

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE KRİTİK KATI ORANI
FAKTÖRÜNÜN KALIP SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK
MODELLENMESİ**

Akif Kemal KISAOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MART 2011
ANKARA**

Akif Kemal KISAOĞLU tarafından hazırlanan “ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE KRİTİK KATI ORANI FAKTÖRÜNÜN KALIP SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK MODELLENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hacı Mehmet ŞAHİN
Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Kadir KOCATEPE
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 04/03/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Akif Kemal KISAOĞLU

**ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ DÖKÜMÜNDE KRİTİK KATI ORANI
FAKTÖRÜNÜN KALIP SICAKLIĞINA BAĞLI OLARAK MODELLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Akif Kemal KISAOĞLU

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Mart 2011

ÖZET

Bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak döküm proseslerinin modellenmesi döküm mikro ve makro boşlukların önemli ölçüde tahmin edilebilmesini sağlamaktadır. Bu teknolojik gelişmeler ile dökümlerde yolluk ve besleyici tasarımı yapılabilmekte ve döküm parçada oluşacak mikro ve makro boşluk bölgeleri kolayca tahmin edilebilmektedir. Bununla birlikte döküm hataları bilgisayar destekli döküm tasarımı ile döküm parametrelerinin sadece doğru tanımlanması ile tahmin edilebilmektedir. Bu parametrelerin en önemlilerinden biri katı-sıvı bölgesinde besleme sıvısının akıcılığını engelleyen katı dentritlerce oluşturulan direncin tanımlanmasıdır. Katı-sıvı aralığında sıvı akış kanalları tıkanıp anda dentritler arası besleme bölgesinde besleme durmaktadır. Bu olay dentrit blokajı olarak bilinmekte ve kritik katı oranı (KKO) olarak tanımlanmaktadır. Bilgisayar destekli döküm modellemelerinde bu oranın doğru olarak verilmesi gerçek döküm üretim şartlarının simüle edilmesi için gereklidir.

Bu çalışmanın temel amacı KKO değerinin tane inceltme işlemi ve farklı kalıp sıcaklıklarına bağlı olarak modellenmesidir. Yapılan modellemelerden elde edilen sonuçlar ile gerçek dökümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda:

1. Tane inceltmesiz dökümlerde 100°C, 155°C ve 210°C kalıp sıcaklıkları sırasıyla 2,30 cm³, 1,46 cm³ ve 1,16 cm³ makro çekme boşluğu üretmiştir. Bu boşluklar için sırasıyla %30, %40 ve %55 KKO değerleri tespit edilmiştir.
2. Tane inceltmeli dökümlerde 100°C, 155°C ve 210°C kalıp sıcaklıkları sırasıyla 1,70 cm³, 1,25 cm³ ve 0,94 cm³ makro çekme boşluğu üretmiştir. Bu boşluklar için sırasıyla %45, %52 ve %65 KKO değerleri tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 710.3.011
Anahtar Kelimeler : Modelleme, Bilgisayar destekli döküm tasarımı, Kritik katı oranı, Katılaşma, Tane inceltme
Sayfa Adedi : 84
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR

**MODELLING OF CRITICAL SOLID FRACTION FACTOR DEPENDING
ON MOLD TEMPERATURE IN ALUMINIUM ALLOY CASTINGS**

(M.Sc. Thesis)

Akif Kemal KISAOĞLU

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

March 2011

ABSTRACT

Depending on the rapid developments in computer technology, modeling of casting processes provides a significant prediction for micro and macro porosity of casting. With these technological developments, gating and feeder design of the casting can be made, and micro and macro porosity regions in the casting can be estimated easily. However, casting defects with computer-aided casting design are correctly estimated providing that casting parameters are only properly defined. One of the most important of these parameters is the identification of resistance which is generated solid dendrites against fluidity of the feed liquid at solid-liquid zone. Feeding stops at the interdendritic feeding zone when liquid flow channels in the solid-liquid region are blocked. This event is known as dendrite blockade which is defined as critical fraction of solid (CFS). In computer-aided modeling for metal casting, the value of CFS must be defined correctly to simulate the production of casting.

The main purpose of this study is to determine the value of CFS depends on the grain refining, and different mold temperatures. The results of computer simulation are compared with results obtained from the actual castings. It is concluded that following:

1. In the non grain refined casting, 100°C, 155°C, and 210°C mold temperatures produced 2,30 cm³, 1,46 cm³, and 1,16 cm³ macro shrinkage cavities respectively. 30%, 40%, and 55% CFS values respectively for those cavities were determined.
2. In the grain refined casting, 100°C, 155°C, and 210°C mold temperatures produced 1,70 cm³, 1,25 cm³, and 0,94 cm³ macro shrinkage cavities respectively. 45%, 52%, and 65% CFS values respectively for those cavities were determined.

Science Code : 710.3.011
Key Words : Modeling, Computer-aided design of castings, Critical Solid Fraction, Solidification, Grain Refinement
Page Number : 84
Adviser : Assist. Prof. Dr. Neşet AKAR

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca bilgileri, deneyimleri, değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Neşet AKAR' a, Metal Eğitimi Bölümünde çalışan akademik ve teknik personele, hayatımın her aőamasında desteklerini eksik etmeyen aileme, ve çalıőmalarım boyunca emeği geçen herkese teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Alüminyum ve Alüminyum Döküm Alaşımları	4
2.1.1. Al-Cu döküm alaşımları	6
2.2. Alüminyum Dökümcülüğünde Tane İnceltme	7
2.2.1. Tane incelticiler	8
2.2.2. Tane inceltici miktarları.....	9
2.2.3. Tane inceltme işleminin soğuma eğrisine etkisi.....	12
2.3. Tane İnceltme Mekanizmaları.....	14
2.3.1. Çekirdeklenme teorileri.....	14
2.3.2. Çözünen teorisi	19
2.4. Alüminyum Alaşımlarında Gaz Giderme	20
2.4.1. Alüminyum alaşımlarında gazlar	20

	Sayfa
2.4.2. Katılma boyunca hidrojenin davranışı.....	21
2.4.3. Alüminyum alaşımlarının dökümünde gaz giderme yöntemleri.....	22
2.5. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları	24
2.5.1. Sıvı besleme.....	25
2.5.2. Kütle besleme.....	26
2.5.3. Dentritler arası besleme	26
2.5.4. Zor besleme (Burst feeding).....	26
2.5.5. Katı besleme	27
2.6. Tane inceltmenin besleme üzerine etkisi	27
2.7. Döküm Simülasyonu.....	29
2.7.1. Döküm simülasyonlarında tanımlanan parametreler	30
2.7.2. Döküm simülasyonlarıyla belirlenebilen özellikler.....	31
2.7.3. Kritik katı oranı veya kritik sıvı oranı.....	32
3. MATERYAL VE METOT	35
3.1. Döküm Alaşımı	35
3.2. Ergitme ve Döküm İşlemi.....	35
3.3. RPT Testi.....	36
3.4. Tane İnceltme Deneyleri	37
3.5. Metalografik İnceleme.....	39
3.6. Döküm Parça Geometrisi.....	41
3.7. Döküm Kalıbı	42
3.8. Yoğunluk Hesapları ve Boşluk Hacim Ölçümleri.....	43

	Sayfa
3.9. Simülasyon Şartları.....	46
3.9.1. Döküm-Kalıp geometrisinin ve malzeme özelliklerinin simülasyon programına girilmesi	47
3.9.2. Simülasyon parçasının dolum analizi ve katılaşması	50
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	53
4.1. Al-%4,3Cu Alaşımının Zaman-Sıcaklık (Soğuma) Eğrilerinin Karşılaştırması	53
4.2. RPT Sonuçları	55
4.3. Tane İnceltme Deney Sonuçları.....	57
4.4. Döküm ve Simülasyon Sonuçları	65
4.4.1. Döküm sonuçları	65
4.4.2. Simülasyon sonuçları	68
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
5.1. Sonuçlar.....	75
5.2. Öneriler	76
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Sıcaklık ile bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü.	6
Çizelge 2.2. Alüminyum ve alaşımlarında hidrojen çözünürlüğü	21
Çizelge 2.3. Niyama katsayısı sınır değerleri	32
Çizelge 2.4. Bazı alaşım grupları için tavsiye edilen KKO ve niyama değerleri.....	34
Çizelge 3.1. Al-%4,3Cu (ETİAL-220) döküm alaşımının kimyasal kompozisyonu.....	35
Çizelge 3.2.RPT deney şartları	37
Çizelge 3.3.Elektroliz karışım oranları	40
Çizelge 3.4.Simülasyonda kullanılan katsayılar ve döküm parametreleri	48
Çizelge 4.1. RPT numunelerinin yoğunluk ölçüm sonuçları	55
Çizelge 4.2. Bekleme süresine bağlı ortalama tane boyutu	63
Çizelge 4.3. Döküm parça çekme boşluğu hacimleri ve yoğunlukları	67
Çizelge 4.4.Kalıp sıcaklığına ve tane inceltme işlemine bağlı olarak KKO değerinin değişimi	69

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Al-Cu denge diyagramı	6
Şekil 2.2. Döküm ingot yapısının şematik gösterimi	7
Şekil 2.3. % 99,7 saflıktaki alüminyuma titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları	10
Şekil 2.4. A356 alüminyum alaşımında üç farklı mastır alaşımı ile tane inceltme sonuçları	11
Şekil 2.5. A319 alüminyum alaşımında tane inceltme sonuçları	12
Şekil 2.6. a) Alüminyumun $TiAl_3$ partikülleri üzerinde çekirdeklenerek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi, b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı Al'un soğuma eğrilerinin gösterimi.....	13
Şekil 2.7. Al-Ti faz diyagramının alüminyum tarafı.....	16
Şekil 2.8. Peritektik hulk teorisi modeli	17
Şekil 2.9. Hiper çekirdeklenme teorisi modeli	18
Şekil 2.10. Birim hacimdeki parçacık sayısı (N_V^P) ile birim hacimdeki tanelerin (N_V^G) sayısının değişimi.....	19
Şekil 2.11. Alüminyumda hidrojen çözünürlüğü	20
Şekil 2.12. Katılaştan bir Al alaşımında beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi	25
Şekil 2.13. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin %KKO'ya etkisi	28
Şekil 2.14. Tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda Al-8Si alaşımının dentritler arası boşluk hacmi.....	28
Şekil 2.15. Tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda Al-20Cu alaşımının dentritler arası boşluk hacmi.....	29
Şekil 2.16. Belirli bir alaşımın soğuma eğrisi üzerinde KKO noktasının gösterimi	33

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. Kritik katı oranına ulaşan metalin beslemesinin kesilmesi	34
Şekil 3.1. ALCAN standart tane inceltme deney düzeneğinin şematik gösterimi	38
Şekil 3.2. Tane inceltme deney numunesi ölçüleri ve inceleme yüzeyi.....	39
Şekil 3.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan döküm parça geometrisi	42
Şekil 3.4. Döküm parçanın boşluk hacmi ve yoğunluk ölçüm bölgeleri.....	45
Şekil 3.5. SOLIDCast programından makro boşluk koordinatlarının belirlenmesi.....	46
Şekil 3.6. Katı model programında çizilen boşluk	47
Şekil 3.7. Döküm parçanın üretildiği çelik kalıbın katı model görünümü	48
Şekil 3.8. Al-%4,3Cu için girilen soğuma eğrisi ve çekme eğrisi.....	49
Şekil 3.9. Sonlu farklar çözüm ağı görüntüsü	50
Şekil 3.10. FLOWCast modülünde kalıp dolum aşaması.....	51
Şekil 3.11. Katılaşma simülasyonu aşamaları a) %1 katılaşma, b) %25 katılaşma	52
Şekil 4.1. Al-%4,3Cu alaşımının tane inceltmesiz ve tane inceltmeli soğuma eğrileri	53
Şekil 4.2. Homojen ve heterojen çekirdeklenmede oluşan katı serbest enerji değişimi	54
Şekil 4.3. %0,008-%0,01-%0,02-%0,03 Ti oranlarında tane boyu-zaman grafiği	63
Şekil 4.4. Değişik tane inceltici tipleri için tane boyutu değişimi.....	64
Şekil 4.5. 100°C kalıp sıcaklığında döküm parçada meydana gelen makro çekme boşluklarının görünümü; a) Tane inceltme işlemi uygulanmış ve b) Tane inceltme işlemi uygulanmamış.....	66

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. 155°C kalıp sıcaklığında döküm parçada meydana gelen makro çekme boşluklarının görünümü; a) Tane inceltme işlemi uygulanmış ve b) Tane inceltme işlemi uygulanmamış.....	66
Şekil 4.7. 210°C kalıp sıcaklığında döküm parçada meydana gelen makro çekme boşluklarının görünümü; a) Tane inceltme işlemi uygulanmış ve b) Tane inceltme işlemi uygulanmamış.....	67
Şekil 4.8. Çekme boşluğu hacminin kalıp sıcaklığına bağlı olarak değişimi.....	70
Şekil 4.9. KKO değerinin kalıp sıcaklığına bağlı olarak değişimi	70
Şekil 4.10. 100°C kalıp sıcaklığında tane inceltmesiz ve KKO %30 değerine göre çekme boşluğu hacmi	71
Şekil 4.11. 100°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %45 değerine göre çekme boşluğu hacmi	72
Şekil 4.12. 155°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %40 değerine göre çekme boşluğu hacmi	72
Şekil 4.13. 155°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %52 değerine göre çekme boşluğu hacmi	73
Şekil 4.14. 210°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %55 değerine göre çekme boşluğu hacmi	73
Şekil 4.15. 210°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %65 değerine göre çekme boşluğu hacmi	74

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan elektrik rezistanslı ergitme ocağı	36
Resim 3.2. Tane inceltme deney numuneleri	38
Resim 3.3. Elektrolitik parlatma cihazı	40
Resim 3.4. Mikroyapıların görüntülenmesinde kullanılan optik mikroskop	40
Resim 3.5. Mikroyapı üzerinden tane boyutu ölçümü	41
Resim 3.6. Rezistans ısıtıcılı kokil kalıp	43
Resim 3.7. Yoğunluk ölçüm cihazı	44
Resim 4.1. İşlemsiz Al-4,3Cu alaşımının tane boyutu	57
Resim 4.2. Al-4,3Cu alaşımına %0,008 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu	59
Resim 4.3. Al-4,3Cu alaşımına %0,01 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu	60
Resim 4.4. Al-4,3Cu alaşımına %0,02 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu	61
Resim 4.5. Al-4,3Cu alaşımına %0,03 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
°C	Celcius
dak.	Dakika
mm	Milimetre
s	Saniye
%	Yüzde
µm	Mikro metre

Kısaltmalar	Açıklama
KKO	Kritik katı oranı
KSO	Kritik sıvı oranı
RPT	Düşürülmüş basınç testi (Reduced pressure test)
ppm	Milyonda bir parçacık (Parts per million)

1. GİRİŞ

Döküm; üretilmek istenen nihai şeklin sıvı metale doğrudan verilebildiği ekonomik bir metal şekillendirme yöntemidir. Sıvı metalle çalışmak çok avantajlı olmasına rağmen, yeterli bilgi ve teknoloji kullanılmadığında bu avantaj dezavantaja dönüşebilmektedir. Özellikle karmaşık geometri ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm tasarımı oldukça zordur. Fakat bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak döküm proseslerinin modellenmesi döküm mikro ve makro porozitelerinin önemli ölçüde tahmin edilebilmesini sağlamaktadır. Döküm simülasyon programları deneme yanılma yöntemi ile gereksiz, kusurlu döküm üretmeye gerek kalmadan bilgisayarda tasarım ile ilk defada sağlam döküm üretimine olanak sağlar. Bu sebeplerden dolayı yüksek performanslı parça üreten dökümhanelerde simülasyon kullanımı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Literatürde döküm simülasyon programlarıyla tasarıma dayalı çok iyi sonuçlar alınmış çalışmalar mevcuttur.

Döküm simülasyonunda başarılı sonuçlar elde etmek, gerçek döküm şartlarının simülasyon programında doğru tanımlanması ve birebir olarak girilmesine bağlıdır. Alaşımın döküm sıcaklığı, çekme oranı, sıvı metalin kalıbı doldurma süresi, katı-sıvı aralığında beslemenin devam edebileceği KKO değeri bu parametrelerden bazıları olarak sayılabilir. Bu parametrelerden KKO değeri üzerinde çok çalışılmamış olmakla birlikte simülasyon sonuçlarında önemli etkilere sahip bir parametredir. Özellikle alüminyum alaşımlarından dökülen parçaların modellenmesinde KKO değeri tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir [Kayıkcı, 2008, Hsu ve ark., 2006].

Sıvı alüminyum alaşımlarına genellikle ergitme potasında katılan tane incelticiler ergiyik içerisinde heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturarak yapının daha ince taneli olmasında rol oynamaktadır. Tane inceltme yapılmış alüminyum dökümlerinde, tane inceltmenin, akışkanlığı artırdığı, daha iyi besleme sağladığı, daha gözeneksiz bir yapı oluşturduğu, mekanik özellikleri

iyileştirdiği, yorulma direncini ve sızdırmazlık direncini arttırdığı bilinmektedir [Bryant ve Fisher, 1993, Cooper ve ark., 2000].

Alüminyum dökümhanelerinde tane inceltici olarak Al-Ti-B türünde mastır alaşımları içerisinde en çok Al₅Ti₁B kullanılmaktadır. Tane inceltme işleminde en iyi etkiyi almak için tane inceltici ilave miktarı, ilaveden sonra bekletme zamanı gibi, tane boyutu oluşumuna etki eden önemli parametreler vardır. Tane incelticiler ergiyik içerisinde katıldıktan çok kısa süre sonra reaksiyona girerek tane boyutunun incelmeye sebep olur ve tane inceltme etkisi zamanla olumlu yönde gelişmektedir. Bu süre her alaşım ve ilave miktarına göre değişen optimum zamanı geçtiğinde ise tane inceltici etkisi zamanla kaybolmaya başlamaktadır [Bryant ve Fisher, 1993, Kearns ve ark., 1996].

Alaşıma katılacak tane inceltici miktarı alaşımda kullanılan hurda döngü seviyesine, inceltici ilave etme metoduna, soğuma hızına ve alaşım bileşimine bağlı olarak 0,25–3 kg/ton gibi geniş bir aralıkta değişebilmektedir [Bryant ve Fisher, 1993, Kearns ve ark., 1996].

Döküm parçaların katılaşmasında besleme üzerinde en önemli etkenlerden birisi de kritik katı oranıdır. KKO bir katı-sıvı (maşi) aralığında büyüyen dentritlerin belirli bir hacme ulaşması ile sıvı akışını bloke ederek beslemenin durmasına neden olduğu noktadır. KKO tane büyüklüğüne duyarlı olduğundan tane inceltme işlemi ile bu oranın ne derece yükseltilebileceği tam olarak bilinmemektedir. Bu çalışma, farklı tane büyüklükleri oluşturmak üzere hem tane inceltmiş hem de tane inceltilmemiş dökümlerin katılaşmasında önemli rol oynayan KKO döküm parça kalıp sıcaklığına bağlı olarak gerçek döküm şartlarında belirlenmesi ve bilgisayar programındaki kritik katı oranının gerçeğe en yakın şekilde verilmesi amacıyla yapılmıştır.

Bu amaçla öncelikle Al-%4,3Cu (Etial-220) alaşımı için ALCAN deneyi yapılarak optimum tane boyutu ve tane inceltme için en etkin süre tespit

edilmiştir. ALCAN deneyi sonucunda elde edilen optimum sonuçlar kullanılarak üç farklı kalıp sıcaklığında (100°C, 155°C, 210°C) içerisinde özellikle yetersiz beslemeden kaynaklanan çekme boşluğu hatası oluşacak geometride tasarlanmış deney parçası, tane inceltmeli ve tane inceltmesiz olarak dökülmüştür. Döküm parçalar içerisinde oluşan çekme boşluklarının hacimsel boyutu Arşimet prensibi kullanılarak ölçülmüştür.

Gerçek döküm şartlarında yapılan bu işlemler bilgisayar ortamında da döküm simülasyon programı (SOLIDCast) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Döküm parçanın hatasız olarak üretilebilmesi için en uzun sıvı beslemenin sağlanması gerekir. Buna bağlı olarak programda kritik katı oranının tespiti için farklı KKO değerlerinde modelleme yapılmıştır. Bunun sonucunda simülasyondan elde edilen boşluk hacimleri ile gerçek döküm şartlarından elde edilen boşluk hacimleri eşleştirilmiştir. Eşleştirmeler neticesinde uygulanan döküm şartlarında (tane inceltmeli veya tane inceltmesiz metalik kalıba döküm) döküm simülasyonunda kullanılması gereken KKO değerleri tespit edilmiştir.

Alüminyum alaşımlarında tane inceltme ve simülasyon parametreleri ile ilgili literatür bilgileri Bölüm 2'de detaylı olarak incelenmiştir. Deneylerde kullanılan malzemeler, ekipmanlar ve metotlar Bölüm 3 ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların tartışması Bölüm 4'te sunulmuştur. Sonuçlar ve bu konuda yapılacak araştırmalara yönelik öneriler ise Bölüm 5'te verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Alüminyum ve Alüminyum Döküm Alaşımları

Alüminyumun saf halde kullanımı elektronik ve elektrik endüstrisi dışında yaygın değildir. Alüminyum genellikle bakır, silisyum, magnezyum, çinko ve lityum gibi elementler ile alaşım halinde kullanılır. Alüminyum, döküm alaşımı halinde iken özellikle düşük ergime sıcaklığı, iyi akıcılık, tane yapısı kontrol kabiliyeti, iyi yüzey kalitesi, düşük gaz çözünürlüğü, işlenebilme kabiliyeti ve ısı işlem ile yüksek mekanik özellikler açısından avantaj sağlar. Fakat yüksek hidrojen çözünürlüğü, sıcak yırtılma ve düşük süneklilik açısından da dezavantaj sağlar [ASM Handbook, 1989].

Alüminyum alaşımları, tüm döküm yöntemleri (kum kalıba döküm, kokil döküm, basınçlı döküm, hassas döküm, santrifüj (merkezkaç) döküm, sıkıştırma döküm ve sürekli döküm yöntemi) ile şekillendirilebilirlikleri açısından üstünlüklere sahiptir.

Döküm alüminyum alaşımları Amerikan Alüminyum Birliğine göre;

- 1xx.x saf alüminyum (%99,0 minimum),
- 2xx.x bakır (%4-%4,6),
- 3xx.x silisyum (%5-%17) bakır ve/veya magnezyumlu,
- 4xx.x silisyum (%5-%12),
- 5xx.x magnezyum (%4-%10),
- 7xx.x çinko (%6,2-%7,5),
- 8xx.x kalay,
- 9xx.x diğerleri, olarak sınıflandırılır.

Saf alüminyum (1xx.x serisi); 1xx.x serisi alüminyum alaşımlarında 1'den sonraki iki rakam alaşımın saflık seviyesini belirler. Örneğin; 150.0 minimum %99,50 saflığındaki alüminyumu tanımlar.

Alüminyum-bakır döküm alaşımları (2xx.x serisi); Bu seri alüminyum alaşımlarına ısıtma işlemi uygulanabilir. Yüksek dayanım, düşük korozyon dayanımı, düşük akıcılık, düşük süneklik özellikleri gösterir. Uygulama alanları; otomotiv ve uçakların silindir kafalarında, dizel motorların pistonlarında, egzoz sistemlerinin parçalarında kullanılır.

Alüminyum-silisyum-bakır/magnezyum döküm alaşımları (3xx.x serisi); Bu serideki alüminyum alaşımlarına ısıtma işlemi uygulanabilir. Yüksek dayanım, düşük süneklik, iyi akıcılık, iyi işlenebilirlik ve iyi aşınma dayanımı gösterir. Bu seride bakır içeren alaşımların korozyon dayanımı düşüktür. Uygulama alanları; otomobil silindir blokları ve kafaları, otomobil jantları, havacılıkta birleştirme elemanları, kompresör veya pompa parçalarında kullanılır.

Alüminyum-silisyum döküm alaşımları (4xx.x serisi); Bu seriye ısıtma işlemi uygulanamaz. Orta dayanım, orta süneklik, iyi aşınma dayanımı, çok iyi döküm özellikleri ve iyi korozyon dayanımı sergiler. Uygulama alanları; pompa gövdeleri, ince kesitli dökümlerde kullanılır.

Alüminyum- magnezyum döküm alaşımları (5xx.x serisi); Bu seriye ısıtma işlemi uygulanamaz. Yüksek korozyon dayanımı, iyi işlenebilirlik, orta derecede döküm özellikleri sergiler. Ayrıca anodize edilerek iyi yüzey görünümü sağlanabilir. Uygulama alanları; kum kalıba dökülerek elde edilen parçalarda kullanılır.

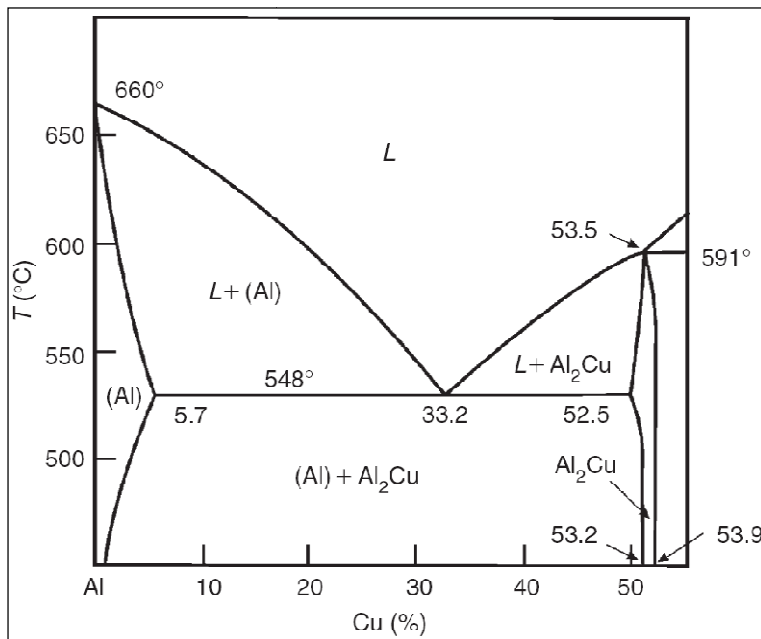
Alüminyum-çinko döküm alaşımları (7xx.x serisi); Bu serideki alüminyum alaşımlarına ısıtma işlemi uygulanabilir. İyi boyutsal kararlılık, iyi korozyon dayanımı, kötü döküm özellikleri, iyi işlenebilirlik (bakır ilavesi ile) özelliklerine sahiptir. Uygulama alanları; boyutsal kararlılık ve korozyon direnci istenen parçaların üretiminde kullanılır.

Alüminyum-kalay döküm alaşımları (8xx.x serisi); Bu seriye ısıtma işlemi uygulanamaz. Düşük dayanım, çok iyi aşınma direnci ve iyi işlenebilirlik

özelliklerine sahiptir. Uygulama alanları; aşınma dayanımı gerektiren yataklarda kullanılır [ASM Handbook, 1989].

2.1.1. Al-Cu döküm alaşımları

Al-Cu ikili sistemde, ötektik sıcaklık 548°C ve ötektik bileşim %33,2 Cu içeriğine tekabül eder. Bu diyagram Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Al-Cu denge diyagramı [Zolotorevsky ve ark., 2007]

Bakırın ötektik sıcaklıkta α fazında eriyebilirliği %5,7'dir. α katı fazının limiti 250°C 'ye kadar bilinmektedir. Daha düşük sıcaklıklarda limit net olarak bilinmemektedir. Bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü ötektik sıcaklıkta maksimum değerdedir. Bakırın alüminyum içinde sıcaklık ile çözünürlüğü Çizelge 2.1'de verilmiştir.

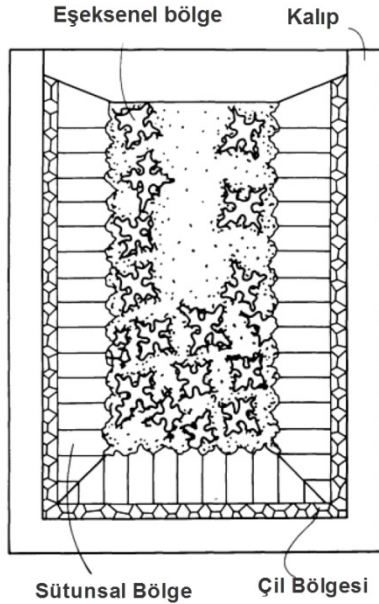
Çizelge 2.1. Sıcaklık ile bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü

Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)	548	500	450	400	350	300	250
Bakır (%)	5,7	4,05	2,50	1,40	0,85	0,45	0,1-0,2

Hızlı su verme ile yarı kararlı olan bir α fazı oluşur. Bu faz içerisinde, oda sıcaklığında uzun süre bekleme veya düşük sıcaklıkta kısa süre bekleme ile Al_2Cu fazı çökeler. Bu olaya yaşlanma denir. Al_2Cu fazının çökmesi sonucu alaşımın sertlik ve mukavemeti artar. Al-Cu alaşımları vida, civata, uçak konstrüksiyonları, perçin, yüksek sıcaklıklarda çalışan dövme silindir kafa ve pistonları v.b yerlerde kullanılırlar [Demircioğlu, 2002].

2.2. Alüminyum Dökümcülüğünde Tane İnceltme

Normal olarak katılaşma sırasında, alüminyum alaşımlarında, diğer hafif metallerde olduğu gibi kalıp duvarına yakın bölgelerde hızlı katılaşmadan dolayı küçük tanelerden oluşan çil bölgesi, merkeze yakın bölgelerde katılaşmanın yavaşlamasından dolayı eşeksenel tanelerin görüldüğü eşeksenel bölge oluşur. Çil bölgesi ve eşeksenel bölgenin arasında sütunsal tanelerin görüldüğü sütunsal bölge meydana gelir (Şekil 2.2) [ASM Handbook, 1989].



Şekil 2.2. Döküm ingot yapısının şematik gösterimi [ASM Handbook, 1989]

İngot yapısındaki bölgeler, metalin döküş sıcaklığına, kalıp içinde oluşan termal gradyantlara bağlıdır. Alüminyuma ilave edilen alaşım elementleri genellikle tane boyutunu azaltırlar. Burada elementin çözünürlüğü ne derece yüksek ise tane boyutu da o derece azalmaktadır [ASM Handbook 1989].

Tane inceltme, ergitme sırasında yapılan geniş aşılama yöntemlerinden bir tanesidir ve döküm tane yapısının farklılaştırılmasını sağlar. Bu şekilde katılaşma sırasında daha ince eşeksenli taneler oluşur. Örneğin, %0,2'den az Ti veya %0,02'den az B ilavesi, Al alaşımının döküm tane boyutunun 2,54 mm'den 0,127 mm'ye kadar azaltmaya yeterlidir. Yüksek çözünürlüğe sahip elementlerin (bakır, magnezyum ve çinko) yüksek oranda bulunduğu alüminyum alaşımlarında, içinde belirgin miktarda Si içeren Si-Mg, Si-Cu ve Si-Cu-Mg alaşımlarına göre daha küçük eşeksenli taneler oluşur [ASM Handbook, 1989].

Yeniden ergitme, sıcak bekletme, çok yüksek sıcaklıklar ve temizleme gibi işlemlerin sonucunda tane inceltmenin etkisi kaybolmaktadır. Tane inceltme uygulanan dökümler ince taneli tamamen eşeksenli bir yapıda katılırlar. Bu yapıyı elde edebilmek için katılaşma birden fazla bölgede aynı anda başlamalı ve tanelerin aşırı büyümesi engellenmelidir.

Yüksek hızda soğuma, soğuma sırasında ergiyiğin mekanik titreşime maruz bırakılması ve tane inceltici elementlerin ilavesi ile tane inceltme işlemi gerçekleştirilir.

2.2.1. Tane incelticiler

Döküm işleminden önce sıvı metale Ti, B, Zr, Nb, V, W, Ta, Ce gibi elementlerin düşük miktarlarda ilavesi ile dökümlerde küçük eşeksenel tane yapısı elde etme çalışmaları uzun zamandır devam etmektedir. Alüminyum için titanyumun potansiyel tane inceltici olduğu 1930'lu yıllarda keşfedilmiştir. Bundan yaklaşık 20 yıl sonra B, Nb, Zr gibi elementlerin de etkili tane inceltici

elementler olduğu tespit edilmiştir. Zr, V, Ta, Ce ve Nb gibi elementlerin alüminyumda belirli seviyelere kadar tane inceltici etkisi göstermesine rağmen Ti elementine oranla etkisinin çok az olması veya çok pahalı olması nedeniyle bu elementler tane inceltici olarak tavsiye edilmemişlerdir. Bazı araştırmacılar tarafından B'un alüminyum alaşımlarında yalnız başına çok etkili bir tane inceltici olmadığı tespit edilmiştir. Fakat çok düşük miktarlarda titanyum ile birlikte borun çok etkili tane inceltici olduğu bildirilmiştir [Murty ve ark., 2002, Easton ve StJohn, 1999, Kashyap ve Chandrashekar, 2001, ASM Handbook, 1989].

Günümüzde tane inceltici olarak tablet şeklindeki tuzlar ve master alaşımları kullanılmaktadır. Hem tablet tuzlar hem de master alaşımları Ti içermektedir. Tablet şeklindeki tuzlar K_2TiF_6 ve KBF_4 bileşiklerinin karışımını içermektedir. Tane inceltici tablet tuzlar 11Ti:1B veya 5Ti:1B oranlarında karıştırılmaktadır [Jones ve Pearson, 1976, Murty ve ark., 2002].

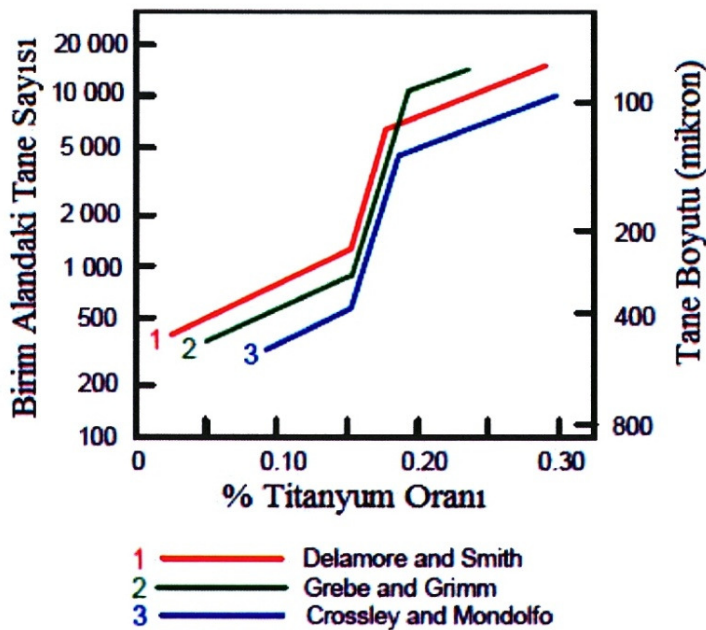
Master alaşımları Al-Ti-B, Al-Ti, Al-Ti-C ve Al-B elementlerinin değişik oranlarda karışımını içermektedir. Literatürde çok farklı oranlarda elementler içeren master alaşımlarının etkili tane inceltici olduğu bildirilmiştir. Bunlar Al-5Ti-1B, Al-11Ti-1B, Al-3Ti-B, Al-3Ti-3B, Al-1Ti-3B, Al-5Ti-0,8C ve Al-5Ti-1,2C gibi çok farklı oranlarda kullanılmaktadır [Kumar ve ark., 2009, Murty ve ark., 2002, Kori ve ark., 2000, Murty ve ark., 1999, Jones ve Pearson, 1976].

2.2.2. Tane inceltici miktarları

Pratikte, tane incelticilerin en çok etkili oldukları şart, ilavenin dökümden çok az önce yapılmasıdır. Normal döküm sıcaklıklarında kabul edilen ilave miktarları %0,05-0,15 Ti, 0,04 B veya %0,01-0,08 arası Ti ile birlikte %0,003 B'dur. %0,003-0,008 arası B ilave etmek yüksek Si içeren alaşımlarda tercih edilmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda %0,03 Ti ile birlikte %0,01 B kullanılması önerilir. Tane incelticilerin bu oranlardan fazla ilave edilmesi, özellikle karmaşık alaşım sistemlerinde intermetalik bileşiklerin yer çekimi

segregasyonunu meydana getirir. Borun fazla ilavesi sonucunda istenmeyen kalıp reaksiyonları oluşabilir ve boridlerin fırının tabanından dışarı sızmasına yol açabilir [ASM Handbook, 1989].

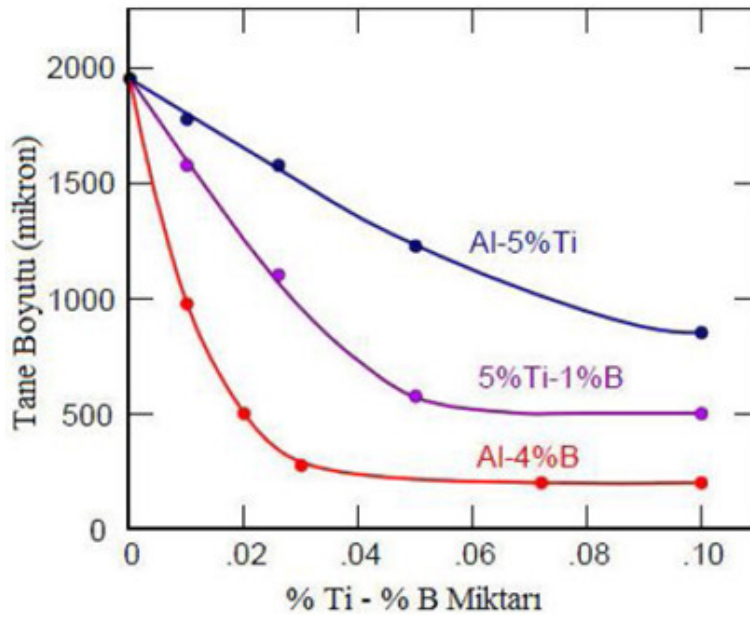
Ti oranının genel alüminyuma oranı en az % 0,15 olacak şekilde yapılmalıdır. Aksi takdirde mastır alaşımı çok hızlı bir şekilde tane inceltme etkisini kaybedecektir. Bu konuda Cole ve arkadaşları [Cole ve ark., 1972] tarafından bir araya getirilen üç farklı çalışmadan alınan sonuçlar Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Şekil 2.3'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 2.3. % 99,7 saflıktaki alüminyuma titanyum ilavesi ile tane inceltme sonuçları [Cole ve ark., 1972]

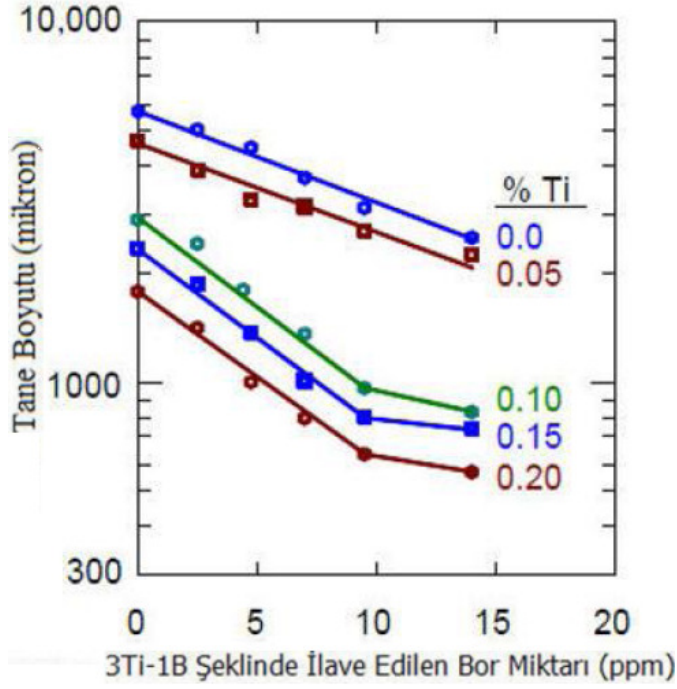
Lu, Wang ve Kung [Lu ve ark., 1981] tarafından ötektik altı bir Al-Si alaşımı olan A356 alaşımında üç farklı tane inceltici mastır alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmasına ait bir sonuç Şekil 2.4'te verilmiştir. Bunlar Al-%5Ti, Al-

%5Ti-%1B ve Al-%4B alaşımlarıdır. Şekil 2.4'te borun tane inceltici olarak titanyumdan daha etkili olduğu görülmektedir. Benzer bir çalışmada Sigworth ve Guzowski [Sigworth ve Guzowski, 1985] AlB_2 partikülleri içeren Al-B mastır alaşımlarının çok daha mükemmel tane inceltme etkisi gösterdiğini rapor etmişlerdir.



Şekil 2.4. A356 alüminyum alaşımında üç farklı mastır alaşımı ile tane inceltme sonuçları [Lu ve ark., 1981]

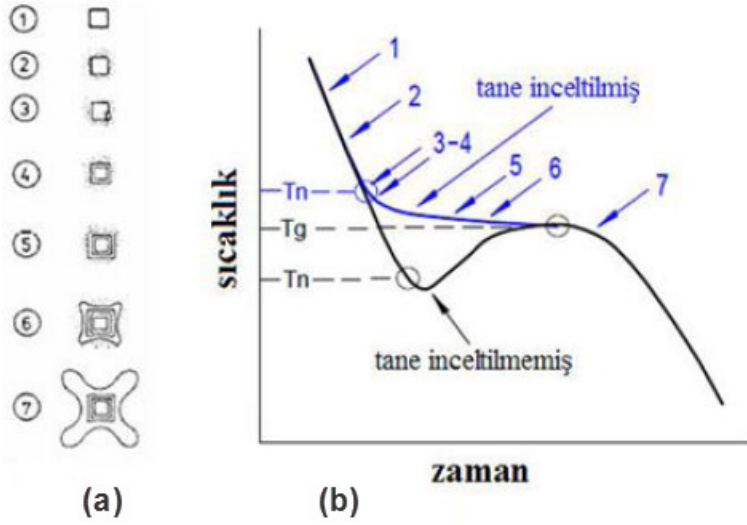
Pasciak ve Sigworth [Pasciak ve Sigworth, 2001] tarafından A319 alaşımı ile yapılan tane inceltme çalışmalarından alınan diğer bir sonuç Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Buna göre tane inceltici olarak bor miktarı arttırılsa bile titanyum ilave etmeksizin etkili bir tane inceltme yapmanın mümkün olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.5. A319 alüminyum alaşımında tane inceltme sonuçları [Pasciak ve Sigworth, 2001]

2.2.3. Tane inceltme işleminin soğuma eğrisine etkisi

Backerud [Backerud, 1983] katı $TiAl_3$ partikülleri üzerinde alüminyumun çekirdeklenecek büyümesini ve bu yolla tane inceltme mekanizmasını Şekil 2.6.a'da gösterilen şema ile açıklamıştır. Sigworth ve Kuhn [Sigworth ve Kuhn, 2007] bu şemayı Şekil 2.6.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 içerisine dağılmaktadır.



Şekil 2.6. a) Alüminyumun TiAl₃ partikülleri üzerinde çekirdeklenerek büyümesi sırasında geçirdiği aşamaların şematik gösterimi, b) Tane inceltilmemiş ve tane inceltilmiş sıvı Al'un soğuma eğrilerinin gösterimi [Sigworth ve Kuhn, 2007]

Bunlardan bir tanesini Şekil 2.6.a'da şematik olarak 1 ile gösterilen parçacık olduğunu varsayabiliriz. TiAl₃ sıvı alüminyum ile temas ettikten sonra çözülmeye başlar. Bunun sonucu partikül çevresinde partikül ile temas eden alüminyum titanyumca zenginleşmeye başlayacaktır. Bu olay Şekil 2.6.a'da 2 nolu skeç ile temsil edilmektedir. Bu anda Şekil 2.7'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 2.6.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 alüminyumu tüketerek büyümeye devam edecek ve büyüme bu sıvı tükenince duracaktır. Metal soğumaya devam ederken bu kez çekirdekler etrafında dentritik büyüme başlayacak ve 6-7 noktalarında gösterildiği gibi devam edecektir. Şekil 2.6.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 gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Buna karşılık 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 alüminyum dökümünde etkili bir tane inceltme gerçekleşip gerçekleşmediği kolayca anlaşılabilir.

2.3. Tane İnceltme Mekanizmaları

Al-Ti-B master alaşımlarının tane inceltici olarak kullanmaya başlanmasından sonra alüminyum alaşımlarının tane inceltme mekanizmaları halen tartışmalı bir konudur. Alüminyum alaşımları için çeşitli tane inceltme mekanizmaları öne sürülmüştür. Bu mekanizmalar doğru olarak kabul edilse de henüz tam bir fikir birliği ortaya çıkmamıştır. Tane inceltme mekanizmaları çekirdeklenme teorisi ve çözünen teorisi olmak üzere iki başlık altında sınıflandırılmaktadır. Çekirdeklenme teorileri; karbür/borür teorisi, faz diyagramı/peritektik teorisi, peritektik hulk teorisi, hiper çekirdekleşme teorisi ve çift çekirdekleşme teorisidir.

2.3.1. Çekirdeklenme teorileri

Karbür/Borür teorisi

Karbür teorisi ilk olarak Cibula [Murty ve ark., 2002] tarafından ortaya atılmıştır ve Jones ve Pearson [Murty ve ark., 2002] tarafından desteklenmiştir. Bu teoriye göre Al-Ti master alaşımının tane inceltme etkisi karbon ilavesi yapılmasa bile TiC çekirdeğinin varlığına bağlıdır. Bu teoriye göre alaşımdaki 1/10000 karbon seviyesinin TiC şekillenmesini sağlamak için yeterli olduğu varsayılmaktadır. Sıvı alüminyumun içinde TiC dengesiyle ilgili tartışmalar devam etmesine rağmen son yıllarda Al-Ti-C master alaşımı üretilmiştir. Çok düşük seviyelerde Al-Ti-C master alaşımının, alüminyum alaşımları için etkili bir tane inceltici olduğu bildirilmiştir [Kumar ve ark. 2009]. Bor içeren tane inceltici kullanıldığı zaman sıvı içinde AlB_2 , TiB_2 ve $(Al,Ti)B_2$

gibi bor bileşikleri oluşur. Bu bileşikler ergimiş sıvı içinde dağılmış şekilde bulunur.

Karbür teorisine göre TiC ve Borür teorisine göre TiB₂ bileşiği alüminyumun çekirdekleşme merkezlerini oluşturur.

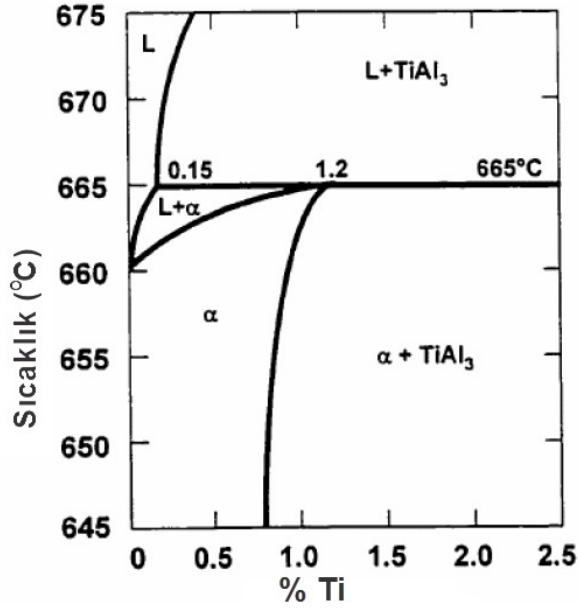
Faz diyagramı/peritektik teorisi

TiAl₃, ZrAl₃, VAl₁₀, NiAl₃, AlB₂ gibi bazı alüminyum bileşiklerinin, alüminyum için iyi çekirdekleyiciler olduğu literatürde bildirilmiştir. Peritektik teorisinin en önemli problemlerinden biri, ikili Al-Ti faz diyagramına göre, sıvı alüminyumun peritektik sıcaklıkta %0,15 Ti içermesi gerekliliğidir (Şekil 2.7). Fakat tane incelticideki Ti miktarı genellikle yaklaşık %0,01'dir. Miktar peritektik tepkimelerin meydana gelmesi için gerekli duyulan miktardan çok daha düşüktür. Peritektik tepkimelerin meydana gelebilmesi için B'un, sıvının peritektik bileşiminde Ti oranını düşürmek için bir sapmaya sebep olduğu tezi savunulmaktadır [Murty ve ark., 2002, Kashyap ve Chandrashekar, 2001].

Bu peritektik reaksiyon %0,0001 B ve %0,15 Ti'nin sıvı bileşiminde aşağıdaki reaksiyona benzer şekilde;



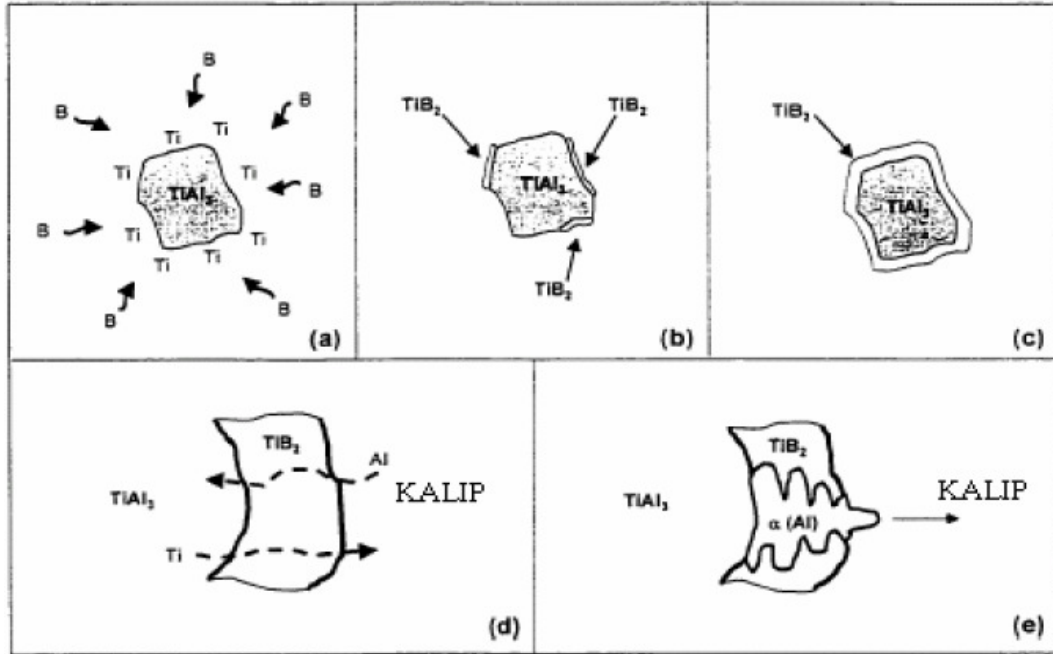
peritektik reaksiyon olduğunu ileri sürülmektedir. Çözeltide mevcut olan TiAl₃ parçacıkları tane inceltme için yeterlidir.



Şekil 2.7. Al-Ti faz diyagramının alüminyum tarafı [Sigworth, 1984]

Peritektik hulk teorisi

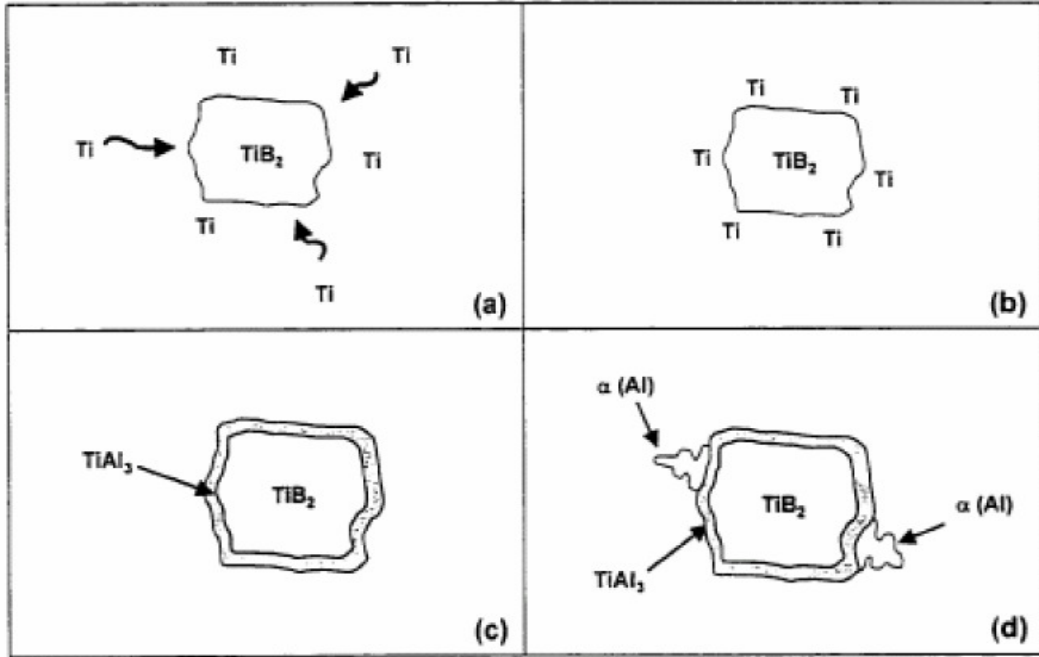
Bu teoriye göre $TiAl_3$ bileşiği TiB_2 bileşiğinden daha iyi bir çekirdekleyicidir. Al-Ti-B master alaşımı sıvıya ilave edildiğinde $TiAl_3$ 'ün çözünme hızını TiB_2 yavaşlatır. Sonuç olarak çok daha güçlü çekirdeğin daha uzun süre etkin kalması sağlanır. Bu teoride TiB_2 'nin $TiAl_3$ bileşiğinin etrafını kabuk şeklinde kapladığı ve alüminitlerin çözünmesi için çevresindeki borit kabuğunu geçerek difüze olması gerekmektedir. Bu da TiB_2 'nin çözünmesini geciktirir. Sonuçta alüminit çözünür ve yaklaşık peritektik kompozisyonda borit kabuğunun içinde sıvı hücresi oluşur. Sıvı peritektik sıcaklığa ulaştığı zaman ($665^\circ C$) bu peritektik taneler heterojen çekirdeklenmeyi tetikler. Bu şartlar oluştuğunda α -Al sıvı içinde büyümeye devam eder [Murty ve ark., 2002, Kashyap ve Chandrashekar, 2001]. Bu teori şematik olarak Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Peritektik hulk teorisi modeli [Ibarra, 1999]; a) TiAl₃'ün kısmi çözünmesi ve TiAl₃'e B'nin difüzyonu, b) TiB₂'nin çözünbilme verimi artırılır, c) TiAl₃ üzerinde TiB₂'nin koruyucu tabaka oluşturması, d) Al ve Ti'nin koruyucu tabaka boyunca eş zamanlı büyümesi, e) Çekirdek ve α-Al'un büyümesi

Hiper çekirdeklenme teorisi

Sıvı alüminyumda aşırı titanyum TiB₂ ve sıvı ara yüzeyine segrege olur ve ara yüzeyde ince bir TiAl₃ tabakası meydana gelir. Sıcaklığın peritektik sıcaklığa ulaşması ile bu bölgede peritektik katılaşma ile α-Al çekirdeklenir [Murty ve ark., 2002, Kashyap ve Chandrashekar, 2001, Ibarra, 1999]. Bu teori şematik olarak Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Hiper çekirdeklenme teorisi modeli [Ibarra, 1999]; a) Eriyikte yoğun Ti miktarı ($Ti/B > 2,21$), b) TiB_2 -Sıvı metal yüzeyinde ayrılan Ti, c) TiB_2 üzerinde $TiAl_3$ tabakasının oluşumu, d) Peritektik reaksiyonla α -Al çekirdeklenmesi

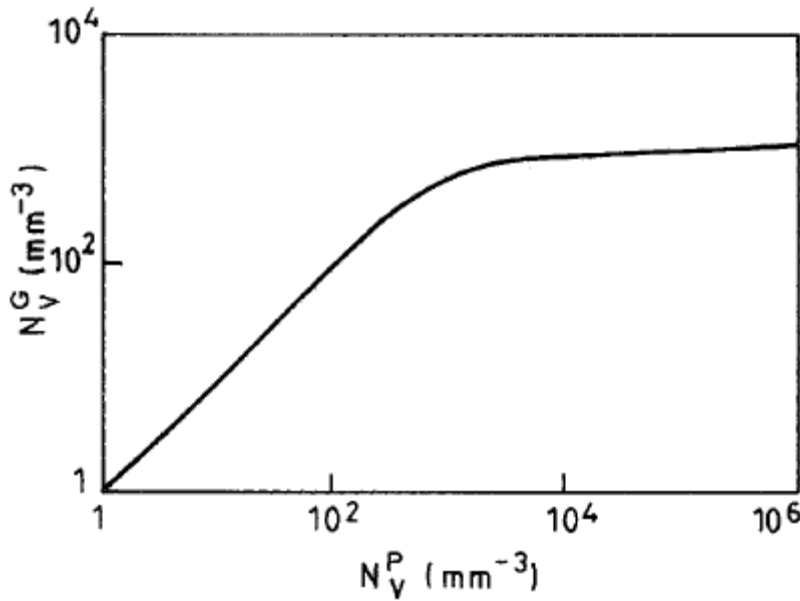
Çift çekirdeklenme teorisi

Ergimiş alüminyum içinde titanyumun yokluğunda, TiB_2 'nin çekirdeklenme yeri olarak tepkide bulunmadığı ve TiB_2 'nin tane sınırlarına çekildiği gözlemlenmiştir. Yine de, yüksek peritektik bileşimindeki titanyum, TiB_2 parçacıklarının sınırlarda bir $TiAl_3$ katmanı ile alüminyum tanelerinin merkezinde olduğu gözlemlenmiştir. Titanyumun yüksek peritektik yoğunlaşmasında bile, benzer bir titanyumca zengin katmanının ($TiAl_3$) TiB_2 parçacıklarını kuşattığı gözlemlenmiştir. Schumacher ve ark TiB_2 yüzeylerindeki çekirdeklenme olayına doğrudan gözlemler yapmıştır ve α -Al çekirdeğinin, yüzeysel $TiAl_3$ katmanına sahip sadece TiB_2 façetalarında meydana geldiğini bulmuştur. Bununla birlikte bu tip bir katman şekillenmesinin sebepleri henüz net değildir.

2.3.2. Çözünen teorisi

Bu teori, hem çekirdekleyicilerin hem de çözünen elementlerin tane inceltme etkisi gösterdiğini savunmaktadır. Titanyum gibi çözünen elementler çekirdekleyici/sıvı ara yüzeyine segregе olur. Bu sayede sıvı-katı ara yüzeyinde meydana gelen yapısal alt soğumadan dolayı dentritlerin büyümesi engellenir. Tane inceltmede, çekirdek etkisi önemli olmasına rağmen çözünen etkisi de önemli rol oynar [Murty ve ark., 2002, Kashyap ve Chandrashekar, 2001].

Maxwell ve Hellawell birim hacimdeki parçacık sayısı (N_V^P) ile birim hacimdeki tanelerin (N_V^G) sayısının sadece kritik değere kadar arttığını ve Şekil 2.10'da gösterildiği gibi bu değerin üstünde bir doyuma ulaştığını göstermişlerdir. Bu, kritik N_V^P değerinin üstünde eklenen bütün parçacıkların çekirdeklenme yeri olarak tepkide bulunmadığı anlamına gelmektedir (Şekil 2.10).

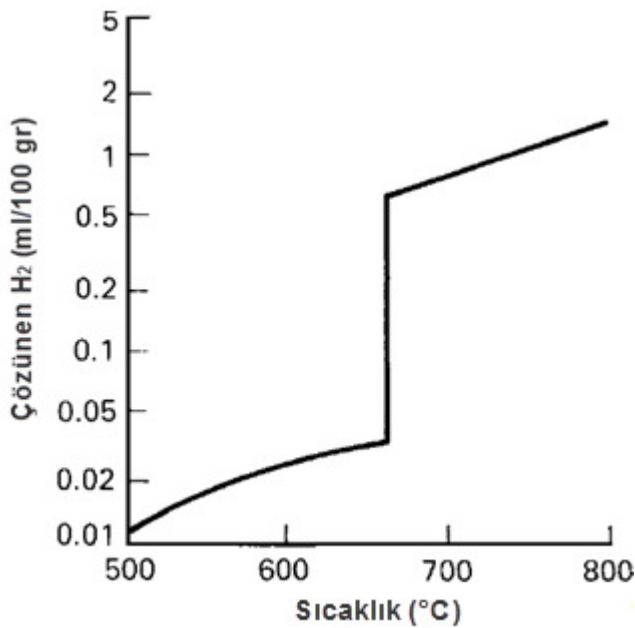


Şekil 2.10. Birim hacimdeki parçacık sayısı (N_V^P) ile birim hacimdeki tanelerin (N_V^G) sayısının değişimi [Murty ve ark., 2002]

2.4. Alüminyum Alaşımlarında Gaz Giderme

2.4.1. Alüminyum ve alaşımlarında gazlar

Alüminyum alaşımlarında gaz boşluklarının esas sebebinin H_2 olduğu kesin olarak anlaşılmıştır. Hidrojenin ergimiş alüminyumdaki çözünürlüğü yüksektir (Şekil 2.11). Fakat katı durumda çözünürlük çok azdır. Bundan dolayı ergimiş metalde çözülmüş gazın tamamı katılaşıma sonunda açığa çıkar ve eriyikten kaçamazsa gaz boşlukları yaratır. Azot, oksijen, karbonmonoksit ve sülfürdioksidin geniş bir sıcaklık aralığında alüminyumdaki çözünürlükleri hemen hemen sıfırdır [Demircioğlu, 2002].

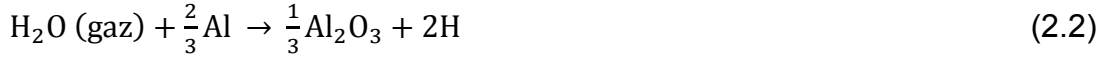


Şekil 2.11. Alüminyumda hidrojen çözünürlüğü [Brown, 1999]

Gaz boşlukları, alüminyum ve alaşımlarında, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve işlenebilme özellikleri üzerinde negatif etkiye sahiptir [Brown, 1999].

Hidrojen tüm döküm işlemleri boyunca (ergitme, bekletme, taşıma ve döküm) sıvı alüminyumun fırın çevresindeki atmosferden gaz absorbe etme eğilimi

sonucu metal bünyesine girer. Hidrojen sıvı alüminyuma H₂O ile verdiği reaksiyon sonucu girer “Eş. 2.2”.



Hidrojenin alüminyum alaşımlarındaki çözünürlüğü farklılık gösterir. Çizelge 2.2.'de 750°C'de bazı alaşımlar için hidrojen çözünürlük değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Alüminyum ve alaşımlarında hidrojen çözünürlüğü [Demircioğlu, 2002]

Alaşım	Hidrojen çözünürlüğü (ppm)
Saf Alüminyum	1,2
Al-7Si-0,3Mn	0,81
Al-4,5Cu	0,88
Al-6Si-3,5Cu	0,67
Al-4Mg-2Si	1,15

Katıdaki hidrojenin çözünürlüğünün az olması sebebiyle katılaşma boyunca sıvıda hidrojen zenginleşmesi olur. Hiçbir katı ve sıvı difüzyonu olmadığı varsayılır ise katılaşma sonunda hidrojen konsantrasyonunda çok büyük artış gözlenir. Örneğin; 0,4 ppm hidrojen içeren 750°C saf alüminyumun %90'ı katılaştığında kalan sıvıdaki hidrojenin konsantrasyonu 3,6 ppm seviyesine ulaşır. Bu durumda katılaşma tamamlandığında döküm yapısında gaz boşluğu meydana gelir.

2.4.2. Katılaşma boyunca hidrojenin davranışı

Sıvı alüminyum hidrojeni çevresinden kolaylıkla almakta ve sıvı olarak kaldığı müddetçe tutabilmektedir. Ancak katılaşma ve soğumanın başlaması ile birlikte çözünürlüğü düştüğünden hidrojeni yapı içerisinde tutmak istemeyecek ve yapının gözenekli olmasına sebep olacaktır.

Sıvı alüminyumdaki kritik hidrojen miktarı aynı zamanda basınca bağlı olarak değişir. Yüksek katılaştırma basınçları kritik değeri artırır. Bu işlemin vakum altında yapılması ise bu değeri azaltır.

Geniş katılama aralığına sahip alaşımlar, daha düşük kritik değerlere sahiptirler. Hidrojen gözenekliliği oluşturma eğilimleri hayli yüksektir. Diğer yandan tane inceltme yapılmış parçalarda gözenek boyutu daha küçüktür. Tane inceltme yapılmamış parçalara oranla daha az gözenek hacim oranına sahiptirler. Modifiye edilmiş alüminyum silisyum döküm alaşımlarında modifiye edilmemiş eş miktarda hidrojen içeren döküm alaşımlarına nazaran hidrojen gözenek seviyesi daha azdır. Arttırılmış katılaştırma hızı boşluk boyutunu azaltır. Çok düşük basınçlarda yapılan dökümlerde hidrojen gözeneği oluşumu eğiliminde önemli ölçüde artış görülür [Chen ve Gruzleski, 1995].

2.4.3. Alüminyum alaşımlarının dökümünde gaz giderme yöntemleri

Alüminyum alaşımlarının döküm aşamalarındaki bazı işlemler ve olaylar gaz problemlerine neden olur. Bu nedenle gazların önlenmesi ve giderilmesi için yapılan çalışmalar tek bir aşamada değil birçok aşamada yapılmaktadır. Genellikle bu işlemler, ergitmeden önce, ergitme sırasında, dökümden hemen önce ve döküm sırasında yapılır. Ayrıca, modeller, kalıplar ve maçalarda yapılan tasarım değişikliği ve parça dizaynı ile gaz problemleri belli miktarlarda önlenmektedir.

Hidrojen, ergiyik alüminyumda, ergiyik bakırdakinden çok daha az erimesine rağmen çok daha fazla gaz boşlukları meydana getirmektedir. Bunun sebebi, hidrojenin büyük bir kısmının katılama noktasında serbest kalmasıdır. Mevcut hidrojen metal katılama olmadan önce, metalden alınmazsa toplu iğne başı şeklindeki yaygın gaz boşlukları meydana gelir. Oksijenle ilgisinin fazla olması ve oldukça sağlam bir oksidasyon zarının meydana gelmesi sebebiyle, metalin hidrojen kapmasını önlemek için alüminyum alaşımlarında

oksidasyon flaksları kullanılmaz. Bu sebeptendir ki, ergiyik metali cüruftan ayıran, özel bir şekilde gaz alma ve giderme usulüyle, erimiş hidrojeni de gideren "koruyucu flaks altında ergitme" yapılmaktadır. Bu husus, azot veya klor gazı ile veya ergiyik metaldeki uçucu ergimiş organik bileşimlerinden meydana gelen klorla temin edilir. Organik klor bileşikleri ergiyik metal içine daldırılır. Bu şekilde açığa çıkan klor gazı arzu edilmeyen diğer gazları da tutarak ergiyik metalden dışarıya atar.

Ergiyik metalden "azot ve klor gazının geçirilmesi" suretiyle arzu edilmeyen gazların temizlenmesinin bazı mahsurları vardır. Bu, işlemin yapılmasında bazı alet, boru ve ısıya dayanıklı malzeme ihtiyacı ortaya çıkar. Bundan başka azotun bir miktar rutubet meydana getirmesi ihtimali de vardır. Klor gazı da hem zehirli hem de korozyon meydana getirici bir elemandır. Klor veya organik klor bileşenleri kullanılıncaya aktif gaz alma maddesi alüminyum klorürdür. Bu madde alüminyumun ergiyik vaziyetteki sıcaklık derecesinde gaz halindedir.



Bu yöntemde alüminyum klor gazı ile birleşerek Alüminyum-Klorür bileşiği oluştur "Eş. 2.3". Bu reaksiyon sonucu bir miktar alüminyum kaybı meydana gelir. Klor gazı yerine uçucu organik klorür bileşimleri kullanılacak olursa alüminyum kaybı önlenmiş olacaktır. Organik gaz alıcı maddelerin verimli olmaları nedeniyle 3-4 kg organik gaz alıcı, 6-8 kg klor gazının gaz alma tesirini yapar. Ayrıca gaz giderme süresi organik gaz alıcı maddelerde çok daha kısadır. Giderilmesi istenen gazları sürüklemek üzere ergiyik metalin bir boru yardımıyla karıştırılmasında meydana gelen gaz kabarcıkları büyük olduğundan, bu işlemin "gaz haline gelen tabletler" yardımıyla yapılması daha verimli ve iyi sonuç verir [Demircioğlu, 2002].

Gaz giderme flaksları ergiyikten hidrojen ve inklüzyonu almak amacı ile

kullanılmaktadır. Flakslar ile gaz giderme işleminde, flaks bileşiminde mevcut bulunan metal klorürler ve florürler ergimiş metalin inklüzyon ve gaz giderme işlemini yaparlar [Demircioğlu, 2002].

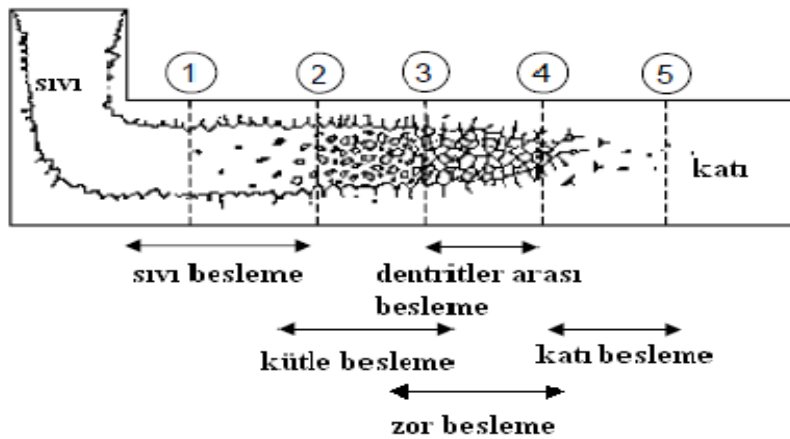
Gaz giderme yöntemlerinden en sık kullanılanı hegzakloretilen tabletleridir. Tablet ergiyik içerisine girdiğinde ayrışarak gaz halindeki $AlCl_3$ 'ü meydana getirmektedir. $AlCl_3$, bir yandan eriyik içerisinde yukarı doğru olan yükseliş hareketini devam ettirirken bir yandan da hidrojen gazlarını toplamakta ve eriyik yüzeyine ulaştırarak atmosfere serbest bırakmaktadır. Bu tabletler ayrıca tuz eritkeni de içermektedirler. Tuz eritkenler, eriyik içerisindeki ıslak oksit katkılarla ilişkili olan hidrojenlerin de artırılmasına yardımcı olmaktadır [Demircioğlu, 2002].

İnert gazlarla (Ar, N gibi) gaz giderme işleminde esas olarak fiziksel bir prosesdir. Ergiyik içerisine gönderilen gaz kabarcığı eriyik içerisinde yükselirken sıvı metal içinde çözülmüş halde bulunan hidrojen, gaz kabarcığına geçer ve gaz kabarcığından atmosfere taşınır [Demircioğlu, 2002].

2.5. Dökümlerde Besleme Mekanizmaları

Birkaç metal ve alaşım hariç metal ve alaşımların neredeyse tamamı katılaşma sırasında negatif hacim değişimine uğramaktadır. Bakır ve alüminyum esaslı alaşımlarda termal iletkenliğin yüksek olması düşük termal gradyanta neden olmakta ve özellikle geniş sıvı-katı aralığına sahip alaşımlarda katı bir kabuk oluşumu gecikmektedir. Bu gibi alaşımlarda döküm parça neredeyse katılaşmanın sonuna kadar sıvı ve sıvı içerisinde oluşmuş olan katı dentritlerin bir arada bulunduğu yarı-katı (maşi) durumunda soğumaktadır. Bu gibi alaşımlarda porozite ve yüzey çökmesi gibi kusurlardan arındırılmış bir döküm istenmesi halinde sıvının beslenmesi tamamen bu yarı-katı ortamda dentritler arasından sağlanmak zorundadır [ASM Handbook, 1989].

Belirli bir sıcaklık gradyanı ile katılaşılan saf alüminyum katı-sıvı ara yüzeyi düzlemsel bir şekilde ilerleyerek katılaşmaktadır. Bu gibi bir katılaşmada katı-sıvı ara yüzündeki sıvı direkt sıvı ile beslenebilir. Buna karşılık alüminyuma alaşım elementi ilave edildiğinde bu katılaşma belirli bir aralıkta gerçekleşmekte ve katı-sıvı ara yüzeyi dentritik karakteristiğe bürünmektedir. Dentritik karakterli katı-sıvı ara yüzeyi genişlemekte ve neredeyse bazen dökümün tamamını kaplayabilmektedir [Dash ve Makhlof., 2001]. Geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda sıkça görülen karakteristik besleme mekanizmaları Campbell tarafından açıklanmıştır. Buna göre Şekil 2.12'de şematik olarak gösterilen katılaşılan bir dökümden 5 besleme mekanizması aşağıda Campbell'dan alınarak özetlenmiştir [Campbell, 1999].



Şekil 2.12. Katılaşılan bir Al alaşımında beş besleme mekanizmasının şematik gösterimi [Campbell, 1999]

2.5.1. Sıvı besleme

Sıvı besleme en açık ve en kolay olan besleme mekanizmasıdır ve genellikle diğer besleme mekanizmaları sıvı beslemeyi takip eder. Sıvı besleme 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. Yetersiz

bir sıvı besleme doğrudan makro porozite (çekinti boşluğu) oluşumu ile sonuçlanmaktadır [Campbell, 1999].

2.5.2. Kütle besleme

Kütle besleme terimi sıvı ile birlikte bir miktar katı kütlenin de besleme sıvısı ile birlikte hareket ederek dentritler arası (interdentritik) bölgede besleme yapmasıdır. Çekirdeklenme sıcaklığının altına düşmesi ile sıvı içerisinde katı dentritler çekirdeklenerek büyümeye başladığı sırada etrafından akan sıvı ile birlikte beslenen bölgeye hareket eder [Campbell, 1999].

2.5.3. Dentritler arası besleme

Katı kristaller genellikle dentritik formda büyümeye devam ederken sıvı ile birlikte besleme bölgesine hareket etmeye devam ederler. Bu iki fazlı akış bulamaç (slurry) olarak tanımlanabilir ve katı dentritlerin iyice büyümesi ile besleme kanalını katı ve sağlam bir ağ ile tamamen kapatmasına kadar besleme aktivitesine katkıda bulunurlar. Dentrit blokajı (dentrite coherency) olarak tabir edilen kritik bir katı oranına erişildiğinde dentritler birbirine tutunarak rijit bir ağ oluşturur. Bu noktaya ulaşıldığında dentrit blokajı daha fazla kütle beslemeye izin vermez. Bunun yerine sıvı katılaşma çekmesini hala telafi edebilmek için dentrit örgüsü aralarından sızarak besleme aktivitesine bir süre daha devam eder. Düşük katı oranlarında dentrit örgüsünün geçirgenliği henüz yüksek olduğundan sıvı sızıntısına tamamen karşı koyamaz [Campbell, 1999].

2.5.4. Zor besleme (Burst feeding)

Katı oranı giderek artarken dentrit örgüsü de giderek güçlenmektedir, ancak geçirgenlik azalmaktadır. Bu noktada dentrit örgüsü daha fazla artan besleme sıvısı basıncına ve zorlamasına dayanamamakta ve sıvı dentrit örgüsünü kırarak bir süre daha besleme bölgesine sızmaya devam

etmektedir. Campbell bu noktada KKO'nun %68 oranında olduğunu bildirmiştir. Ancak, alaşımın türü ve alaşım içinde bulunan katkı elementleri ve döküm şartları bu oran üzerinde önemli etkilere sahiptir. Zor besleme noktasının tahmin edilmesinde hem KKO'nun bilinmesine hem de yarı-katı bölgesindeki dentrit örgüsünün çekme dayanımı bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır [Campbell, 1999].

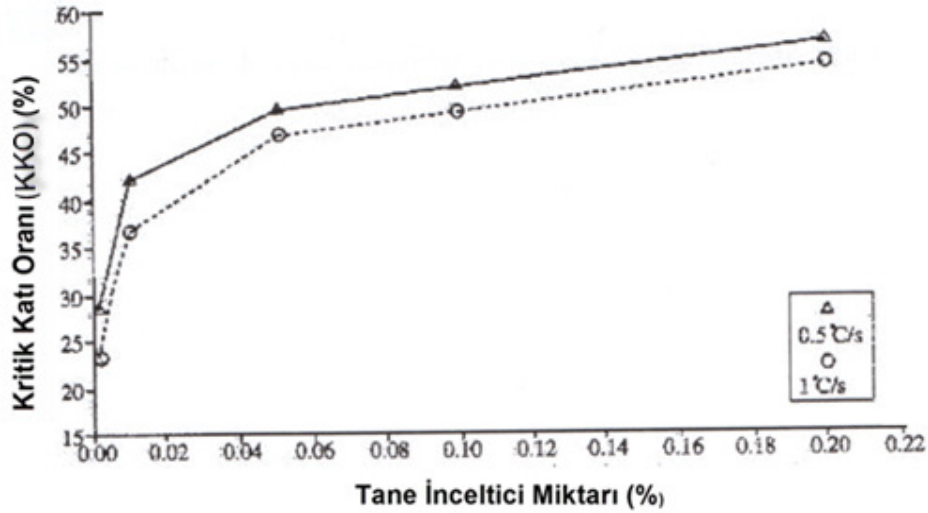
2.5.5. Katı besleme

Büyüyen katı oranıyla birlikte dentrit örgüsü arasında sıvı geçirgenliği giderek azalırken dentritler üzerindeki gerilme de giderek artmaktadır. Artan gerilme ile bazen dentrit örgüsü dağılmakta ve katı dentrit parçaları bir miktar sıvı beraberinde besleme bölgesine taşınabilmektedir. Katı besleme terimi besleme işleminin henüz katılaşıp 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 çok istenen bir durumdur. Hatasız bir dökümün üretilebilmesi için katılaşma sırasında yeterli miktarda sıvı metalin sağlanabilmesi zorunludur. Eğer besleme metali yetersiz kalırsa dökümde makro ve mikro porozite, yüzey çökmesi gibi birçok kusur oluşabilir [Campbell, 1999].

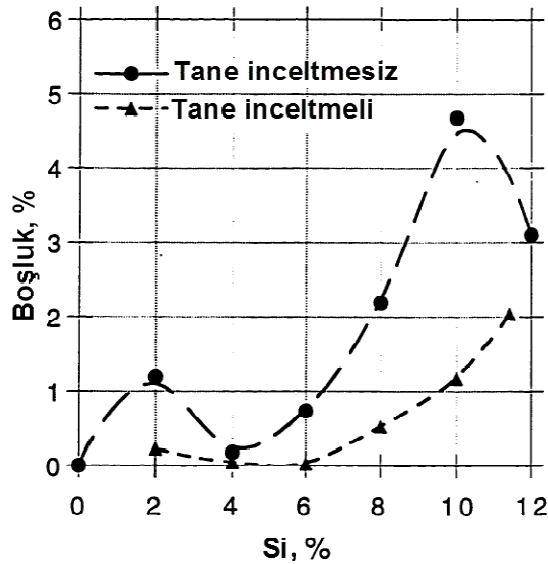
2.6. Tane İnceltmenin Besleme Üzerine Etkisi

Tane inceltirilmiş dökümlerde yarı-katı bölge boyunca beslenebilirliğin arttığı bilinmektedir [ASM Handbook, 1989, Kim, 1996]. Chai ve ark. yavaş hızda dönerek soğuyan silindirik bir dökümün içine yerleştirdiği kanat ile katılaşma sürecinde büyüyen dentritlerin kanata uyguladığı yükteki değişimi ölçmüştür. Al-%4Cu alaşımı ile yapılan bu ölçümlerin sonuçları Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi tane inceltici ilavesine bağlı olarak dentrit blokajı gecikmektedir. Tane inceltirilmemiş bir dökümde dentrit blokajı yaklaşık %25 katı oranı seviyesinde iken %0,20 oranında tane inceltici ilave

edilmiş dökümde bu oran %50 seviyesine çıkmaktadır. Şekil 2.13'te ayrıca soğuma hızının da dentrit blokajı üzerinde bir miktar etkisinin olduğu görülmektedir. Soğuma hızı 0,5 °C/s'den 1 °C/s'ye çıktığında dentrit blokajı bir miktar erken başlamaktadır [Chai ve ark., 1995, Kim ve Lee, 1997].

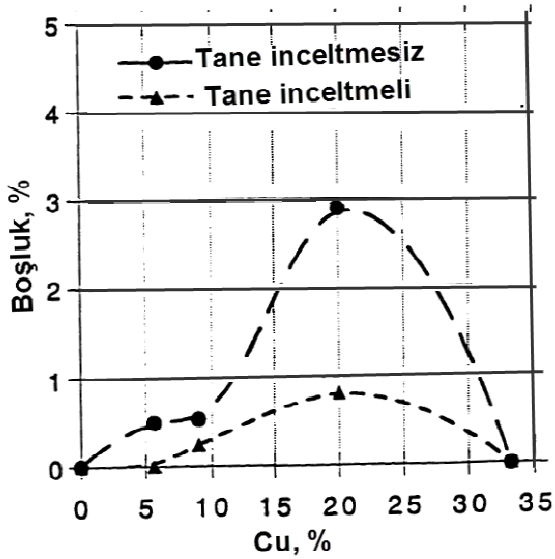


Şekil 2.13. Al-%4Cu alaşımında tane inceltici ilavesinin %KKO'ya etkisi [Chai ve ark., 1995]



Şekil 2.14. Tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda Al-8Si alaşımının dentritler arası boşluk hacmi [Kim, 1996]

Kim [Kim, 1996] doktora çalışmasında geniş katılışma aralığına sahip Al-8Si ve Al-20Cu alaşımları için tane inceltme işlemi sonucunda dentritler arası boşluk hacminin 1/3 oranında azaldığını tespit etmiştir (Şekil 2.14, Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda Al-20Cu alaşımının dentritler arası boşluk hacmi [Kim, 1996]

2.7. Döküm Simülasyonu

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak bilgisayar destekli tasarım ve modelleme yazılımları dökümcülük sektörüne de girmiştir. SOLIDCast, MAGMASOFT, NovaCast, QuikCAST, ProCAST, Vulcan ve Flow-3D gibi bazı yazılımlar en yaygın kullanılan döküm simülasyon programlarıdır. Günümüzde birçok dökümhanede dökümlerin üretim dizaynı öncelikle bilgisayar ortamında yapılarak hata oranı minimuma indirilir. Dökümlerin bilgisayar ortamında tasarımı ise doğrudan dökümlerin katılışma hızı, sıcaklık gradyanı, ısının döküm-kalıp ara yüzeyinden transfer hızı, kalıp malzemesinin ısıl özellikleri vb. gibi parametrelerin doğru bilinmesine ve uygun şartların belirlenerek kullanılmasına bağlıdır. Günümüzde mikro ve makro yapı, porozite, döküm parçanın ısıl gerilim analizi, döküm parçadan ısı transfer hızı gibi parametreleri esas alan döküm simülasyonlarının daha

doğru yapılabilmesi için çok yoğun araştırmalar devam etmektedir [Akar, 2006].

Bütün döküm simülasyon programlarının işlem basamakları genellikle benzerdir. Bunlar; malzeme ve özelliklerinin seçimi, döküm ve kalıp modeli oluşturma, modelin çözüm ağının oluşturulması, simülasyon ve sonuçların değerlendirilmesi olarak sıralanabilir. Sonuçlar incelendikten sonra isteğe bağlı olarak veya gerekiyorsa yeni tasarım ve tekrar simülasyon yapılır ve kısa zamanda optimum tasarım elde edilir [Arda ve Kayıkcı, 2006, Çolak ve Kayıkcı, 2007].

2.7.1. Döküm simülasyonlarında tanımlanan parametreler

Döküm simülasyon programlarında neredeyse bütün alaşımların dökümü modellenabilir ve gerçek döküm şartları birebir programda tanımlanabilir. Başarılı sonuçlar elde edilmesindeki en önemli etken gerçek döküm şartlarının simülasyon programında tam ve doğru olarak girilmesine bağlıdır. Çünkü döküm ve katılma işlemi bu parametrelerden etkilenmektedir ve bunların modelleme esnasında eksik girilmesi hatalı sonuçlar verebilir. Döküm simülasyon programlarında sınır şartları olarak tanımlanan birçok parametre mevcuttur. Bunların arasında malzeme ve özellikleri seçimi oldukça kapsamlıdır ve genellikle bu kapsamda kalıp malzemesi içinde ve malzemeler arası ısı akışını kontrol eden özellikler (ısı transfer katsayıları), kullanılan döküm alaşımları özellikleri, hacimsel değişim (çekme) eğrisi değerleri de program tarafından verilebildiği gibi isteğe bağlı olarak da değiştirilmesi mümkündür.

Ayrıca döküm simülasyon programları yardımıyla neredeyse dökülebilen tüm alaşımların bilinen birçok döküm yöntemiyle modellenmesi mümkündür.

2.7.2. Döküm simülasyonlarıyla belirlenebilen özellikler

Modelleme sonucu döküm parça üzerinde neredeyse istenilen bütün özellikler belirlenebilir.

Kalıp dolumu esnasında sıvı metalin hızı, basıncı, yönü, türbülanslar, soğuk birleşme bölgeleri, döküm parçanın katılma süresi, döküm parça üzerinde oluşan sıcak noktalar, beslenmesi gereken noktalar ve modülleri, besleyici yeri ve boyutları, parça üzerinde oluşan çekinti (makro porozite), ve mikro porozite tahmini gibi özellikler belirlenebilir [Çolak ve Kayıkcı, 2007]. Mikro porozite tahmini; Niyama değeri ile tanımlanmaktadır [Liotti ve Previtali, 2006, Carlson ve Beckermann, 2009, Tian ve ark., 2003].

% Niyama noktası değeri Niyama değerinin hesaplandığı yüzde katı oranıdır. Niyama kriteri bir noktadaki sıcaklık gradyanının aynı noktadaki soğuma oranına bölünmesi ile elde edilir "Eş. 2.4". Niyama değeri katılmanın yönlendirilme derecesinin ve çekme oluşma ihtimalinin bir göstergesidir. Niyama değeri normalde KKO'dan hemen sonra hesaplanır. Varsayılan Niyama değerinin KKO değerinden %5 yüksek alınması uygundur [Liotti ve Previtali, 2006, Carlson ve Beckermann, 2009, Tian ve ark., 2003, Kayıkcı ve Akar, 2010].

$$N = G_s / \sqrt{T} \quad (2.4)$$

Burada N Niyama değeri, G_s ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$) termal gradyant ve T ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) soğuma oranı'dır.

Bu fonksiyon basitliği ve gerekli sınır parametreleri sayesinde bilgisayarda kullanımı uygun olduğu için geniş kullanım alanına sahiptir. Fonksiyonun sınır değerleri sisteme ve değişmeyen materyallerine bağlıdır.

Literatürde farklı metaller için önerilen Niyama sınır değerleri Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Niyama kriteri sınır değerleri [Liotti ve Previtali, 2006]

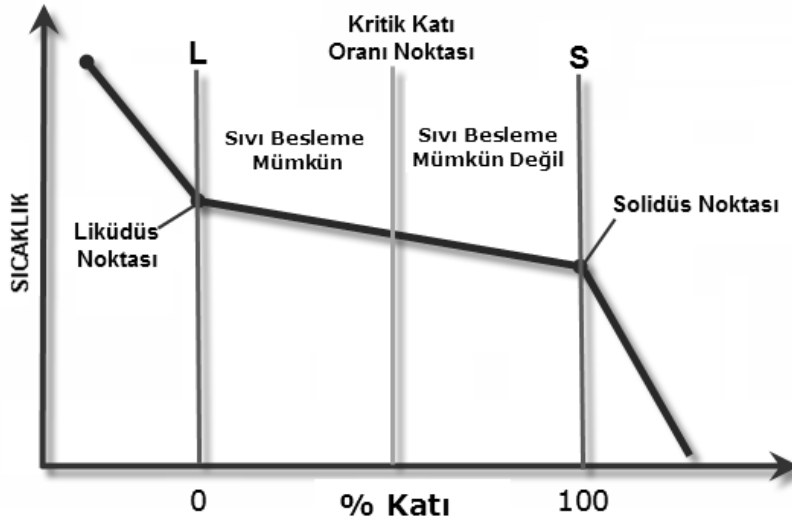
Malzeme	Sınır değer
Çelik	1
Dökme demir	0,75
Al Alaşımlar	0,25-0,30
Cu Alaşımlar	1,3

Modelin etkinliği gerçek boşluk seviyesiyle kıyaslanarak değerlendirilir kullanılan yazılımdaki hesaplar tahmin edildikten sonra alaşım ürünleri dökümhanede elde edilir [Liotti ve Previtali, 2006].

Bununla beraber döküm parça kesitleri üzerinde soğuma süresince sıcaklık-zaman analizleri, katılaşma zamanı analizi, yönlendirilmiş katılaşma analizi, doldurma ve katılaşma esnasındaki sıcaklık dağılımı, ve dökümlerde büyük önem taşıyan herhangi bir zamandaki sıvı faz, katı faz, kritik katı oranları modellenenbilir.

2.7.3. Kritik katı oranı (KKO) veya kritik sıvı oranı (KSO)

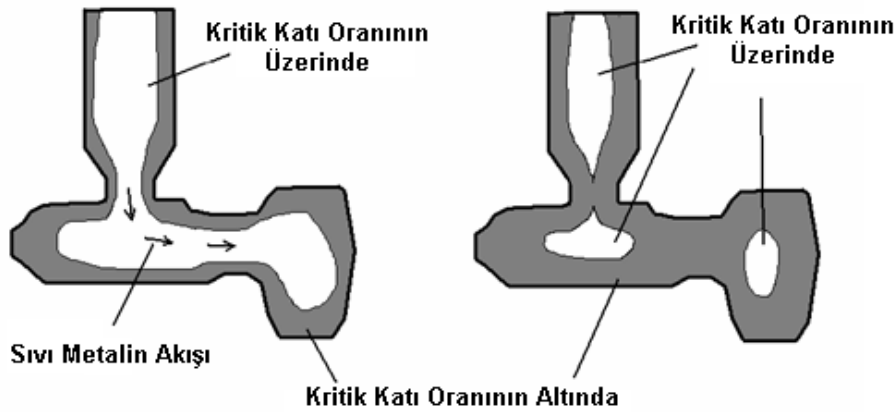
Döküm katılaştıkça, tamamen sıvı fazdan kademeli olarak tamamen katı faza dönüşür. Dökümde çekme porozitesini engellemek için oluşabilecek ya da meydana gelen çekmeyi beslemek sıvı besleme metalinin akışına bağlıdır. Katılaşma ilerledikçe sıvı metal hiç akamayacağı bir noktaya ulaşır. Sıvının ulaştığı bu nokta KKO veya KSO olarak adlandırılır. Genellikle bu durum tamamen katılaşma yüzdesi olarak açıklanır ve Şekil 2.16'daki gibi soğuma eğrilerinde görünür [Kayıkcı ve Akar, 2010, Kumruoğlu ve Özer, 2008].



Şekil 2.16. Belirli bir alaşımın soğuma eğrisi üzerinde KKO noktasının gösterimi [Kayıkcı ve Akar, 2010]

Döküm parça katılaştırken tamamen sıvı fazdan, tamamen katı faza kademeli olarak geçer. Bu esnada döküm parçada hacimsel değişiklikler gözlemlenir ve bu durum döküm parçada çekme boşlukları oluşmasına neden olabilir. Döküm parçada çekme boşluğu oluşmaması için, çekme anında besleyiciden sürekli olarak sıvı metal takviyesi gerekir. Soğuyan metalin katı oranı arttıkça akıcılığı azalır. Sıvı-katı oranı öyle bir noktaya ulaşır ki sıvı hareketi sona erer. Sıvı hareketinin sona erdiği nokta KKO noktası olarak isimlendirilir (SOLIDCast programında bu değer KKO olarak tanımlanır). Soğuma eğrisinde KKO noktasına ulaşan metal besleme yeteneği açısından tamamen katılaşmış gibi davranır ve Şekil 2.16'da gösterildiği gibi sıvı beslemesi kesilir [Kayıkcı ve Akar, 2010].

KKO'nun, aşağıdaki örnek şekil incelendiğinde ne kadar önemli olduğu anlaşılabilir (Şekil 2.17). KKO noktasının üzerinde metal bir noktadan bir noktaya akacak sıvı oranına sahiptir. KKO değerinin üzerinde döküm parçanın bir bölümünde katılaşma ve çekme meydana gelse bile besleyiciden sıvı metal akmaya devam eder dolayısı ile parçada çekme meydana gelmez [Kayıkcı ve Akar, 2010].



Şekil 2.17. KKO'ya ulaşan metalin beslemesinin kesilmesi [Kayıkcı ve Akar, 2010]

Diğer taraftan besleme yolu KKO noktasının altına soğursa besleme yolu tıkanarak besleyiciden sıvı metal akışı kesilir ve döküm parça içinde beslenemeyen izole olmuş sıvı alanları kalır (Şekil 2.17). Döküm parça içinde izole olmuş bu sıvı metal soğumaya devam eder ve aynı zamanda da hacimsel olarak büzülür. Dolayısı ile besleyicideki sıvı metal ile bu alanları beslemesinin imkânı yoktur ve bu alanlarda katılaşma çekmesi boşlukları meydana gelir. Döküm kesitlerinde oluşan bu tür izole bölgeler sıcak nokta (hot spot) olarak tanımlanır.

SOLIDCast programında soğuma eğrileri ve hacimsel çekme eğrileri fare (mouse) yardımı ile yeniden çizilebilir. Ayrıca KKO ve Niyama noktaları da isteğe göre ayarlanabilir. Alaşımlar için tavsiye edilen KKO ve Niyama değerleri Çizelge 2.4'te verilmiştir [Kayıkcı ve Akar, 2010].

Çizelge 2.4. Bazı alaşım grupları için tavsiye edilen KKO ve Niyama değerleri [Kayıkcı ve Akar, 2010]

Alaşım	KKO	Niyama
Çelikler	%60	%65
Alüminyum alaşımları	%35	%50
Bakır alaşımları	%50	%90

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Döküm Alaşımı

Deneysel çalışmalarda kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1'de verilen Al-%4,3Cu (ETİAL-220) döküm alaşımı kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Al-%4,3Cu (ETİAL-220) döküm alaşımının kimyasal kompozisyonu

Alaşım elementi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
Ağırlıkça (%)	0,029	0,087	4,310	0,144	0,106	0,071	Kalan

3.2. Ergitme ve Döküm İşlemi

Döküm alaşımının ergitme işlemi, Resim 3.1'de görüntüleri verilen elektrik rezistanslı ergitme ocağında silisyum karbür pota içerisinde gerçekleştirilmiştir. Elektrik rezistanslı ergitme ocağının sıcaklık kontrolü, ocağın içine monte edilmiş ısı çifti (termokupl) bağlı sıcaklık kontrol paneli ile sağlanmıştır.

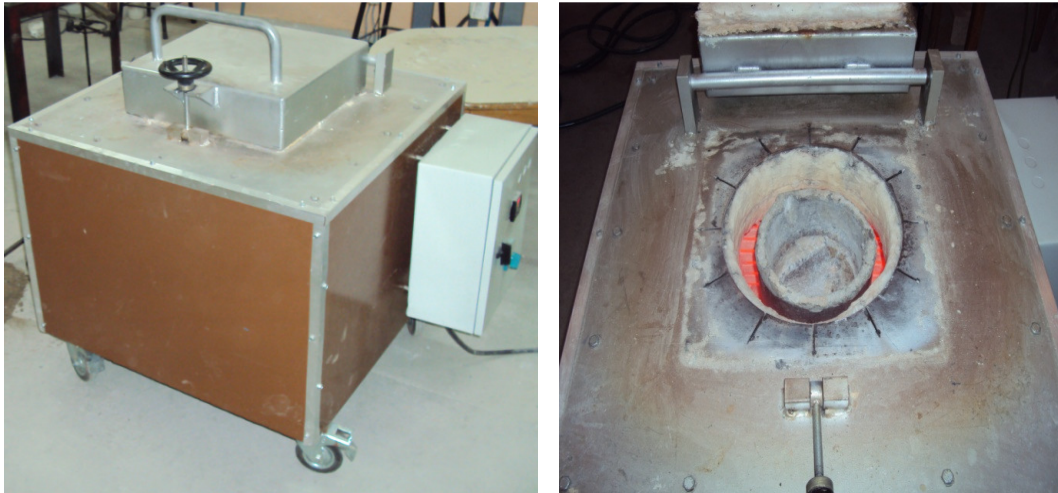
Ergitme işleminde kullanılan el takımları her bir işlemde önce temizlenmiş ve yüzeyleri BN (Bornitrür) ile kaplanmıştır.

Külçe halindeki döküm alaşımı, belli miktarda tartıldıktan sonra elektrik rezistanslı ergitme ocağının içinde bulunan silisyum karbür pota içerisine yerleştirilmiştir. Döküm alaşımı pota içerisine yerleştirildikten sonra 730°C'ye ayarlanmış ocağın kapağı kapatılmış ve metalin ergimesi beklenmiştir. Metal ergimeye başladığı anda sıvı metalin atmosferden gaz almasını önlemek için Foseco-Coveral 90 yüzey koruyucu ile yüzey kapatılmıştır.

Deneysel çalışmalarda tane inceltici uygulanmamış ve tane inceltici uygulanmış olmak üzere iki farklı döküm işlemi yapılmıştır.

Tane inceltme işlemi uygulanmamış durumda; 730°C'deki ergimiş sıvı metale (ağırlıkça %0,2 oranında) Foseco-Nitral C19 gaz giderici tablet ile gaz giderme işlemi uygulanmıştır. Gaz giderme işleminin ardından yüzeydeki curuf tabakası temizlenen sıvı metal, ergitme potasından döküm potasına alınmış ve sıcaklık kontrolünün ardından 710°C'de döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Tane inceltme işlemi uygulanmış durumda; 730°C'deki ergimiş sıvı metale önce tablet şeklindeki ve Ti:B oranı 11:1 olan tane inceltici (Foseco-Nucleant 70SS) ilave edilmiş ve tane incelticinin reaksiyona girmesi için bir süre sıvı metalin yüzeyi tekrar Foseco-Coveral 90 yüzey koruyucu ile kapatılarak beklenmiştir. Belirli bir süre bu durumda bekletilen sıvı metal (ağırlıkça %0,2 oranında) Foseco-Nitral C19 gaz giderici tablet ile gaz giderme işlemi uygulanmıştır. Gaz giderme işleminin ardından yüzeydeki curuf tabakası temizlenen sıvı metal, ergitme potasından döküm potasına alınmış ve sıcaklık kontrolünün ardından 710°C'de döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.1. Deneysel çalışmada kullanılan elektrik rezistanslı ergitme ocağı

3.3. RPT Testi

RPT (Düşürülmüş Basınç Testi) sıvı metal içerisinde bulunan gaz oranını

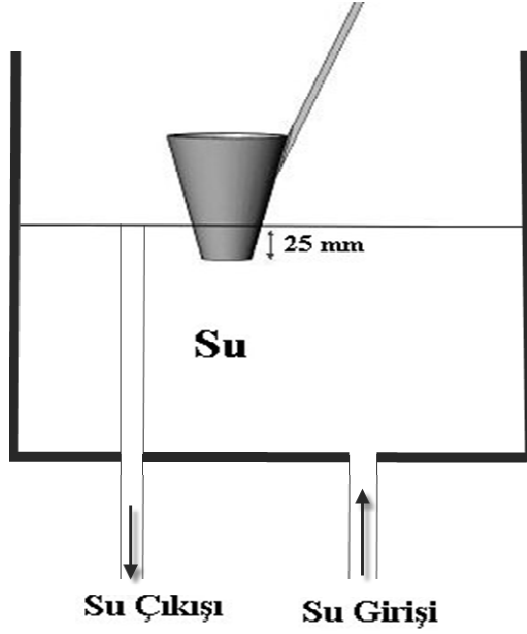
tespit etmek için uygulanan yöntemlerden biridir. Bu testin amacı, sıvı metale uygulanan gaz giderme işleminin yeterliliğinin tespit edilmesidir. RPT testinin gerçekleştirildiği döküm şartları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. RPT deney şartları

Deney No	Döküm Sıcaklığı	Yüzey Koruyucu	Gaz Giderme	Tane inceltme	Vakum
RPT-1	710 °C	Yok	Yok	Yok	700 mmHg
RPT-2	710 °C	Var	Yok	Yok	700 mmHg
RPT-3	710 °C	Var	Var	Yok	700 mmHg
RPT-4	710 °C	Var	Var	Var	700 mmHg

3.4. Tane İnceltme Deneyleri

Optimum tane inceltici miktarını belirleyebilmek amacıyla 730°C'deki ergimiş sıvı metale Titanyum miktarı %0,03, %0,02 ve %0,01 %0.008 olacak şekilde dört değişik oranda alüminyum folyoya sarılı tablet şeklindeki (Ti:B=11:1) tane inceltici (Foseco-Nucleant 70SS) ilave edilmiştir. Tane inceltici ilave edildikten sonra tane incelticinin reaksiyona girme ve reaksiyonda kalma süresinin belirlenmesi amacıyla 0 dak., 2,5 dak., 7,5 dak., 12,5 dak., 17,5 dak., 22,5 dak., 27,5 dak., 32,5 dak. ve 37,5 dak.'larda numuneler alınmıştır. Her numune alma işleminin ardından sıvı metalin yüzeyi Foseco-Coveral 90 yüzey koruyucu ile kapatılarak beklenmiştir.



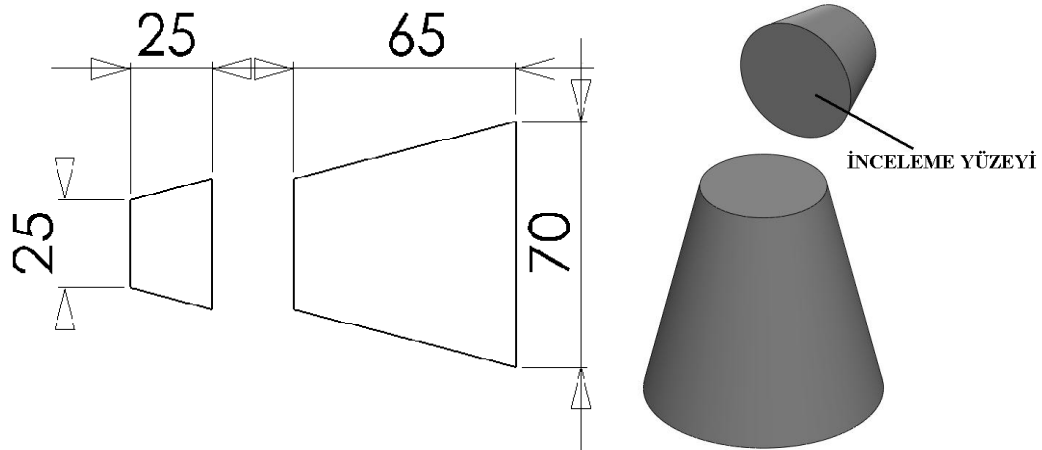
Şekil 3.1. ALCAN standart tane inceltme deney düzeneği şematik gösterimi

Tane inceltme deneyleri ALCAN tane inceltme deney standartlarına göre yapılmıştır [Murty ve ark., 2002]. ALCAN tane inceltme deney düzeneği Şekil 3.1'de şematik olarak verilmiştir. Sıvı metal, dip çapı 25 mm, üst çapı 70 mm ve yüksekliği 90 mm olan 3 mm metal bir sacdan yapılmış, sürekli akan ve yüksekliğinin sabit olduğu bir kap içindeki suya uç kısmı daldırılmış pota içinde katılaştırılmıştır.



Resim 3.2. Tane inceltme deney numuneleri

Katılaşma ve soğuma süresince soğutma kabı içerisinde bekletilen konik alaşım külçesinin fotoğraf görüntüsü Resim 3.2'de ve tane inceltme deney numunesinin kesilme ölçüleri ve numunenin inceleme yüzeyinin şematik görünüşü Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Tane inceltme deney numunesi ölçüleri ve inceleme yüzeyi

3.5. Metalografik İnceleme

Bu çalışmada, optik mikroskoptan alınan mikroyapı resimleri üzerinden görüntü analizi teknikleri kullanılarak tane boyutu ölçümleri ve karşılaştırmaları yapılmıştır.

Metalografik inceleme amacıyla numuneler Resim 3.2 ve Şekil 3.2'de görüldüğü gibi abrasif kesme cihazında kesilmiştir. Sırasıyla 220, 400, 800 ve 1200 grit su zımparaları ile zımparalamanın ardından 6 μm ve 3 μm polikristal elmas pasta süspansiyonları ile parlatma işlemi yapılmıştır.

Parlatılan yüzeyler yıkanıp kurutulduktan sonra Resim 3.3'de görülen Struers marka elektrolitik parlatma cihazı ile elektrolit yardımı ile yüzeyleri (polarize ışıkta taneleri görüntüleyebilmek amacıyla) ince oksit filmi ile kaplanmıştır. Elektrolitin kimyasal karışım oranları Çizelge 3.3'te verilmiştir. Elektroliz işlemi 22°C'de, 39 Volt akım altında ve 10 s sürede yapılmıştır.



Resim 3.3. Elektrolitik parlatma cihazı

Çizelge 3.3. Elektroliz karışım oranları

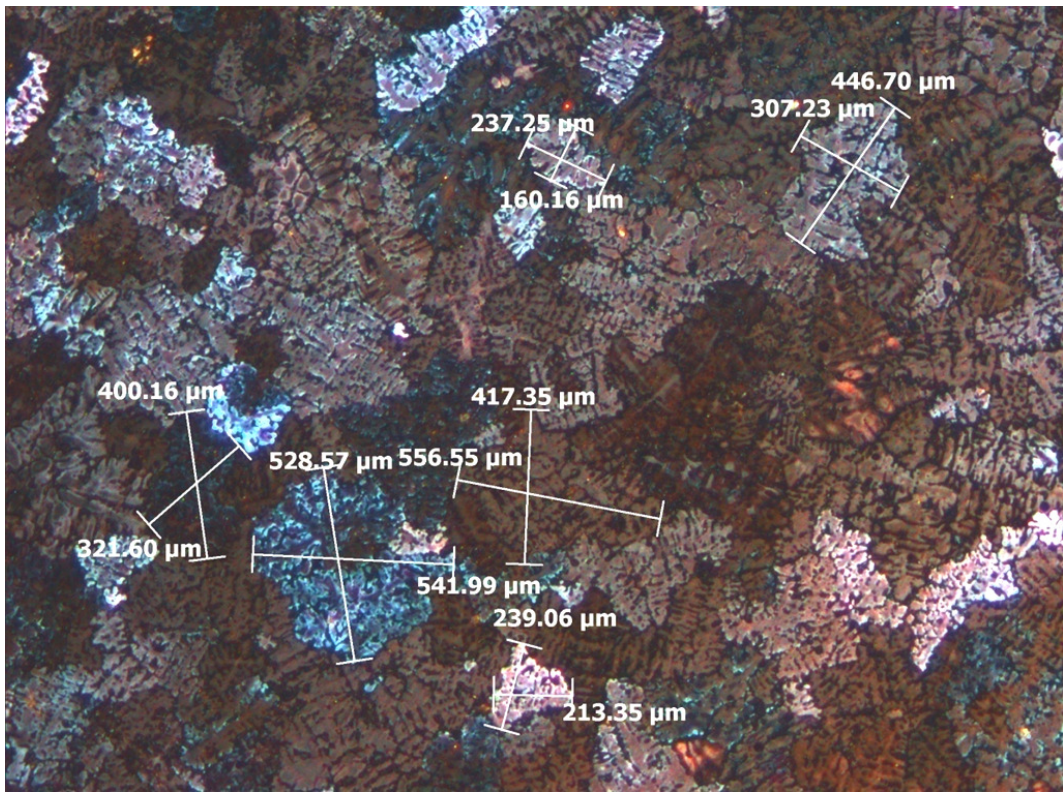
Madde	Miktar (%)
HClO ₄ (Perklorik asit)	5
2-Butoxyethanol	15
Ethanol	60
Saf su	20

Mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M marka optik mikroskop (Resim 3.4) kullanılmıştır.



Resim 3.4. Mikroyapıların görüntülenmesinde kullanılan optik mikroskop

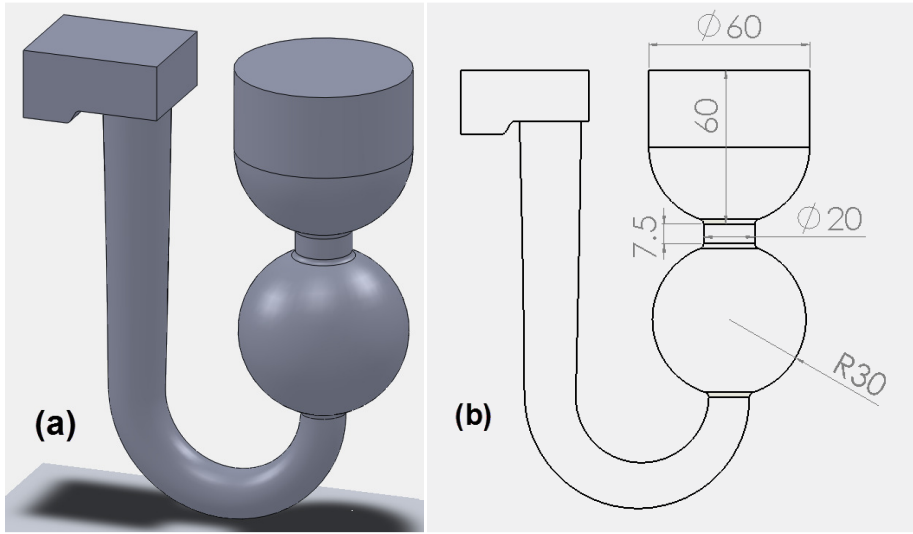
Tane ölçümleri optik mikroskop ile polarize ışık altında gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin farklı bölgelerinden yaklaşık 100 adet net olarak görülebilen taneler seçilmiştir. Seçilen tanenin enine ve boyuna çizilen çizgiler yardımı ile otomatik olarak ölçümler yapılmıştır (Resim 3.5). Daha sonra tanenin eni ve boyunun ortalaması alınarak her bir tane için tane boyutu hesaplanmıştır. Her numuneden hesaplanan tanelerin tamamının ortalaması alınarak deney şartı için ortalama tane boyutu belirlenmiştir.



Resim 3.5. Mikroyapı üzerinden tane boyutu ölçümü

3.6. Döküm Parça Geometrisi

Seçilen döküm parça geometrisi ve ölçüleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Döküm geometrisi özellikle içte makro çekme boşluğu oluşacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan döküm parça geometrisi

Bilgisayar destekli döküm tasarımında KKO'nun belirlenmesi döküm parçada oluşan gerçek makro çekme miktarının simülasyon sonucunda görülen makro çekme miktarının karşılaştırılması ile mümkün olmaktadır. Bu yüzden dökülecek parçanın üst ve alt kısımları daha kalın, orta kısmı ince olarak tasarlanmıştır. Buna bağlı olarak kalıba sıvı metal doldurulduğunda üst kısımda alt bölgeyi besleyecek metal olmasına rağmen üst ve alt bölgeyi birbirine bağlayan ve daha ince olan orta kısmın daha erken katılaşması söz konusu olacaktır ve besleme gerçekleşmeyecektir. Bundan dolayı alt kısımda bilinçli olarak bir hata oluşması sağlanmış olup bu hata boyutuyla simülasyonlardan alınan sonuçlar karşılaştırılıp KKO değeri belirlenmiştir.

3.7. Döküm Kalıbı

Dökümün yapılacağı kalıp 1040 imalat çeliğinden üretilmiştir (Resim 3.6). Kalıp dökümden önce kalıbın dışına yerleştirilen rezistans ısıtıcılar yardımı ile istenilen sıcaklığa ısıtılmıştır.



Resim 3.6. Rezistans ısıtıcılı kokil kalıp

Ayrıca ısı kaybını önlemek için kalıbın dış kısmı tamamen seramik battaniye ile kaplanmıştır. Kalıbın sıcaklık kontrolü kalıba yerleştirilen ısı çiftine bağlı sıcaklık kontrol cihazı ile sağlanmıştır.

Bu çalışmada katılma hızına bağlı olarak KKO değerini belirleyebilmek için 100°C, 155°C ve 210°C olmak üzere üç farklı kalıp sıcaklığı kullanılmıştır.

3.8. Yoğunluk Hesapları ve Boşluk Hacim Ölçümleri

Deneylerden elde edilen numunelerin yoğunluk ölçümleri Arşimet prensibine göre çalışan Sartorius marka yoğunluk ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir (Resim 3.7). Her bir numunenin önce havada ve daha sonra suda ağırlığı tartılmıştır. Numunelerin yoğunlukları "Eş. 3.1" den yararlanılarak tespit edilmiştir.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

Burada ρ yoğunluk ($\frac{gr}{cm^3}$), m kütle (gr) ve V hacimdir (cm^3).

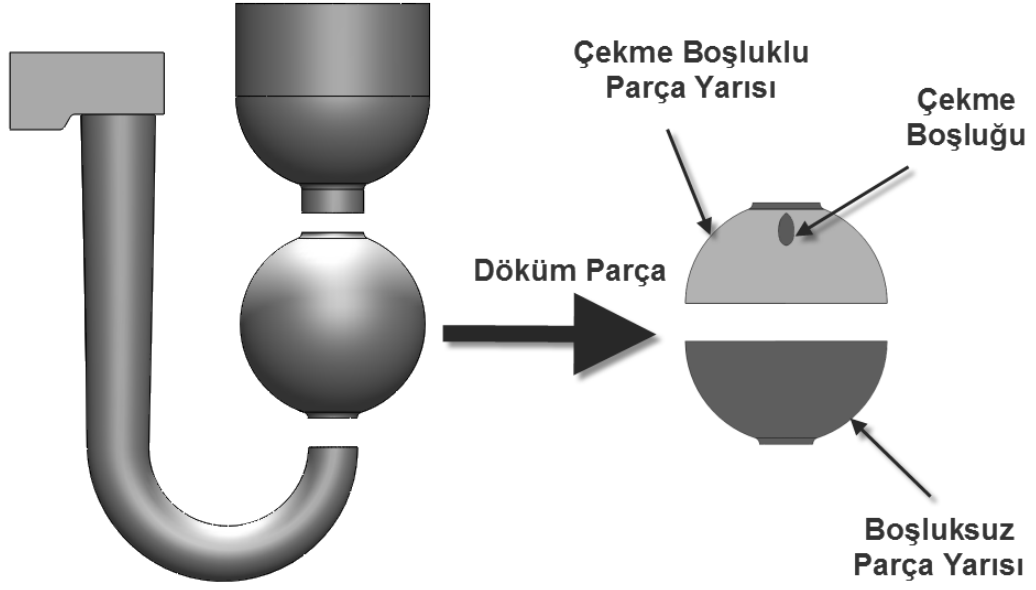


Resim 3.7. Yoğunluk ölçüm cihazı

Parçada oluşan makro çekme boşluğunu belirleyebilmek için küre şeklindeki döküm parça Şekil 3.4'te gösterildiği gibi önce ikiye ayrılmıştır. Daha sonra döküm parçadaki boşluk oluşmayan bölgeden parçanın gerçek yoğunluğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde makro çekme boşluğunun olduğu bölgenin de yoğunluğu ve hacmi tespit edilmiştir. "Eş. 3.2" den yararlanılarak parçada meydana gelen boşluk miktarı belirlenmiştir.

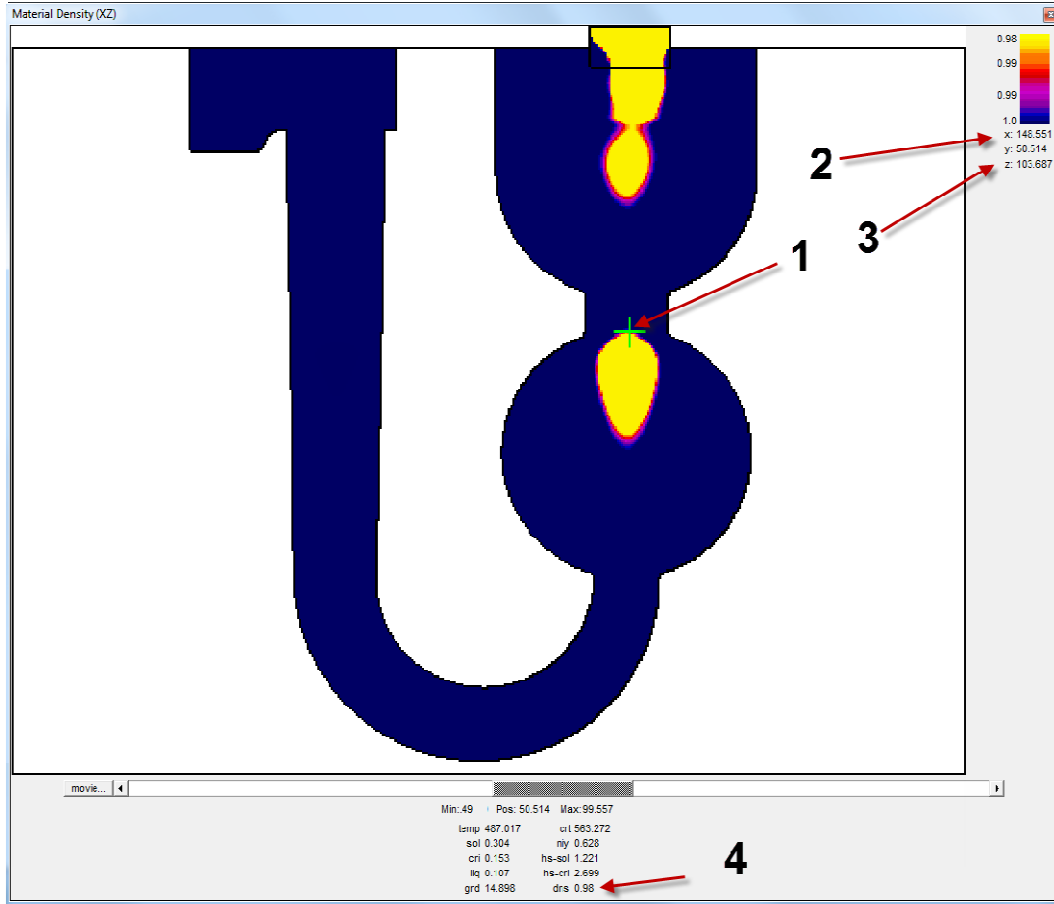
$$V_{BH} = \frac{(V_{BP} \times \rho_{SP}) - m_{BP}}{\rho_{SP}} \quad (3.2)$$

Burada ρ_{SP} sağlam parçanın yoğunluğu, m_{BP} makro boşluklu parçanın kütlesi, V_{BP} makro boşluklu parçanın hacmi ve V_{BH} makro boşluk hacmidir.



Şekil 3.4. Döküm parçanın boşluk hacmi ve yoğunluk ölçüm bölgeleri

Simülasyondan elde edilen makro boşluk hacimlerini belirlemek için önce Şekil 3.5'te görüldüğü gibi XZ düzleminde döküm parçanın tam merkezinden kesecek şekilde kesit yüzeyinden koordinatlar belirlenmiştir.



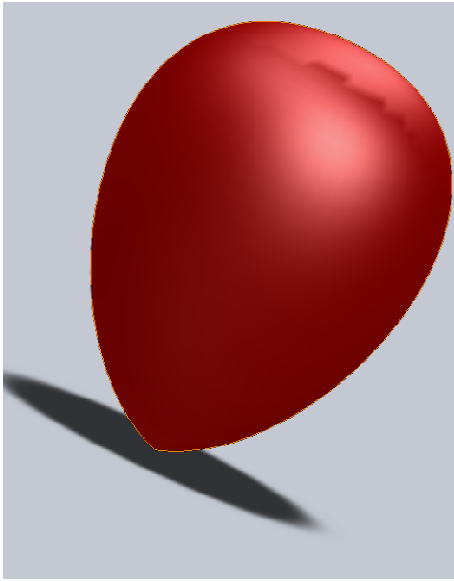
Şekil 3.5. SOLIDCast programından makro boşluk koordinatlarının belirlenmesi

SOLIDCast programında boşluk koordinatları belirlendikten sonra katı model programında boşluk koordinatları yardımı ile boşluğun bire bir katı modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.6). Katı model programının “kütle özellikleri” aracılığı ile boşluğun hacmi belirlenmiştir.

3.9. Simülasyon Şartları

Döküm parçanın simülasyonu SOLIDCast ticari döküm simülasyon programında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan simülasyon programı soğuma ve katılaştırma modellerini sonlu farklar yöntemi ile çözümleyen bir yazılımdır.

Simülasyon yazılımlarının kullanım amacı gerçek döküm şartlarının bilgisayar ortamında sayısal olarak modellenmesini sağlamaktır. Bu çalışmada tüm döküm şartlarının yanında özellikle katılaşma sürecinde oluşan dendrit ağı neticesinde sıvı beslemenin kesildiği noktayı gösteren KKO değerinin gerçek karşılığının bulunabilmesi öngörülmüştür.



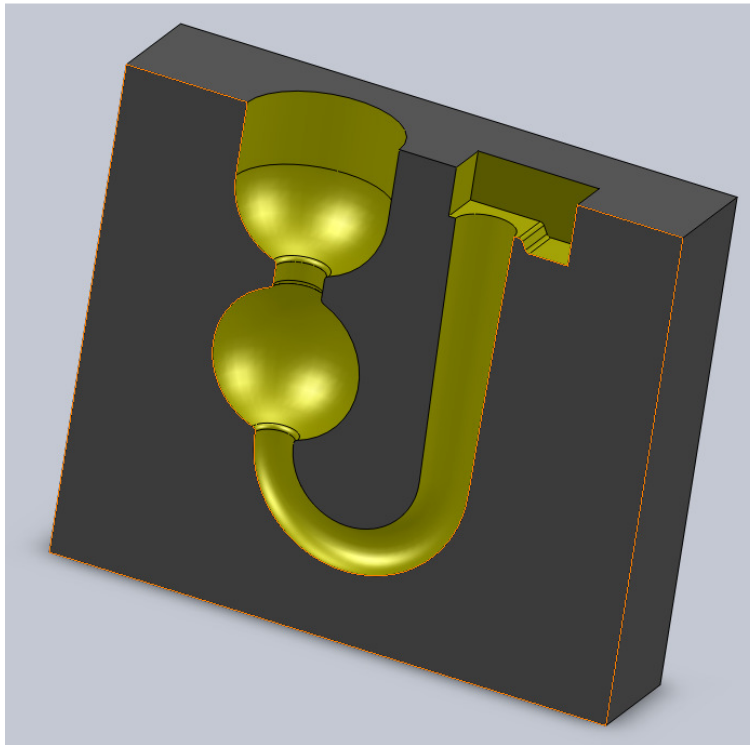
Şekil 3.6. Katı model programında çizilen boşluk

3.9.1. Döküm-Kalıp geometrisinin ve malzeme özelliklerinin simülasyon programına girilmesi

Şekil 3.7'de görülen döküm parçanın üretildiği çelik kalıp ve Şekil 3.3'de görülen döküm parça, katı modelleme programında çizildikten sonra STL formatında kaydedilerek SOLIDCast yazılımında açılmıştır. Bu aşamadan sonra döküm ve kalıp malzemesinin türü ve termo-fiziksel özelliklerinin tanımlanması yapılmıştır. Döküm malzemesinin özellikleri simülasyon programının veri tabanında mevcut olmadığı için manuel olarak girilmiştir. Döküm ve kalıp malzemesi için katsayılar ve kullanılan döküm parametreleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Simülasyonda kullanılan katsayılar ve döküm parametreleri

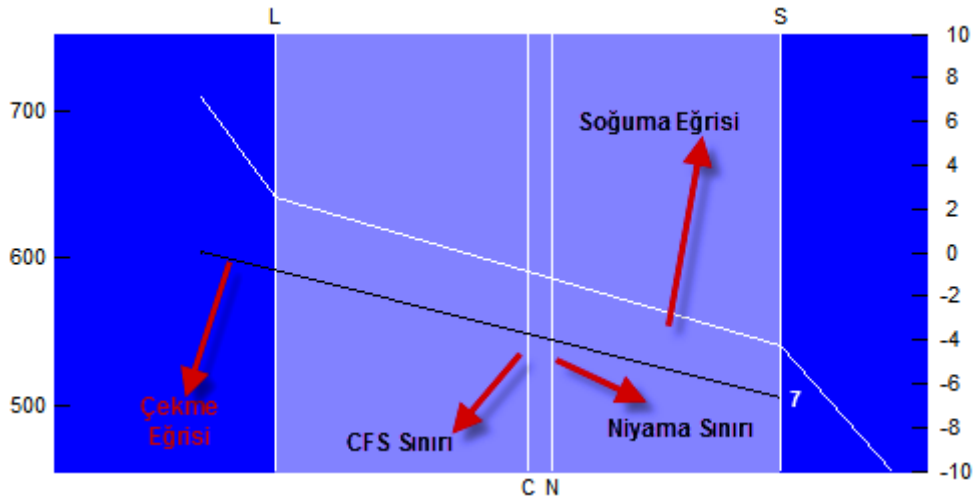
	Kalıp	Döküm parça	
Malzeme	St-1040	Al-%4,3Cu	
Isıl iletkenlik (W/m-K)	53,618	190 [Kayıkcı, 1999]	
Özgül ısı (J/kg-k)	464,424	1070 [Kayıkcı, 1999]	
Yoğunluk (kg/m ³)	7842,413	2750 [Kayıkcı, 1999]	
Başlangıç Sıcaklığı (°C)	100-155-210	710	
Liküdüs Sıcaklığı (°C)	-	644	
Solidüs Sıcaklığı (°C)	-	Tane inceltmeli	Tane inceltmesiz
		568	572
Dolum Zamanı (s)	-	5	
Meş Boyutu (mm)	1	1	



Şekil 3.7. Döküm parçanın üretildiği çelik kalıbın katı model görünümü

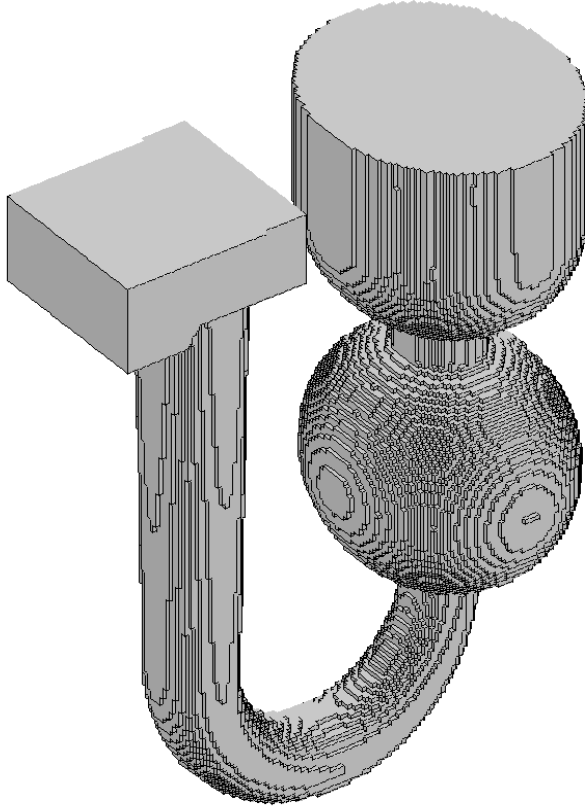
Alaşımın bilinen termo-fiziksel özellikleri girildikten sonra gerekli olan soğuma eğrisi, KKO ve hacimsel çekme oranı gibi sınır şartları verileri girilir. Soğuma eğrisi, ısı kaydedici cihaz ve termokapıllar yardımı ile ölçülen zaman-sıcaklık grafiği üzerinden alınan liküdüs ve solidüs sıcaklıklarının programa girilmesi sonucu oluşturulmuştur (Şekil 3.8).

Bu eğri üzerinde KKO değeri Niyama fonksiyonu ve çekme eğrisi gibi veriler bulunmaktadır. Bu veriler döküm şartlarına göre değiştirilmiştir. KKO değeri makro çekmenin başladığı noktayı Niyama değeri ise sıvı akışı kesildikten sonra mikro çekmenin hesaplandığı noktayı belirler.



Şekil 3.8. Al-%4,3Cu için girilen soğuma eğrisi ve çekme eğrisi

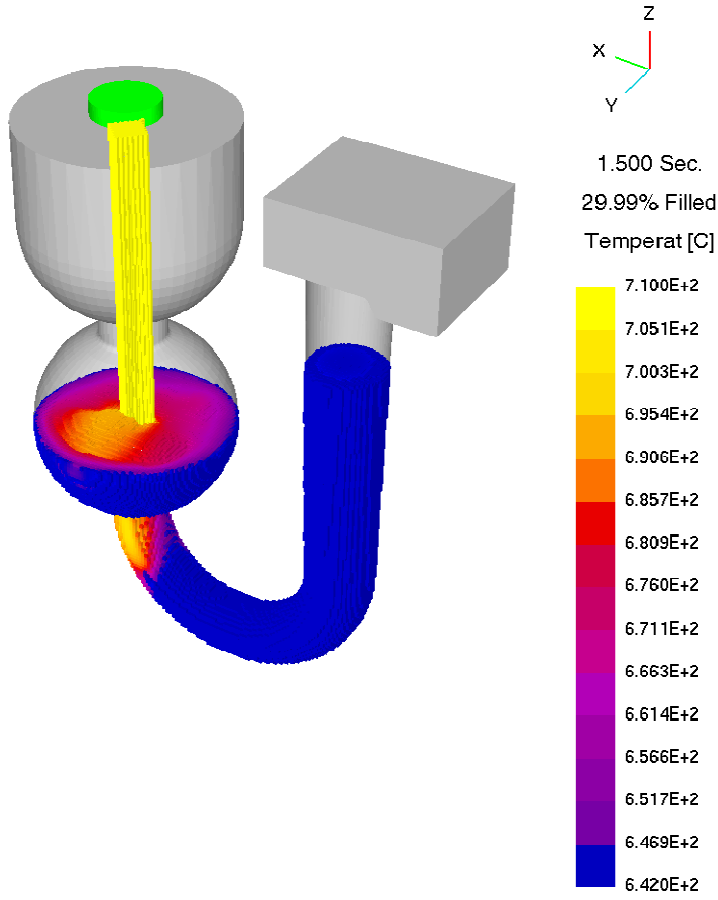
Bu aşamadan sonra Şekil 3.9'da görüldüğü gibi her bir çözüm ağının birbirinden 1 mm uzaklıkta çözüm (düğüm) noktaları oluşturacak şekilde sonlu farklar çözüm ağı (mesh) oluşturulmuştur.



Şekil 3.9. Sonlu farklar çözüm ağı görüntüsü

3.9.2. Simülasyon parçasının dolum analizi ve katılaşması

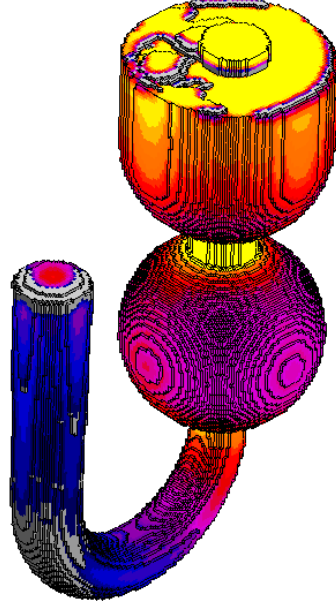
SOLIDCast döküm simülasyon programında kalıp dolumu program ile entegre çalışan FLOWCast modülü ile simüle edilmektedir. FLOWCast modülü akışkanlar dinamiği kriterlerine göre sıvı metalin kalıp boşluğuna doluşunu hesaplar. Kalıp doldurulurken sıvıda türbülans oluşumu, parçada eksik döküm, soğuk birleşme gibi faktörleri de belirler [Kayıkcı ve Akar, 2010]. Şekil 3.10'da kalıp dolum simülasyonu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.10. FLOWCast modülünde kalıp dolum aşaması

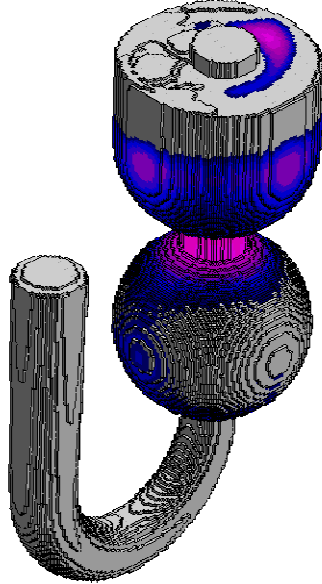
Kalıp dolumu tamamlandıktan sonra soğuma başlar ve parçanın tüm kesitleri katılaşıncaya kadar devam eder. Katılma bitince simülasyon otomatik olarak sonlanır. Bu işlemler neticesinde gerekli analiz sonuçları belirlenir. Parçanın katılma simülasyonu ile ilgili görüntüler Şekil 3.11'de verilmiştir.

Time: 0.087 Min. Max Cast Temp: 703.252C Min Cast Temp: 374.44C
 Time Step: 78 Max Mold Temp: 443.898C Min Mold Temp: 149.60C
 Percent Solid: 0.66 %



(a)

Time: 0.183 Min. Max Cast Temp: 632.541C Min Cast Temp: 267.349C
 Time Step: 2390 Max Mold Temp: 470.822C Min Mold Temp: 147.399C
 Percent Solid: 25.94 %



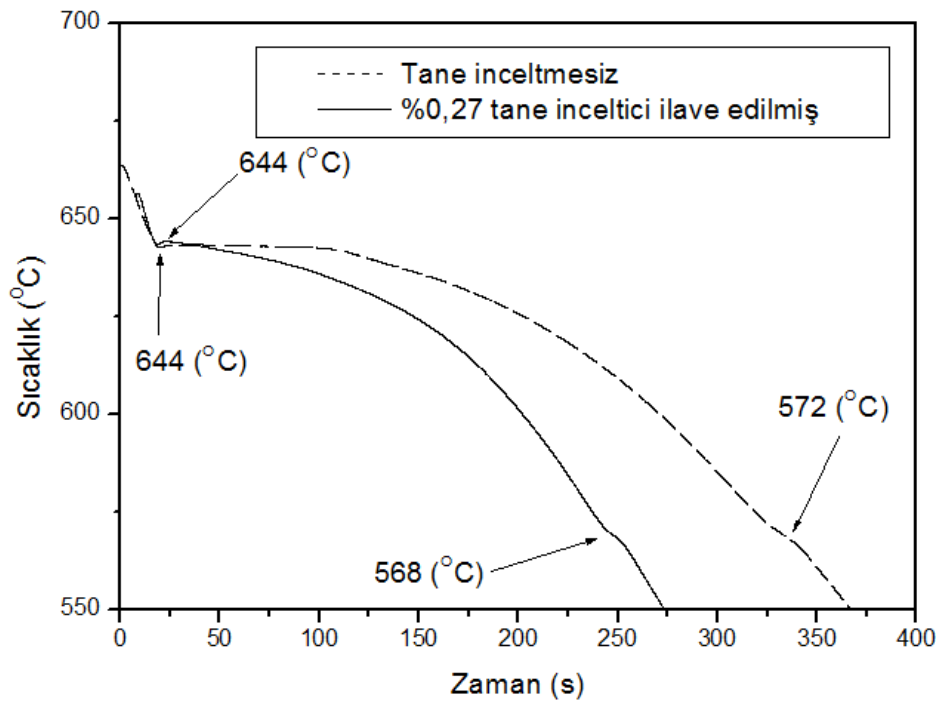
(b)

Şekil 3.11. Katılma simülasyonu aşamaları a) %1 katılma, b) %25 katılma

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

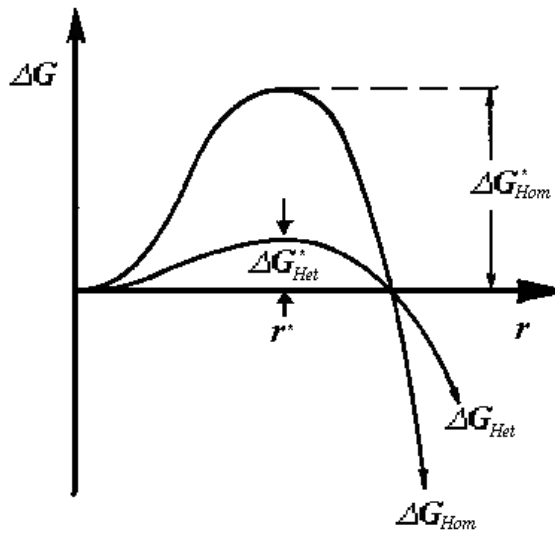
4.1. Al-%4,3Cu Alaşımının Zaman-Sıcaklık (Soğuma) Eğrilerinin Karşılaştırılması

Tane inceltmeli ve tane inceltmesiz olarak yapılan dökümlerin soğuma eğrileri Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde liküdüs sıcaklığının (644°C) tane inceltme ile değişmediği görülebilir. Şekil 4.1'deki soğuma eğrilerinden tane inceltmesiz durumda $0,8^{\circ}\text{C}$ alt soğuma, %0,27 tane inceltici (%0,03Ti) ilave edildiğinde $0,4^{\circ}\text{C}$ alt soğuma tespit edilmiştir. Solidüs sıcaklığı tane inceltmesiz durumda 572°C ve %0,27 tane inceltici (%0,03Ti) ilave edilmiş durumda 568°C olarak belirlenmiştir. Tane inceltici ilavesi katılaşma zamanını oldukça azaltmıştır. Tane inceltmesiz durumda katılaşma yaklaşık 330. s'de tamamlanırken tane inceltici ilave edildiğinde katılaşma 230. s'de tamamlanmıştır.



Şekil 4.1. Al-%4,3Cu alaşımının tane inceltmesiz ve tane inceltmeli soğuma eğrileri

Alaşıma tane inceltici ilave edildiğinde alüminyum taneleri $TiAl_3$ partikülleri üzerinde çekirdeklenecek büyür [Sigworth ve Kuhn, 2007]. Bu durumda çekirdeklenme için çok az serbest enerji değişimine ihtiyaç duyulur (Şekil 4.2). Diğer taraftan çekirdeklenmenin başlayacağı herhangi bir katı partikül bulunmadığı durumda (tane inceltmesiz) çekirdeklenme için daha fazla serbest enerji değişimine ihtiyaç duyulur. Dolayısı ile tane inceltmesiz durumda çekirdeklenmenin başlayabilmesi için itici güç olan alt soğuma daha fazla olmalıdır [Kurz ve Fisher, 1989, Porter ve Easterling, 1990].



Şekil 4.2. Homojen ve heterojen çekirdeklenmede oluşan katı serbest enerji değişimi [Porter ve Easterling, 1990]

Kritik çekirdek yarıçapı homojen ve heterojen çekirdeklenmede aynıdır. Yalnız kritik çekirdek hacmi değişir. Bu sebepten çekirdekleyici esas olarak çekirdeklenmeye karşı gelen yüzey enerji engelini azaltır.

Sıvı metale tane inceltici ilave edildiğinde sıvı içerisinde ince partiküller halinde dağılır [Murty ve ark., 2002]. Sıvı içerisinde dağılmış durumdaki bu küçük partiküller heterojen çekirdeklenme merkezlerini oluştururlar. Dolayısı ile döküm parçanın birçok noktasında taneler çekirdeklendir ve büyür. Diğer taraftan tane inceltici olmadığı durumda çekirdeğin oluşabilmesi için ısının

kalıp duvarından dışarıya atılması ve sıcaklığın katılaşma sıcaklığına ulaşması gerekir. Bu durumda katılaşmanın tamamlanması gecikir.

Hızlı soğuma faz diyagramında ötektik noktayı sağa kaydırarak ötektik sıcaklığı düşürür. Ötektik sıcaklığın düşmesi ile sıvı katı aralığı genişler. Ahmadein ve arkadaşları [Ahmadein ve ark., 2009] alüminyum alaşımlarında soğuma hızının tane boyutuna ve soğuma eğrisine etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmaya benzer olarak soğuma hızının artması ile solidüs sıcaklığının düştüğünü bildirmişlerdir.

4.2. RPT Sonuçları

Farklı döküm şartlarında yapılan RPT testlerinden elde edilen deney numunelerinin yoğunluk ölçümleri ile ilgili sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. RPT numunelerinin yoğunluk ölçüm sonuçları

Deney No	Döküm Sıcaklığı (°C)	Yüzey Koruyucu	Gaz Giderme	Tane inceltme	Yoğunluk (gr/cm ³)
RPT-1	710	Yok	Yok	Yok	2,63
RPT-2	710	Var	Yok	Yok	2,73
RPT-3	710	Var	Var	Yok	2,79
RPT-4	710	Var	Var	Var	2,80

Yüzey koruyucu, tane inceltme ve gaz giderme işlemleri uygulanmamış durumda (RPT-1) 2,63 gr/cm³, sadece yüzey koruyucu flaks altında (RPT-2) 2,73 gr/cm³, yüzey koruyucu flaks+gaz giderme işlemi (RPT-3) sonucunda 2,79 gr/cm³ ve yüzey koruyucu flaks+gaz giderme işlemi+tane inceltici (RPT-4) ilavesi sonucunda 2,80 gr/cm³ alaşım yoğunlukları elde edilmiştir.

Şekil 2.7'de saf alüminyumun hidrojen çözünürlüğü görülmektedir. Alüminyum alaşımlarında ergime sırasında Hidrojen gazı çözünürlüğü oldukça yüksektir. Atmosferde bulunan hidrojen gazı sıvı metal içine nüfuz eder ve katılaşma sırasında sıvı içinde çözünen gazların bir araya gelerek

gaz boşluklarını oluşturması sonucu alaşımın yoğunluğu azalır [Anson ve Gruzleski, 1999, Zhu ve ark., 2006, Dişpınar ve Campbell, 2007, Savaş ve Kayıkcı, 2006].

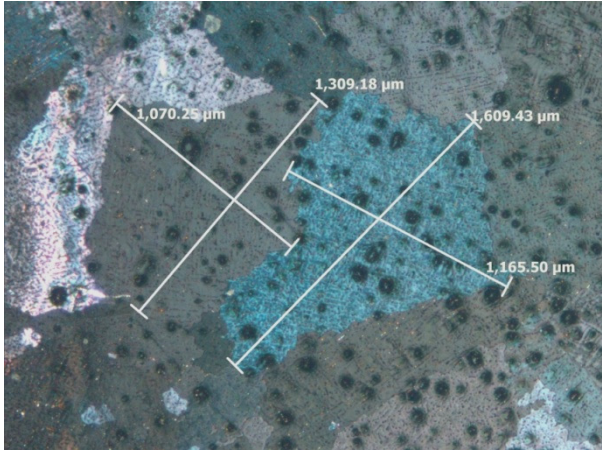
Sıvı metalin yüzeyi yüzey koruyucu bir flaks ile kapatıldığında sıvının atmosfer ile teması kesilir. Atmosfer ile teması kesilen sıvının içine hidrojen gazının girişi büyük oranda engellenmiş olur. Bu durumda en büyük hidrojen kaynağı külçe alaşımının kendisidir. Yüzey koruyucu flaks alaşımın tam ergidiği anda atılır. Dolayısı ile bu ana kadar alaşım atmosfer ile temas etmektedir. Bu durumun, diğer önemli hidrojen kaynağı olduğu düşünülmektedir. Dolayısı ile sadece yüzey koruyucu flaks kullanarak elde edilen yoğunluğa göre oldukça yüksek sayılabilecek yoğunluk elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Bu da alüminyum alaşımının açık atmosferde yüksek oranda gaz çözüldüğünü göstermektedir.

Yüzey koruyucu flaks ile birlikte gaz giderme işlemi uygulandığında alaşımın yoğunluğunda $0,06 \text{ gr/cm}^3$ lük bir artış kaydedilmiştir. Bu da gaz giderme işleminin oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

Yüzey koruyucu flaks, tane inceltici ile birlikte gaz giderme işlemi uygulandığında ise tane inceltici uygulanmamış alaşıma göre yoğunlukta bir miktar artış kaydedilmiştir. Bunun sebebinin tanenin küçülmesi ve dolayısı ile dentritlerin küçülmesine bağlanabilir. Dentritler arasında kalan sıvı fazın dışarıdan beslenememesi sonucu dentritler arası mikro çekme boşlukları meydana gelir [Kılıçlı, 2010]. Tane inceltme ile beraber dentritler de küçülmektedir. Dolayısı ile dentritler arasında kalan sıvı faz hacim oranı da azalmaktadır. Sıvı faz hacim oranının azalmasına paralel olarak mikro çekme boşlukları da azalır [Campbell, 1999]. RPT-3 ve RPT-4 deneyleri arasındaki çok az yoğunluk farkının dentritler arası mikro çekmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.3. Tane İnceltme Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmalar bölümünde anlatılan ve optimum tane boyutunu tespit etmek için farklı Ti ilave oranlarında (%0,008-%0,01-%0,02-%0,03) Alcan deneyi sonucu elde edilen mikroyapı görüntüleri Resim 4.1-Resim 4.5'de verilmiştir.



Resim 4.1. İşlemsiz Al-4,3Cu alaşımının tane boyutu

Tane inceltme işlemi uygulanmamış Al-4,3Cu alaşımının tane boyutu (Resim 4.1), tane inceltme işlemi uygulanmış Al-4,3Cu alaşımlarının tanelerine göre oldukça büyüktür (Resim 4.2-4.5). Tane inceltme işlemi uygulanmamış Al-4,3Cu alaşımının ortalama tane boyutu 1142 µm olarak belirlenmiştir (Çizelge 4.2).

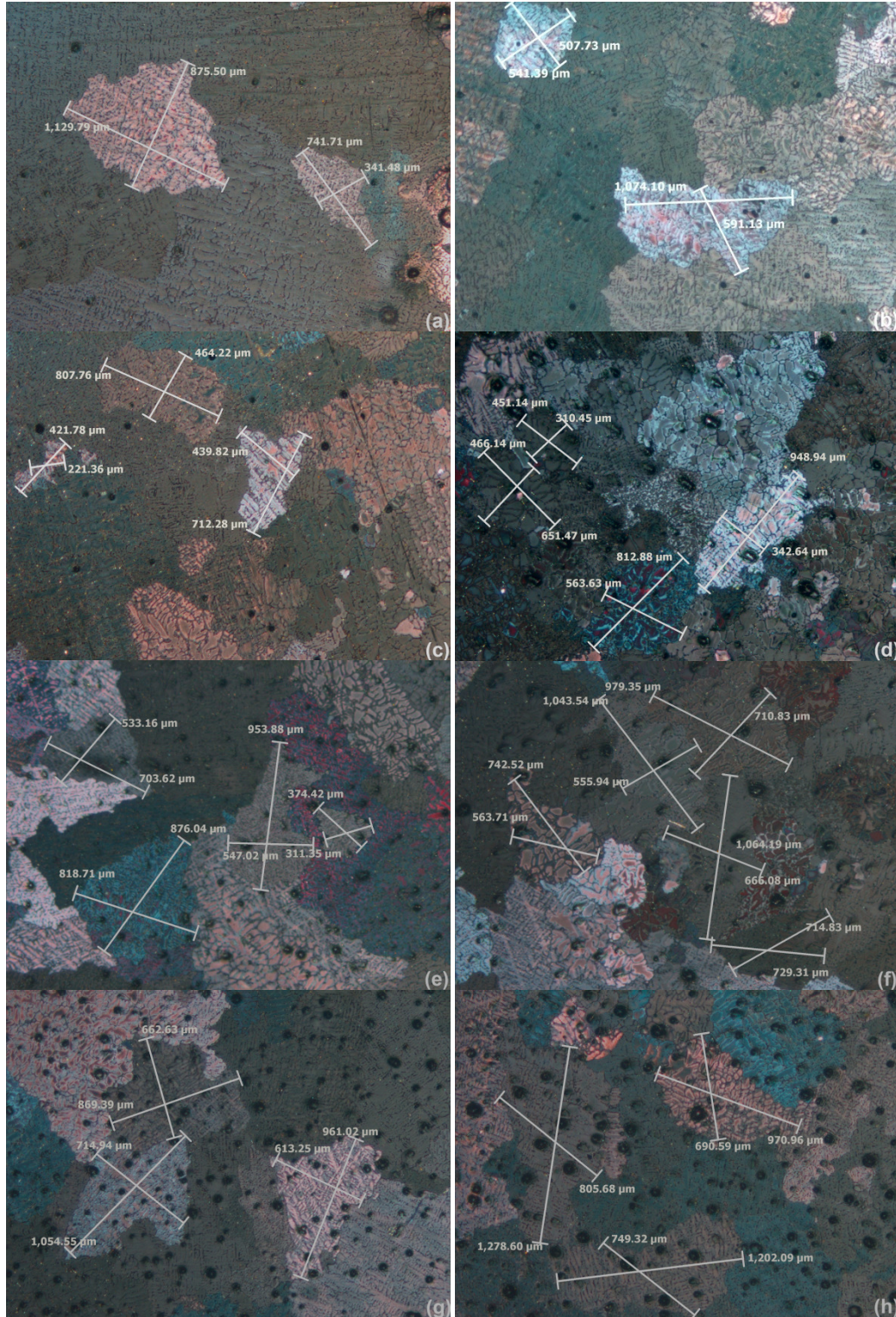
Titanyum oranına göre tane inceltici oranını belirlemek için 730°C'deki sıvı metale % 0,008 Ti (%0,07 tane inceltici tablet), % 0,01 Ti (%0,09 tane inceltici tablet), % 0,02 Ti (%0,18 tane inceltici tablet) ve % 0,03 Ti (%0,27 tane inceltici tablet) ilavesi yapılmıştır. Daha sonra 2,5 dak.'dan başlamak üzere 5'er dak. zaman aralıklarında numuneler alınmış ve tane boyutları ölçülmüştür. Resim 4.2-Resim 4.5'te görüntüleri verilen tanelerin ortalama boyutları Şekil 4.3'te ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Şekil 4.3 incelendiğinde %0,008 Ti oranında 7,5 dak.'da tane boyutu 580 µm'ye kadar düşmüş 22,5 dak.'ya kadar yaklaşık olarak sabit tane boyutunda kalmıştır. 22,5 dak.'dan sonra tane boyutu tekrar artmaya başlamıştır. 37,5 dak.'da tane boyutu 971 µm olarak belirlenmiştir.

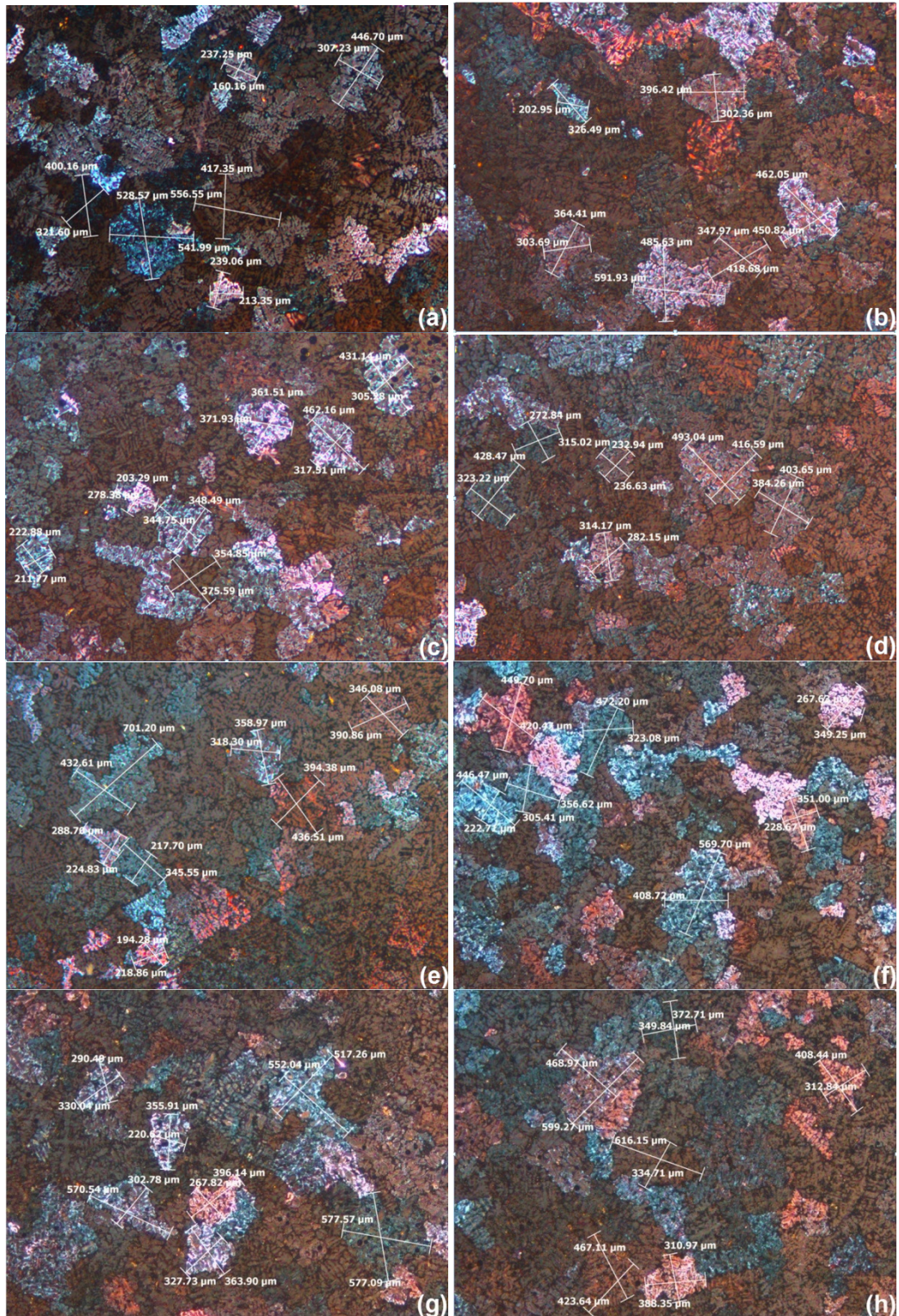
%0,01Ti, %0,02Ti ve %0,03 Ti oranında tane boyutu 2,5 dak.'da ani olarak azalmıştır. %0,01 Ti oranında en düşük tane boyutu 17,5 dak.'da 280 µm olarak ölçülmüştür. 27,5.dak.'da tane boyutu tekrar artmıştır. 27,5-37,5 dak. aralığında tane boyutu ortalama 380 µm olarak ölçülmüştür.

%0,02 ve %0,03 Ti oranında ise tane boyutu eğrileri birbirine paralel olarak değişim göstermiştir. %0,02 ve %0,03 Ti oranında 12,5 dak.'da en düşük tane boyutu tespit edilmiştir. %0,02 Ti oranında en düşük tane boyutu 203 µm iken %0,03 Ti oranında 177 µm olarak belirlenmiştir. Bu dakikadan sonra %0,02 Ti oranında yaklaşık 210 µm ve %0,03 Ti oranında yaklaşık 200 µm tane boyutunda 37,5 dak.'ya kadar sabit kalmıştır.

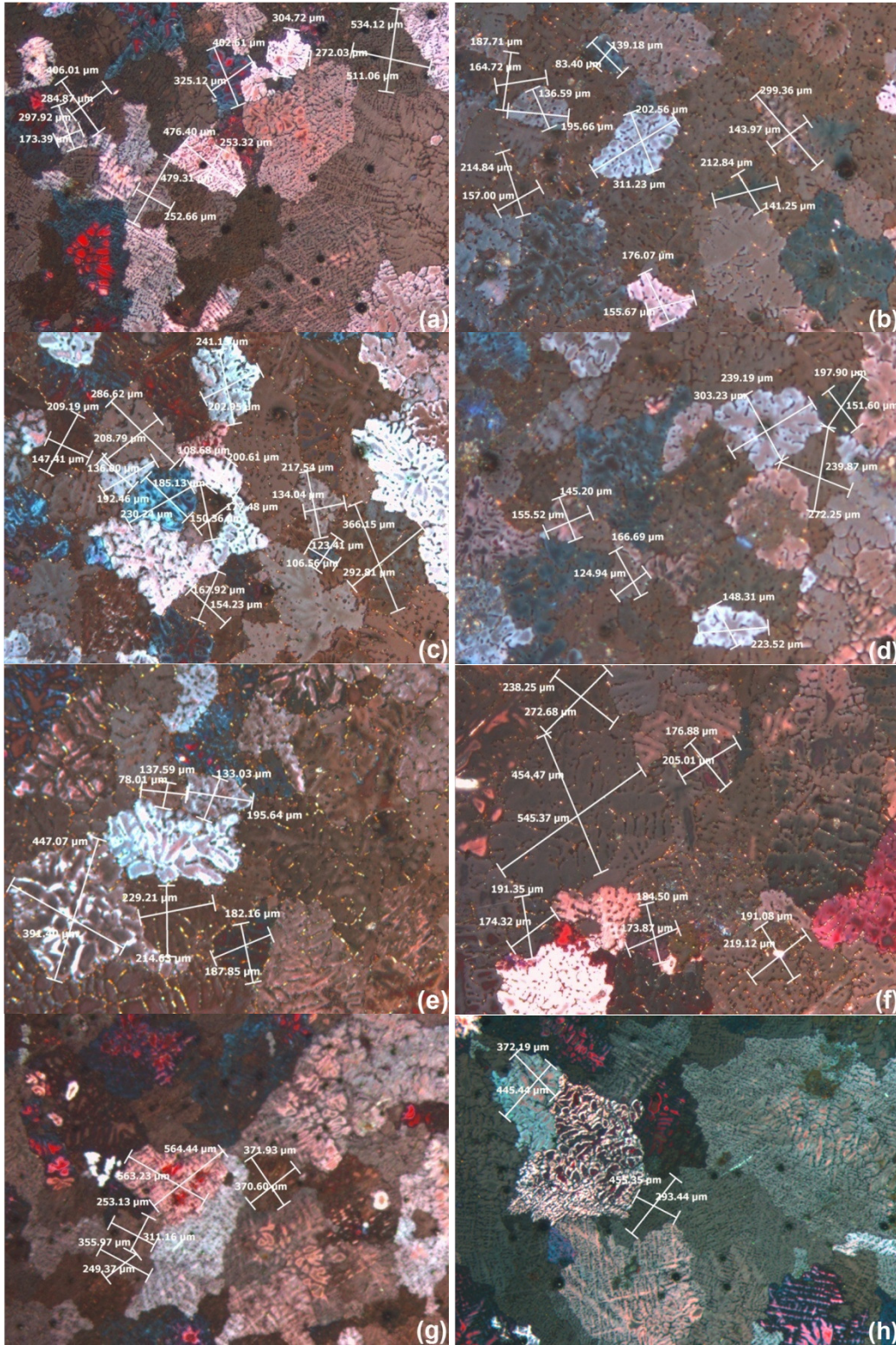
Literatürde [Murty ve ark, 1999, Murty ve ark., 2002] tane inceltme sonrası kabul edilebilir tane boyutunun 220 µm olduğu bildirilmiştir. Ayrıca ideal tane incelticinin tane inceltme işleminden sonra uzun bir süre etkinliğini koruması gerektiği bildirilmiştir [Murty ve ark., 2002].



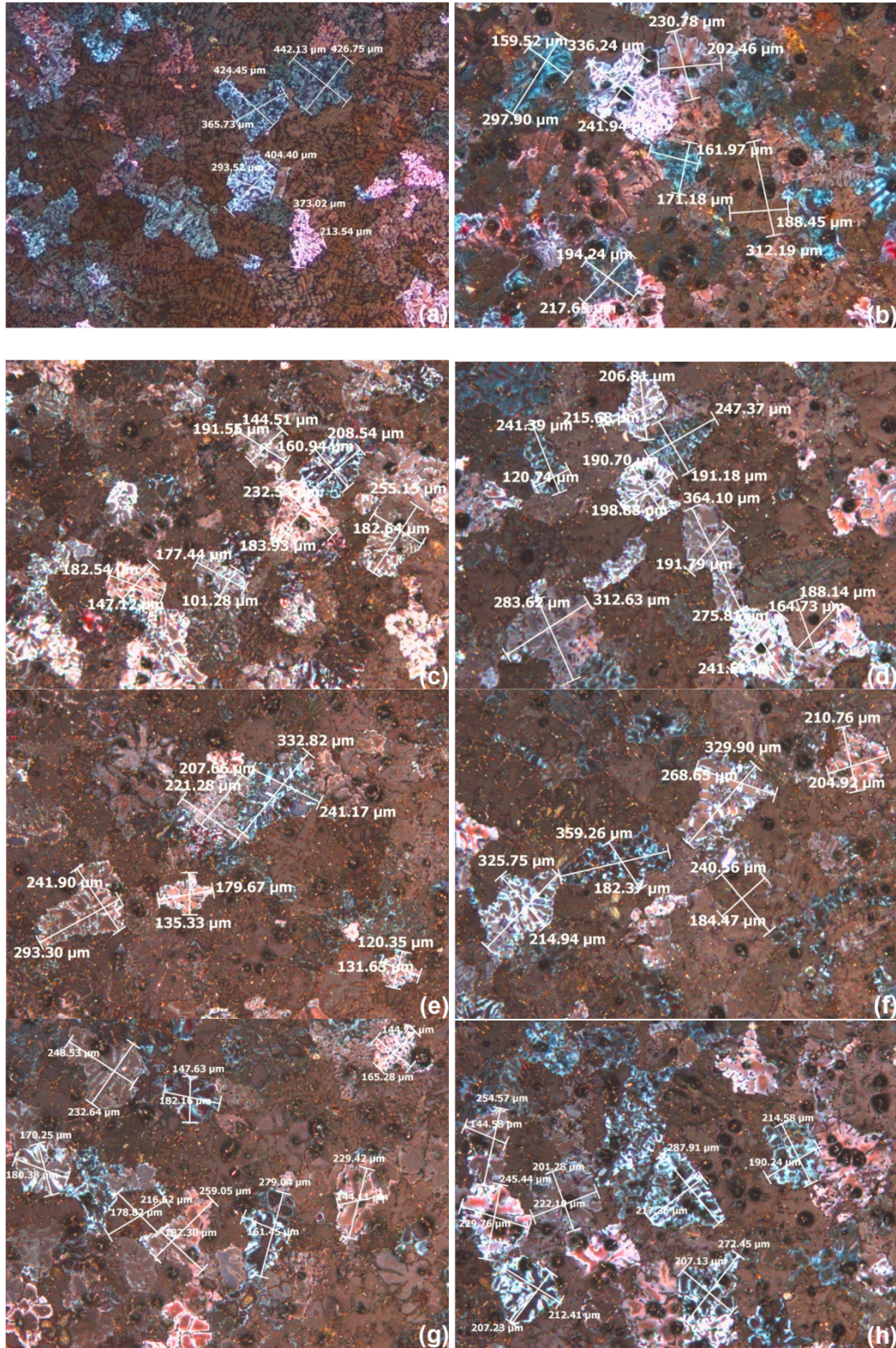
Resim 4.2. Al-4,3Cu alaşımına %0,008 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu



Resim 4.3. Al-4,3Cu alaşımına %0,01 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu

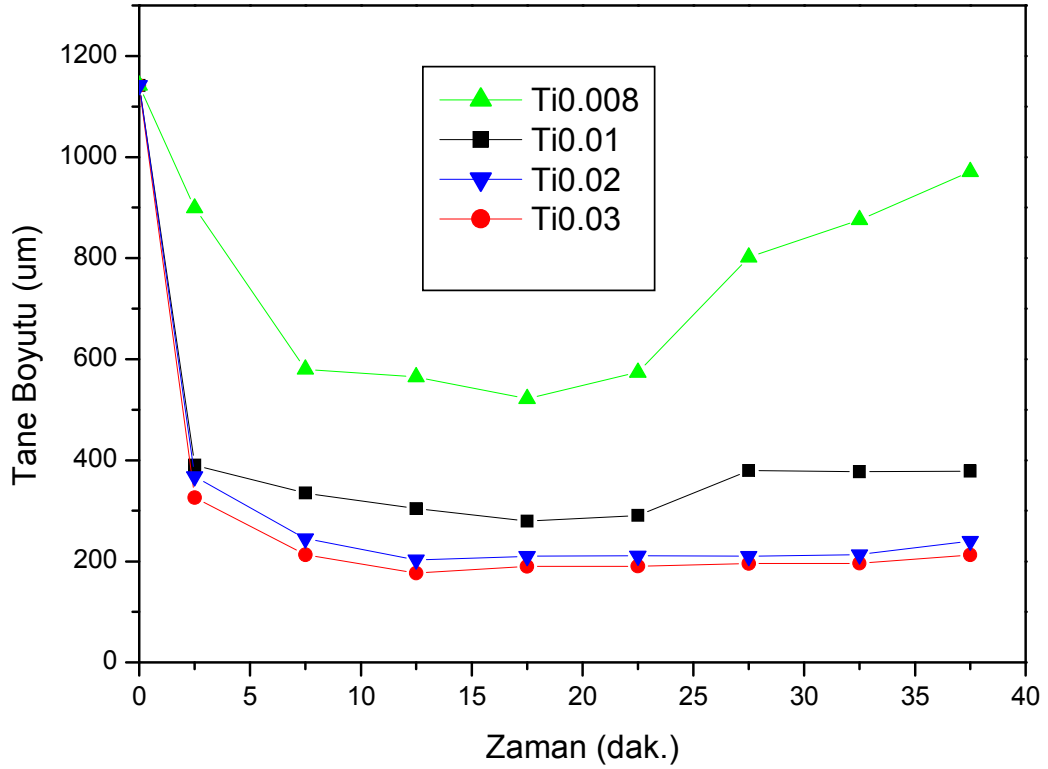


Resim 4.4. Al-4,3Cu alaşımına %0,02 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu



Resim 4.5. Al-4,3Cu alaşımına %0,03 Ti oranında tane inceltici ilavesinden; a) 2,5, b) 7,5, c) 12,5, d) 17,5, e) 22,5, f) 27,5, g) 32,5, h) 37,5 dak. sonra tane boyutu

Sonuçlar göstermiştir ki en küçük tane boyutu ve en etkin bekleme süresi Ti oranının %0,03 olduğu durumdur (Şekil 4.3). Bu oranda yapılan deney sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

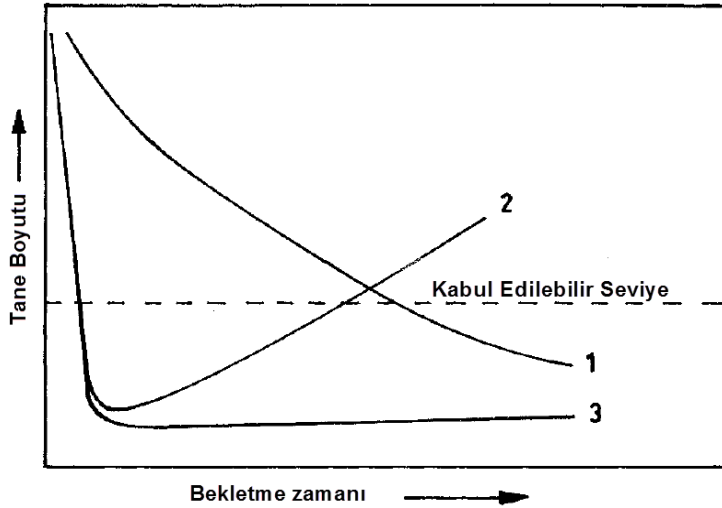


Şekil 4.3. %0,008-%0,01-%0,02-%0,03 Ti oranlarında tane boyu-zaman grafiği

Çizelge 4.2. Bekleme süresine bağlı ortalama tane boyutu

Bekleme Zamanı (Dak.)	İlave Edilen Ti Oranı (%) ve Tane Boyutu (µm)			
	0,008 Ti	0,01 Ti	0,02 Ti	0,03 Ti
0	1142	1142	1142	1142
2,5	899	390	368	326
7,5	580	335	245	213
12,5	565	304	203	177
17,5	522	280	210	190
22,5	574	291	211	191
27,5	802	380	210	196
32,5	876	377	213	196
37,5	971	379	240	213

Şekil 4.4'te değişik tane inceltici tipleri için tane boyutunun zaman ile değişimi şematik olarak verilmiştir. 1 nolu eğride görülen tane inceltici çok yavaş reaksiyona girip tane inceltme etkisini çok geç göstermektedir. 2 nolu eğride görülen tane inceltici çok hızlı reaksiyona girip etkinliğini çok kısa sürede kaybeden tane inceltici tipidir. 3 nolu eğride tane inceltici çok kısa sürede reaksiyona girip çok uzun bir sürede etkinliğini korumaktadır. Şekil 4.3'teki deneysel sonuçlarda elde edilen veriler incelendiğinde Foseco-Nucleant 70SS tabletin Al-4,3Cu alaşımı için tane inceltici etkinliği Şekil 4.4'teki 3 nolu tane inceltici tipine benzerdir.



Şekil 4.4. Değişik tane inceltici tipleri için tane boyutu değişimi [Murty ve ark., 2002]

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere Al-%4,3Cu alaşımına %0,02 ve %0,03 Ti oranlarında yapılan ilaveler sonucunda tane boyutunun Şekil 4.4'te verilen kabul edilebilir seviyenin (220 μm) altında olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere optimum tane boyutu için en etkin bekleme süresi 12,5 dak. olarak bulunmuştur. %0,03 Ti oranı (%0,27 tane inceltici miktarı) ve 12,5 dak. bekleme süresi ideal tane inceltme işlemi şartları olarak belirlenmiş ve tane inceltme işleminin KKO değerine etkisini belirleyebilmek amacıyla bu değerler döküm şartlarında uygulanmıştır.

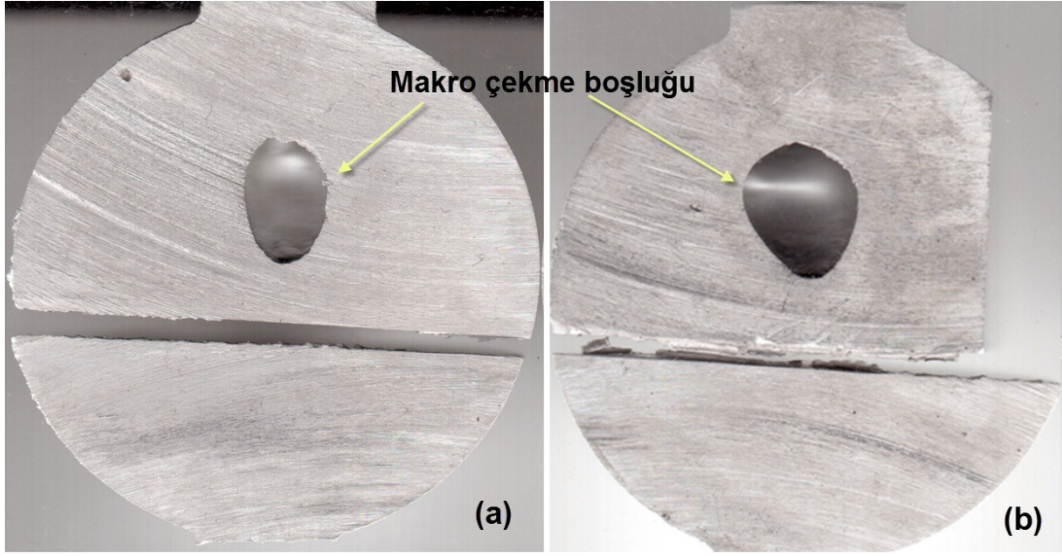
4.4. Döküm ve Simülasyon Sonuçları

4.4.1. Döküm sonuçları

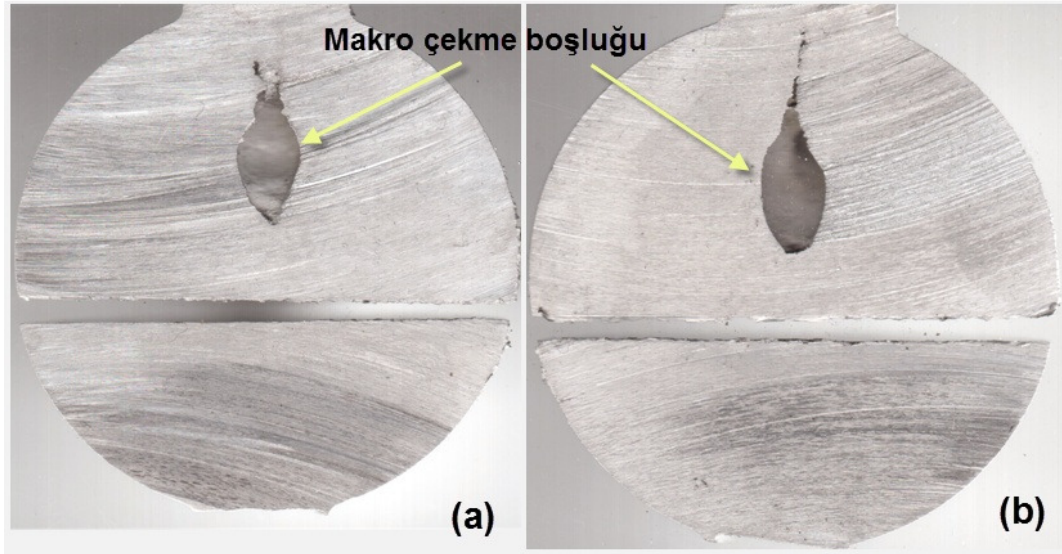
Tane inceltme işlemi uygulanmış ve tane inceltme işlemi uygulanmamış döküm parçada oluşan makro çekme boşlukları Şekil 4.5-4.7'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.5-4.7'de görüldüğü gibi küre şeklindeki döküm parça makro çekme boşluğunu kesmeyecek şekilde ikiye bölünmüştür. Sağlam boşluksuz döküm parça bölgesinden yoğunluk ölçümleri, makro çekme boşluğunun olduğu bölgeden ise çekme boşluğunun hacmi belirlenmiştir. Her bir döküm şartı için belirlenen makro çekme boşluk hacimleri ve alaşım yoğunlukları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Şekil 4.5-4.7'den de net olarak görüldüğü gibi aynı kalıp sıcaklığı için tane inceltme işlemi uygulanmış döküm parçalarda daha küçük makro çekme boşluğu oluşmuştur. Örneğin, 100°C kalıp sıcaklığında ölçülen boşluk hacimleri tane inceltme işlemi uygulanmamış durumda 2,30 cm³ iken tane inceltme işlemi uygulandığında ise 1,70 cm³ (Çizelge 4.3) olarak ölçülmüştür.

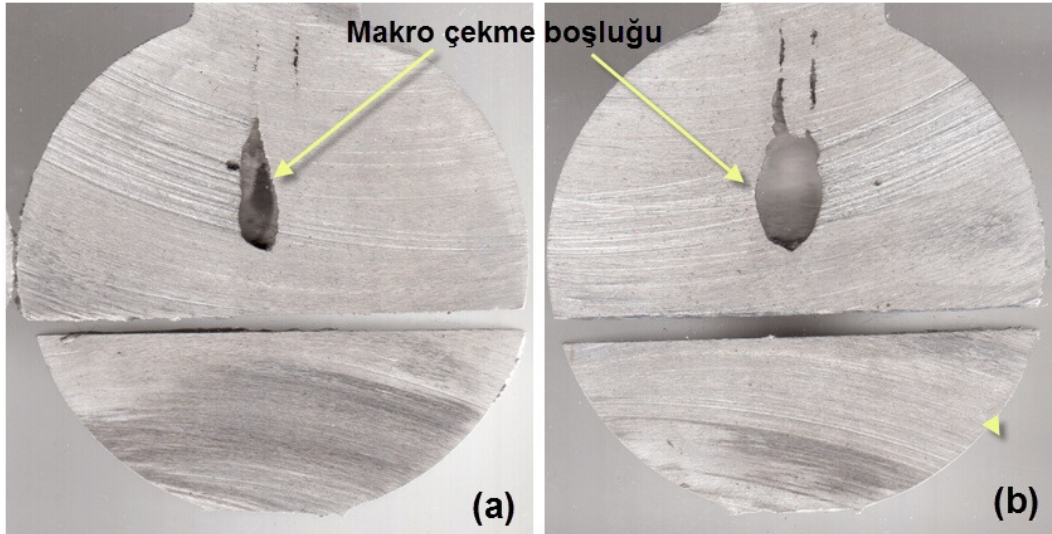
Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere belirlenen boşluk hacimleri incelendiğinde tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda kalıp sıcaklığının artmasıyla hacimlerde azalma meydana gelmiştir. Aynı zamanda üç farklı kalıp sıcaklığında metalin yoğunluğu tane inceltmeli durumda 2,80 gr/cm³ ve tane inceltmesiz durumda 2,79 gr/cm³ olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.5. 100°C kalıp sıcaklığında döküm parçada meydana gelen makro çekme boşluklarının görünümü; a) Tane inceltme işlemi uygulanmış ve b) Tane inceltme işlemi uygulanmamış



Şekil 4.6. 155°C kalıp sıcaklığında döküm parçada meydana gelen makro çekme boşluklarının görünümü; a) Tane inceltme işlemi uygulanmış ve b) Tane inceltme işlemi uygulanmamış



Şekil 4.7. 210°C kalıp sıcaklığında döküm parçada meydana gelen makro çekme boşluklarının görünümü; a) Tane inceltme işlemi uygulanmış ve b) Tane inceltme işlemi uygulanmamış

Çizelge 4.3. Döküm parça çekme boşluğu hacimleri ve yoğunlukları

Kalıp Sıcaklığı (°C)	Tane inceltmesiz			Tane inceltmeli		
	Parça Yoğunluğu (gr/cm ³)	Boşluk hacmi		Parça Yoğunluğu (gr/cm ³)	Boşluk hacmi	
		cm ³	%		cm ³	%
100	2,79	2,30	2	2,80	1,70	1,5
155	2,79	1,46	1,3	2,80	1,25	1,1
210	2,79	1,16	1	2,80	0,94	0,8

155°C ve 210°C kalıp sıcaklıklarından farklı olarak 100°C kalıp sıcaklığında oluşan makro çekme boşlukları üst bölgeden (besleyici boğazı) bağımsız ve küremsi şekilde oluşmuştur. 155°C ve 210°C kalıp sıcaklıklarının her ikisinde de makro çekme boşlukları besleyici boğazına doğru yaklaşmış ve besleyici boğazının hemen altına kadar gittikçe daralan geometride meydana gelmiştir.

Bu görüntülerden çok açık olarak 100°C kalıp sıcaklığında besleyici boğazının çok erken katılaştığı söylenebilir. Besleyici boğazı erken katılaştığı için döküm parça besleyiciden çok fazla besleme metali ile beslenememiştir. Ayrıca döküm kalıbı çelik olduğu için (kum kalıptan çok daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir) katılaşmanın kalıp duvarından başlayarak merkeze doğru

ilerlediği düşünölmektedir. Bu durumda döküm parçanın dış yüzeyinden başlayan kalıtlasma merkeze doğru yönlenererek tamamlanmıştır. Çekme boşlukları, basit geometriler için en son katılaşmanın olduğu yerde meydana gelir [Ravi, 2005]. 100°C kalıp sıcaklığında makro çekme boşluklarının küremsi şekilde oluşum nedeninin besleyici boğazının katılaşmanın çok erken safhalarında katılaşmasına ve kalıbın ısı iletkenliğinin çok yüksek olmasına bağlı olduğu düşünölmektedir.

155°C ve 210°C kalıp sıcaklıklarında besleyici boğazından 100°C'lik kalıba göre daha uzun süre besleme metalinin parçaya doğru aktığı söylenebilir. Ayrıca Çizelge 4.3'teki boşluk hacimlerinden de göröleceği üzere bu kalıp sıcaklıklarında elde edilen hacim değerleri de 100°C'lik kalıptan elde edilen hacim değerlerinden oldukça düşüktür.

Literatürde tane inceltmenin besleme üzerindeki etkisi araştırılmıştır [Kim, 1996, Chai ve ark., 1995]. Araştırmacılar tane inceltme ile beslenebilirliğin oldukça arttığını belirlemişlerdir. Kim [Kim, 1996] doktora çalışmasında geniş katılaşma aralığına sahip Al-8Si ve Al-20Cu alaşımları için tane inceltme işlemleri sonucunda dentritler arası boşluk hacminin 1/3 oranında azaldığını tespit etmiştir. Bu da tane inceltme ile dentritlerin küçüldüğünü ve dentritler arasında kalan sıvının tane inceltmesiz duruma göre daha çok beslendiğini göstermektedir.

4.4.2. Simölasyon sonuçları

Bu çalışmada kullanılan döküm simölasyon programı üç boyutlu döküm kalıp geometrisini kübik meşler yardımı ile verilen sınır şartlarına göre sonlu farklar yöntemi ile çözümlenen bir yazılımdır. Yazılım soğuma modellemesini ısı ve kütle transfer formülleri yardımı ile gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada kullanılan Al-4,3Cu ve kullanılan döküm geometrisi için KKO olarak tabir edilen kritik katı oranı dışındaki tüm başlangıç ve sınır şartları her bir döküm için sabit alınmıştır.

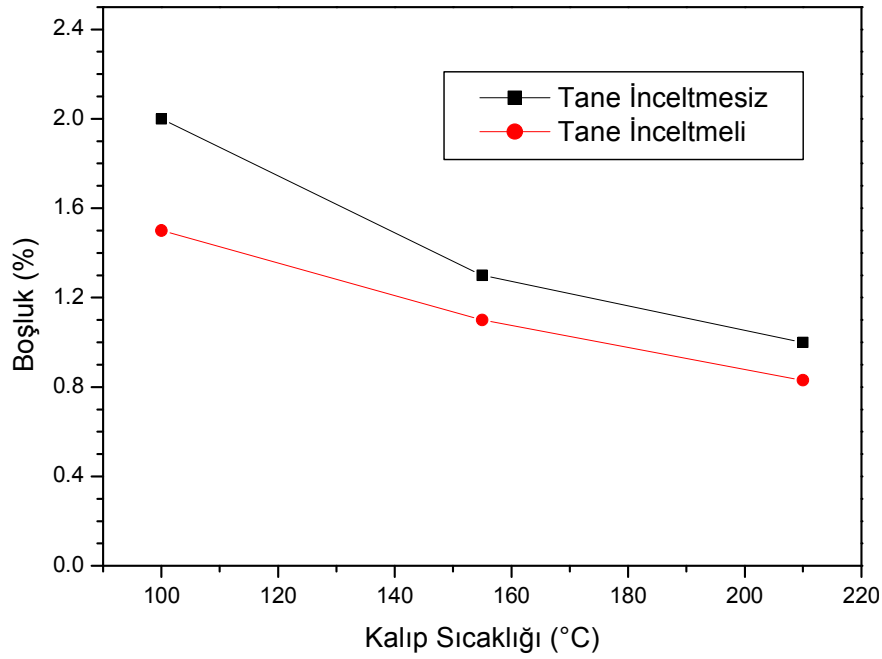
Simülasyon sonuçları üzerinden koordinat belirleme ve katı modelleme yöntemleriyle yapılan ölçümler neticesinde elde edilen boşluk hacmi değerleri ile gerçek dökümler üzerinden Arşimet prensibi ile ölçülmüş boşluk hacmi değerleri eşleştirilmiştir. Bu işlem yapılırken tane inceltmeli ve tane inceltmesiz dökümler için KKO değeri %30'dan başlanarak %1'lik artışlarla %65 değerine kadar değişen oranlarda girilmiştir.

Eşleştirmeler sonucunda kalıp sıcaklığına (100°C, 155°C ve 210°C) bağlı olarak KKO değerleri ve boşluk hacimleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

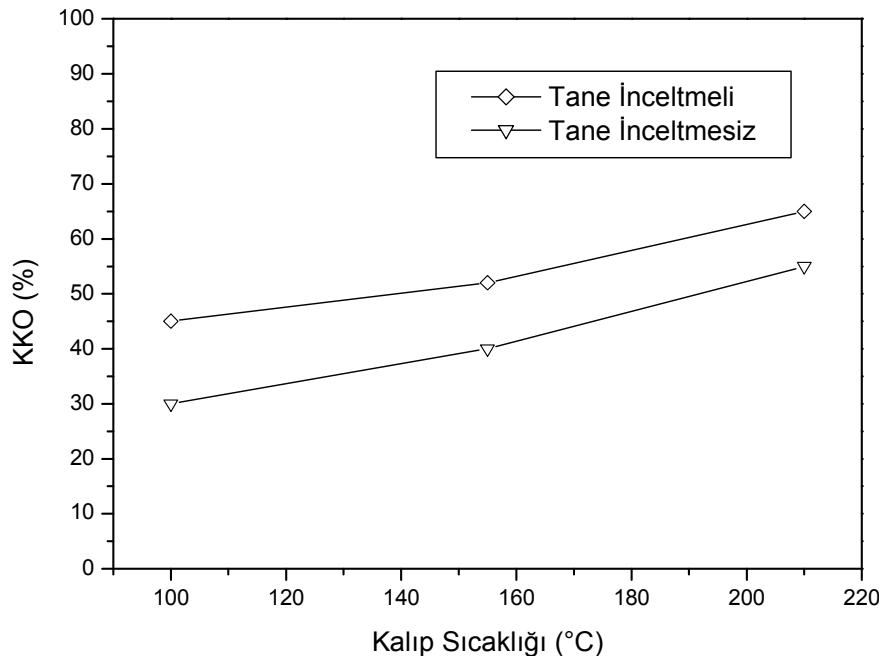
Çizelge 4.4. Kalıp sıcaklığına ve tane inceltme işlemine bağlı olarak KKO değerinin değişimi

Kalıp Sıcaklığı (°C)	Tane inceltmesiz		Tane inceltmeli	
	Boşluk hacmi (cm ³)	KKO (%)	Boşluk hacmi (cm ³)	KKO (%)
100	2,30	30	1,70	45
155	1,46	40	1,25	52
210	1,16	55	0,94	65

Simülasyon sonucunda KKO değerine bağlı olarak oluşan boşluk görüntüleri Şekil 4.10-4.15'te verilmiştir. Al-4,3Cu alaşımında tane inceltme işlemi yapılmış dökümlerde tane inceltme işlemi uygulanmamış olanlara göre kaplamasız çelik kalıplar için 100°C, 155°C ve 210°C kalıp sıcaklıkları için sırası ile %15, %12 ve %10 daha yüksek katı oranlarında besleme sağlanabildiğini göstermiştir. Döküm ve simülasyon sonuçları sentez edildiğinde Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görülen grafikler çizilmiştir.



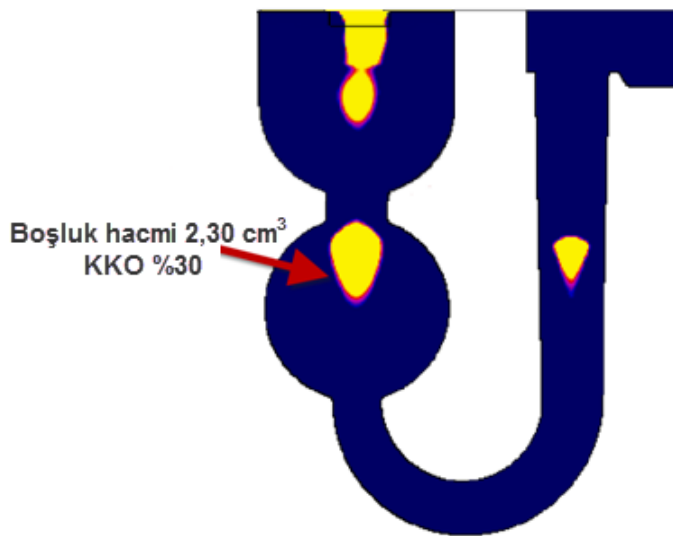
Şekil 4.8. Çekme boşluğu hacminin kalıp sıcaklığına bağlı olarak değişimi



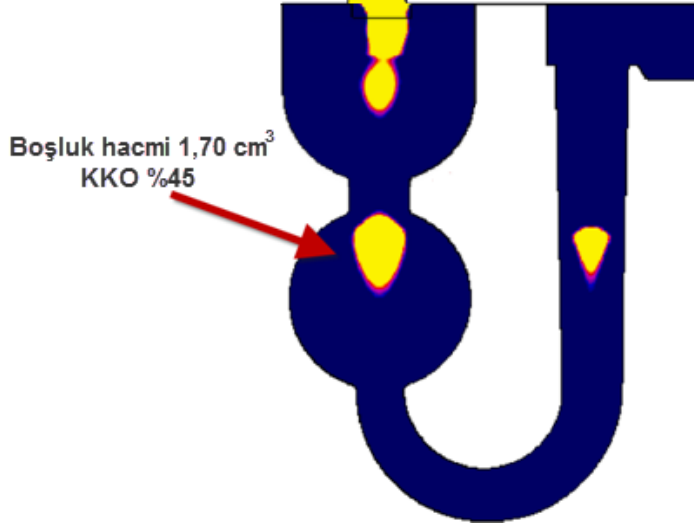
Şekil 4.9. KKO değerinin kalıp sıcaklığına bağlı olarak değişimi

SOLIDCast programında KKO değerinin alüminyum alaşımları için %35 olarak alınması tavsiye edilmektedir [Kayıkcı ve Akar, 2010]. Yurtseven [Yurtseven, 2009] ve Karayazı [Karayazı, 2009] kum kalıba döküm

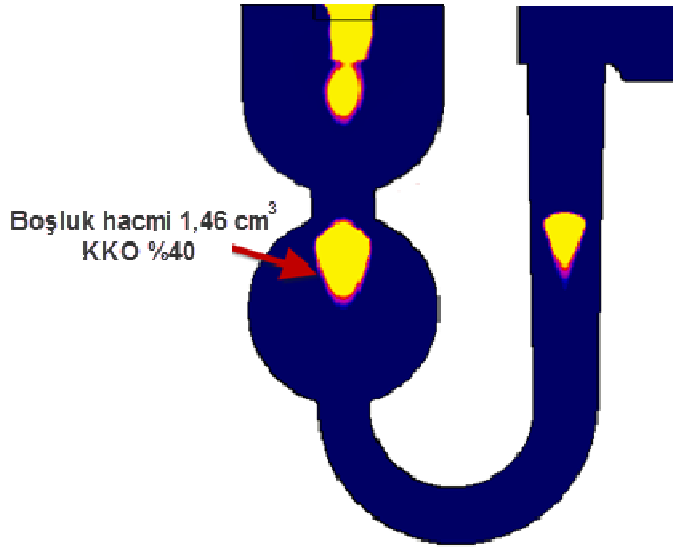
şartlarında sırasıyla Etial-177 ve Etial-110 alaşımları için KKO değeri modelleri üzerine çalışmışlardır. Etial-177 için KKO değeri tane inceltmesiz durumda yaklaşık %35, tane inceltmeli durumda ise yaklaşık %58, Etial-110 için ise tane inceltmesiz durumda yaklaşık %33, tane inceltmeli durumda ise yaklaşık %57 olarak belirlemişlerdir. Kum kalıba dökümlerde kalıp malzemesinin düşük ısı iletkenliğe sahip olmasından dolayı katılaşma daha yavaş olmaktadır. Buna karşın metalik kalıpların ısı iletkenlikleri daha yüksek olduğu için katılaşma daha hızlı gerçekleşmektedir. Hızlı katılaşma çekirdeklenme için daha büyük itici güç sağlar [Porter ve Easterling, 1990, Kurz ve Fisher, 1989]. Dolayısıyla metalik kalıplarda alaşıma tane inceltme işlemi uygulanmasa bile kum döküme göre daha küçük taneler meydana gelir. Bu da Şekil 2.12'de dentritler arası besleme bölgesindeki sıvı akışını kolaylaştırır veya daha kısa dentritik örgü oluşmasından dolayı dentritler arasında sıvı akış mesafesini kısaltır. Diğer araştırmacılar [Yurtseven, 2009, Karayazı, 2009] tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda yaklaşık olarak %24'lük bir KKO farkı belirlemişlerdir. Bu çalışmada ise yaklaşık olarak KKO farkı %10'dur. Bunun sebebinin kalıbın ısı iletim özelliklerinden ve hızlı katılaşma sonucu daha küçük tanelerin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



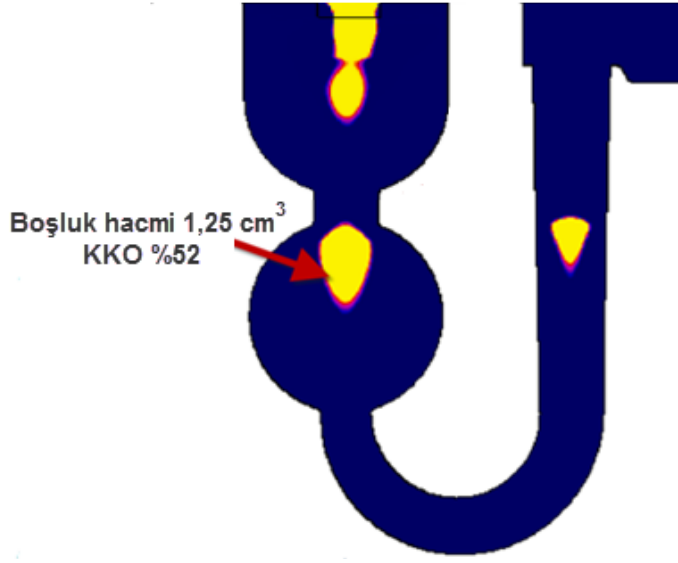
Şekil 4.10. 100°C kalıp sıcaklığında tane inceltmesiz ve KKO %30 değerine göre çekme boşluğu hacmi



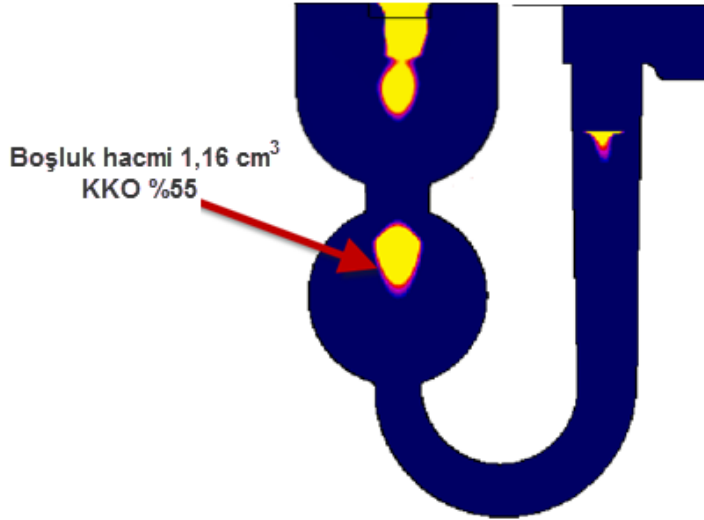
Şekil 4.11. 100°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %45 değerine göre çekme boşluğu hacmi



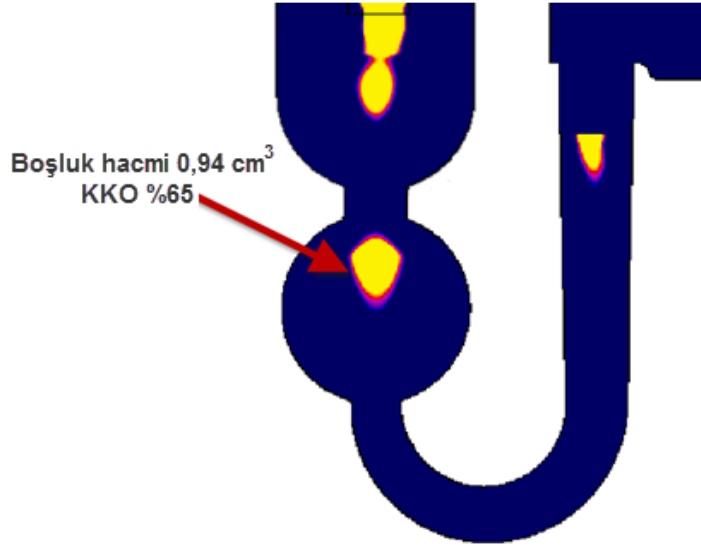
Şekil 4.12. 155°C kalıp sıcaklığında tane inceltmesiz ve KKO %40 değerine göre çekme boşluğu hacmi



Şekil 4.13. 155°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %52 değerine göre çekme boşluğu hacmi



Şekil 4.14. 210°C kalıp sıcaklığında tane inceltmesiz ve KKO %55 değerine göre çekme boşluğu hacmi



Şekil 4.15. 210°C kalıp sıcaklığında tane inceltmeli ve KKO %65 değerine göre çekme boşluğu hacmi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

1. Öncelikle optimum tane boyutu ve tane incelticinin en etkin bekleme süresinin belirlenmesi için kullanılan Al-%4,3Cu alaşımına ALCAN deneyi uygulanmıştır. Bunun sonucunda alaşıma eklenecek olan tane inceltici oranı %0,27 ve Ti oranı %0,03 olarak tespit edilmiştir. Bu oranlar doğrultusunda en etkin bekleme süresi 12,5 dak. olarak belirlenmiştir.
2. Tane inceltme uygulanmamış halde alaşımın tane boyutu ortalama 1200 μm civarında iken tane inceltme işlemi uygulanmış (%0,03 Ti) durumda ise en etkin süre boyunca beklendiğinde tane boyutu ortalama 177 μm civarına kadar düşmüştür. Tane inceltici etkinliğini tane boyutunda çok az bir artış ile 37,5 dak.'ya kadar sürdürmüştür.
3. Üç farklı kalıp sıcaklığında (100°C, 155°C ve 210°C) metalin yoğunluğu tane inceltmeli durumda 2,80 gr/cm^3 ve tane inceltmesiz durumda 2,79 gr/cm^3 olarak ölçülmüştür.
4. Yapılan dökümlerden elde edilen soğuma eğrilerinde likidüs sıcaklıkları tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda 644°C olarak ölçülürken solidüs sıcaklıkları tane inceltmeli durumda 568°C ve tane inceltmesiz durumda 572°C olarak ölçülmüştür.
5. Çelik kalıba yapılan dökümler neticesinde tane inceltici ilavesinin ve farklı kalıp sıcaklıklarının besleme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Tane inceltici ilavesi ile beslemenin arttığı ve çekme boşluğunun küçüldüğü belirlenmiştir.
6. Gerçek dökümlerden elde edilen sonuçlar sonrasında Al-4,3Cu alaşımı için simülasyon programına girilecek sınır şartları elde edilmiş ve buna

göre KKO değerleri modellenmiştir. Yapılan modellemelerden elde edilen sonuçlar ile gerçek dökümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda:

- a) 100°C kalıp sıcaklığında tane inceltmesiz durumda %30 KKO değeri 2,30 cm³ ve tane inceltmeli durumda %45 KKO değeri 1,70 cm³ boşluk değerine denk gelmiştir.
- b) 155°C kalıp sıcaklığında tane inceltmesiz durumda %40 KKO değeri 1,46 cm³ ve tane inceltmeli durumda %52 KKO değeri 1,25 cm³ boşluk değerine denk gelmiştir.
- c) 210°C kalıp sıcaklığında tane inceltmesiz durumda %55 KKO değeri 1,16 cm³ ve tane inceltmeli durumda %65 KKO değeri 0,94 cm³ boşluk değerine denk gelmiştir.
- d) Tane inceltmeli ve tane inceltmesiz durumda kalıp sıcaklığının artmasıyla çekme boşluğu hacimlerinde azalma ve KKO değerinde artma meydana gelmiştir

5.2. Öneriler

1. Günümüz şartlarında zaman önemli bir faktör durumundadır. Bu durum dikkate alınarak daha kısa sürede en etkin veya en verimli konuma gelen yeni tane inceltici teknolojileri takip edilmeli ve kullanımı ile ilgili çalışmalar yapılmalıdır.
2. Farklı kalıp sıcaklıkları ve soğuma hızları yanında farklı döküm sıcaklıklarında da yoğunluk, tane inceltme, beslenebilirlik gibi etkiler araştırılmalıdır.

3. Bununla beraber simülasyon parametreleri arasında yer alan ve dökümlerde oluşan mikro çekme boşlukları ile ilgili olan Niyama faktörü konusunda da daha kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

Ahmadein, M., Pustal, B., Berger, R., Subasic, E. And Bührig-Polaczek, A., "Grain Nucleation Parameters for Aluminum Alloys: Experimental Determination and Model Validation", ***Metallurgical and Material Transactions A***, 40: 646-653 (2009).

Akar, N., "Katılma sırasında döküm-kalıp ara yüzeyinde ısı transfer katsayısının incelenmesi", Doktora tezi, ***Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 1-3 (2006).

Anson, J. P. And Gruzleski, J. E., "The Quantitative Discrimination between Shrinkage and Gas Microporosity in Cast Aluminum Alloys Using Spatial Data Analysis", ***Materials Characterization***, 43: 319–335 (1999).

Arda, İ. And Kayıkcı, R., "Döküm simülasyonu nedir? Ne değildir?", ***Metal Dünyası***, 154: 44-48 (2006).

ASM International Handbook Committee, "Casting", ***Metals Park, OH, ASM International***, Metals Handbook, 15: 743-770 (1989).

Backerud, L., "How Does a Good Grain Refiner Work?", ***Light Metal Age***, 6-12 (1983).

Brown, J. R., "Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook", 11. Baskı ***Butterworth-Heinemann***, Oxford, 70-71 (1999).

Bryant, M. And Fisher, P., "Grain Refining and the Aluminium Industry (Past, Present and Future)", ***Aluminium Casthouse Technology***, July, 4-8 (1993).

Campbell, J., "Castings", ***Heinemann***, Great Britain, 191-208 (1999).

Carlson, K. D. And Beckermann, C., "Prediction of Shrinkage Pore Volume Fraction Using Dimensionless Niyama Criterion", ***Metallurgical and Materials Transactions A***, 40: 163-175 (2009).

Chai, G., Backerud, L., Rolland, L. And Arnberg, L., "Dendrite coherency during equiaxed solidification in binary aluminium alloys", ***Metallurgical and Materials Transactions A***, (4): 965-970 (1995).

Chen, S. G., Gruzleski, J. E., "Measurent of Hydrogen in Aluminium- Silicon Foundry Alloys Using The ALSCAN Technique", ***Light Metals, The Minerals, Metals & Materials Society***, 1079-1086 (1995).

Cole, G. S., Cisse, J., Kerr, H. W. And Bolling, G. F., "Grain Refinement in Aluminum and Aluminum Alloys", ***AFS Trans***, 80: 211-218 (1972).

Cooper, P., Jacob, A. And Detomi, A., "Additive developments in the Aluminium Industry", **1. International Congress of the Aluminium Industry**, (2000).

Çolak, M., Kayıkcı, R., "Döküm simülasyon programları üzerine bir değerlendirme", **Metal Dünyası**, 189: 2-4 (2007).

Dash, M. And Makhlof, M., "Effect of key alloying elements on the feeding characteristics of aluminium-silicon casting alloys", **Journal of Light Metals**; 1: 251-265 (2001).

Demircioğlu, P., "Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Gaz Oluşumu ve Gaz Giderme Teknikleri", Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 58-75 (2002).

Dişpınar, D., Campbell, J., "Effect of casting conditions on aluminium metal quality", **Journal of Materials Processing Technology**, 182: 405–410 (2007).

Easton, M. A., StJohn, D. H., "The Partitioning of Titanium During Solidification of Aluminum Alloys", **Mater. Sci.Technol.**, 16(9): 993-1000 (2000).

Easton, M. And StJohn, D., "Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part II. Confirmation of, and a Mechanism for, the Solute Paradigm", **Metallurgical and Materials Transactions A**, 30:1625-1633 (1999).

Hsu, F. Y., Jolly, M. R. And Campbell, J., "Vortex-gate design for gravity casting", **International Journal of Cast Metals Research**, 19(1): 38-46 (2006).

Ibarra D. G., "Control of Grain Refinement of Al-Si Alloys by Thermal Analysis", **Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University**, Montreal Canada, 1-38 (1999).

Jones, G. P. And Pearson, J., "Factors Affecting the Grain-Refinement of Aluminum Using Titanium and Boron Additives", **Metallurgical Transactions B**, 7: 223-234 (1976).

Kanicki, P. D., Rasmussen, W., "Cleaning Up Your Metal", **Modern Casting**, 55-58 (1990).

Karayazı, A., "Etial 110 alaşımının dökümünde makro ve mikro porozite oluşumunun modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 72-83 (2009).

Kashyap, K. T. And Chandrashekar, T., "Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys" *Bull. Mater. Sci.*, 24(4): 345–353 (2001).

Kayıkcı, R., "Metal-Mould Contact and Heat Transfer During Casting Solidification", PhD, *University of Manchester*, Manchester, 63 (1999).

Kayıkcı, R., "Büyük kütleli bir çelik parçanın dökümünde klasik ve bilgisayar destekli mühendislik yöntemlerinin karşılaştırılması", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 23(2): 257-265 (2008).

Kayıkcı R., Akar N., "SolidCAST ile Bilgisayar destekli döküm tasarımı", *DTS*, Sakarya, 31-35 (2010).

Kearns, M. A., Thistlethwaite, S. R. and Cooper, P. S., "Recent advances in understanding the mechanism of aluminium grain refinement by TiBAl master alloys", *125. Annual Meeting & Exhibition*, (1996).

Kılıçlı, V., "Yarı-katı döküm tekniği ile üretilen Al-Zn alaşımlarında yapı-özellik ilişkisinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 114-117 (2010).

Kim, J., "Effect of Solidification Mechanism on The Porosity Formation in Aluminum-Silicon Alloys", PhD, *University of Wisconsin-Madison*, 63-109 (1996).

Kim, T. G. And Lee, Z. H., "Time-varying heat transfer coefficients between tube-shaped casting and metal mold", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40(15): 3513-3525 (1997).

Kori, S. A., Murty, B. S., Chakraborty, M., "Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy", *Materials Science and Engineering A*, 280:58-61 (2000).

Kumar, Vinod, G. S., Murty, B. S., Chakraborty, M., "Grain refinement response of LM25 alloy towards Al-Ti-C and Al-Ti-B grain refiners", *Journal of Alloys and Compounds*, 472: 112-120 (2009).

Kumruoğlu, L. C., Özer, A., "Investigation of Critical Liquid Fraction Factor in Nodular Iron Castings By Computer Simulation", *Journal of Materials Processing Technology*, 197: 182-188 (2008).

Kurz, W., And Fisher, D. J., "Fundamentals of solidification", *Trans Tech Publications*, Third edition, Switzerland-Germany-UK-USA, 21-33 (1989).

Liotti, E., Previtali, B., "Study of The Validity of The Niyama Criteria Function Applied to The Alloy AlSi7Mg", *Alluminio E Leghe*, 9: 33-37 (2006).

Lu, H. T., Wang, L. C. And Kung, S. K., "Grain Refining in A356 Alloys", **J. Chinese Foundrymen's Association**, 29: 10-18 (June, 1981).

Murty, B. S., Kori, S. A., Venkateswarlu, K., Bhat, R. R., Chakraborty, M., "Manufacture of Al-Ti-B master alloys by the reaction of complex halide salts with molten aluminium", **Journal of Materials Process Technology**, 89-90:152-158 (1999).

Murty, B. S., Kori, S. A. And Chakraborty, M., "Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying", **International Materials Reviews**, 47(1): 3-29 (2002).

Pasciak, K. And Sigworth, G. K., "Role of Alloy Composition in Grain Refining of 319 Alloy", **AFS Trans**, 109: 567-577 (2001).

Porter, D. A., And Easterling, K. E., "Phase transformations in metals and alloys", **Chapman and Hall**, UK, 193-195 (1990).

Ravi, B., "Metal Casting: Computer aided design and analysis", **PHI, India** 42-43 (2005).

Savaş, Ö., Kayıkcı, R., "Application of Taguchi's methods to investigate some factors affecting microporosity formation in A360 aluminium alloy casting", **Materials and Design**, 28: 2224–2228 (2007).

Sigworth, G. K., "The Grain Refining of Aluminum and Phase Relationships in the Al-Ti-B System", **Metallurgical Transactions A**, 15: 277-282 (1984).

Sigworth, G. K., Guzowski, M. M., "Grain refining of Hypo-eutectic Al-Si Alloys", **AFS Transactions**, 93: 907-12, (1985).

Sigworth, G. K., Kuhn, T. A., "Refinement of Al casting alloys", **AFS Transactions**, 115: 1-12 (2007).

Tian, J., Xue, X., Zhang, Y., Gao, Y., Liu, L., Sun, Q., And Yuan, S., "Numerical Simulation and Shrinkage Defects Prediction of a Turbine Blade Investment Casting", **J. Mater. Sci. Technol.**, 19: 32-34 (2003).

Yurtseven, Y., "Etial177 Alaşımının Dökümünde Makro ve Mikro Porozite Oluşumunun Modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Sakarya, 67-74 (2009).

Zhu, J. D., Cockcroft, S. L., And Maijer, D. M., "Modeling of Microporosity Formation in A356 Aluminum Alloy Casting", **Metallurgical and Materials Transactions A**, 37: 1075-1085 (2006).

Zolotarevsky, V., Belov, N., Glazoff, M., "Casting Aluminium Alloys", **Elsevier**, USA, 397-447 (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KISAOĞLU, Akif Kemal
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 21.12.1984 İskenderun
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (326) 615 49 22
 Cep Tel. : 0 (555) 367 82 36
 Adres : Esentepe Mh. Şehit Savcı Mehmet Türkseven Cad.
 No:95 İskenderun/HATAY
 e-mail : akemalkisaoglu@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Fen Bilimleri Enstitüsü/ Metal Eğitimi Bölümü	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Teknik Eğitim Fakültesi Döküm – Model Anabilim Dalı	2008
Lise	İskenderun Teknik Lisesi Bilgisayar/ Donanım	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006	Alfa Döküm Ltd. Şti.	Stajer
2007	Tan Döküm A.Ş.	Stajer
2009-2010	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, İnternet, Futbol, Müzik, Play Station