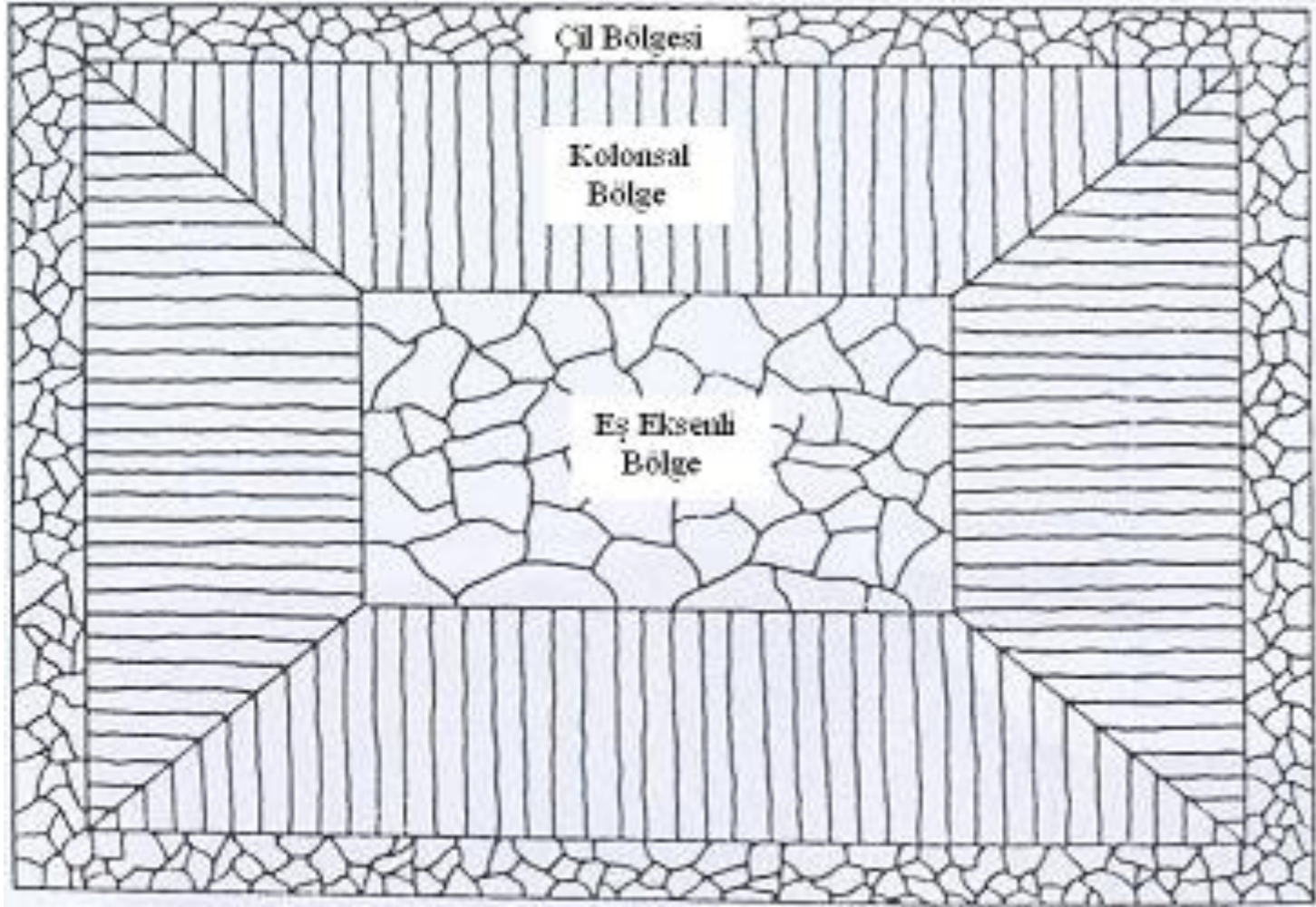


Dökümlerin Yapısı

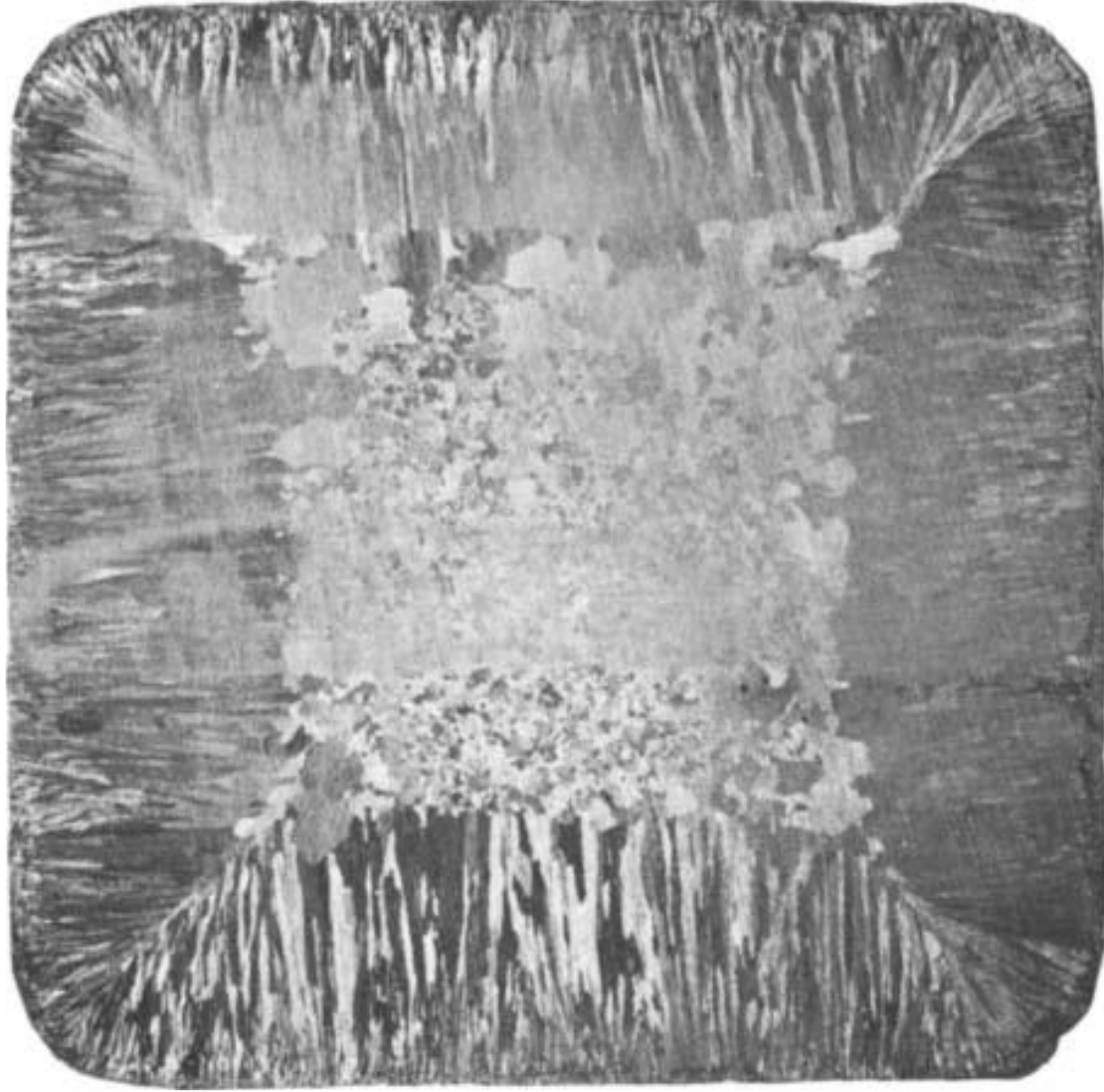
Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Malzemelerin birçok özellikleri, özellikle mekanik özellikler tane boyutu ve tane şekline bağımlı olduğundan döküm yapıları büyük öneme sahiptir. Ayrıca çözünenin farklı şekillerde yeniden dağılımının bir sonucu olan segregasyon da önemli etkiye sahiptir.

Bu bölümde makroskobik döküm yapısının doğası incelenecek ve değişik türdeki yapıların gelişim nedenleri tartışılacaktır. Özelliklerin geliştirilebilmesi için yapı kontrolü şarttır. Bu, döküm halinde ve plastik işleme şekillendirme işlemlerinden sonra kullanılan her iki grup üründe de önemlidir.



Çil bölgesi, kolonsal bölge ve eş eksenli bölgeyi gösteren döküm yapısının enine kesiti.



Küçük çelik ingottan kesilmiş diskin makro dağlanması (Nital 10)

Bir çok döküm çok kristalli katıda (döküm parça veya ingot), değişik tane yapısına sahip üç farklı bölge tanımlanabilir: Bunlar;

1-Çil Bölgesi : Sınır katmanı ve kalıp duvarıyla komşu rastgele yönlenmiş küçük ve eş eksenli kristaller

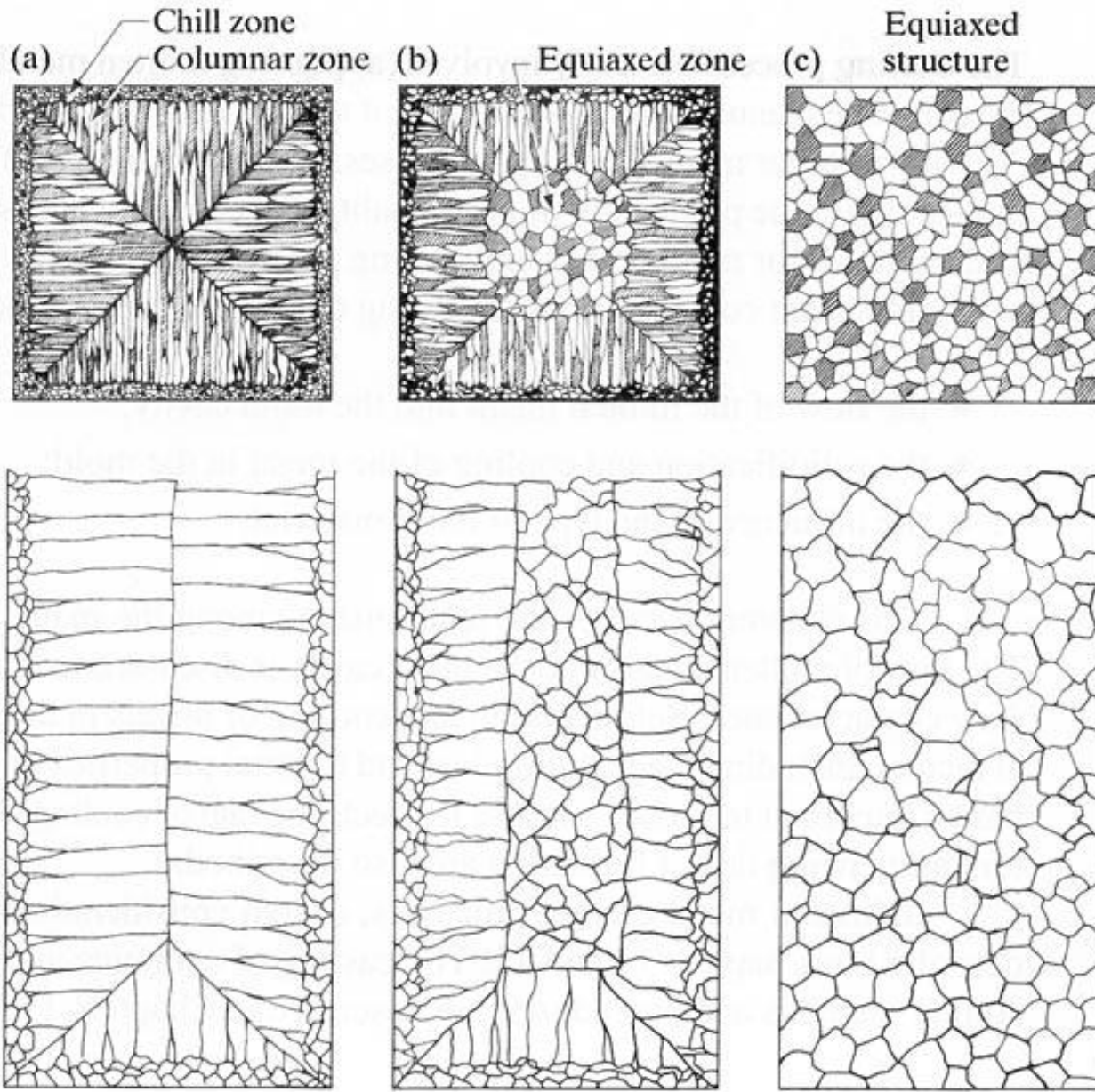
2-Kolonsal Bölge : Isı akışına paralel dizilen uzamış kristallerin bandı.

3-Eş Eksenli Bölge : Eş biçimli kristalli merkezi bölge. Tane boyutunun küçük olması halinde bu bölgenin özellikleri izotropiktir. Bu bölgedeki tane boyutu çil bölgesinden doğal olarak büyüktür.

Olası özelliklerin tayininde en önemli etken, kolonsal ve eş eksenli bölgelerin kısmi oranlarıdır. Çil bölgesi normal olarak sadece birkaç tane boyutu genişliğinde olup sınırlı etkiye sahiptir.

Eğer tane yapısı kontrolündeki amaç izotropiyi sağlamak ise, ince taneli eş eksenli yapı gereklidir. Bu durum ise kolonsal büyümenin durdurularak eş eksenli bölgenin oluşmasının teşvik edilmesi ile sağlanır.

Diğer taraftan anizotropik özelliklerin istenmesi halinde yapının ağırlıklı olarak kolonsal olması gerekir. Farklı bölgelerin nispi oranları döküm değişkenlerini değiştirerek kontrol edilebilir. Örneğin; alaşım bileşenleri, döküm sıcaklığı, soğutma hızı kontrolüyle ingot tamamen kolonsal yapıdan eş eksenli yapıya dönüştürülebilir.

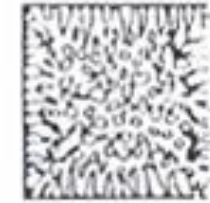
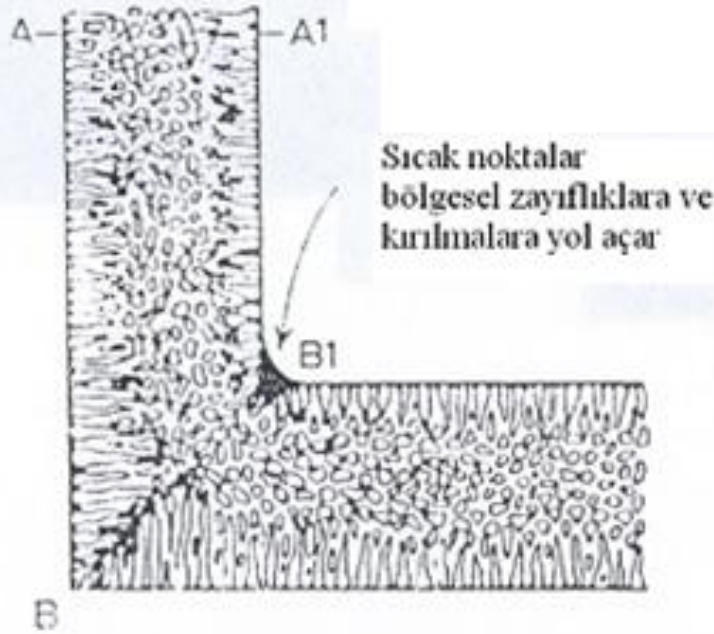


Çeşitli Döküm Yapıları : a) Çil bölge hariç tamamen kolonsal yapı, b) Kısmen kolonsal, kısmen eş eksenli yapı, c) Tamamen eş eksenli yapı.

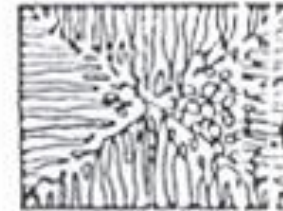
Tane sınırları büyüyen tanelerin birbirleri ile teması sonucu oluşur ve tane sınırı etkisi kristalografik yönelme ve çözünen ve çözünmeyen empüritelerin burada toplanmasından kaynaklanır. Bu nedenle tane sınırlarının etkisi oryantasyondaki (yönelme) değişime ve sınırların spesifik özelliklerine bağlıdır. Kırılma açısından ve çatlak ilerlemesi yönünden tane sınırları özellikle çözünen segregasyonunun burada bulunması durumunda tercihli yerleri oluşturabilir.

Yapıda eş eksenli tanelerin oluşmadığı durumlarda çözünen ve çözünmeyen empüriteler kolonsal tanelerin sınırlarında toplanırlar ve bu durum felaketle sonuçlanabilir; örneğin, kaynak havuzlarında sıkça bu problemle karşılaşılmaktadır.

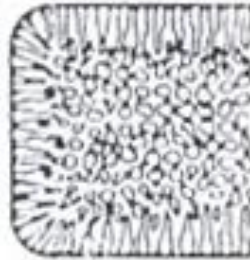
Dökümlerde özellikle dikdörtgen kesitlerin keskin köşelerinde ve dikey yüzey birleşmelerinde tane sınırlarının birbirleri ile teması kötüdür. Bu durum uygun tasarım yapılarak düzeltilebilir. Döküm üreticileri mutlaka süreç kontrolünü sağlamalıdır. İngotlar katı halde yoğun deformasyon işlemine tabi tutulduğunda, nihai tane yapısı katı hal değişimleri tarafından tayin edilir. Bununla beraber ilk aşamalarda yapılan dikkatli kontroller homojenliğin sağlanması açısından faydalı sonuçların elde edilmesini sağlar. Kontrollü ve ince taneli döküm yapıları homojenizasyonu kolaylaştırır. Bu durum tane şekli ve boyut kontrolünün sağladığı diğer bir avantajdır.



A-A1 Kesiti



B-B1 Kesiti

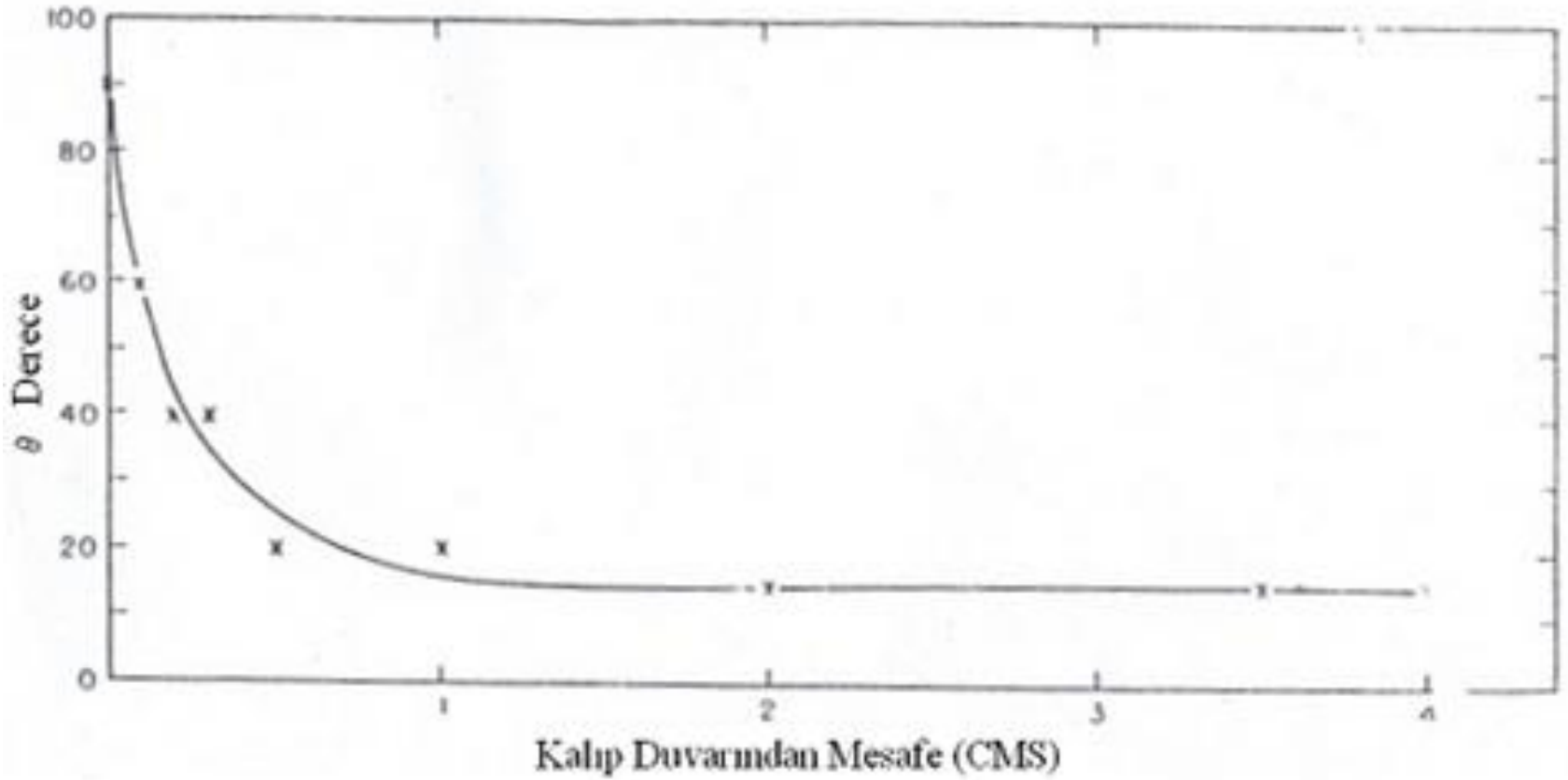


Yuvarlak köşelerin avantajıyla çeşitli döküm formlarında kolonsal yapı

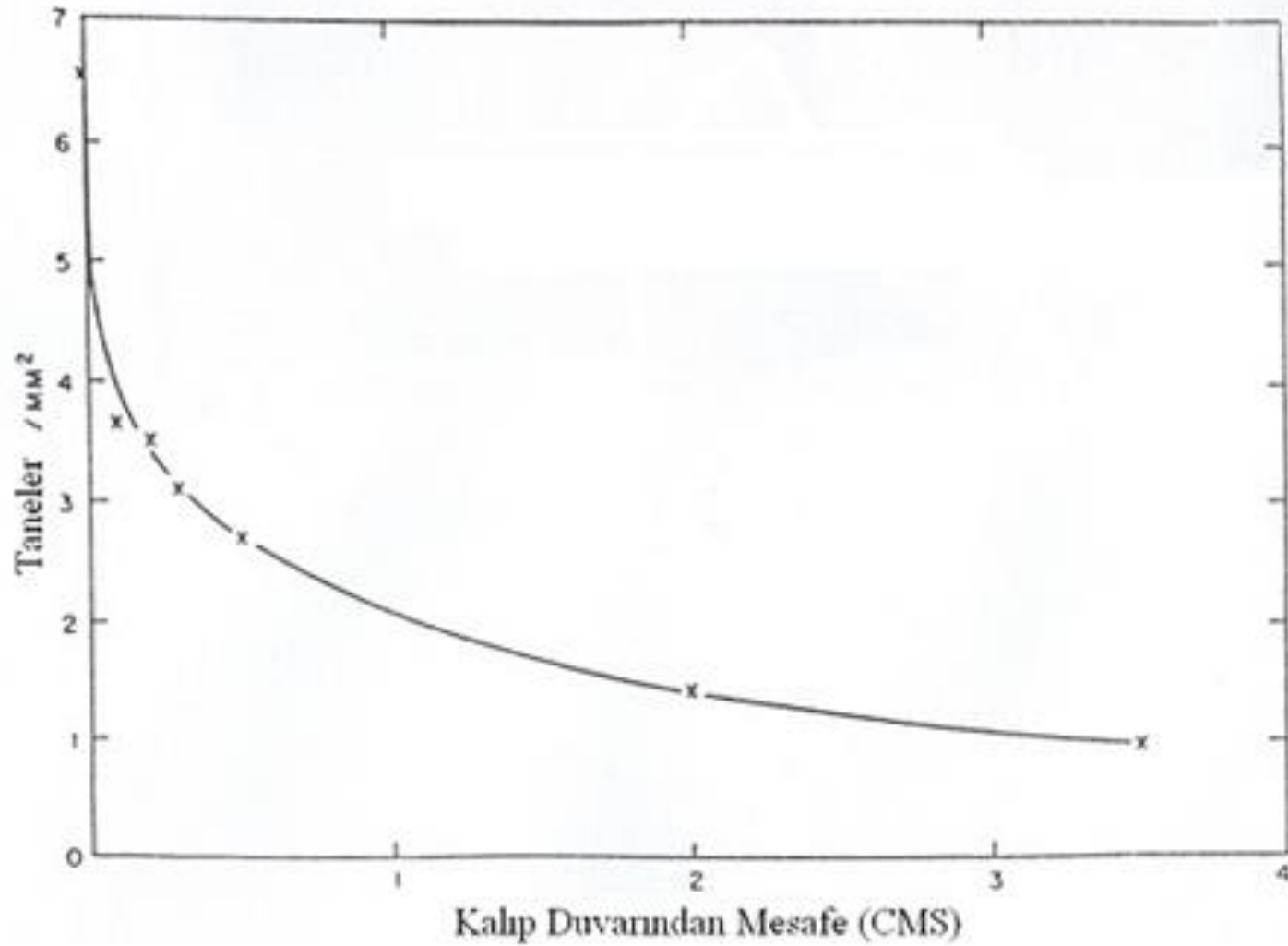
Sık görülmeyen şekil etkilerinden meydana gelen zayıf bölgeler

Çil bölgesi

Çil taneleri kalıp duvarı üzerinde ve yanında çekirdeklenir. Alt soğuma çalışmaları çil tanelerinin heterojen çekirdeklenme sonucu oluştuklarını göstermiştir. Çil bölgesinin oluşumu ilk olarak olduğu düşünülen sürüsel (copious) çekirdeklenme ile izah edilmiştir. Çekirdeklenmenin sayısı büyük ölçüde kalıp duvarındaki ısı duruma bağlı olmakla beraber, ayrıca kalıp duvarının heterojen çekirdeklenme için hazır altlık görevi görmesine ve sıvı tabakadaki etkin çekirdeklerin varlığıyla açıklanabilir. Belirli bölgelerde hızlı soğuma da ayrıca rol oynayabilir. Sonuç olarak bakıldığında çil bölgesindeki kristallerin sayısı sıvının döküm sıcaklığına, kalıbın sıcaklığına, kalıbın ve metalin ısı özelliklerine, kalıp duvarının veya sıvı içindeki parçacıkların çekirdeklenme potansiyeline bağlıdır. Bazı sıra dışı durumlarda başlangıçta oluşan çil bölgesi kristallerinin yeniden ergimesi mümkündür.



Alüminyum %2 Ag alaşımında kalıp duvarından itibaren mesafeye göre tercihli yönlenme değişimi.



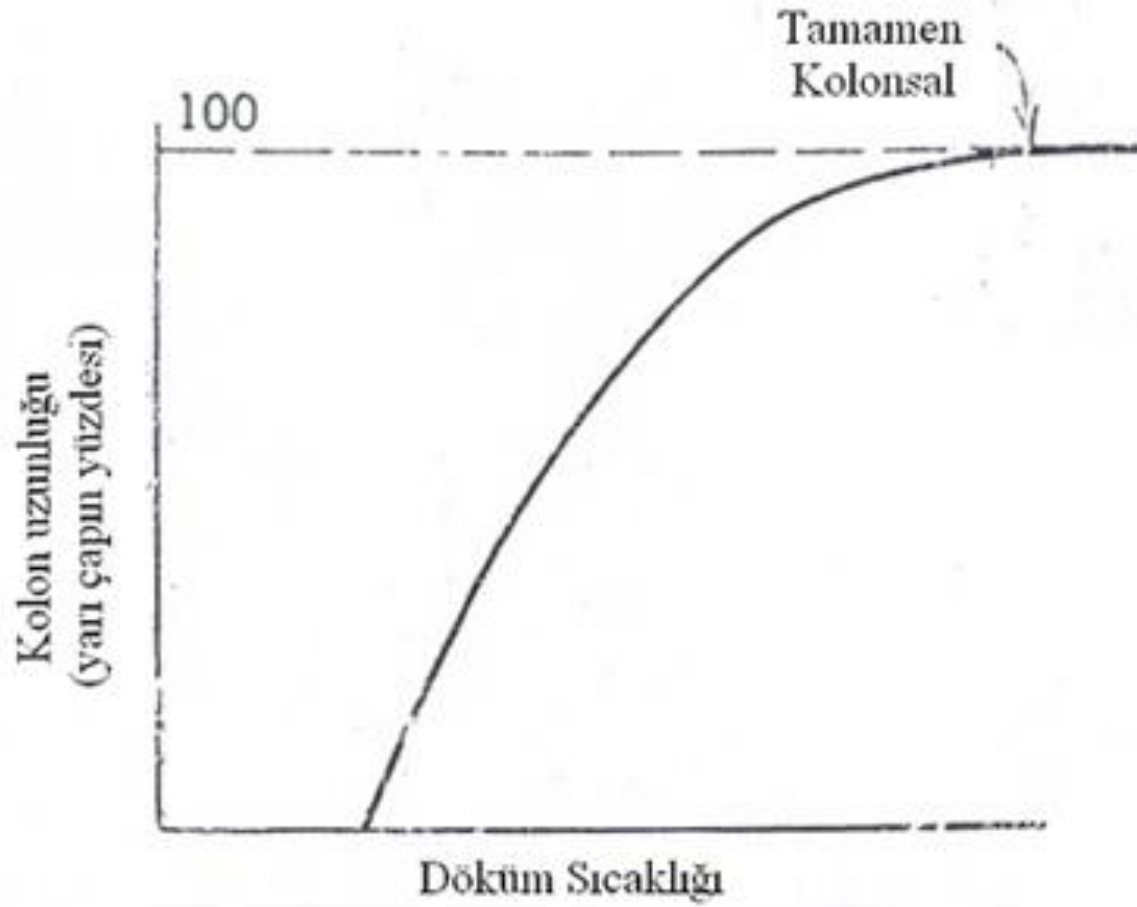
Aynı alaşımın kalıp duvarından itibaren artan mesafeyle birlikte tane boyutundaki artış.

Kolonsal bölge

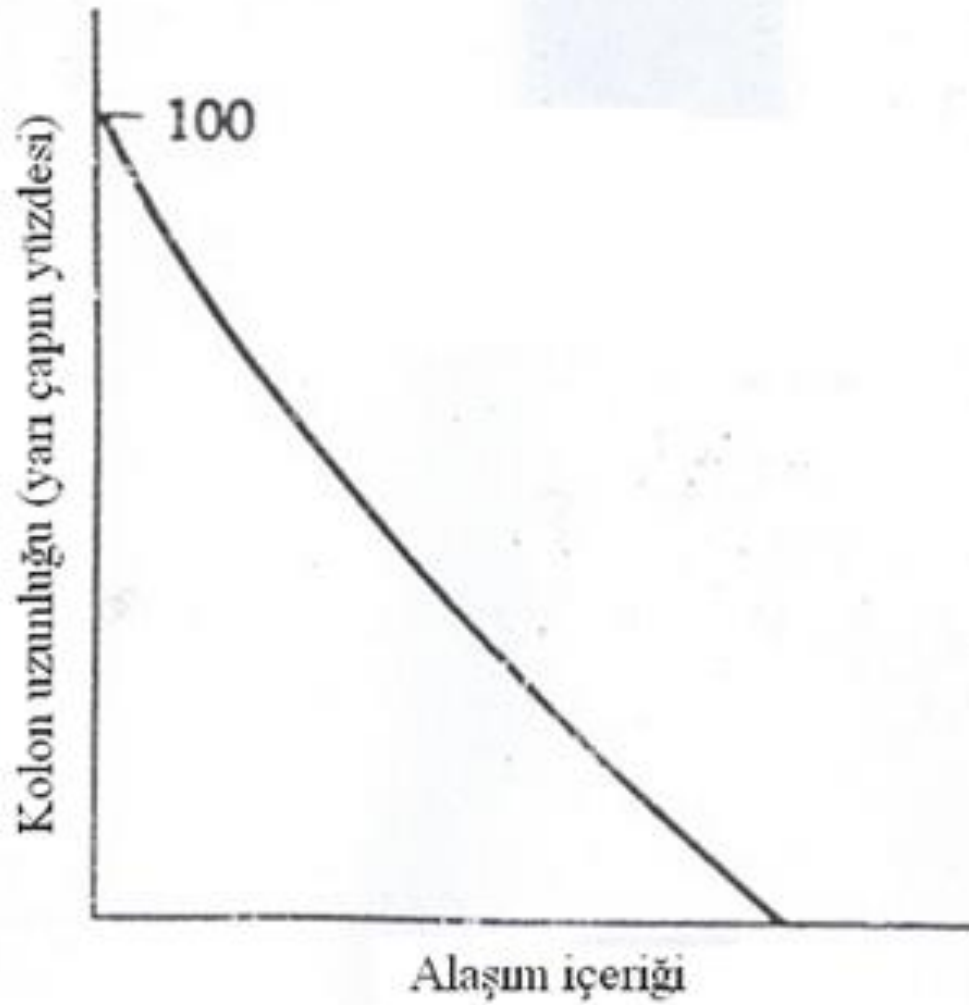
Kolonsal kristaller çil bölgesinden itibaren baskın bir şekilde ve dentritik büyüme yönüne paralel şekilde kuvvetli bir tercihli yönelme ile gelişir. Çıkış noktası veya kaynağı çil bölgesi olmayan az sayıda tane kolonsal bölgede oluşur. Kolonsal bölgedeki alt yapı düzlemsel hücresel ve hücresel dendritik yapıların tümünü gösterebilir.

Kolonsal kristallerin eksenini normal olarak ısı akış yönüne paraleldir. Kolonsal kristallerin çil bölgesinden büyümesinde, büyüme yönleri ısı gradyanta (ısı akışına) paralel olan kristaller paralel olmayan komşularına göre çok daha hızlı büyür. Bunlar uygun oryantasyonu olmayan komşularının büyümesini engelleyerek ve durdurarak büyüme sürecine hakim olur. Bu olay, kolonsal bölgedeki yönelme dağılımındaki azalma ve ortalama tane boyutundaki artış ile sonuçlanır.

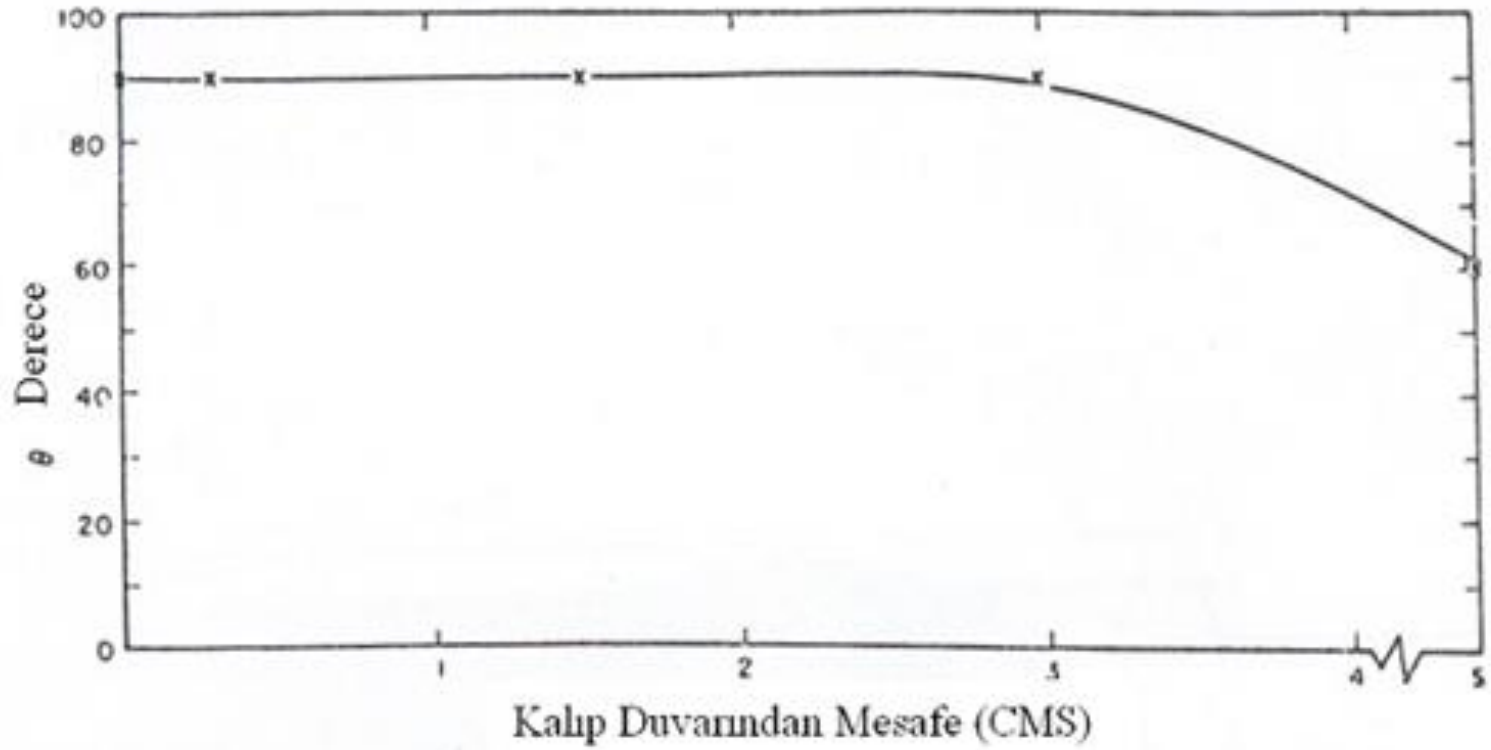
Belirli bir alaşımda kolonsal bölgenin uzunluğu döküm sıcaklığı yükseldikçe artar. Verilen döküm koşullarında kolonsal bölgenin uzunluğu alaşımın içeriği arttıkça azalır. Saf metallerin döküm yapısı tamamen kolonsaldır ve tercihli yönelme çok az değişim gösterir. Saf metallerde ara yüzey, zorunlu olarak düzlemseldir ve dendritik büyüme kayda değer derecede gerçekleşmez. Bu durum tercihli yönelmenin olmamasından ve ara yüzeye atılan alaşım elementi yığınının olmamasından kaynaklanır.



Kolonsal bölgenin boyu ile döküm sıcaklığı arasındaki ilişki.



Sabit döküm sıcaklığında, alaşım bileşimi ile kolonsal bölgenin boyunun değişimi.

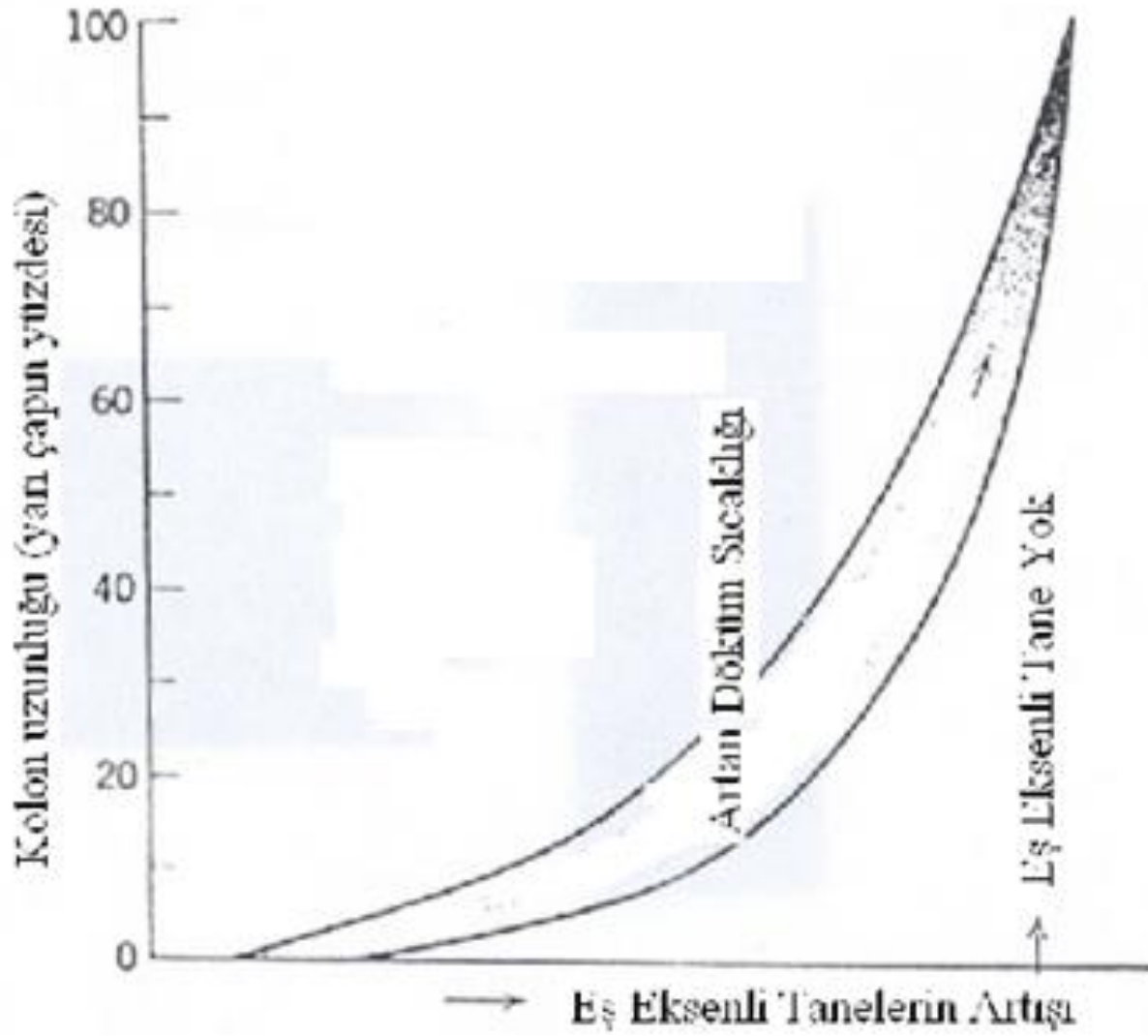


Saf alüminyumda kalıp duvarından itibaren mesafeye bağlı olarak tercihli yönlenme değişimi.

Saf metallerde kolonsal kristallerin sürekli oluşumu eş eksenli kristal üretememenin bir sonucudur. Çil bölgesindeki çekirdeklenmelerin etkisiyle veya yüzeyde çekirdeklenen kristaller meydana gelirse bazı eş eksenli kristaller oluşabilir. Kolonsal bölge başlangıcı ve uzaması çil kristallerden gelişmesi yukarıda anlatılmıştır. Ana kontrol faktörü eş eksenli bölgenin teşekkülüdür. Eş eksenli yapıların oluşumu için koşullar uygun olmadığı müddetçe kolonsal kristaller oluşmaya devam eder. Bu nedenle kolonsal bölgenin kontrolü eş eksenli kristallerin oluşumu teşvik edilerek yapılabilir. Bu, döküm yapısının kontrolünde etkili en önemli unsurdur.

Eş eksenli bölge

Eş eksenli bölgedeki kristaller çil bölgesindekilere göre daha büyüktür ve yönlenmeleri karışıktır. Önceki şekillerde gösterildiği gibi geniş eş eksenli bölge oluşumunda dökümde nispeten düşük üst ısı (düşük döküm sıcaklığı) kullanımı ve yüksek alaşım elementi içeriği tercih edilir. Döküm sıcaklığı arttığında eş eksenli tane oluşumu eğilimi azalır bununla beraber eş eksenli tanelerin boyutu büyür.



Kolonsal bölge uzunluğu, eş eksenli tane boyutu ve döküm sıcaklığı arasındaki ilişki.

Eş eksenli bölge gelişiminde döküm boyutunun dikkate alınması gereken büyük bir önemi vardır. Örnek olarak kolonsal bölge uzunluğu ve döküm sıcaklığı arasındaki ilişki ile eş eksenli tanelerin boyutu ve döküm sıcaklığı (aşırı ısı) arasındaki ilişki sadece küçük ingotlar içindir. Metal benzeri sistemler üzerinde yapılan çalışmalar eş eksenli kristallerin çekirdeklenmesinde birkaç kaynağın rol aldığını göstermektedir.

Bu kaynaklar:

Görünüş olarak izole (bağımsız) çekirdeklenme hadiseleri
Büyüyen kolonsal bölgeden kaynaklananlar
Serbest yüzeyde meydana gelen olaylar

Eş eksenli bölgenin gelişim teorileri

Üçü genel olarak önemli olduğu kabul edilen dört ana teori önerilmiştir.

(i) Yapısal aşırı soğuma teorisi:

Eş eksenli bölge, bir kısım ilk kolonsal büyümeden sonra büyüyen kristallerin önündeki yapısal aşırı soğuma, heterojen çekirdeklenmeyi indüklemek için yeterli hale geldiğinde oluşur. Bu kristallerin müteakip büyümesi kolonsal bölgeyi bloke eder ve kalan sıvının daha sonra eş eksenli biçimde katılaştığı kabul edilir. Bu teori bazı nedenlerden dolayı reddedilmiştir.

Katılaşan metalin ısıl geçmişi ile ilgili deneysel bulgular ile önerilen koşullar uyuşmamaktadır. Uzun kolonsal bölgeler gelişene kadar eř eksenli bölgenin oluşumunu sağlayan aşırı soğumanın nasıl engellendiği açıklanmamaktadır. Nihai olarak, heterojen çekirdekleyici içermeyen ergiyiklerde eř eksenli bölgenin oluşumuyla ilgili gözlemler büyüyen kolonsal ara yüzeyin önünde çekirdeklenme gereksinimi gerçeği ile uyuşmamaktadır. Takibi teorilerin hiçbirisi ara yüzeyin önünde çekirdeklenmeye olan ihtiyaa dayanmaz fakat eř eksenli tanelerin bağımsız olarak üretilmesi esasına dayanır.

(ii) Big Bang Mekanizması (Serbest çil kristalleri teorisi):

Bu teoriye göre hem kolonsal tanelerin ve hem de eş eksenli tanelerin çekirdeklerinin kalıp duvarının çil (hızlı soğutma) etkisiyle teşekkülü söz konusudur. Bu çekirdekler daha sonra kolonsal kristal olarak büyür veya merkezi bölgeye doğru taşınarak (sürüklenerek) eş eksenli kristalleri oluşturur. Kolonsal yapıdan eş eksenli yapıya geçiş, eş eksenli dendritlerin oluşturduğu (ağ) bariyer tarafından kolonsal büyümenin engellenmesiyle sağlanmaktadır. Özellikle ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda yapılan dökümlerde bu mekanizmayı destekleyen önemli kanıtlar bulunmaktadır.

(iii) Dendrit kopması (kristal çoğalması) teorisi:

Önemli diğer bir mekanizma kristal çoğalmasıdır; bu mekanizmaya göre büyüyen kolonsal dendritlerin kolları birleşme noktalarından ergiyerek kopmakta ve taşınarak (sürülenerek) eş eksenli tanelerin çekirdeğini oluşturmaktadır. Dendritik büyüme sırasında dendrit ucunda çözünence zengin bir tabaka oluşur. Herhangi bir yan kol bu tabakanın içinden geçerek büyümek zorundadır. Bu durumda düşük ergime noktalı bir boyun oluşur. Boyun ve eğrilik, ısı dalgalanmalarının oluşması durumunda boynun yeniden ergiyerek kopmasına neden olur. Bu ısı dalgalanmalar doğal konveksiyon sonucu oluşur. Büyüme sırasında büyük ısı dalgalanmalar oluşur ve konveksiyonu teşvik eden koşullar aynı zamanda eş eksenli bölgenin teşekkülünü de teşvik eder. Konveksiyonun engellenmesi halinde eş eksenli büyümenin de engellendiği kanıtlanmıştır. Gerçekleştirilen doğrudan gözlemler, metallerdeki dendritlerin yeniden ergimesinin, eş eksenli bölge oluşumunda etkili olduğunu doğrulayıcı yöndedir.

(iv) Serbest yüzeyden batma (yağmurlama) teorisi:

İngotun serbest yüzeyinde (açık üst yüzey) oluşan eş eksenli kristallerin çekirdekleri, dibe doğru batar ve büyüyen kolonsal bölgenin önündeki sıvıya yağar. Çekirdekler basitçe ayrılıp kendi ağırlıkları altında batan serbest yüzey dendritleri olarak düşünülebilir veya alternatif olarak dendrit yeniden eritilmesi katkıda bulunan bir rol oynayabilir.

Yukarıdaki bilgilerin ışığında ii, iii ve iv numarada tarif edilen üç mekanizma ingotların ve dökümlerin katılaşmasında etkilidir. Katılaşma esnasında ilgili mekanizmaların görece rolleri var olan koşullara (alaşım bileşimi, soğuma hızı ve döküm sıcaklığı) bağlıdır. Bununla beraber bu üç mekanizmanın anlaşılması tane yapısını kontrol eden metotların gelişmesine olanak sağlamıştır.

Dökümlerde tane yapısı kontrolü

Manyetik alaşımlar, tek kristalli türbin kanatları gibi çok özel uygulamalar hariç diğer tüm uygulamalar için ince taneli ve eş eksenli yapılı dökümler ve ingotlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yapılar izotropiktir ve bunların çoğu özellikleri yüksektir. Bu yapıların gelişmesi için kolonsal büyümenin önlenmesi gereklidir. Bu durum eş eksenli çekirdek oluşum şartlarını zorlayarak elde edilebilir. Gerekli ön koşul kolonsal büyümeyi engelleyecek etkili bir kristal ağın oluşturulmasıdır. İki önemli yaklaşım vardır.

Döküm şartlarının kontrolü veya aşılایıcı (aşılایıcı = inokülan = tane küçültücü) kullanımı ile çekirdeklenmenin kontrolü.

Fiziksel metotların kullanımı. Örneğin; karıştırma, ultrasonik titreşim, dinamik tane inceltme.

Çekirdeklenme davranışının kontrolü

Belirli bir alaşım için en basit yaklaşım liküdüs sıcaklığına en yakın sıcaklıkta (düşük döküm sıcaklığı) dökerek sıvı metalin kalıpla karşılaştığı ilk anda sürüsel heterojen çekirdeklenmeyi teşvik etmektir. Bu durumdan dolayı, geniş ısısal değişim ve yüksek akışkanlık gereksinimi nedeniyle karmaşık şekilli parçaların yüksek sıcaklıklarda dökülme zorunluluğu bir dezavantaj oluşturur. Bu aynı zamanda riskli bir prosestir; çünkü çekirdekleyici ajanlar bilinçli olarak ilave edilmez ise çekirdeklenme prosesi uygun heterojen çekirdekleyicilerin var olma şansına bağımlı olacaktır. Bu nedenle dökümden önce genellikle aşılavıcı (tane küçültücü) eklenir. Çekirdeklenme bölümünde tartışıldığı üzere bir inokulantın çekirdekleyicilik etkinliği hem yapısal ve hem de kimyasal faktörlere bağlıdır. Nihai olarak amprik metodlara ihtiyaç duyulmaktadır ve çok sayıda inokulant kullanıma sunulmuştur. Amprik metodlar ayrıca ilk çekirdeklerin büyüme hızlarını düşürerek çok sayıda çekirdeğin teşekkülünü sağlayan büyüme önleyicileri geliştirebilmek için kullanılmıştır.

SOME GRAIN REFINING NUCLEANTS^a

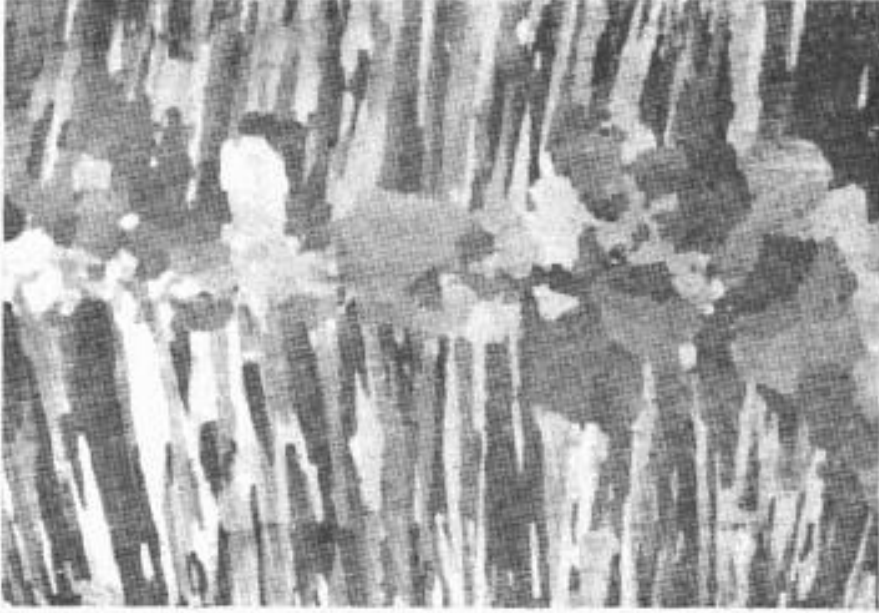
<i>Metal or alloy</i>	<i>Grain refiner</i>	<i>Comments</i>
Magnesium and Mg-Zr alloys	Zirconium added as alloy or salts	Zr or Zr-enriched Mg peritectic nuclei
Magnesium-aluminium	Carbon, for example as hexachlorethane	Al_4C_3 or AlNAI_4C_3 nuclei
Magnesium-aluminium	Superheating	In presence of C, Al_4C_3 and/or Al-Mn nuclei
Magnesium-aluminium-FeCl ₃ manganese		Fe-Al-Mn or Al_4C_3 nuclei
Mg Zn	FeCl ₃ or Zn-Fe	Fe compound nuclei
Mg Zn	NH ₃	Nucleated by H ₂ (?)
Al alloys	Ti as reducible halide salts or as Al-Ti hardener	TiC nucleus or peritectic TiAl_3
Al alloys	Ti + B as reducible halide salts or as Al-Ti-B hardener	TiB_2 nuclei, more resistant to melt history

Metal or alloy	Grain refiner	Comments
Al alloys	Boron as reducible halide salts or Al-B	AlB ₂ nuclei
Al alloys	Niobium	
Cu alloys	Fe metal or alloy	Fe-rich peritectic nuclei
Bronzes	Transition nitrides and borides or FeB	
Cu-Al ₂ Cu eutectic	Titanium	Nucleates primary Al
Cu-7%Al	Mo, Nb, W, V	
Cu-9%Al	Bi	
Low alloy steel	Titanium	
Low alloy steel	Transition elements and carbides	
Silicon steel	TiB ₂	Dissolves and precipitates TiN or TiC
Low alloy steel	Fe powder	Introduction of micro-chilling particles
Austenitic steel	CaCN ₂ , nitrided Cr and other metallic powders	In presence of increased nitrogen
Tin alloys	Germanium or indium	
Lead alloys	S	
Lead alloys	Se, Te	
Type metal	As, Te	
Monel	Lithium	
Al-Si hypereutectic	Phosphorus as Cu-P, PNCI ₂ or proprietary inoculant	Refines primary Si
Fe-C (graphite)	Carbon	Refines eutectic, probably through nucleating graphite
Fe-C-Si (graphite)		
Grey cast iron		
Grey cast iron	Si alloys containing aluminium, alkaline earths and/or rare earths	Refines eutectic, may nucleate through precipitation of carbides or graphite

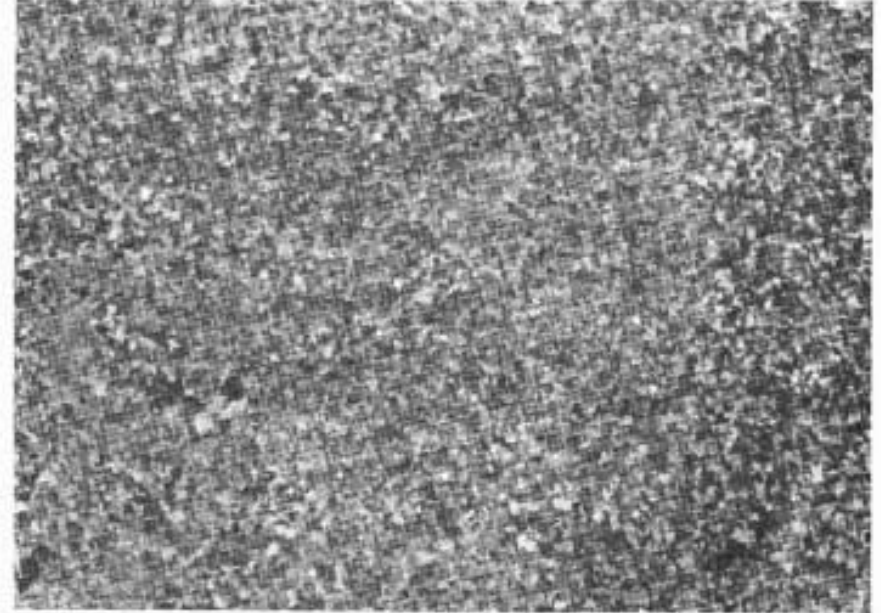
Aşılایıcının ergimiş metal bünyesinde homojen dağıtılması, kirlenmemesi ve ergimemesi halinde aşılایıcı ilavesinin verimliliğı yükselir. Ayrıca çekirdeğın büyümesi sıvının içinde bir miktar alt soğumanın olmasını gerektirir. Bu genellikle yapısal alt soğuma şeklinde olur bununla beraber katılaşmanın başlangıcında bazı ısı alt soğumalar da meydana gelebilir.

Yapısal aşırı soğuma, sıvı içerisinde düşük sıcaklık gradyanı, yüksek büyüme hızları, $k_0 < 1$ için düşük dağılım katsayıları tarafından teşvik edilir. Bu koşulları oluşturmak ve çekirdekleyicilerin verimli kullanılabilmesi için katılaşma prosesi kontrol edilmelidir.

Bir diğer yaklaşım ise heterojen çekirdeklenmenin sağlanabilmesi için kalıp duvarı kaplamalarının kullanımıdır. Bu işlemde kalıp duvarı çekirdekleyici ajan içeren bir karışımla kaplanır; bu yolla dökümün tüm kısımları çekirdekleyiciye ulaşabilmesi sağlanır.



(a)

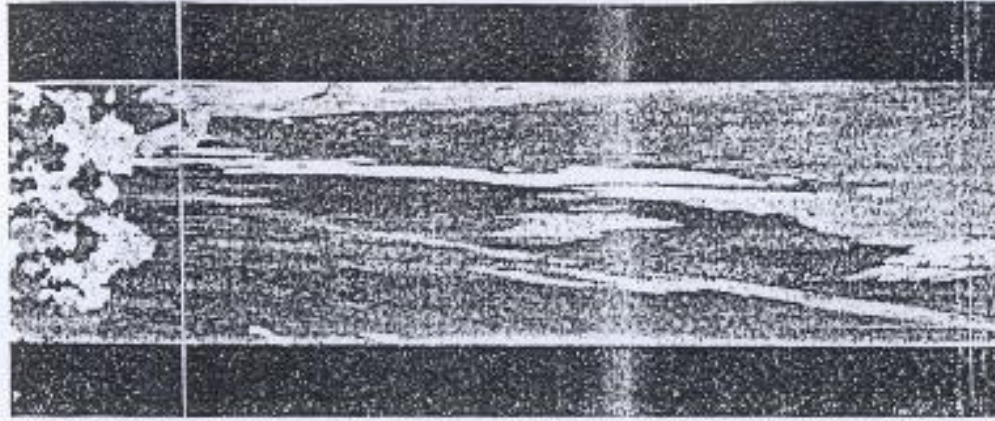


(b)

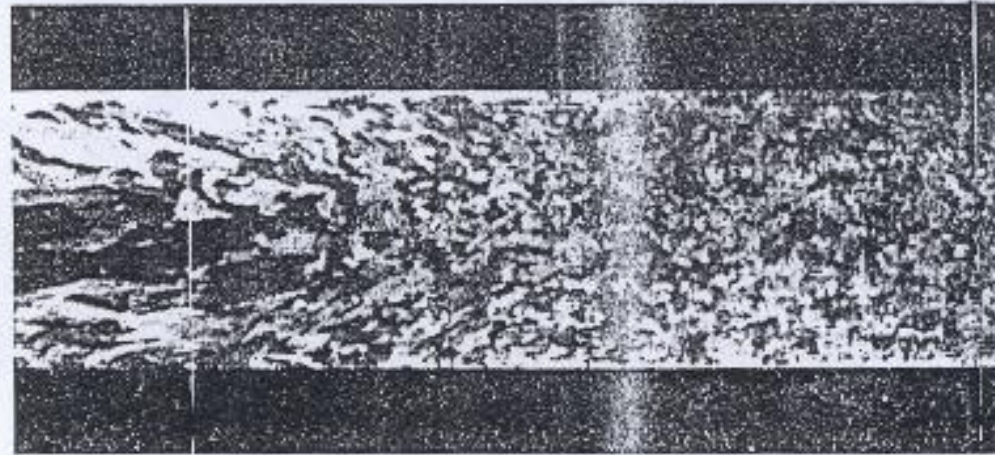
- a) %18 Cr %12 Ni içeren çelikte normal kaba tane tane yapısı
b) aynı çelikte aşılama ile tane yapısının inceltilmesi.

Dinamik tane inceltme

Büyüyen dendritlerin dinamik olarak kırılması ve eş eksenli büyümeyi sağlamak için pek çok metot kullanılmıştır. Bunların tamamı bir miktar fiziksel bozunma içerip farkları fiziksel bozunmanın miktarıdır. Mekanik karıştırma (vibrasyon, osilasyon ve rotasyon, arttırılmış doğal konveksiyon, manyetik ve elektromanyetik karıştırma, sonik ve ultrasonik vibrasyon ve gaz kabarcıklarıyla karıştırma) dinamik tane inceltme için etkili olarak kullanılmıştır. Her durumda eş eksenli tanelere yönelik çekirdek üretmenin temel mekanizması dendrit kollarının ergitilerek koparılmasıdır; bununla beraber bir kısım mekanik dendrit deformasyonu veya kırılması meydana gelebilir. Sıvı metal büyüyen dendritlerin arasında ileri geri akarken bölgesel ısı dalgalanmalar üretir. Bunlar dendritin tekrar erimesini sağlayan şartları üreten zorlanmış ısı dalgalardır. Dinamik tane inceltmesinin önemli bir avantajı, bunun oldukça karmaşık dökümlerde, kalıp bozulması oluşmaması şartıyla uygulanabilmesidir.

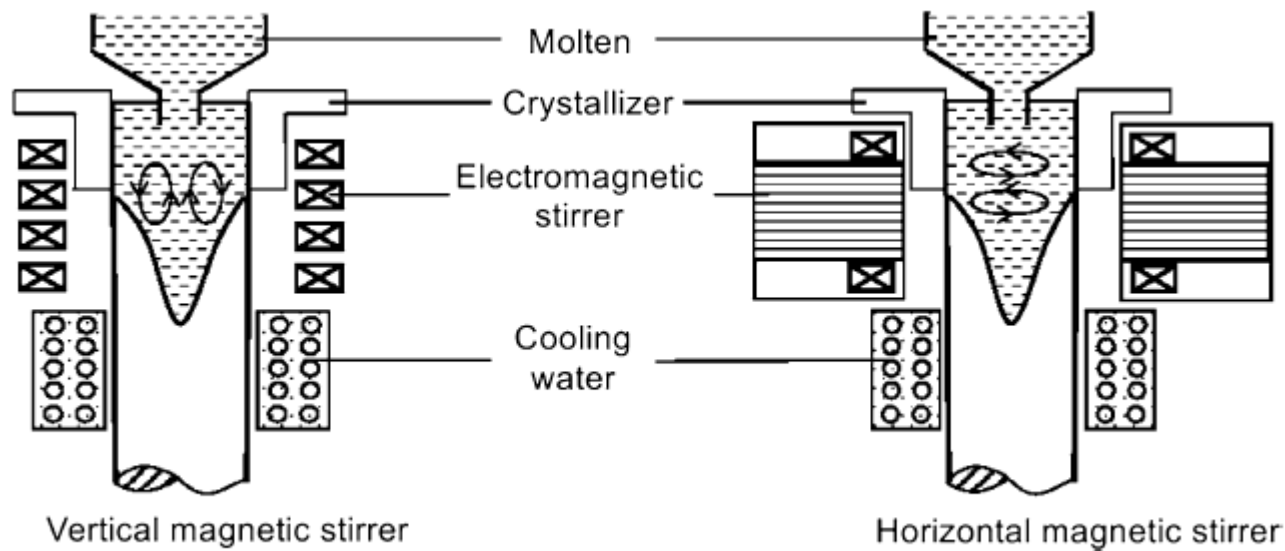


(a)

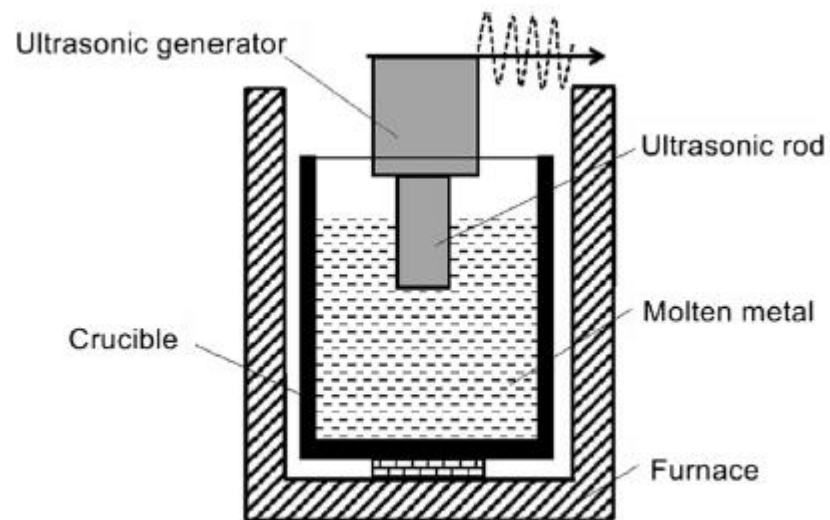


(b)

Alüminyum %4 Cu alaşımlarının makro yapıları a) karıştırmadan önce
b) karıştırmadan sonra



Schematic diagram of electromagnetic stirring



Schematic view of ultrasonic equipment

Ergitme kaynaklarının makro yapısı

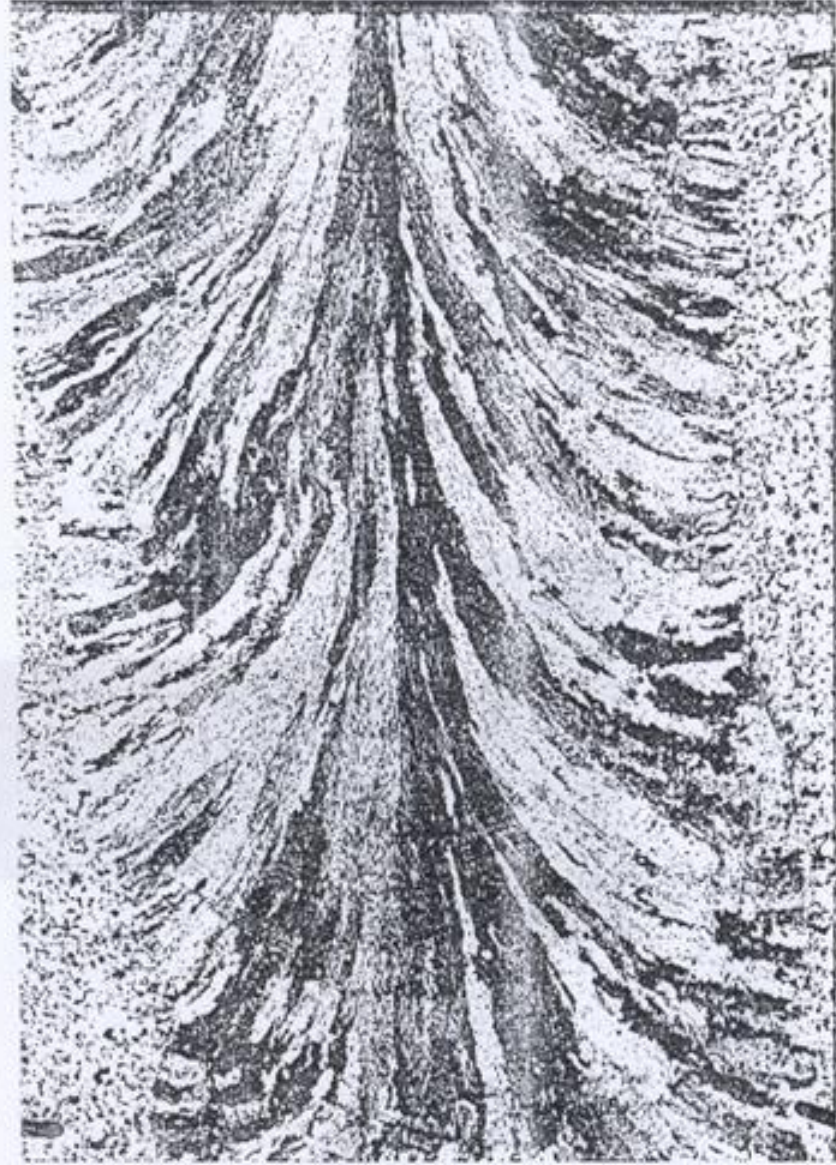
Ergitme kaynaklarının katılma mekanizmaları, normal dökümlerinki ile temelde aynıdır.

Bunlar arasındaki ana farklar:

- a) Katılma hızlarının yüksek olması,
- b) Sıvıdaki sıcaklık gradyanının dik, kaynak havuzunun ortasındaki sıcaklığın ergime sıcaklığından çok yüksek olmasıdır.

Ergitme kaynağı makro yapılarında çil bölgesinin karşılığı yoktur çünkü kısmen ergimiş taneler sınır görevi görmekte ve kolonsal büyümeyi başlatmaktadır. Bu durum ısı kaynağının uzaklaşmasından hemen sonra meydana gelir ve herhangi bir çekirdeklenme olayı gerektirmez. Taneler kolonsal formda genelde orta çizgiye doğru büyür. Normal büyüme yapıların hücrelerden dendritik hücrelere doğru değişebildiği gözlenmiş ve bazı serbest dendritik büyümelere rastlanmıştır. Kaynak havuzunda büyük bir türbülans olmasına rağmen ve bu türbülansın dinamik tane inceltici etkisi olmasına rağmen, normalde bir eş eksenli bölge gözlenmez.

Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi eş eksenli bölgenin oluşabilmesi için dendrit parçalarının (yeniden ergime veya kırılma ile elde edilmiş) ergimeden kalması gerekir. Kaynak havuzundaki çok yüksek sıcaklıklar ergimeden kalmayı zorlaştırır. Döküm yapılarının kontrolü için mevcut olan metotlar ergitme kaynaklarına da uygulanabilir; ancak pratikte bazı zorlukları vardır. Manyetik karıştırma, ultrasonik titreşim ve çekirdekleyici ile aşılama başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca gaz jetleriyle yüzey çekirdeklenmelerinin uyarılması ve ark titreşimi eş eksenli yapı oluşturmak için etkili olarak kullanılmıştır.



Örtülü ark kaynağı dikişinin kolonsal katılaşma modeli.

