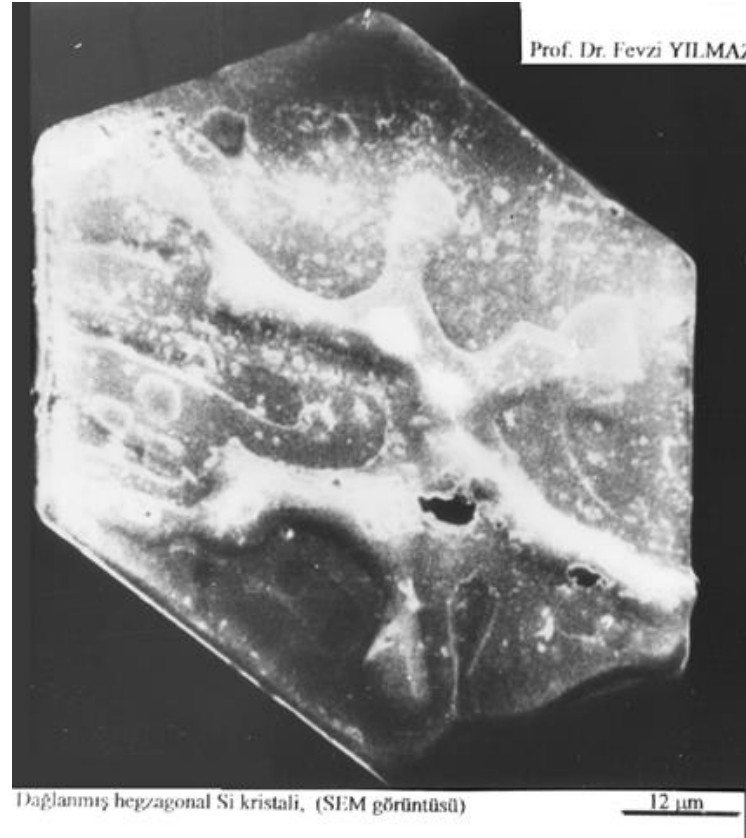


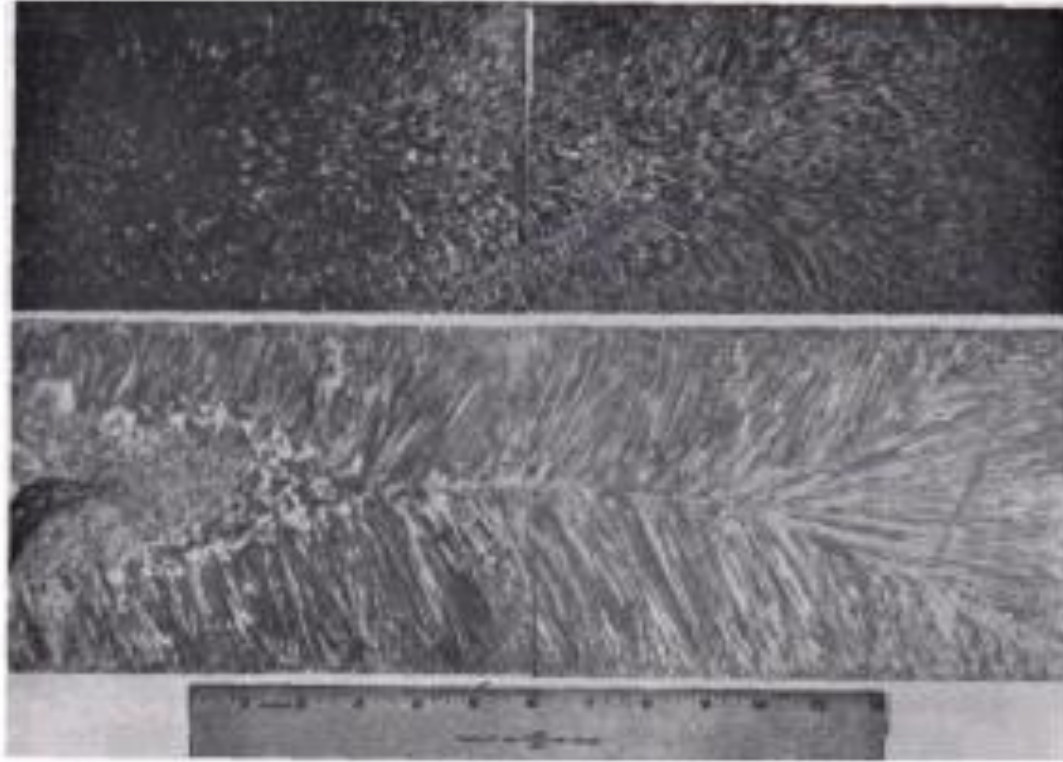


Fig. 3.5 A growth spiral on a crystal of SiC grown from the vapour (Verma<sup>29</sup>).

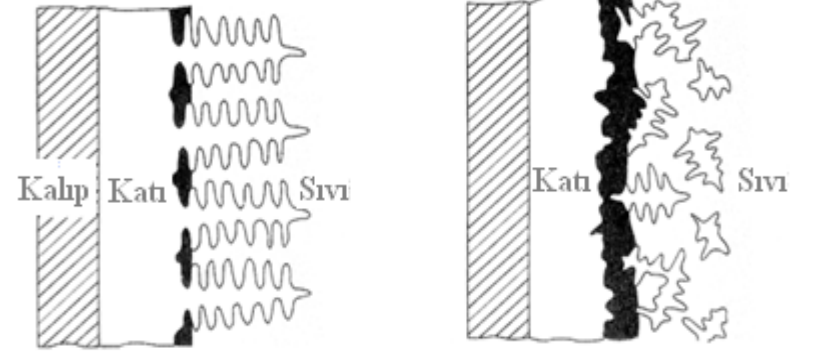


Parlatılmış ve dağlanmış Si kristali, {100} düzlemi (SEM görüntüsü) 10 μm

# AYNI İNGOT 2 FARKLI YAPI! (eş eksenli ve kolonsal)

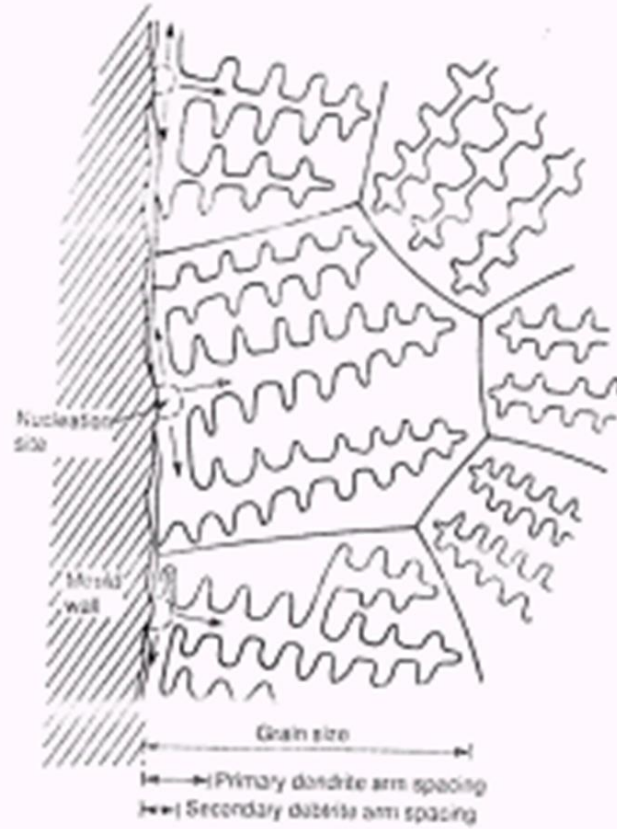


# DENDRİTİK BÜYÜME



Eş yönlenmiş ve serbest büyümüş (eş eksenli) dendrit kristalleri (Dendrit Yunanca ağaç demektir)

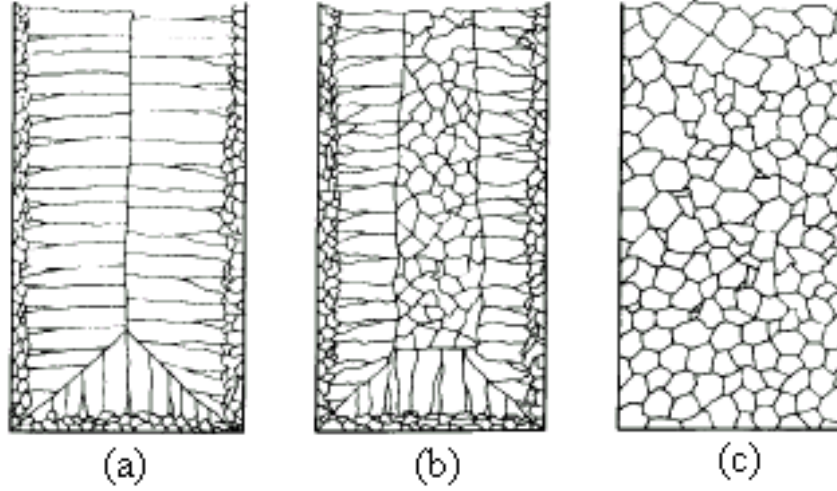
# DENDRİT VE TANELER



Dendrit ve dendritlerin oluşturduğu taneler



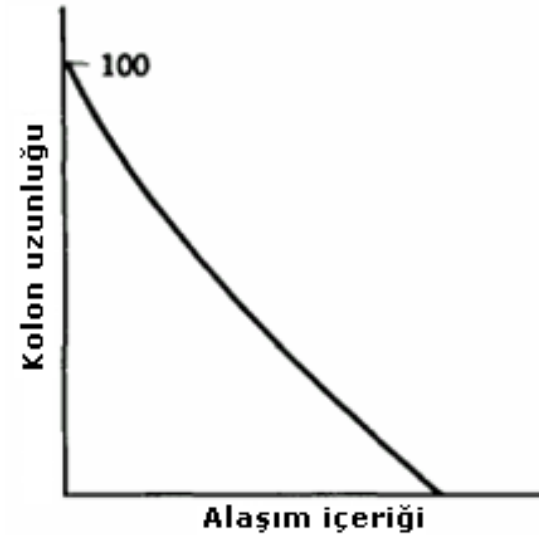
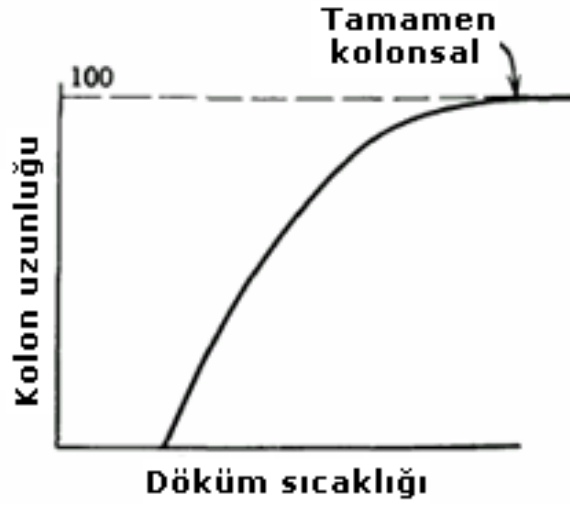
# İNGOT (BİYET) YAPISI



**(a) Tamamen kolonsal**

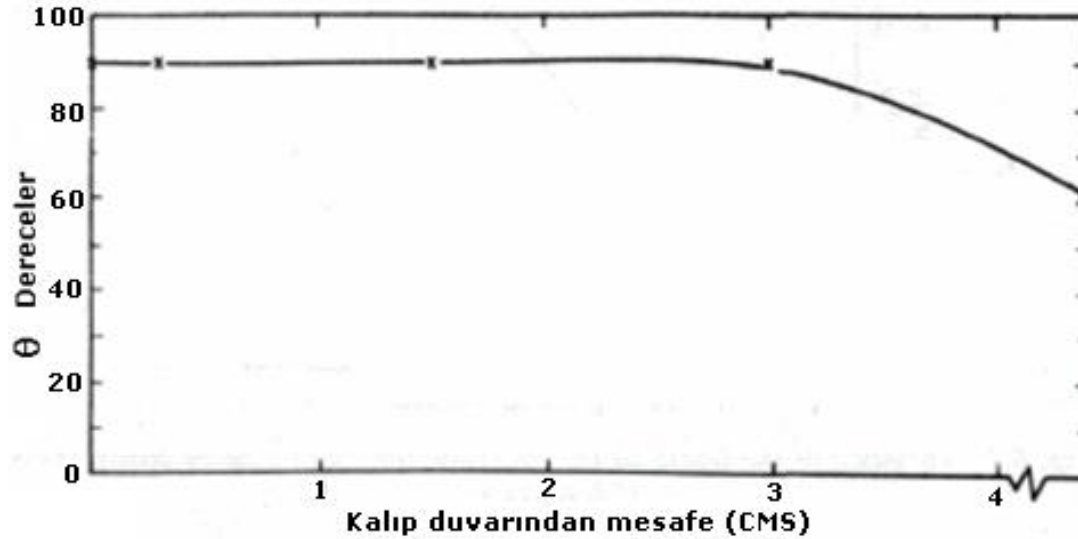
**(b) Kısmen kolonsal, kısmen eşeksenli**

**(c) Eş eksenli**



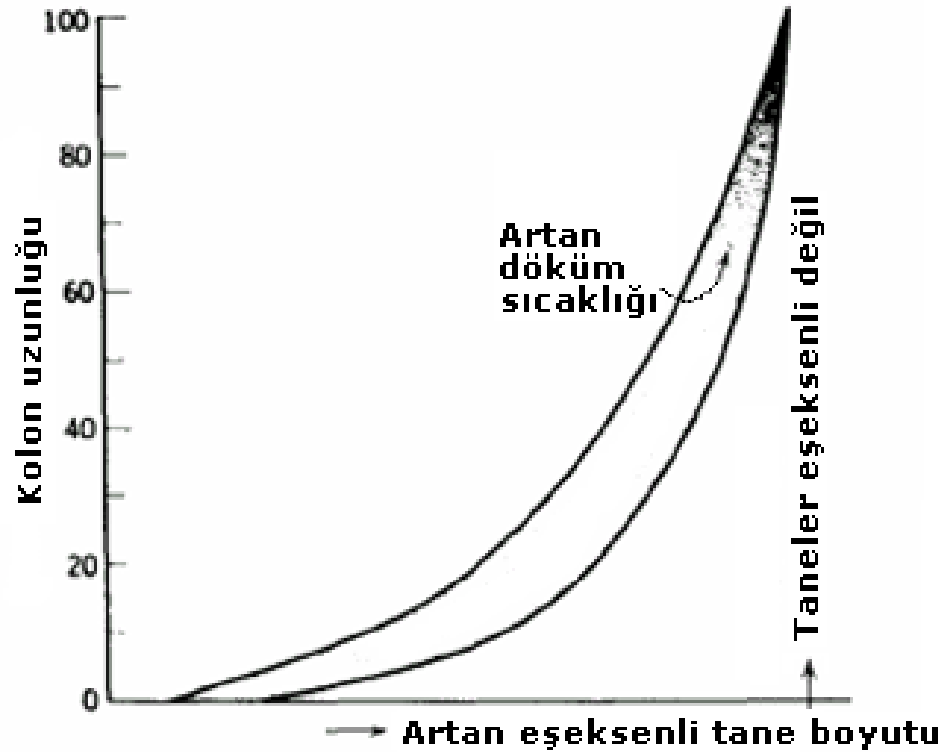
**Döküm sıcaklığı ile kolonsal bölge uzunluğunun değişimi**

**Sabit döküm sıcaklığında alaşım içeriğiyle kolonsal bölge uzunluğunun değişimi**



**Saf alüminyum için kalıp duvarından mesafe ile tercihli yönlenmedeki değişim:  $\theta$  yönlenmedeki yayılmadır**

# Kolonsal yapı uzunluğu, eşeksenli tane boyutu ve döküm sıcaklığı arasındaki ilişki



DİNLEDİĞİNİZ İÇİN  
**TEŞEKKÜRLER**

SORULAR – CEVAPLAR

[f.yilmaz@fsm.edu.tr](mailto:f.yilmaz@fsm.edu.tr)

[aluteam@fsm.edu.tr](mailto:aluteam@fsm.edu.tr)