

ALÜMİNYUM DÖKÜMLERİNDE TANE İNCELTME

Murat ÇOLAK, Ramazan KAYIKCI

Sakarya Üniv., Tek. Eğt. Fak., Metal Eğitimi Bölümü, Serdivan. Tel: 264 2956511, mcolak@sakarya.edu.tr,

ÖZET

Titanyum (Ti) ve bor (B) elementlerinin %0,01 gibi az bir oranda ilave edilmesi ile alüminyum alaşımlarında hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi gösterdiği uzun yıllardır bilinmektedir. Tane inceltme işlemi uygulanmış alüminyum dökümlerinde inceltme uygulanmamış olanlara göre daha iyi beslenebilirlik ve daha gözeneksiz bir yapı elde edilmektedir. Buna bağlı olarak ince taneli dökümler, düşük segregasyon dağılımı, yüksek mekanik özellikler ve sızdırmazlık direnci gibi üstün özelliklere sahiptirler. Buna karşılık tane inceltici master alaşımlarının sıvı alüminyuma ilave yöntemi ve tane inceltmeyi etkileyen faktörler ve sonuçların tekrarlanabilirliği gibi konularında farklı görüş ve uygulamalar bulunmaktadır. Bu çalışmada, literature dayalı olarak alüminyum alaşımlarında tane inceltme mekanizmaları, tane inceltmede titanyum ve bor elementlerinin etkisi ve tane inceltmenin besleme üzerine etkisi incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında titanyum ve borun birlikte katılması sonucu oluşan TiB_2 bileşiğinin iyi bir çekirdekleyici olduğu ve TiB_2 partiküllerinin sıvı alüminyum içerisinde neredeyse hiç çözünmeyerek düşük ilave oranlarında bile mükemmel tane inceltme sağladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler – Alüminyum alaşımları, Tane inceltme, Besleme.

GRAIN REFINEMENT IN ALUMINIUM CASTINGS

ABSTRACT

It is well known that by adding as little as 0.01 % titanium (Ti) and boron provide a fast and efficient grain refinement in aluminium alloys. Due to better feedability, grain refined aluminium alloys have less porosity comparing to unrefined alloys. Thus, castings made from grain refined aluminium alloys exhibit low segregation, higher mechanical properties and pressure tightness. However, there are still some discrepancies in, for example, adding master alloys into liquid aluminium, mechanisms of grain refining and the reproducibility of the refining effect from one casting to another. In the present work, relaying on the literature, mechanisms of grain refining in aluminium alloys, the effect of titanium and boron on grain refining and the effects of grain refining on the feeding behavior of castings have been studied. The survey showed that shortly after addition, titanium reacts with boron resulting in formation of compound TiB_2 which is an effective nucleus for aluminum and the TiB_2 particles are almost insoluble in the liquid alloy.

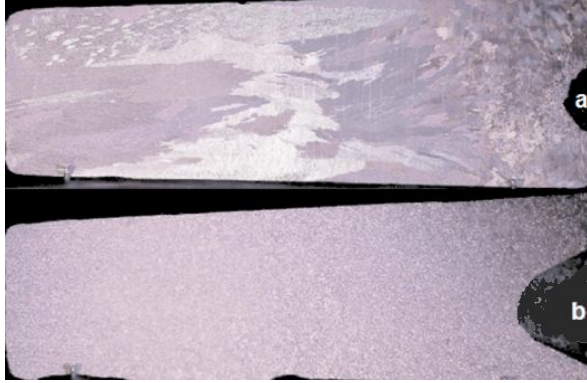
Keywords – Aluminium alloys, Grain refinement, Feeding.

I. GİRİŞ

Alüminyumda tane inceltme uygulamaları uzun yıllardır bilinmektedir. Sıvı metale bir miktar titanyum ilavesi tane yapısında önemli ölçüde küçülme sağlamakta ve

alaşımın dökülebilirliğini artırmaktadır. Tane inceltici olarak kabul gören titanyum (Ti) ve bor (B) elementleri %0,01 gibi az miktarlarda bile birlikte alüminyuma

ilave edildiğinde hızlı bir şekilde ve önemli derecede tane inceltme etkisi göstermektedir. Bu etki her hangi bir şekilde Ti ve B ilave edilmemiş ve bir miktar Ti ve B ilave edilmiş iki alüminyum külçenin kesilmesi ve yüzeylerinin parlatılmasından sonra uygun şekilde dağlanması ile ortaya çıkan tane yapısında net olarak gösterebilmektedir. Ti ve B ilavesi ile bir alüminyum alaşımının tane yapısında ortaya çıkan değişime bir örnek Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil: 1. (a) Tane inceltilmemiş, (b) Al5Ti1B bileşiminde 10 ppm bor ilave edilmiş 3004 alaşımının tane yapıları [1].

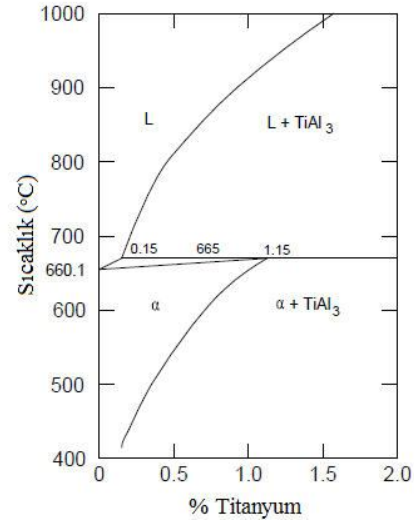
Tane inceltme özellikle, ikinci faz partiküllerinin dağılımını değiştirdiğinden döküm parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu durum Şekil 1’de gösterilen tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş yapıların karşılaştırılması ile daha net görülebilir. Şekil 1a’da görülen tane inceltilmemiş yapıda uzun kanat şeklinde alüminyum tanelerinin oluştuğu görülmektedir. Sıvı metalde bulunan veya katılaşma sırasında oluşan gevrek intermetalik bileşikler ve porozite bu iri tanelerin aralarına dizilerek bu tanelere dik gelen uzama kabiliyetini zayıflatacaktır. Şekil 1b’deki yapı ise tane inceltilmiş bir yapı olup küçük, düzenli ve eşeksiz bir tane yapısına sahiptir. Bu yüzden mekanik özellikler daha izotropiktir ve alaşım daha mukavemetlidir.

Alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltme işlemi porozite miktarını azaltmakta ve porozite boyutunu küçültmektedir. Aynı zamanda besleme kabiliyetini arttırmakta olduğundan alüminyum alaşımları çoğunlukla tane inceltme işlemine tabi tutulmaktadır [1].

2. ALÜMİNYUM DÖKÜMLERİNDE TANE İNCELTME MEKANİZMALARI

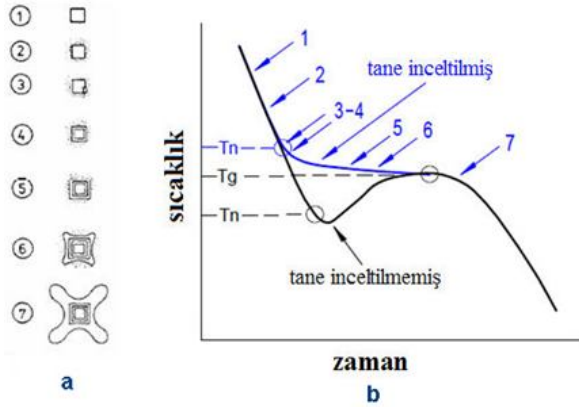
Alüminyum dökümlerinde titanyum ilavesinin tane inceltme etkisi gösterdiği 1930 lu yıllardan bu güne

bilinmektedir. Titanyumun bu etkiyi nasıl gösterdiği konusunda en yaygın görüş ise titanyumun alüminyum ile $TiAl_3$ bileşiği oluşturarak bu bileşiklerin sıvı alüminyumda heterojen çekirdeklenme noktaları oluşturduğu şeklindedir. Şekil 2’de Al-Ti Faz diyagramının alüminyumca zengin tarafı gösterilmiştir. Faz diyagramından görüldüğü gibi Ti ilavesi alüminyumun ergime derecesini $660\text{ }^\circ\text{C}$ ’dan $665\text{ }^\circ\text{C}$ ’ye yükseltmektedir. Diğer bir nokta ise alüminyum içerisinde Ti oranı $\%0,15$ ’i geçtiği anda sıvı içerisinde heterojen çekirdeklenme altlıklarını oluşturduğu var sayılan katı $TiAl_3$ bileşiklerinin oluşmasıdır. Sıvı alüminyum içinde Ti oranı lokal olarak $\%0,15$ oranını geçtiğinde katı $TiAl_3$ bileşiği kendiliğinden oluşmaktadır. Soğuma sürecinde her hangi bir aşırı soğumaya (ΔT) gerek kalmaksızın alüminyum $TiAl_3$ bileşiği üzerinde heterojen çekirdeklenme mekanizması ile çekirdeklenmekte ve ince taneli yapı kendiliğinden oluşmaktadır.



Şekil: 2. Al-Ti Faz diyagramının alüminyum tarafı [2].

Backerud[3] katı $TiAl_3$ partikülleri üzerinde alüminyumun çekirdeklenerek büyümesini ve bu yolla tane inceltme mekanizmasını Şekil 3.a’da gösterilen şema ile açıklamıştır. Sigworth ve Kuhn[1] bu şemayı Şekil 3.b’de gösterilen başka bir şematik soğuma eğrisi ile ilişkilendirerek açıklamışlardır. Buna göre, tane inceltici olarak ilave edilen titanyum içeren mastır alaşımı içerisinde çok sayıda $TiAl_3$ intermetalik bileşiği bulunmaktadır. Dökümden birkaç dakika önce tane inceltici mastır alaşımı ilave edildiğinde milyonlarca mikroskobik $TiAl_3$ partikül sıvı metal içersine dağılmaktadır.



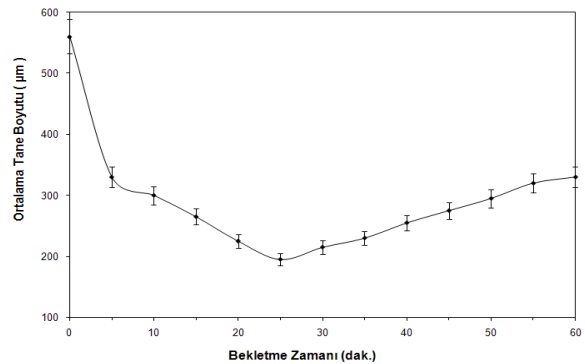
Şekil: 3. a) Alüminyumun TiAl₃ partikülleri üzerinde çekirdeklenerek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi [3], b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı alüminyumun soğuma eğrilerinin gösterimi [1].

Bunlardan bir tanesinin Şekil 3a'da şematik olarak 1 ile gösterilen parçacık olduğunu varsayabiliriz. TiAl₃ sıvı alüminyum ile temas ettikten sonra çözünmeye başlar. Bunun sonucu partikül çevresinde partikül ile temas eden alüminyum titanyumca zenginleşmeye başlayacaktır. Bu olay Şekil 3.a'da 2 no lu skeç ile temsil edilmektedir. Bu anda Şekil 2'de verilen faz diyagramından görüleceği gibi ilk önce partikül etrafında titanyumca zengin sıvı ana metale göre daha yüksek likidüs sıcaklığına sahip olması nedeni ile katılaşmaya başlayacaktır. Böylece Şekil 3.a'da 3 nolu skeç ile gösterildiği gibi partikül yüzeylerinde ilk katı çekirdeklenme başlamış olacaktır. Aynı şekilde 4 ve 5 ile işaretlenen skeçlerde gösterildiği gibi partikül etrafındaki çözülmüş titanyumca zengin alüminyum tüketerek büyümeye devam edecek ve büyüme bu sıvı tükenince duracaktır. Metal soğumaya devam ederken bu kez çekirdekler etrafında dendritik büyüme başlayacak ve 6-7 de gösterildiği gibi devam edecektir.

Şekil 3.b ayrıca TiAl₃ partiküllerinin tane inceltme etkisini soğuma eğrisine yansıtması açısından da önemlidir. Tane inceltici ilave edilmemiş bir dökümün soğuma eğrisi incelendiğinde çekirdekleşmenin kendiliğinden oluşabilmesi için sıvının T_g (büyüme) sıcaklığı altında bir T_n (çekirdekleşme) sıcaklığına kadar birkaç derecelik alt soğuma gerçekleştirmesi gerekmektedir. Buna karşılık mavi çizgi ile görüntülen tane inceltici ilave edilmiş bir dökümün soğuma eğrisi ise T_g sıcaklığının hemen üzerinde 3-4 noktalarında alüminyumun çekirdeklenebildiğini göstermektedir. Buna göre basit bir termal analiz yöntemi ile bir alüminyum dökümünde etkili bir tane inceltme gerçekleşip gerçekleşmediği kolayca anlaşılabilir.

Titanyumun alüminyumda tane inceltme etkisini teyid eden diğer bir faktör ise bazı araştırmacıların [4] alüminyum tane merkezlerinde titanyumca zengin bölgelerin varlığını göstermiş olmasıdır. Bununla birlikte titanyum ile tane inceltmede dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli nokta titanyumun alüminyum içerisinde çözünübelmesidir. Genellikle dökümhane uygulamalarında Ti ilave oranı 100 ppm (% 0,01 Ti) oranı civarındadır. Bu oranda Ti ticari saflıkta bir alüminyuma ilave edildiğinde TiAl₃ kümeleşmeleri faz diyagramında da görülebileceği gibi belirli bir süre içerisinde tamamen çözünerek tane inceltme etkisini kaybedecektir. Bu olay uzun bekleme süreleri ile dökülen tane inceltici ilave edilmiş alüminyum alaşımlarında tane inceltme etkisinin zamanla azalarak yok olmasına neden olmaktadır.

Tane inceltici ilavesinin etkisinin ETİAL 160 alaşımının dökümünde zamanla değişimi üzerine yapılan bir çalışmada; hem hurda hemde primer alaşımın dökümünde bekleme süresinin tane boyutunu etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Şekil 4'te verilen grafikten görüldüğü gibi tane boyutunun TiB ilavesinden sonra yaklaşık 25 dakika içinde minimum seviyelerine kadar azaldığı ve daha sonra zaman artışıyla ölçülen tane boyutunun da arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebinin ise; tane inceltici ilavesiyle alaşım içerisinde oluşan TiB₂ ve özellikle TiAl₃ gibi intermetalik bileşiklerin zamanla çözünmeye başlaması veya birbiriyle birleşerek büyümesi olarak görülmektedir[5].

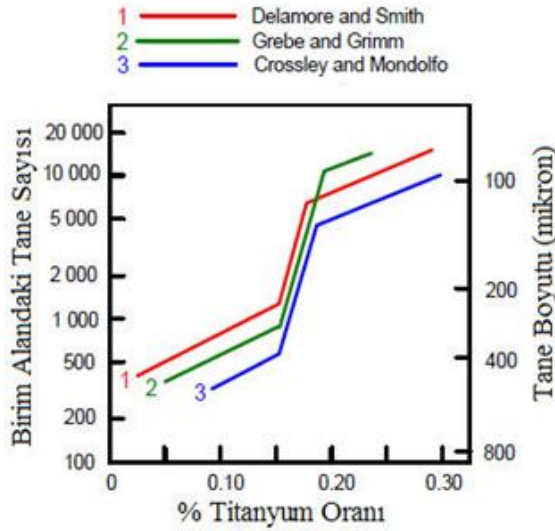


Şekil: 4. ETİAL 160 primer alaşımına katılan Al5Ti1B master alaşımının bekleme zamanına göre tane boyutu değişimi [5].

Tane inceltici Ti içeren master alaşımlarının tane inceltme etkilerinin zayıflama süreleri bir çok faktöre bağlıdır. Bunlardan en önemlisi master alaşımı içerisinde bulunan TiAl₃ partiküllerinin boyut dağılımıdır. Daha büyük boyuta sahip TiAl₃ partikülleri içeren master alaşımlarında tane incelticilerde etki geç başlamakta ve geç bitmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak

günümüz modern dökümhane uygulamalarında benimsenen yaklaşıma göre ilave Ti oranının genel alüminyuma oranı en az % 0,15 olacak şekilde yapılmasıdır. Aksi takdirde mastır alaşımı çok hızlı bir şekilde tane inceltme etkisini kaybedecektir.

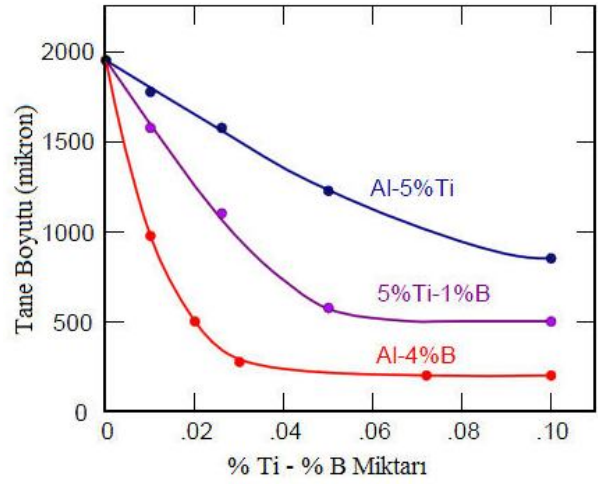
Bu konuda Cole ve arkadaşları [6] tarafından bir araya getirilen üç farklı çalışmadan alınan sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5'te verilen deneysel sonuçlardan % 0,15 ten daha az oranlarda Ti ilavesi ile düzgün bir tane inceltmenin mümkün olmadığı ve tutarlı bir tane inceltme yapılabilmesi için Ti oranının mutlaka % 0,15'in üzerinde bir değerde olması gerektiği görülmektedir. Bu değer aynı zamanda sıvı alüminyum içinde çözünebilen maksimum titanyum sınırındır.



Şekil 5. % 99,7 safiyette alüminyumda titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları [6].

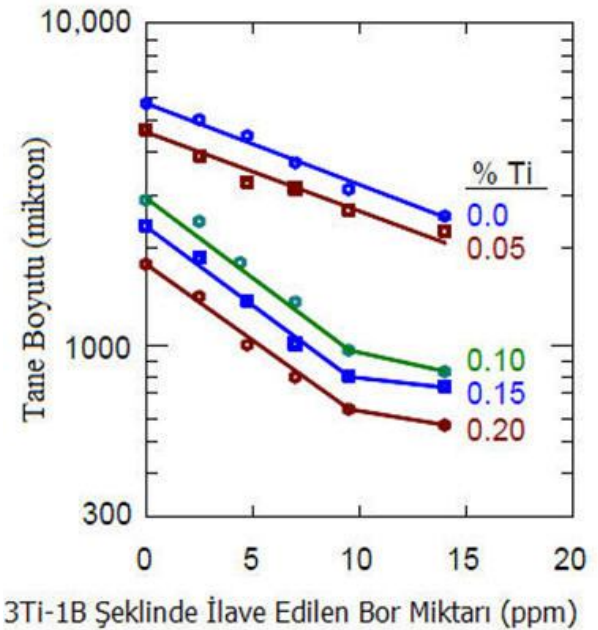
3. ALÜMİNYUMDA TANE İNCELTMEDE BORUN ETKİSİ

Lu, Wang ve Kung[7] tarafından ötektik altı bir Al-Si alaşımı olan A356 alaşımında üç farklı tane inceltici mastır alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmasına ait bir sonuç Şekil 6'da verilmiştir. Bunlar Al-%5Ti, Al-%5Ti-%1B ve Al-%4B alaşımalarıdır. Şekil 6'da borun tane inceltici olarak titanyumdan daha etkili olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışmada Sigworth ve Guzowski [8] AlB₂ partikülleri içeren Al-B mastır alaşımının çok daha mükemmel tane inceltme etkisi gösterdiğini rapor etmişlerdir.



Şekil 6. A356 alüminyum alaşımında üç farklı mastır alaşımı ile tane inceltme sonuçları [7].

Pasciak ve Sigworth[9] tarafından A 319 alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmalarından alınan diğer bir sonuç Şekil 7'de gösterilmiştir. Buna göre tane inceltici olarak bor miktarı artırılrsa bile titanyum ilave etmeksizin etkili bir tane inceltme yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir.

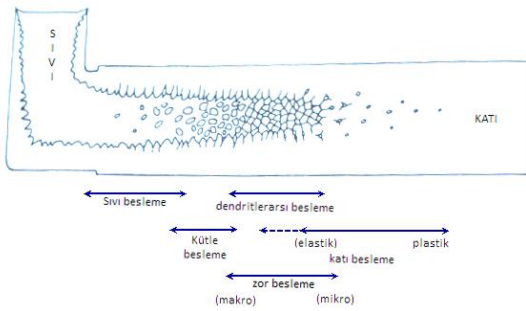


Şekil 7. Alüminyum 319 alaşımında tane inceltme sonuçları [9].

4. DÖKÜMLERDE BESLEME MEKANİZMALARI

Birkaç metal ve alaşım hariç metal ve alaşımların neredeyse tamamı katılaşıma sırasında negatif hacim değişimine uğramaktadır. Bakır ve alüminyum temelli alaşımlarda termal iletkenliğin yüksek olması düşük termal gradyana neden olmakta ve özellikle geniş sıvı-katı aralığına sahip alaşımlarda katı bir kabuk oluşumu gecikmektedir. Bu gibi alaşımlarda döküm neredeyse katılaşımanın sonuna kadar sıvı ve sıvı içerisinde oluşmuş olan katı dendritlerin bir arada bulunduğu yarı katı (maşi) durumunda soğumaktadır. Bu gibi alaşımlarda porozite veya yüzey çökmesi gibi kusurlardan arındırılmış bir döküm istenmesi halinde sıvının beslenmesi tamamen bu yarı katı ortamda dendritler arasından sağlanmak zorundadır [10,11].

Belirli bir sıcaklık gradyanı ile katılaşılan saf alüminyum katı – sıvı arayüzeyi düzlemsel bir şekilde ilerleyerek katılaşımaktadır. Bu gibi bir katılaşımda katı-sıvı ara yüzündeki sıvı doğrudan sıvı besleme ile beslenebilir. Buna karşılık alüminyuma alaşım elementi ilave edildiğinde katılaşıma genellikle belirli bir aralıktaki gerçekleşmekte ve katı-sıvı ara yüzeyi dendritlik karakteristiğe bürünmektedir. Dendritlik karakterli katı-sıvı aralığı (maşi bölgesi) soğuma gradyanına bağlı olarak genişlemekte ve neredeyse bazen dökümün tamamını kaplayabilmektedir[12]. Geniş katılaşıma aralığına sahip alaşımlarda sıkça görülen karakteristik besleme mekanizmaları Campbell[13] tarafından açıklanmıştır. Buna göre Şekil 8’de şematik olarak gösterilen katılaşılan bir dökümde beş besleme mekanizması aşağıda Campbell’den alınarak özetlenmiştir.



Şekil: 8. Katılaşılan bir dökümde beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi [13].

4.1. Sıvı besleme

Sıvı besleme en açık ve en kolay olan besleme mekanizmasıdır ve genellikle diğer besleme mekanizmaları sıvı beslemeyi takip eder. Bu mekanizması kabuk yaparak katılaşılan veya ötektik katılaşılan ortamlarda tek besleme mekanizmasıdır. Sıvı besleme mekanizması iyi araştırılmış ve diğer besleme mekanizmalarına göre en iyi anlaşılmuş bir besleme mekanizmasıdır[14].

4.2. Kütle besleme

Kütle besleme terimi sıvı ile birlikte bir miktar katı kütlenin de besleme sıvısı ile birlikte hareket ederek interdendritik bölgede besleme yapmasıdır. Çekirdeklenme sıcaklığının altına düşmesi ile sıvı içerisinde katı dendritler çekirdeklenerek büyümeye başladığı sırada etraftan akan sıvı ile birlikte beslenen bölgeye hareket eder.

4.3. İnterdendritik besleme

Katı kristaller genellikle dendritik formda büyümeye devam ederken sıvı ile birlikte besleme bölgesine hareket etmeye devam ederler. Bu iki fazlı akış bulamaç (slurry) olarak tanımlanabilir ve katı dendritlerin iyice büyümesi ile besleme kanalını katı ve sağlam bir ağ ile tamamen kapatmasına kadar besleme aktivitesine katkıda bulunurlar. Dendrit blokajı tabir edilen kritik bir katı oranına erişildiğinde dendritler bir birine tutunarak rijit bir ağ oluşturur. Bu noktaya ulaşıldığında dendrit blokajı daha fazla kütle beslemeye izin vermez. Bunun yerine beslenmesi gereken sıvı katılaşıma çekmesini hala telafi edebilmek için dendrit örgüsü aralarından sızarak besleme aktivitesine bir süre daha devam eder. Düşük katı oranlarında dendrit örgüsünün geçirgenliği henüz yüksek olduğundan sıvı sızıntısına tamamen karşı koyamaz.

4.4. Zor besleme

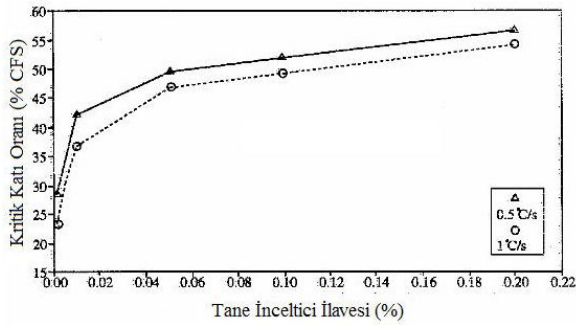
Katı oranı giderek artarken dendrit örgüsü de giderek güçlenmektedir, ancak geçirgenlikte azalmaktadır. Bu noktada dendrit örgüsü daha fazla artan besleme sıvısı basıncına ve zorlamasına dayanamamakta ve sıvı dendrit örgüsünü kırarak zorlamalı olarak bir süre daha besleme bölgesine sızmaya devam etmektedir. Campbell[13] bu noktada kritik katı oranının %68 civarında olduğunu bildirmiştir. Ancak, alaşımın türü, tane boyutu ve döküm şartları bu oran üzerinde önemli etkilere sahiptir.

4.5. Katı besleme

Büyüyen katı oranı ile birlikte dendrit örgüsü arasından sıvı geçirgenliği giderek azalırken dendritler üzerindeki gerilmede giderek artmaktadır. Artan gerilme ile bazen dendrit örgüsü dağılmakta ve katı dendrit parçaları bir miktar sıvı beraberinde besleme bölgesine taşınabilmektedir. Katı besleme terimi besleme işleminin henüz katılaşmış ve yeterince güçlenmemiş katının deformasyonu ile oluşan bir beslemedir. Bununla birlikte besleme işleminin katı besleme mekanizmasına gerek duyulmadan diğer besleme mekanizmalarından birisi ile gerçekleşmesi daha istenen bir durumdur. Hatasız bir dökümün üretilebilmesi için katılaşma sırasında yeterli miktarda sıvı metalin sağlanabilmesi zorunludur. Eğer besleme metali yetersiz kalırsa dökümde makro ve mikroporozite, yüzey çökmesi gibi bir çok kusur oluşabilir.

5. TANE İNCELTMENİN BESLEME ÜZERİNE ETKİSİ

Tane inceltmiş dökümlerde maşi bölgesi boyunca beslenebilirliğin arttığı bilinmektedir[10]. Chai[11], yavaş hızda dönerek soğuyan silindirik bir dökümün içine yerleştirdiği kanat ile katılaşma sürecinde büyüyen dendritlerin kanata uyguladığı yükteki değişimi ölçmüştür. Al-%4 Cu alaşımı ile yapılan bu ölçümlerin sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi tane inceltici ilavesine bağlı olarak dendrit blokajı (dendrite coherency) gecikmektedir. Tane inceltilmemiş bir dökümde dendrit blokajı yaklaşık %25 katı oranı seviyesinde iken %0,20 oranında tane inceltici ilave edilmiş dökümde bu oran %50 seviyesine çıkmaktadır. Şekil 9'de ayrıca soğuma hızının da dendrit blokajı üzerinde bir miktar etkisinin olduğu görülmektedir. Soğuma hızı 0,5 °C/s' den 1 °C/s' ye çıktığında dendrit blokajı bir miktar erken başlamaktadır[11].



Şekil: 9. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin dendrit blokajına etkisi [11].

Tane inceltmenin beslenebilirlik üzerine etkisinin incelendiği farklı bir çalışmada; ETİAL160 alüminyum döküm alaşımı ile yapılan kum dökümlerde besleme

etkinliğinin tane boyutunun küçülmesi ile arttığını ve buna bağlı olarak makro porozite oluşumunun azaldığını göstermiştir. İyi derecede tane inceltmiş bir dökümde dendrit blokajı sınırını belirleyen kritik katı oranı (CFS) %50 iken bu oran tane inceltilmemiş bir dökümde %35 olarak ölçülmüştür[15].

6. SONUÇLAR

Sıvı metale bir miktar titanyum ve bor ilavesi tane yapısında önemli ölçüde küçülme sağlamakta ve alaşımın dökülebilirliğini artırmaktadır. Fakat tane inceltme mekanizmasında literatürde çelişkili çalışmalar bulunmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalardan en yaygın kabul gören sonuçları toparlayarak titanyum ve borun tane inceltme etkisi aşağıdaki şekilde özetlemiştir;

TiAl₃ zayıf bir çekirdekleyicidir. Aynı zamanda TiAl₃ kristalleri alüminyum içinde yüksek oranda çözünürliğe sahiptir. Bu iki nedenle sadece titanyumla inceltme yapıldığında çok ince tane elde etmek için oldukça fazla miktarda titanyum ilavesi gerekmektedir.

TiB₂ partikülleri mükemmel çekirdekleyicilerdir. TiB₂ sıvı alüminyumda neredeyse hiç çözünmemektedir. Bu nedenle TiB₂ partikülleri düşük ilave oranlarında bile mükemmel tane inceltme sağlamaktadır. TiB₂ partiküllerinin sıvı Al içinde katı kalmaları daha uzun bekletme süreleri için inceltme etkisinin devam etmesini sağlamaktadır.

AlB₂ alüminyumda en mükemmel çekirdekleme yeteneği olan bileşiktir. Ancak alüminyumda hızlı bir şekilde çözünüyor olması tane inceltme etkisini zayıflatmaktadır. Alüminyumda serbest kalan bor titanyum ve stronsiyum ile reaksiyona girerek bileşikler oluşturmakta ve uzun dönemde bekletme fırınlarında toplanmalara neden olmaktadır. Bu yüzden çekirdekleme potansiyeli olmasına rağmen AlB₂ tek başına tane inceltici olarak kullanılamamaktadır.

7. KAYNAKLAR

- 1- SIGWORTH,G.K., KUHN,T. A., Refinement of Aluminium Casting Alloys, AFS Transactions, Vol.115, pp.1-12, 2007.
- 2- SIGWORTH, G. K., The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System, Metallurgical Transactions, Vol. 15A, pp. 277-282, 1984.

- 3- BACKERUD, L., How Does a Good Grain Refiner Work?, Light Metal Age, pp. 6-12, 1983.
- 4- EASTON, M. A., STJOHN, D. H., The Partitioning of Titanium During Solidification of Aluminum Alloys, Mater. Sci.Technol., Vol. 16(9), pp. 993-1000, 2000.
- 5- ÇOLAK, M., KAYIKCI, R., AlTiB Mastır Alaşımı İlavesinin Etial160 Döküm Alaşımı Üzerinde Tane İnceltme Etkisinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009.
- 6- COLE, G.S., CISSÉ, J., KERR, H.W., BOLLING, G.F., Grain Refinement in Aluminum and Aluminum Alloys, AFS Trans, Vol.80, pp. 211-218, 1972.
- 7- LU, H. T., WANG, L. C., KUNG, S. K., Grain Refining in A356 Alloys, J. Chinese Foundrymen's Association, Vol. 29, pp. 10-18, 1981.
- 8- SIGWORTH, G.K., GUZOWSKI, M. M., Grain refining of Hypo-eutectic Al-Si Alloys, AFS Transactions, Vol 93, pp. 907-12, 1985.
- 9- PASCIAK, K., SIGWORTH, G.K., Role of Alloy Composition in Grain Refining of 319 Alloy, AFS Transactions, Vol. 109, pp. 567-577, 2001.
- 10- Metals Handbook, Vol.15. casting, Ed. ASM International Handbook Committee, 743-770, Metals Park, OH, ASM International, 1989.
- 11- GIOCAI, C., Dendrite Coherency During Equiaxed Solidification in Aluminum Alloys, Chemical Communications, Stockholm University, 83 pages, 1994.
- 12- DASH, M., MAKHLOUF, M., Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminum-silicon casting alloys, Journal of Light Metals, 1 pp. 251-265, 2001.
- 13- CAMPBELL, J., Casting, Heinemann Ltd, Oxford, 1991.
- 14- CAMPBELL, J., Feeding mechanisms in casting, AFS Cast Metals, Research Journal 5, pp.1-8, 1969.
- 15- KAYIKCI, R., ÇOLAK, M., Kuma Dökülen Etial160 Alüminyum Alaşımında Tane İnceltmenin Beslenebilirlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009.