

**ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA Al_5Ti_1B İLE TANE
İNCELTME İŞLEMİ UYGULANMASI**

Fatih BAYPINAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2005

ANKARA

**ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA Al₅Ti₁B İLE TANE
İNCELTME İŞLEMİ UYGULANMASI**

Fatih BAYPINAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2005

ANKARA

Fatih BAYPINAR tarafından hazırlanan **ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA Al5Ti1B İLE TANE İNCELTME İŞLEMİ UYGULANMASI** adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ferhat GÜL
Tez Yöneticisi

Bu çalışma jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Ercan CANDAN

Üye : Doç. Dr. Yusuf ÖZÇATALBAŞ

Üye : Doç. Dr. Ferhat GÜL

Üye :

Üye :

Bu tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA Al5Ti1B İLE TANE İNCELTME İŞLEMİ UYGULANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih BAYPINAR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2005**

ÖZET

İyi döküm karakteristikleri ve mekanik özellikleri, düşük çekme, yüksek korozyon direnci nedeni ile Al-Si alaşımları otomobil, elektrik ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının tane inceltmesi Al-Ti veya Al-Ti-B'a dayalı master alaşımların ilavesi ile gerçekleştirilir. Bunlar mukavemeti, sünekliği, homojenliği, katılaşma sırasında beslemeyi geliştirmek için kullanılır. Tane inceltme sırasında elde edilen tane boyutu, tane incelticinin tipi ve miktarı, döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Bu tezde Al7Si döküm alaşımlarının mekanik özellikleri üzerinde bu parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Tane inceltme işlemi Al5Ti1B master alaşımı ilavesi ile gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklıkları 730,750 ve 770°C olarak seçilmiştir. Sıvı alüminyumun tane inceltmesi için %0,15 ve %0,2 olmak üzere iki farklı titanyum içeriği kullanılmıştır. Katılaşmadan sonra numunelerin yarısına T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Tane inceltme ve ısıtma işlemi ile mekanik özelliklerde önemli gelişmeler elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar optimum proses parametrelerini 770°C döküm sıcaklığı, 250°C kalıp sıcaklığı ve %0,2 titanyum içeriği olduğu göstermektedir.

Bilim Kodu : 710.3.011
Anahtar Kelimeler : Al5Ti1B, Al-Si Alaşımları, Tane İnceltme, Döküm Sıcaklığı ve Kalıp Sıcaklığı
Sayfa Adedi : 107
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Ferhat GÜL

GRAIN REFINING OF ALUMINIUM FOUNDRY ALLOYS USING AL5Ti1B**(M.Sc. Thesis)****Fatih BAYPINAR****GAZİ UNIVERSITY****INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY****December 2005****ABSTRACT**

Al-Si alloys are widely used in automobile, electrical, aircraft industries due to their good casting characteristics and mechanical properties, low shrinkage, high corrosion resistance. Grain refinement of aluminum alloys is usually achieved by an addition of master alloys based on Al-Ti or Al-Ti-B, It is used to improve mechanical strength, ductility, homogeneity, feeding during solidification. The grain size obtained during grain refinement depends on number of parameters such as type and level of grain refiner, pouring temperature, mould temperature. In this thesis, the effects of these parameters on the mechanical properties of Al%7 Si foundry alloys were investigated. Grain refinement was achieved by adding Al5Ti1B master alloy. The pouring temperatures were selected as 730, 750 and 770 °C. Two different level of 0,15 and 0,2 Ti were used for grain refinement of molten aluminum. After solidification, the half of specimens were applied T6 heat treatment. Significant improvements in mechanical properties have been obtained with grain refining and heat treatment. Experimental results show that optimum process parameters are the pouring temperature of 770 °C, mould temperature 250 °C and 0,2 % Ti content.

Science Code : 710.3.011**Key Words : Al5Ti1B, Al-Si Alloys, Grain Refinement, Pouring Temperature and Mold Temperature****Page Number: 107****Adviser : Doç. Dr. Ferhat GÜL**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Doç. Dr. Ferhat GÜL'e, çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen her türlü destek ve imkanı sağlayan Yüksek Metalurji Mühendisi Ahmet Cevdet ALTUN ve Yüksek Makine Mühendisi Mehmet Emin ALTUN'a ayrıca deneylerin yapılması aşamasında yardımlarını esirgemeyen Yusuf KİTİZ'e, Altun Döküm San. A.Ş.'de görevli tüm çalışma arkadaşlarıma, manevi desteğiyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem Hatice BAYPINAR'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM-SİLİSYUM ALAŞIMLARI	2
2.1. Al-Si Faz Diyagramı	4
2.2. Al-Si Ötektik Alaşımlarda Büyüme	6
2.3. Al-Si Alaşımlarında Silisyumun Özelliklere Etkisi	6
2.4. Alüminyum-Silisyum Alaşımlarında Tane İnceltme	8
2.5. Titanyum Bor Alüminyum Tane İncelticileri.....	9
3. Al-Si ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME MEKANİZMALARİ.....	14
3.1. Titanyum İlavesi ile Tane İnceltme	14
3.2. Bor İlavesiyle Tane İnceltme	16
3.3. Al-Ti-C İlavesiyle Tane İnceltme.....	18
3.4. Titanyum ve Bor İlavesi ile Tane İnceltme	22
3.4.1. Borid teorisi.....	22
3.4.2. Peritektik hulk teorisi	24

Sayfa

3.4.3. Hiper çekirdekleşme teorisi	26
3.5. Tane İnceltmesinde Büyüme Sınırlamasının Etkisi	27
4. Al-Si ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTMEYE ETKİ EDEN FAKTÖRLER	29
4.1. Bileşimin Tane İnceltme Üzerine Etkisi.....	29
4.2. Döküm Sıcaklığının (Fazla Isının) Etkisi	33
4.3. Soğuma Hızının Etkisi.....	33
4.4. Döküm ve Kalıp Sıcaklığının Etkisi.....	35
4.5. Aşılama Süresinin Etkisi	36
4.6. Tane Küçültme Yöntemleri.....	39
4.6.1. Isısal yöntemle tane küçültme	39
4.6.2. Dinamik yöntemlerle tane küçültme	40
4.6.3. Manyetik ve elektromanyetik karıştırma.....	41
4.6.4. Çalkantı	43
4.6.5. Üfleme ile karıştırma.....	44
4.6.6. Kalıp boyası kullanma.....	44
4.6.7. Momentum konveksiyonunun artırılması	45
4.6.8. Döndürme	45
4.6.9. Titreşimle tane küçültme	46
4.6.10. Kalıbın titreştirilmesi.....	49
4.6.11. Sıvının titreştirilmesi	50
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	53
5.1. Döküm Alaşımlarının Hazırlanması.....	52

Sayfa

5.2. Deney Numunesi	55
5.3. Simülasyon Testi	56
5.4. Kimyasal Analiz	57
5.5. Isıl İşlem	57
5.6. Metalografik Numune Hazırlama	58
5.7. Mekanik Testler.....	59
5.7.1. Sertlik testi.....	59
5.7.2. Çekme testi	60
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	62
6.1. Simülasyon Sonuçları.....	62
6.1.1. Sıvı akışı	62
6.1.2. Katılaşma.....	66
6.1.3. Çekinti	69
6.2. Mikroyapı İncelemeleri	72
6.3. Çekme ve Sertlik Deney Sonuçları.....	91
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ.....	107

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Silisyumun çeşitli sıcaklıklarda alüminyum içindeki eriyebilirlik.....	5
Çizelge 2.2. Alüminyum-Silisyum alaşımlarının bileşimi	7
Çizelge 2.3. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan tane incelticilerin kimyasal bileşimleri	11
Çizelge 4.1. Alüminyumda tane inceltme mekanizmaları	28
Çizelge 5.1. Dökümde kullanılan alaşımların kimyasal bileşim aralığı (%).....	52
Çizelge 5.2. Döküm sonrası elde edilen deney numuneleri ve deney şartları.....	53
Çizelge 5.2. (Devam) Döküm sonrası elde edilen deney numuneleri ve deney şartları	54
Çizelge 5.2. (Devam) Döküm sonrası elde edilen deney numuneleri ve deney şartları	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Al-Si döküm alaşımlarında silisyumun mekanik özelliklere etkisi	3
Şekil 2.2. Alüminyumun tane inceltmesinde silisyum içeriğinin etkisi	3
Şekil 2.3. Al-Si faz diyagramı	4
Şekil 2.4. Çeşitli Al-Si döküm alaşımlarında tane inceltmesi	12
Şekil 2.5. Ti-B bileşimine bağlı olarak tane boyutunun değişimi	13
Şekil 3.1. Al-Ti faz diyagramı	15
Şekil 3.2. Al-Ti sistemlerinde peritektik reaksiyonla α -Al'un çekirdeklenmesi	16
Şekil 3.3. 356 Al-Si alaşımının Al-Ti ve Al-Ti-B ile tane inceltme	18
Şekil 3.4. Peritektik hulk teorisinin modeli	26
Şekil 3.5. Hiper çekirdeklenme teorisi modeli	27
Şekil 4.1. Bileşimin tane yoğunluğuna etkisi	30
Şekil 4.2. Al – 7 Si döküm alaşımına çeşitli bileşimlerde ve farklı Ti veya B oranlarına sahip master alaşımları ilavesi ile a) 5 dk b) 120 dk bekletme zamanlarında tane inceltme analizi	31
Şekil 4.3. A.356 ve 319 alüminyum döküm alaşımlarında 5/1 TiB tane inceltici ilavesi ile (1 gr/kg 0,005Ti) farklı soğuma hızı test yöntemlerinin tane inceltme etkisi	33
Şekil 4.4. Döküm ve kalıp sıcaklığında artışın tane boyutuna etkisi	35
Şekil 4.5. Alüminyum için farklı bekletme zamanlarında 0,01% Ti veya B ilave oranlarında çeşitli tane incelticilerin kullanımı ile tane inceltme	36
Şekil 4.6. Manyetik alan şiddeti, aşırı soğuma fonksiyonu olarak tane küçültme derecesinin değişimi	42
Şekil 4.7. Elektromanyetik karıştırma yöntemleri	43
Şekil 4.8. Al, Fe-C ve Bi alaşımlarına uygulanan titreşim şartlarının tane küçültmeye etkileri	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. % 10, % 50 ve % 90 tane küçültme değerlerinin, frekans genlik haritasında gösterilmesi	47
Şekil 4.10. Döküm parçasına uygulanan farklı titreşim yöntemlerinin şematik gösterimi	50
Şekil 5.1. Kokil kalıp yolluk tasarımı.....	56
Şekil 5.2. Metalografik numune alma ve inceleme bölgeleri.....	58
Şekil 5.3. Çekme numuneleri boyutları.....	60
Şekil 6.1. Sıvı akış süreci 0,6 s.	63
Şekil 6.2. Sıvı akış süreci 1 s.....	63
Şekil 6.3. Sıvı akış süreci 1,2 s.	64
Şekil 6.4. Sıvı akış süreci 1,4 s.	64
Şekil 6.5. Sıvı akış süreci 1,6 s.	65
Şekil 6.6. Sıvı akış süreci 1,8 s.	65
Şekil 6.7. Sıvı akış süreci 2 s.....	66
Şekil 6.8. Katılaşma süreci 6,731 s.	67
Şekil 6.9. Katılaşma süreci 15 s.	67
Şekil 6.10. Katılaşma süreci 23,18 s.	68
Şekil 6.11. Katılaşma süreci 58,9 s.	68
Şekil 6.12. Çekinti süreci kesit 1.....	69
Şekil 6.13. Çekinti süreci kesit 2.....	70
Şekil 6.14. Çekinti süreci kesit 3.....	70
Şekil 6.15. Çekinti süreci kesit 4.....	71

Şekil**Sayfa**

- Şekil 6.16. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtıl işlemsiz, 250°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi 92
- Şekil 6.17. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtıl işlemsiz, 250°C kalıp sıcaklığı, 90 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi..... 94
- Şekil 6.18. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtıl işlemsiz, 280°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi 95
- Şekil 6.19. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, T6 ısıtıl işlemlili, 250°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi 97
- Şekil 6.20. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, T6 ısıtıl işlemlili, 280°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi 99
- Şekil 6.21. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtıl işlemsiz, 730 ve 750°C döküm sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin kalıp sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi 100
- Şekil 6.22. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, T6 ısıtıl işlemlili, 750 ve 770°C döküm sıcaklığı, 60 ve 90 saniye kalıp açma süresine sahip numunelerin kalıp sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi 101

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Tel ve tablet şeklinde tane incelticiler.....	10
Resim 3.1. Al-3%Ti-0,15%C ön alaşımasının mikro yapısı	20
Resim 3.2. Al-3Ti-0.75C ve Al-5Ti-1B ön alaşımlarının tane inceltme performansı.....	22
Resim 3.3. Al-0Ti-3B master alaşımındaki AlB_2 partiküllerinin SEM mikro fotoğrafları	23
Resim 3.4. Al-1Ti-3B master alaşımındaki $(AlTi)B_2$ partiküllerinin SEM mikro fotoğrafları	25
Resim 4.1. Al-Si7 tane incelticiler (a) Al-5Ti-1B (b) Al-1Ti-3B master alaşımlarının makro yapı fotoğrafları	37
Resim 5.1. Gaz alma sistemi	51
Resim 5.2. Kule tipi ısıtma işlem fırını	58
Resim 5.3. Sertlik test cihazı	59
Resim 5.4. Çekme testi cihazı	51
Resim 6.1.a. 0,15Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	72
Resim 6.1.b. 0,15Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	73
Resim 6.2.a. 0,15Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	73
Resim 6.2.b. 0,15Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	74
Resim 6.3.a. 0,15Ti730C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	74
Resim 6.3.b. 0,15Ti730C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	75
Resim 6.4.a. 0,15Ti770C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	76
Resim 6.4.b. 0,15Ti770C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	76
Resim 6.5.a. 0,2Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	77
Resim 6.5.b. 0,2Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	78

Resim	Sayfa
Resim 6.6.a. 0,2Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	78
Resim 6.6.b. 0,2Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350).....	79
Resim 6.7. 0,2Ti730C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350).....	79
Resim 6.8. 0,2Ti770C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	80
Resim 6.9.a. 0,15Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	80
Resim 6.9.b. 0,15Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350).....	81
Resim 6.10.a. 0,2Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	81
Resim 6.10.b. 0,2Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350).....	82
Resim 6.11. 0,15Ti730C250C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350).....	83
Resim 6.12. 0,2Ti730C250C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	83
Resim 6.13.a. 0,15Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	84
Resim 6.13.b. 0,15Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350).....	84
Resim 6.14.a. 0,2Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)	85
Resim 6.14.b. 0,2Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	85
Resim 6.15. 0,15Ti770C280C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)	86
Resim 6.16. 0,2Ti770C280C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350).....	86
Resim 6.17. 0,15Ti730C250C60T6 kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	87
Resim 6.18. 0,15Ti730C250C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	87
Resim 6.19. 0,2Ti750C250C60T6 kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	88
Resim 6.20. 0,2Ti750C250C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	88

Resim	Sayfa
Resim 6.21. 0,2Ti750C280C60T6 kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	89
Resim 6.22. 0,2Ti750C280C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	89
Resim 6.23. 0,2Ti770C280C60T6 kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	90
Resim 6.24. 0,2Ti770C280C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
ρ	Yoğunluk (g/cm^3)
N	Newton
σ	Mukavemet (MPa)
HB	Brinell Sertlik
Tf	Katılaşma Denge Sıcaklığı
V_L	Sıvının Özgül Hacmi
V_S	Katının Özgül Hacmi
Lf	Katılaşma Gizli Isısı
Tm	Dengede Katılaşma Sıcaklığı
fa	Frekans / genlik
Lo	İlk Boy
Ls	Son Boy
Ao	İlk Çap
As	Son Çap
α	Genleşme Katsayısı
D	Dökümün Çapı
d	Tane Boyutu
a,b	DeneySEL Sabitler
v	Katılaşma Hızı
T	Kalıp/metal arasındaki açıklığın başladığı an ile bittiği an arasındaki sıcaklık farkı.

1. GİRİŞ

Hafif metal alaşımlarının günümüz teknolojisindeki uygulaması ve önemi giderek artmaktadır. Bu tür alaşımlardan olan alüminyum döküm alaşımları kolay dökülebilmeleri, özgül ağırlık ve ısı genleşmelerinin düşük, ısı iletkenliklerinin yüksek olması ve uygun mekaniksel özellikler göstermeleri nedeni ile teknolojik bir öneme ve çekiciliğe sahiptirler.

Tarihsel olarak tane inceltme yöntemi titanyum ve bor ihtiva eden tuz fluksların sıvı metale ilavesiyle başlamıştır. Tane inceltici olarak kullanılan flukslar verimli olmalarına rağmen birçok dezavantaja sahiptirler. Tuz fluksları sıvı metalin hidrojen içeriğini arttırmaya, korozyon gazları üretmeye ve inceltici elementlerin özelliklerini tam olarak gösterememesine neden olmaktadır. Alüminyum döküm endüstrisinde verimli tane inceltme Al-Ti ve Al-Ti-B ön alaşımlarının ilavesiyle başarılmıştır.

Al-Ti ve Al-Ti-B ihtiva edene ön alaşımların ilavesi ile yapılan tane inceltme sıcak yırılmalara karşı dirençteki artış, gelişmiş mekaniksel özellikler, mikro yapıların homojenliği ve makro porozitedeki azalma, bu yöntemin uygulanmasında önemli nedenlerdendir.

Alüminyum döküm alaşımlarında tane boyutunun kontrolü mikro yapının katılaşma sırasında ve katılaşmadan sonra kontrol altında bulunması ve amaçlara göre yönlendirilmesi ile sağlanabilir. Mikro yapı ile alüminyum döküm gereçlerin mekanik özellikleri arasındaki ilişki göz önünde bulundurularak kullanım amacına en uygun mikro yapının oluşumu sağlanmalıdır. Alüminyum dökümlerde tane inceltmenin verimliliği silisyumun morfolojisi, soğuma hızı ve döküm sıcaklığı gibi diğer üretim parametrelerinin çeşitliliği ile artırılabilir.

Alüminyum döküm alaşımlarında tane inceltme işlemi, kaliteli ve nitelikli dökümler için çok önemli ve gereklidir.

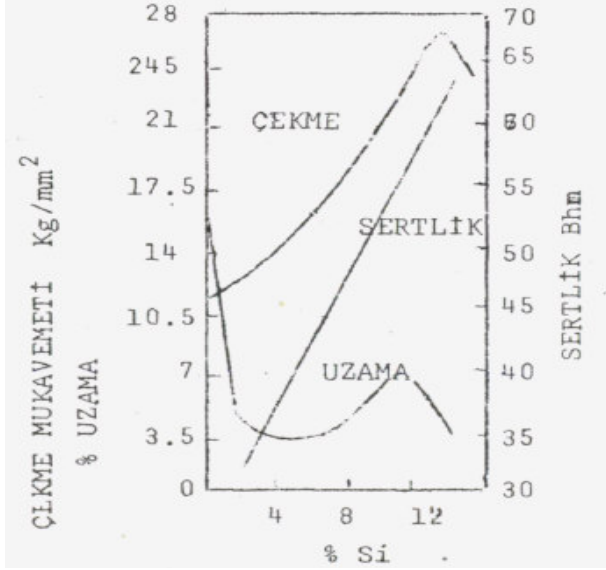
2. ALÜMİNYUM SİLİSYUM ALAŞIMLARI

Günümüzde Al-Si alaşımları, dayanım/ağırlık oranının yüksek oluşu, yüksek ısı ve elektriksel özellikleri ve kum kalıba dökümden basınçlı döküme kadar birçok yöntemle dökülebilmelerine olanak sağlayan mükemmel döküm kabiliyetleri nedeniyle otomotiv endüstrisinden havacılık sanayine kadar geniş bir alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Al-Si alaşımlarının, kabaca yumuşak ve sünek alüminyum fazı ile sert ve kırılgan silisyum fazından meydana gelen bir karma malzeme olduğu söylenebilir. Alüminyumun hafifliği, plastik şekil değiştirme kabiliyetinin yüksek oluşu, yüksek elektriksel özellikleri, korozyon dayanımının yüksekliği, manyetik olmayışı ve kaynak kabiliyetinin iyi olması ana tercih sebeplerindendir. Saf alüminyumun bu avantajlarının yanı sıra döküm kabiliyetinin iyi olmayışı, sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin düşük oluşu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Silisyumun alaşım elementi olarak en büyük etkisi döküm kabiliyetini arttırmasıdır. Silisyumun ilavesi ile alaşımın akıcılığı ve mekanik özellikleri artarken, özgül ağırlık ve ısı genleşme katsayısı azalmaktadır (1).

Al-Si alaşım grubu yukarıda belirtilen özelliklerinin yanı sıra daha yüksek dayanım ve kırılma tokluğu, sertlik gibi mekanik özellikleri gerektiren değişik alanlarda kullanılmaya çalışılmaktadır. Endüstri tarafından istenen bu mekanik özelliklerdeki artış Al-Si alaşımlarının mikroyapıları ile doğrudan ilgilidir (1).

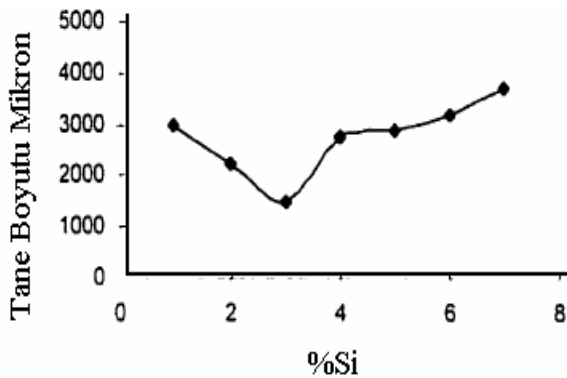
Mikroyapıda da mekanik özelliklere en büyük etkiyi, yapı içerisindeki ötektik silisyumun boyutu, morfolojisi ve dağılımı yapmaktadır. Mikroyapı içerisindeki silisyumun boyutu, morfolojisi ve dağılımı alaşımın soğuma hızının değiştirilmesi yada alaşım içerisine silisyumun katılma mekanizmasını değiştiren element yada bileşiklerin eklenmesi ile farklılaştırılabilir ve bu farklılaşmanın sonucu olarak mekanik özelliklerde artış yada azalma gözlenir. Al-Si alaşımları içerisindeki silisyumun dağılımı, morfolojisi ve boyutu üzerinde yapılan değişiklikler Al-Si alaşımlarının modifikasyonu yada sıvı-metal işlemleri olarak tanımlanmaktadır (2).

Si miktarı % 7-12 aralığında olan Al-Si alaşımları yüksek mukavemet gerektiren, yüksek sıcaklıkta aşınma direnci istenen uygulama alanlarında kullanılır. Genellikle kokil ve basınçlı dökümle şekillendirilir. Mekanik özellikleri ise alaşımın bileşimine göre Şekil 2.1’de gösterildiği gibi değişmektedir (3).



Şekil 2.1. Al-Si döküm alaşımlarında silisyumun mekanik özelliklere etkisi (3)

Şekil 2.2’de alüminyum silisyum döküm alaşımlarında silisyum bileşiminin tane inceltme verimi gösterilmektedir.

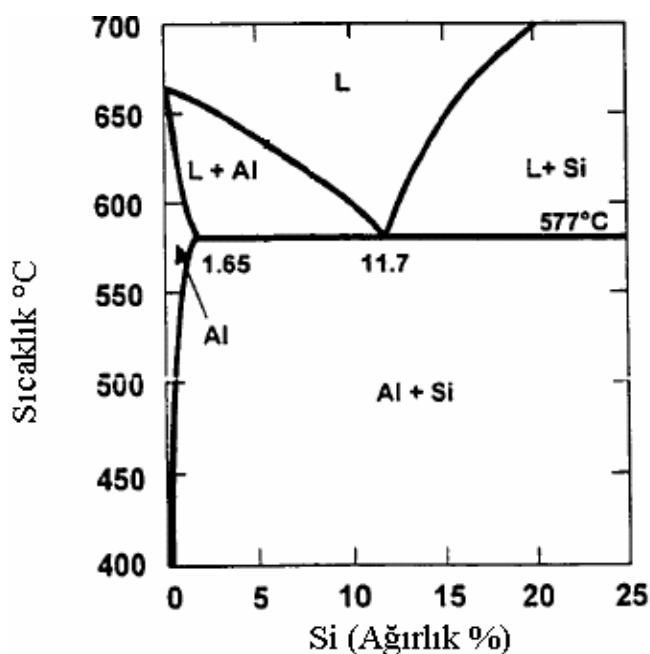


Şekil 2.2. Alüminyumun tane inceltmesinde silisyum içeriğinin etkisi (4)

2.1. Al-Si Faz Diyagramı

Al-Si alaşıımı basit bir ötektik sistem olup iki katı eriyik faz olan YMK (Yüzey merkezli kübik) alüminyum ve elmas kübik (özel yüzey merkezli kübik) yapıya sahip silisyumdan oluşmaktadır. Şekil 2.3’de Al-Si denge diyagramı gösterilmektedir. Denge koşullarında ötektik sıcaklığına $577\pm 1^{\circ}\text{C}$ ve % 11,7 Si ötektik bileşimine sahiptir.

Ötektik karışımı oluşturan fazlardan α fazı oda sıcaklığında % 1 den daha az silisyum içeren alüminyum bazlı bir katı eriyiktir. Ötektiği oluşturan diğer faz β ise, hemen, hemen arı silisyum olan, çok az alüminyum içeren silisyum bazlı bir katı eriyiktir. Ötektik altı Al-Si alaşımlarının yapısı, genellikle dallantılı bir görünümde olan α birincil fazı ile bu dallantılar arasında kümeleşmiş ötektik karışımdan oluşur. Ötektik üstü Al-Si alaşımlarında ise yapı ötektik karışımı ile kaba çökeltiler görünümündeki β fazından oluşmuştur (5).



Şekil 2.3. Al-Si faz diyagramı (1)

Geniş bileşim aralıklarına sahip alüminyum alaşımlarına uygulanan çeşitli hızlı katılaştırma teknikleri (splat quenching: sıvı metalin çok ince bir tabaka şeklinde soğutulması, melt spinning: sıvı metalin içerisinde su sirküle edilen ve dönen bir tambur (bakır) etrafında soğutularak katılaştırılması, atomizasyon: sıvı metalin inert gaz ortamında püskürtülerek soğutulması) α -Al içerisindeki silisyum çözünürlüğünü metaller arası bileşik veya amorf (metalik olmayan) faz oluşturmaksızın arttırmıştır.

Ötektik sıcaklıkta silisyumun alüminyum içinde katı eriyebilirliği % 1,65'tir. Eriyebilirlik oda sıcaklığında % 0,05 den daha azdır ve 300°C de bu çözünürlük % 0,05'e düşmektedir. 1190°C'de silisyum içerisindeki maksimum alüminyum çözünürlüğü ise % $0,016 \pm 0,003$ 'dür. Çeşitli sıcaklıklarda eriyebilirlik Çizelge 2.1'de gösterilmektedir (6).

Çizelge 2.1. Çeşitli sıcaklıklarda silisyumun alüminyum içerisindeki eriyebilirliği (7)

Sıcaklık (°C)	Eriyebilirlik % ağırlık
577	1,65
550	1,30
500	1,10
450	0,70
400	0,45
350	0,25
300	0,10
250	0,04
200	0,01

Geçişli elektron mikroskobu (TEM) ile yapılan araştırmalar ve kafes parametrelerinin ölçümleri α -Al içerisindeki maksimum Si katı eriyik çözünürlüğünün % 11 ± 1 Silisyuma taşındığını göstermiştir (3).

2.2. Al-Si Ötektik Alaşımlarda Büyüme

Ötektik alaşımların kendine özgü özelliklerini araştırmanın en güncel yöntemi, sabit hızda yönlenmiş katılaşma işlemi uygulanmasıdır. Yönlenmiş olarak katılaştırılan malzemede, sıcaklık gradyanı doğrultusunda yönlenmiş ve üniform bir mikro yapı elde edilmesi amaçlanır. Bu mikro yapı malzemeye yüksek mukavemet ve yüksek sıcaklıklarda ısısal kararlılık özellikleri kazandırmak için uygulanan iki yöntem vardır. Modifikasyon adı verilen bu yöntemlerden birincisi malzemeyi sıvı halden hızla soğutmak, yani bir çeşit su verme işlemi, diğeri ise sodyum ve stronsiyum gibi bazı alkali metallerin küçük miktarlarda ilavesidir. Ötektik alaşımlarda büyüme genellikle iki çeşittir:

1. Eşsiz büyüme iki faz birbirinden bağımsız olarak kristalleşir, yani katı-sıvı ara yüzeyinde biri diğlerinden çok ileride büyür ve ardından arada kalan sıvı bölgelerinde diğ faz kristalleşir. Eşsiz büyümede, katı-sıvı ara yüzeyinde morfoloji ve sıcaklık dalgalanmaları vardır.
2. Eşli büyümede her iki faz yaklaşık olarak düz bir katı-sıvı arayüzeyi vererek birlikte ve aynı sıcaklıkta katılaşır. Katı-sıvı arayüzeyine yakın sıvıda atom yayınması etkinleşir (7).

2.3. Al-Si Alaşımlarında Silisyumun Özelliklere Etkisi

Silisyum bilindiği gibi alüminyum döküm alaşımlarının ana alaşım elementidir. Alüminyum döküm alaşımına silisyum ilavesi ile akıcılık, kaynak kabiliyeti ve mekanik özellikler artar ayrıca ısıl işlem ve modifikasyon gibi özel işlemlerin uygulanabilirliğide silisyum ilavesi ile mümkün olur. Döküm alaşımlarında silisyum miktarı maksimum % 22-24'tür. Alaşımlar toz metalurjisi ile üretildiğinde silisyum miktarı % 50'ye çıkmaktadır. Al-Si alaşımlarının bileşimi Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Alüminyum-Silisyum alaşımlarının bileşimi (5)

Si	% 5-25	Mn, Cr, Co, Mo	% 3'e kadar
Cu	% 0-5	Ni, Be, Zr	% 3'e kadar
Fe	% 3'e kadar	Na, Sr	% 0,02'den az
Mg	% 0-2	P	% 0,01'den az
Zn	% 0-3	Al	Geri kalan

Silisyum, alaşımın katılaşma anında oluşan katılaşma çekmesini önemli ölçüde azaltır. Diğer alaşım elementlerinin çekmedeki etkisi çok azdır. Katılaşma esnasında oluşan çekintideki silisyumun etkisi % 6–12 silisyum bileşiminde % 3–4, % 20–24 silisyum bileşiminde % 1-2'dir. Silisyumun özgül ısısı alüminyumdan % 1–2 daha düşüktür. Alaşımın elektrik iletkenliği çoğu zaman eriyik durumdaki silisyuma bağlıdır. Bakır ve magnezyumunda etkisi vardır. Manganez, krom, titanyum ve zirkonyum iletkenliği azaltır. Silisyum, bakır ve magnezyum manyetik hassasiyetliği biraz azaltır. Fakat bu özellik çoğu zaman manganez bileşimine bağlıdır. Al-Si alaşımları malzemenin saflığına bağlı olarak çeşitli miktarlarda Fe, Mn, Cu, Zn v.b. kirlilik elementleri içermektedir. Ayrıca Cu ve Mg gibi metaller alaşım elementi olarak döküm malzemesinin mukavemetini ve sertleşebilirliğini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Katılaşma işlemi esnasında kirlilikler ve alaşım elementleri metaller arası partiküller meydana getirmektedir (5).

Eruslu'nun alüminyum alaşımlarının dökümü ve yapı kontrolü üzerine yaptığı çalışmada silisyum içeriğinin artışı ile üretilen malzemenin mekanik özelliklerinde artış meydana getirmekte olduğu ifade edilmektedir (3).

2.4. Alüminyum-Silisyum Alaşımlarında Tane İnceltme

Alüminyum alaşımlarında tane inceltilmesi, bu yüzyılın ilk yarısından itibaren ticari olarak kullanılmakta ve alüminyum alaşımlarından üretilen parçaların kontrolünde temel işlemlerden biri olmuştur. Sıcak yırtılmalara karşı dirençteki artış, gelişmiş mekaniksel özellikler, mikro yapıların homojenliği ve makro porozitedeki azalma, tane inceltme yönteminin uygulanmasında önemli nedenlerdendir (8).

Al-Si döküm alaşımlarında tane inceltme katılaşma sırasında kütleli beslemeyi geliştirmekte ve bu durum çekme porozitesinde azalmaya neden olmakta ve daha küçük ve daha gelişmiş porozite dağılımını teşvik etmektedir. Aynı zamanda ince tane boyutu sıvı içerisinde çözünmüş gazlardan meydana gelen gözeneklere ilave olarak, ikincil intermetalik fazların daha üniform olmasını sağlar. Döküm parçanın bütününe meydana gelen artış, hem mekanik özellikleri hemde basınç sızdırmazlığındaki artış ile meydana gelmektedir (8).

Sıvı metalin kimyasal bileşimini, temizliğini ve hidrojen içeriğini kontrol etmek, bir dökümde optimum fiziksel ve mekaniksel özellikler elde etme açısından çok önemlidir. Alüminyum döküm alaşımlarında tane boyutunun kontrolü, sıvı metalin besleme kabiliyetini geliştirmede ve uygun yüzey görüntüsünün yanında otomotivde kullanımda yüksek mekanik özellikler sağlama açısından önemlidir. Tane boyutuna ilave olarak, α -Al fazı dendrit kolları arasındaki mesafe kadar, ötektik silisyum morfolojisi yüksek kalitede alüminyum üretiminde temel rol oynamaktadır. Alüminyum dökümlerde tane inceltmenin verimliliği silisyumun morfolojisi, soğuma hızı ve döküm sıcaklığı gibi diğer üretim parametrelerinin çeşitliliği ile artırılabilir.

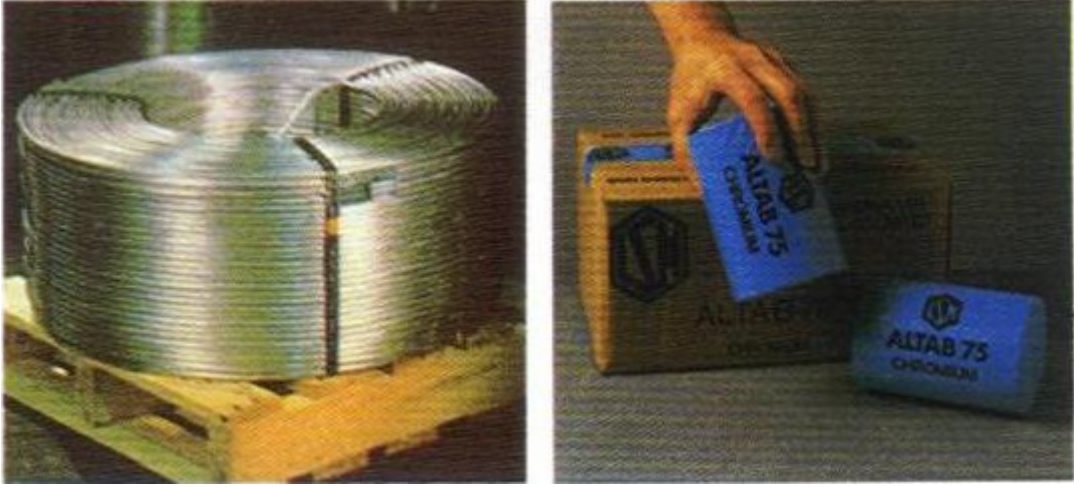
Alüminyum döküm alaşımlarında gaz boşluğu ve çekme boşluklarının minimum olması arzu edilir. Boşluk boyutu, tane boyutu ile orantılı olup ince taneli dökümlerde boşluklar daha küçük ve bu nedenle mukavemet daha yüksektir. Benzer şekilde çekme ve sıcak yırtılma hatalarının kaba taneli yapıda oluşma oranı yüksektir (9).

Al-Si döküm alaşımlarının katılaşma işlemi çekirdeklenme ve birincil α -Al'un büyümesiyle başlar ve alaşım elementlerini içeren çeşitli fazların bir sonraki çökmesiyle devam eder. Çekirdeklenme ve büyüme aşaması bir dökümün tane boyutunun olduğu ilk basamaktır. Temiz bir sıvı metalin katılaşması önemli bir çekirdeklenme problemini ortaya koyar (10).

Bir dökümde tane boyutu sıvı metal içerisinde katılaşma esnasında hareket edebilen yabancı tanelerin sayısı ile ilişkili olduğu fark edilmiştir. Daha sonra her tane farklı bir parçacıkla çekirdeklenirse çok sayıda çekirdek, tane oluşumuna daha küçük tane boyutla sonuçlanarak izin verecektir. Alüminyum döküm alaşımlarında kalıp duvarlarında oluşan oksitler ve kalıp boyalarına kadar farklı parçacıklar bulunabilir. Aşırı soğumalarda bu parçacıklar katılaşma için çekirdek gibi etkili olabilir. Alüminyuma kristallografik benzerlikli parçacıklar sıvı metalde dengede katılaşma sıcaklığı T_m 'nin denge donma noktasına yakın sıcaklıklarda etkili çekirdekler haline gelecektir (11).

2.5. Titanyum Bor Alüminyum Tane İncelticileri

AlTiB tane inceltici tel % 99,7 saflıkta birincil alüminyumdan ve değişik bileşimlerdeki florür tuzlarından üretilmektedir. Önceleri yuvarlak takoz halinde döküldükten sonra ekstrüzyon ile elde edilen tel, bugünkü teknolojiye sürekli döküm ve haddeleme metodu ile imal edilmektedir. Sürekli döküm teknolojisi özellikle döküm kalitesinde önemli avantajlar sağlayarak incelticisinin temas süresini arttırmıştır. Temas süresi AlTiB'un ergimiş alüminyuma ilavesini takiben sağladığı maksimum tane inceltme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Tane incelticiler sıvı alüminyuma katılmasından dolayı alaşımın bileşiminde önemli bir değişim söz konusu değildir. Bugün alüminyum sanayinin % 80'i tel şeklinde AlTiB tane incelticisi kullanmaktadır. Resim 2.1'de tel ve tablet şeklinde tane incelticiler gösterilmiştir (12).



Resim 2.1. Tel ve tablet şeklinde tane incelticiler (12)

Sürekli döküm yönteminde AlTiB ile tane inceltme tekniğinde yapılan en büyük geliştirme, tane incelticilerin ergitme ocaklarına küçük ingotlar şeklinde atılması yerine döküm oluğundaki metale otomatik olarak tel şeklinde beslenmesidir. Döküm oluğunda tel ile yapılan bu tane inceltme işlemi ocakta yapılan işleme göre daha etkin ve hassastır. Sürekli tane inceltme uygulaması gerekli malzeme ilavesini % 50 oranında azaltmakta, ergitme fırını içerisinde oluşan titanyum borid miktarının artmasını önlemekte ve döküm prosesi boyunca sabit bir tane inceltmesi sağlamaktadır (13).

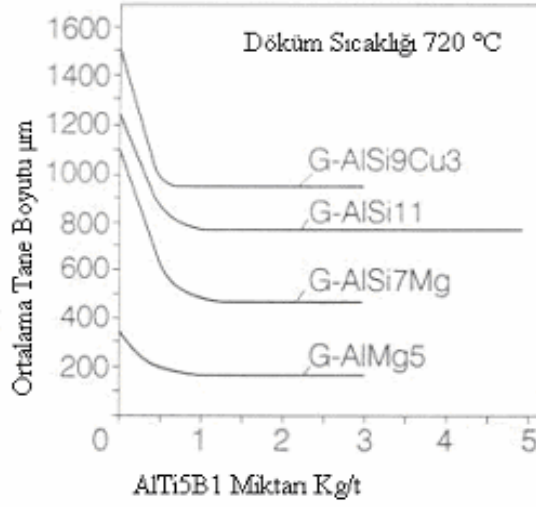
AlTiB'un tane incelticisi olarak kullanılmaya başlamasından itibaren araştırmacılar çeşitli alüminyum alaşımlarına en etkin Ti/B oranı için büyük çaplı araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmalar neticesinde % 3–10 oranında titanyum %0,1–1 oranında bor ihtiva eden çeşitli ürünler geliştirmişlerdir, ancak standart en çok kullanılan bileşim 5/1 Ti-B oranıdır. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan tane incelticiler Çizelge 2.3'de gösterilmiştir (13).

Çizelge 2.3. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan tane incelticilerin kimyasal bileşimleri (14)

Tane İncelticiler		
AlTiB 5/1	Al % 5 Titanyum	% 1 Bor
AlTiB 5/0,6	Al % 5 Titanyum	% 0,6 Bor
AlTiB 5/0,2	Al % 5 Titanyum	% 0,2 Bor
AlTiB 3/1	Al %3 Titanyum	% 1 Bor
AlTi 6	Al % 6 Titanyum	
AlTi 10	Al % 10 Titanyum	

Dünya alüminyum sanayinin % 70'i bu bileşimdeki ürünü tane inceltici olarak işlemlerde kullanmaktadır. İnce levha ve folyo gibi bazı özel üretimlerde % 5 Ti ve % 0,2 B Ti/B gibi daha düşük bor ihtiva eden bileşimler tercih edilir. Bu gibi bileşimler daha az titanyum borid bileşikleri ihtiva eder. Titanyum miktarı % 0,25'i aşmamalıdır. Bu noktadan sonra oluşan kaba Al-Ti primer kristallerinin teşekkülü mukavemet özelliğini düşürür (14).

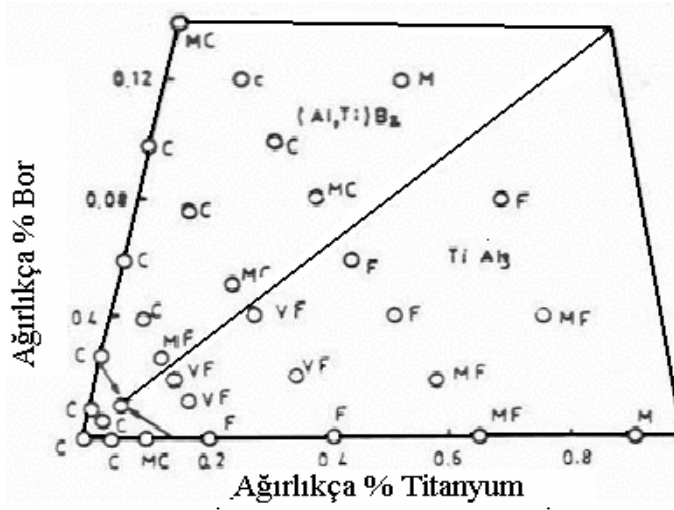
İkili Al-Ti tane inceltme alaşımları genellikle tercih edilmez, çünkü oluşan $TiAl_3$ çekirdekletiricileri 700 °C'de metal içerisinde kolayca erir, ayrıca bu tür alaşımlarla çalışıldığında alüminyum içerisinde büyük ve gevrek tanelerin olma eğilimini artırır. Şekil 2.4'de çeşitli Al-Si döküm alaşımlarında tane inceltme performansları gösterilmiştir (15).



Şekil 2.4. Çeşitli Al-Si döküm alaşımlarında tane inceltilmesi (15)

Al-Ti master alaşımlarına tane küçültme amacı ile bazı ilaveler yapılmış ve bor'un Al-Ti sisteminin tane etkisini arttırdığı gözlenmiştir. Üçlü Al-Ti-B master alaşımı kaba $TiAl_3$ ve çok ince TiB_2 kristallerini içerir. Master alaşımların metalografik incelenmesi TiB_2 'nin tane küçültücü rol oynamadığı ancak $TiAl_3$ 'ün etkisini artırdığını göstermiştir (6).

Alüminyumda çekirdek merkezi olarak TiB_2 'nin rol oynadığı iddia edilmektedir. $TiAl_3$ ve TiB_2 'nin birlikte bulunduğu zaman $TiAl_3$ 'ün daha etkili bir çekirdekleştirici olduğu bütün araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir. $TiAl_3$ partikülleri tane içerisinde bor içeren partiküller ise tane sınırlarında yer almaktadır (16).



C Kaba, M Orta, F İnce, MC Orta Kaba, MF Orta İnce, VF Çok İnce

Şekil 2.5. Ti-B bileşimine bağlı olarak tane boyutunun değişimi (6)

AlTiB tane inceltici tel kullanımının alüminyum alaşım üretiminin ayrılmaz bir parçası haline geldiği ve değişik alaşımların tane inceltme işlemine yatkınlıkları konusunda önemli bir bilgi birikimi sağlanmıştır. Genel bir kural olarak daha az alaşım elementleri içeren alüminyum alaşımlarının AlTiB ile tane inceltilmesi daha zordur. Özellikle demir, silisyum, mangan, titanyum ve bor gibi elementler ana inceltme işlemini olumlu şekilde etkiledikleri için bu elementleri içeren alüminyum alaşımlarının tane inceltme işlemleri daha kolaydır. Buna karşılık krom ve zirkonyum gibi elementler tane inceltme işlemini olumsuz yönde etkiledikleri için bu elementleri içeren alaşımların tane inceltme işlemleri daha zor ve yüksek oranda ilaveler ile gerçekleştirilir. Şekil 2.5’de Ti-B bileşimine bağlı olarak tane boyutunun değişimi gösterilmiştir (6).

Alüminyum alaşım bileşiminin yanı sıra döküm kesit kalınlığı ve döküm yöntemi tane inceltme işlemini etkileyen diğer faktörlerdir. Sıcak halde ingot dökümleri, kalın kesitler ve düşük katılaşma hızlarında gerçekleştirildiği için tane inceltme işlemi daha ince kesitlerde gerçekleştirilen ekstrüzyon takoz dökümüne göre daha zordur. Sürekli levha döküm işlemlerinde ise kesitin ince ve katılaşmanın hızlı olmasına karşın kenar çatlama problemi sebebi ile AlTiB tel incelticinin yüksek oranlarda ilave edilmesi gereklidir (13).

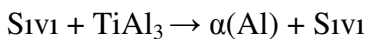
3. Al-Si ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME MEKANİZMALARI

Tane inceltme yöntemi titanyum ve bor ihtiva eden tuz fluksların sıvı metale ilavesiyle başladı. Genellikle bu incelticilerdeki aktif içerikler titanyum ve boru ortaya çıkarmada sıvı alüminyumla beraber hareket eder. K_2TiF_6 ve KBF_4 tane inceltici olarak verimliliklerine rağmen, birçok dezavantaja sahiptirler. Tuz flakslar sıvı metalin hidrojen içeriğini arttırmaya, korozyon gazlar üretmeye ve inceltici elementlerin özelliklerini tam olarak gösterememesine neden olmaktadır.

Alüminyum döküm endüstrisinde kimyasal tane inceltme: kontrollü heterojen çekirdeklenme, Al-Ti ve Al-Ti-B master alaşımlarının ilavesiyle başarıldı. Bu doğrultuda değişik teoriler ortaya çıktı ve tane boyutunun küçültülmesinin tam mekanizması hala tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Burada tane inceltmenin fiziksel görünüşleri ve termal analiz tekniklerinin parametrelerini ilişkilendirmek için bazı temel teoriler açık bir şekilde tanımlanacaktır.

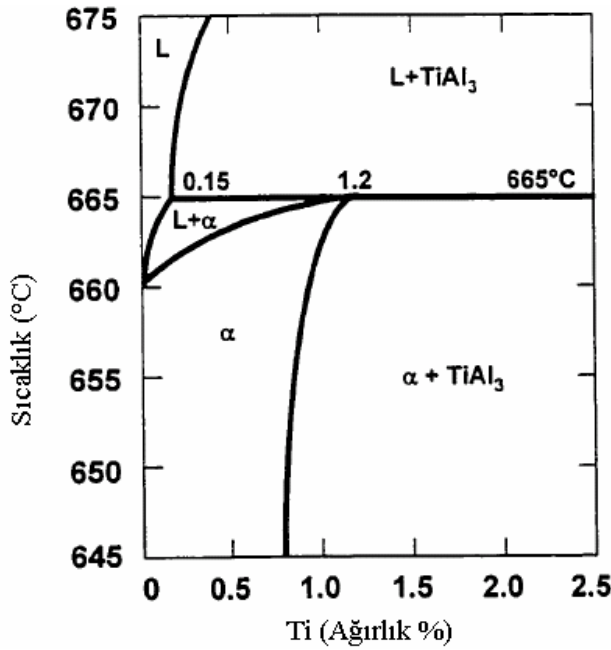
3.1. Titanyum İlavesi ile Tane İnceltme

Birçok yazar tarafından sunulan değişik teoriler arasında Crassley ve Mondolfo (4) tarafından peritektik teorisi, titanyum ilavesi ile alüminyum alaşımlarında tane inceltmeyi açıklamada ana mekanizma olarak görülür (Şekil 3.1). Al-Ti faz diyagramı %1,2 titanyum ve 665 °C'de peritektik reaksiyon gösterir. Yeterli oranda (>% 0,15) titanyum varsa peritektik olarak hareket eden $TiAl_3$ sıvı metal de oluşan birincil α -Al'un ilk kristallerini oluşturur. Bileşim genellikle peritektik altı sıcaklığında olup dönüşüm aşağıdaki reaksiyonda gösterilmiştir. Crassley ve Mondolfo (4) ya göre alüminyum tane inceltmesi bu reaksiyonla ilişkilidir (4).



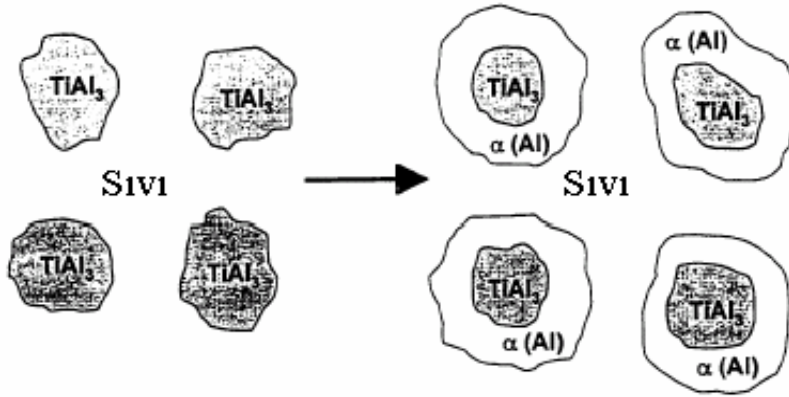
α -Al parçacıkları kalan sıvı metal ve oluşan ilk kristallerin sayısına bağlı olarak inceltme derecesi için çekirdek gibi hareket eder (Şekil 3.2). Al-Ti master alaşımları

alüminyum matriste $TiAl_3$ parçacıkları içerir ve arıtılan sıvı metale ilave edildiğinde $TiAl_3$ parçacıklarını dağıtarak çekirdeklenme için heterojen bölgeler oluşturur. Alüminyum döküm alaşımlarında $<0,15$ titanyum içeren bileşimlerde de tane inceltme elde edilebilir. Fakat bu etki $TiAl_3$ parçacıklarının sıvı metal içerisinde erimesine bağlı olarak zamanla kaybolur (4).



Şekil 3.1. Al-Ti faz diyagramı (6)

Al-Ti sistemi, Şekil 3.1'de görüldüğü gibi % 0,15 Ti ve 665 °C da bir peritektik reaksiyon vermektedir. İkili Al-Ti sisteminde $TiAl_3$ metaller arası bileşiği çekirdeklenme rolünü oynamaktadır. Peritektik teori, alüminyum tanelerin merkezinde $TiAl_3$ partiküllerini bulan ve bu bileşik ile çevresindeki alüminyum arasında uyum (yönlenme) ilişkisi gözleyen diğer yazarlar tarafından da teyit edilmektedir. Peritektik teorisine katılmasına rağmen Davies ve arkadaşları (2) çok düşük titanyum içeriklerinde (% 0,01 ağırlıkça Ti) dahi çekirdeklenen partiküllerin bulunması gerçeği nedeniyle faz diyagramında bir hata olduğunu iddaa etmişlerdir.



Şekil 3.2. Al-Ti sistemlerinde peritektik reaksiyonla α -Al'un çekirdeklenmesi (4)

Al-Ti master alaşımları için peritektik altındaki titanyum seviyelerinde inceltme etkisinin sıvı metaldeki TiAl_3 parçacıklarının erimesine bağlı olarak azaldığı ve kaybolduğu tespit edildi. Ayrıca TiAl_3 parçacıklarının morfolojisi master alaşımın inceltme verimliliğini etkilediği görüldü. Blok şeklindeki malzemeler için inceltme etkisi, ilave zamanından sonra etkili hale gelmesi zaman almasına rağmen etkinliği uzun sürer.

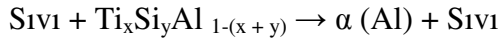
3.2. Bor İlavesiyle Tane İnceltme

Yapılan deneylerde Al-Si alaşımlarının tane inceltme işleminde kullanılan Al-Ti-B master alaşımlarında borun önemi göz ardı edilemez. Aşırı bor miktarı AlB_2 parçacıklarının oluşumunu sağlayacağı için Ti/B oranını önemli kılar. Alüminyum için çekirdek olarak AlB_2 'nin verimliliği üzerinde önemli bir çelişki vardır. Cibulaya (4) göre AlB_2 parçacıkları alüminyumu çekirdekleyebilir. Maxwell ve Hellavall (4) AlB_2 'nin saf alüminyum için etkili bir çekirdek olmadığını ileri sürerler. AlB_2 ve TiB_2 benzer yapılara sahiptirler ve bu fazlar için benzer özellikler gözlenebilir.

Genelde Al-Si alaşımlarının tane inceltmesi için üç farklı tip master alaşımı üretilmektedir. Bunlar Al-Ti ve Al-B ikili veya TiB_2 (Ti/B 2,2) stokimetrik orana göre aşırı titanyumlu veya aşırı borlu Al-Ti-B alaşımlarıdır. Çözülebilir bor içeren

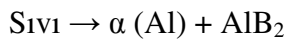
Al-Ti-B çeşitli incelticilerin Al-Si döküm alaşımlarında en iyi sonuçları sağladığı ve incelticilerin performansındaki farkların, sıvı metal içerisinde kalan titanyumun oranıyla ilgili olduğu bulundu.

Dövme alüminyum endüstrinde kullanılan Al-Ti ön alaşımları titanyumun tane inceltme etkisiyle silisyum oranına bağlı olarak Al-Si döküm alaşımlarında test edilen ürünler arasında en az etkili olarak bulundu. Yüksek silisyum içerikli döküm alaşımlarında Al-Ti sistemi aşağıdaki reaksiyonunda belirtildiği gibi yeni alüminyumun fazları içererek peritektik bir sistem olan Al-Ti-Si sistemi haline geldiğini belirttiler (4).



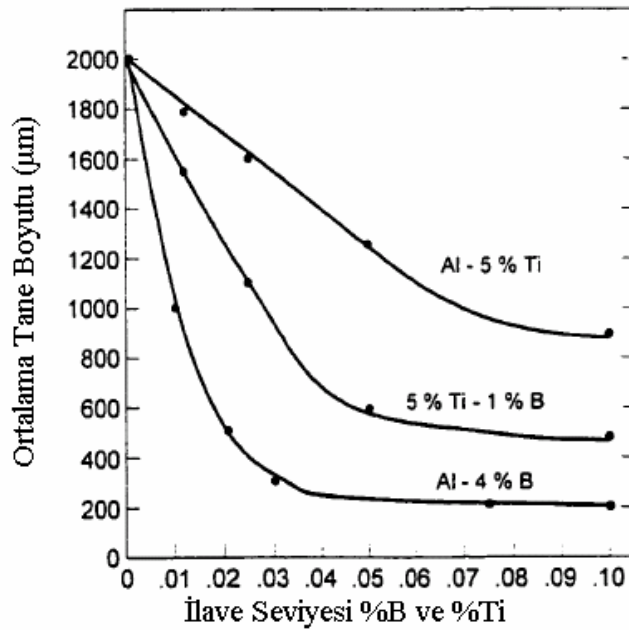
Bu Ti-Si-Al fazı alüminyum tanelerin merkezinde bulunmuştur ve % 6 Si içeriği için yukarıdaki reaksiyonda 356 ve 319 Al-Si döküm alaşımlarının sıvı sıcaklığının hemen altında yaklaşık 600 °C de oluşmaktadır.

Sigworth ve Guzowski (4), Al-3Ti-3B master alaşımının (Al,Ti)B₂ parçacıkları (AlB₂'ye yakın kompozisyona sahip) üzerinde ilk alüminyum çekirdeklenmesi ile Al-Si sıvıda güçlü bir inceltme etkisi oluşturduğunu buldular. Diğer araştırmacılar, 659,7°C ötektik reaksiyonda TiB₂ parçacıkları ve α(Al) çekirdekleri üzerinde yoğun bir bor tabakası oluşturduğunu öne sürmüşlerdir.



Mohanty ve Guzowski (4) Al-Si alaşımlarında titanyum oranı yoğun olduğunda Al-Ti-Si fazı TiB₂ üzerinde oluştuğunu buldular. Al-Ti-Si fazı bunu takiben peritektik reaksiyonla ilk alüminyumu çekirdekler.

Önce yapılan deneylerde, X ışını difraksiyon sonuçlarına bağlı olarak AlB_2 'nin saf alüminyum çekirdeklediğine inanılırdı. Ayrıca Sigworth (4), klasik Al-Ti ve Al-Ti-B tane incelticilerine ilave olarak Al % 4 B ilavesiyle elde edilen üstün tane inceltmesini rapor etti. Şekil 3.3 alüminyumunda tane inceltmesinde yalnız kullanılan titanyumun etkili olmadığı önerildi. Fakat Al-Si alaşımları için % 0,02 B ötektik reaksiyona bağlı olarak önemli hale gelir. Bu sıcaklıkta ötektik reaksiyon meydana gelirse yukarıdaki reaksiyon için aşırı soğuma gerekeceği için katılaşma sıcaklığı üzerinde α -Al'un çekirdeği oluşmaz. Al-Si alaşımlarında çekirdekleşme için katı heterojen bölgelerinin varlığını sağlayarak ötektik reaksiyon, ergime sıcaklığı üzerinde (615 °C 356 alaşımı için) meydana gelir.



Şekil 3.3. 356 Al-Si Alaşımının Al-Ti ve Al-Ti-B ile Tane İnceltme (4)

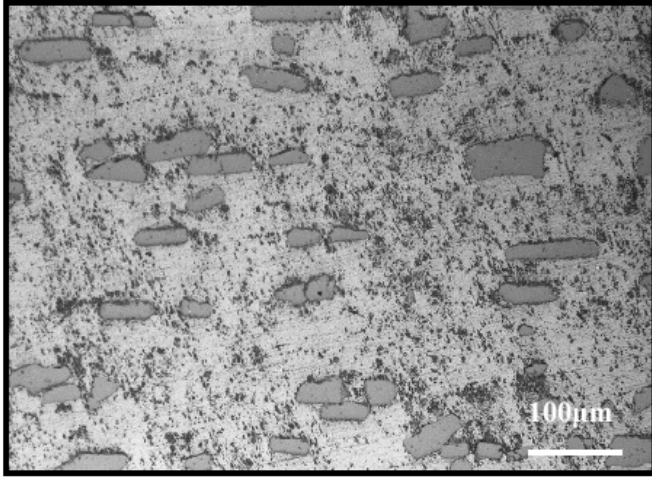
3.3. Al-Ti-C İlavesiyle Tane İnceltme

Alüminyum alaşımlarının dökümünde bu güne kadar tercih edilen ön alaşımlar Al-Ti-B sistemine ait olup, çözülebilir $TiAl_3$ ile kararlı TiB_2 parçacıkları içermektedir.

Al-Ti-B ön alaşımlarındaki TiB_2 parçacıkları genellikle oldukça kaba olup, hem üretim hem de tane küçültme uygulamasında topaklanma eğiliminde olduklarından bazı kalite hatalarına sebep olurlar. TiB_2 parçacıkları çoğu kez, ince folyolarda delikliliğin, baskı plakaları ve eloksal kalite levhalarda yüzey çizik ve kazıklarının, ekstruzyon biyetlerinde, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlı levha ve dövme ürünlerinde çatlamaların sorumlusu olarak görülürler. Kalite problemlerinin yanı sıra Zr içeren alaşımlarda Zr'un TiB_2 tane küçültme etkisine olumsuz tesir ediyor olması borsuz tane küçültücüler için büyük bir ilgi ve talep yaratmıştır. Bu nedenle, tane küçültücü üreticileri son yıllarda Al-Ti-B tane küçültücülerinin yerini alabilecek ve en az onlar kadar başarılı olabilecek alternatif ön alaşımlar geliştirmek için büyük bir çaba göstermişlerdir.

Al-Ti-C ön alaşımlarını üretmek için çoğu, sıvı alüminyumda TiC oluşturmak için Al-Ti sıvı alaşımına C beslemeyi hedefleyen farklı yöntemler denenmiştir. Alüminyum alaşımlarını karbonca zenginleştirmek, karbon (grafit) alüminyum tarafından ısıtılmadığından sanıldığı kadar kolay bir iş değildir.

Bu gün piyasada bulunan Al-Ti-C ön alaşımları TiC taneciklerinin yanı sıra $TiAl_3$ taneciği de içerir. Bunlardan sadece TiC taneciklerinin tane küçültmede aktif rol oynadığına inanıldığından Al-Ti-C ön alaşımlarında karbon miktarının artırılıp Ti:C oranının düşürülmesinin tane küçültme verimliliğinde bir artışa yol açıp açmayacağının belirlenmesi teknolojik yönden son derece önemlidir. Resim 3.1'de Al-3%Ti-0,15%C ön alaşımının mikro yapısı gösterilmektedir (17).



Resim 3.1. Al-3%Ti-0,15%C ön alaşımlarının mikro yapısı (17)

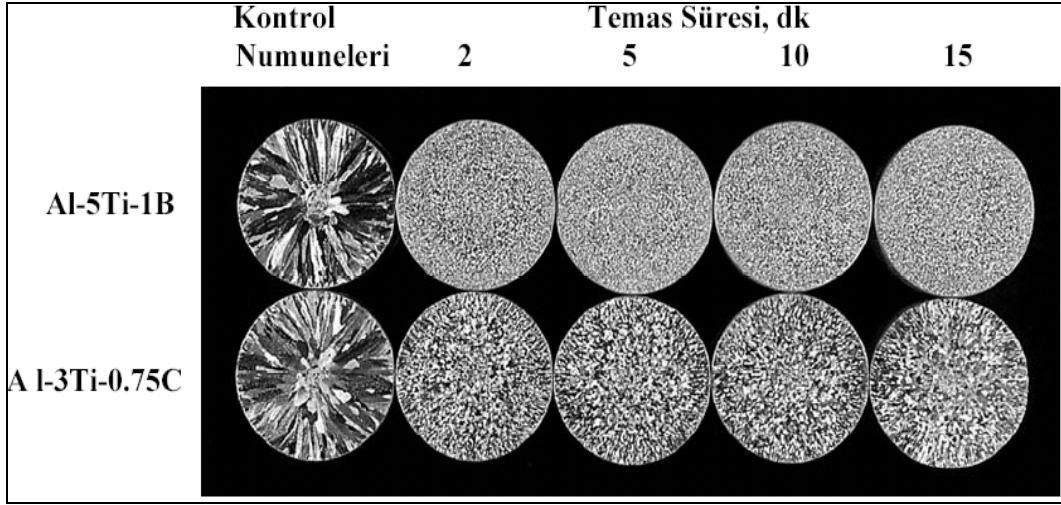
Cibula'nın (17) çalışmalarından bu yana alüminyum alaşımlarında ötektik altı Ti konsantrasyonları ile sağlanan tane küçültme etkisindeki rolü ile TiC'ün alüminyum için verimli ve başarılı bir çekirdeklendirici olduğu bilinmektedir. Titanyumun sıvı alüminyumda çok az miktarlarda bulunan C ile reaksiyona girip TiC oluşturduğuna ve bu kararlı fazın da alüminyumu çekirdeklendirme görevini üstlendiğini ileri sürmüştür. Bu nedenle Al-Ti-B alaşımlarının yerine aday alaşımların geliştirilmesi çabalarında ilk akla gelen Al-Ti-C sistemidir. Bu alaşımların tane küçültme becerisi bazı alüminyum alaşımlarında gösterilmiş Al-Ti-C alaşımları ile Al-Ti-B alaşımları ile sağlanan seviyelerde tane küçülme daha düşük TiC oranlarında elde edilebileceği iddaa edilmiştir. Ayrıca TiC parçacıkları TiB_2 taneciklerinden daha küçüktürler ve toplanma eğilimleri de daha düşüktür.

Cibula'nın (17) karbür teorisi şu gerçeğe dayanmaktadır. Düşük konsantrasyonlarda titanyum alüminad oluşturmakta ancak potadan veya kullanılan takımlardan dolayı sıvıda bulunan karbon titanyum ile TiC oluşturmak için reaksiyona girmektedir. Mohanty ve arkadaşları (17) tarafından yapılan son çalışmalarda sıvıda termodinamik kararsızlığı nedeniyle TiC'in etkin bir aşılavıcı olmadığını iddaa etmişlerdir. Son yıllarda birkaç yazar Cibula'nın (17) karbür teorisini desteklemektedir ve ticari olarak yeni girişimler bulunmaktadır.

Aynı doğrultuda Cibula (17) tarafından yapılan çalışmalarda düşük titanyum konsantrasyonlarında (%0,01 ağırlıkça titanyum) TiC partiküllerinin alüminyum alaşımlarının tane boyutunun azaltılmasına neden olduğu tespit edilmiş, ancak daha sonraki denemelerde sıvı tarafından karbonun ıslatılabilirliğinin az olması sebebiyle, titanyum içeren alaşımlardaki karbon miktarındaki artış tane inceltmede düşük başarıya neden olmuştur.

Alüminyum alaşımları Al-Ti-C ön alaşımları ile aşılandığında çekirdeklenmenin doğrudan TiC tanecikleri üzerinde gerçekleştiği ve bu nedenle başarılı bir tane küçültme için fazladan titanyumun gerekli olmadığı iddaa edilmiştir. Bu durum yeterli tane küçültme için TiB_2 şeklinde bağlanan dışında fazladan titanyuma ihtiyaç duyan Al-Ti-B alaşımları ile karşılaşılandan farklıdır. Al-Ti-B alaşımlarında tane küçültmede aktif rol oynayan TiB_2 tanecikleri tedragonel kafes yapılı ve YMK yapıdaki alüminyumla uyumsuz iken, Al-Ti-C tane küçültücülerindeki TiC tanecikleri YMK kafes yapılı ve alüminyumla uyumludur. Buna bağlı olarak TiC alüminyum için TiB_2 den çok daha etkili bir çekirdekleyicidir (17).

% 99,7 saflığındaki alüminyuma uygulanan Al-3Ti-0,75C alaşımının mikroyapısı Resim 3.2’de görülmektedir. Alüminyum matriksde dağılmış çok sayıda ve oldukça küçük TiC partikülleri bulunmaktadır. Kokil kalıpta gerçekleşen hızlı katılaşmaya rağmen TiC partiküllerinin önemli bir bölümünün topaklanmaları görülmektedir. TiC partiküllerinin yani sıra çok az sayıda $TiAl_3$ partikülleri bulunmaktadır. Ancak $TiAl_3$ sayıca az ve boyutça TiC partikülleri kadar küçük olduklarından fark edilmeleri oldukça güçtür (17).



Resim 3.2. Al-3Ti-0.75C ve Al-5Ti-1B ön alaşımlarının tane inceltme performansı (17)

Al-3Ti-0,75C alaşımlarının tane küçültme performansı Al-5Ti-1B alaşımlarının ile birlikte Resim 3.2’de gösterilmiştir. Al-5Ti-1B ön alaşımı Al-3Ti-0,75C ön alaşımına kıyasla farklı temas sürelerinde daha küçük tane yapıları vermektedir. Resim 3.2’deki sonuçlardan Al-3Ti-0,75C alaşımlarının tane yapısını küçülttüğü fakat performansının yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır (17).

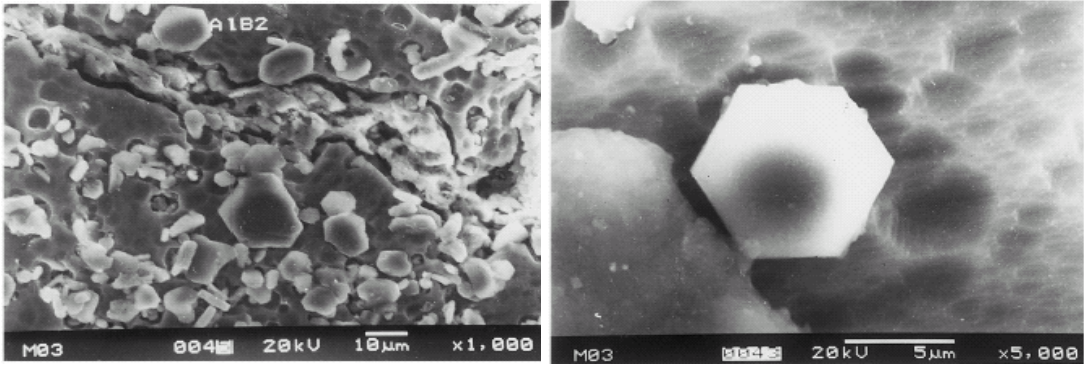
3.4. Titanyum ve Bor İlavesi ile Tane İnceltme Teorileri

Al-Ti ön alaşımlarına bor ilavesi alüminyum alaşımlarında tane inceltme verimliliğini büyük oranda arttırdığı bilinmektedir. Bu bağlamda birçok çalışma yapılmıştır. Termodinamik çalışmalar ve deneysel buluşlarla ilgili birçok araştırma vardır. McCarter, Guzowski ve meslektaşları (4) burada belirtilen üç ana teoriden özetlenen bu çalışmada kritik görüşlerini aşağıda sunmuşlardır.

3.4.1. Borid teorisi

Titanyumla inceltile alüminyum alaşımlarına bor eklendiğinde TiB_2 ’nin çözünmeyen parçacıklarının direk olarak düşük titanyum konsantrasyonlarında tane boyutundaki azalmada etkili olduğu Cibula (17) tarafından öngörüldü. Bu olay çözünmeyen borid parçacıklarının bir bölgede yoğunlaşması ve burada kalmasına

bağlı olarak meydana gelir. Bu fikre karşı Marcantino ve Mondolfo erimiş alüminyuma bor ilavesinin titanyumun çözünürlüğünü azalttığını ve çok düşük titanyum konsantrasyonlarında bile $TiAl_3$ kristallerinin var olmasına izin vererek alüminyumca zengin Al-Ti sisteminin peritektik reaksiyonunu genişlettiğini belirttiler. Diğer araştırmacılar Cibulanın (17) borid teorisini bor içeren parçacıklarının tane merkezinde değil aksine tane sınırında bulunduklarını iddia ettiler (4). Resim 3.3’de Al-0Ti-3B master alaşımındaki AlB_2 partiküllerinin SEM mikro fotoğrafları gösterilmektedir.



Resim 3.3. Al-0Ti-3B master alaşımındaki AlB_2 partiküllerinin SEM mikro fotoğrafları (18)

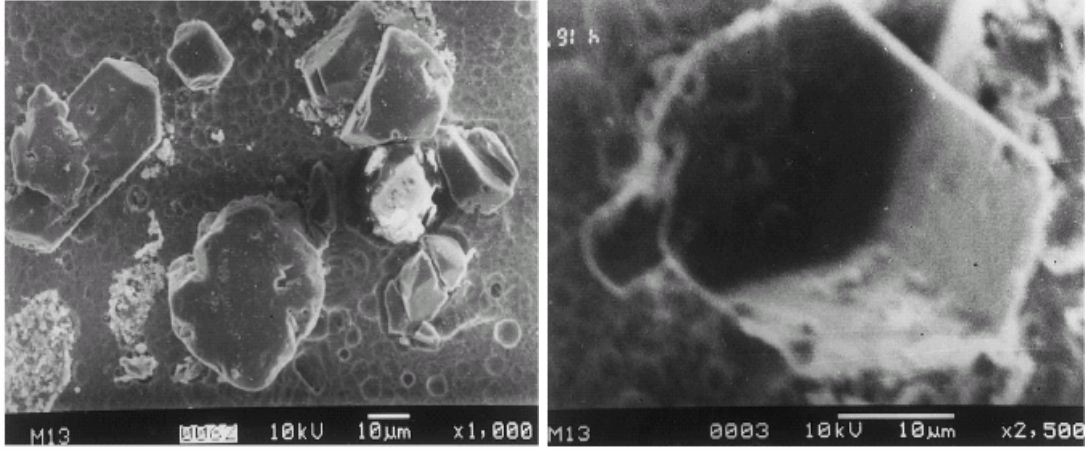
E.Geçkinli ve arkadaşları (6) bor dağılımının otoradyografik tespiti ile yapmış oldukları çalışmada alüminyumun yapısında bulunan borun tane sınırlarında yer aldığı saplanmıştır. Borun direkt olarak kendisinin veya bileşiklerinin çekirdek merkezi olarak davranmadıkları bulunmuştur fakat çekirdekleştiricilerin oluşumuna etki ederek $TiAl_3$ gibi tane küçültmede endirekt olarak rol oynamaktadırlar.

Sigward (4), Al-Si alaşımlarında alüminyum için $(AlTi)B_2$ fazının direk çekirdek gibi davrandığını ispatladı. Buna karşın Cornish katı eriyiklerinin $(AlTi)B_2$ oluşumunun alüminyum alaşımlarının tane inceltilmesinde önemli bir rol oynadığını belirtti. Kuiselaas ve Beckerud (4) Al-Ti-B master alaşımların üretimi esnasında bu yarı kararlı fazın sıvı halde tutulması esnasında TiB_2 ’ye dönüştüğünü tespit etti.

Guzowski ve meslektaşları (4) alüminyum için çekirdekleşme bölgeleri haline gelen $TiAl_3$ ile birlikte ‘çift yönlü’ parçacıklar oluşturmak için borun TiB_2 ve $(AlTi)B_2$ ye izin verdiğini gözlemledi. Bu gözlem titanyum içeriğini düşürmek için borun Al-Ti peritektik reaksiyonunu değiştirdiği Marcantonio ve Mondolfo tarafından önerilen teori ile çelişmektedir. Çelişkilere rağmen bu yazarlar tane inceltirilmiş metal içerisinde şu parçacıkların varlığını tam olarak ifade ederler $TiAl_3$, TiB_2 , AlB_2 ve $(AlTi)B_2$ karışımı. Bu gözlemlerden iki teori ortaya çıkmıştır ve bu teorilerden hiç biri tam olarak ispatlanamamıştır.

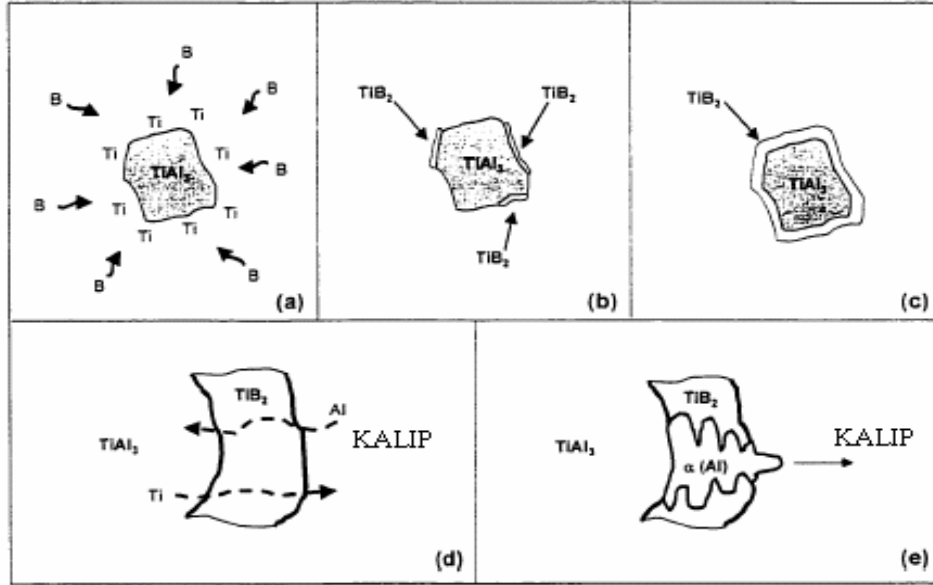
3.4.2. Peritektik hulk teorisi

Backerud (4) tarafından önerilen bu teoride sıvı metal içerisindeki küçük $(AlTi)B_2$ parçacıkları tamamen çözünür ve bu tanelerin etrafı titanyum ile kaplanarak $TiAl_3$ parçacıklarını kısmen çözerler. Bu durum bu bölgedeki (alüminyum taneler etrafında) titanyum konsantrasyonunu artırır ve TiB_2 için çözebilme verimi artar. Borid daha sonra $TiAl_3$ parçacıklarının erimesine karşı koruyucu bir tabaka oluşturarak alüminyum fazının yüzeyine çöker. Zamanla titanyum (dışarıda) ve alüminyum (içeride) titanyumla doldurulan sıvı alüminyum havuzları oluşturarak kokil kalıp boyunca eş zamanlı difüzyonu meydana getirirler. Sıcaklığın peritektik sıcaklığa ($665\text{ }^{\circ}\text{C}$) ulaştığı zaman bu peritektik taneler heterojen çekirdekleşmeyi tetikler. Bu durum meydana geldiğinde αAl tarafından sıvı metal içerisinde büyümeye devam eder. Bu teori şematik olarak Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.



Resim 3.4. Al-1Ti-3B master alaşımındaki (AlTi)B₂ partiküllerinin SEM mikro fotoğrafları (18)

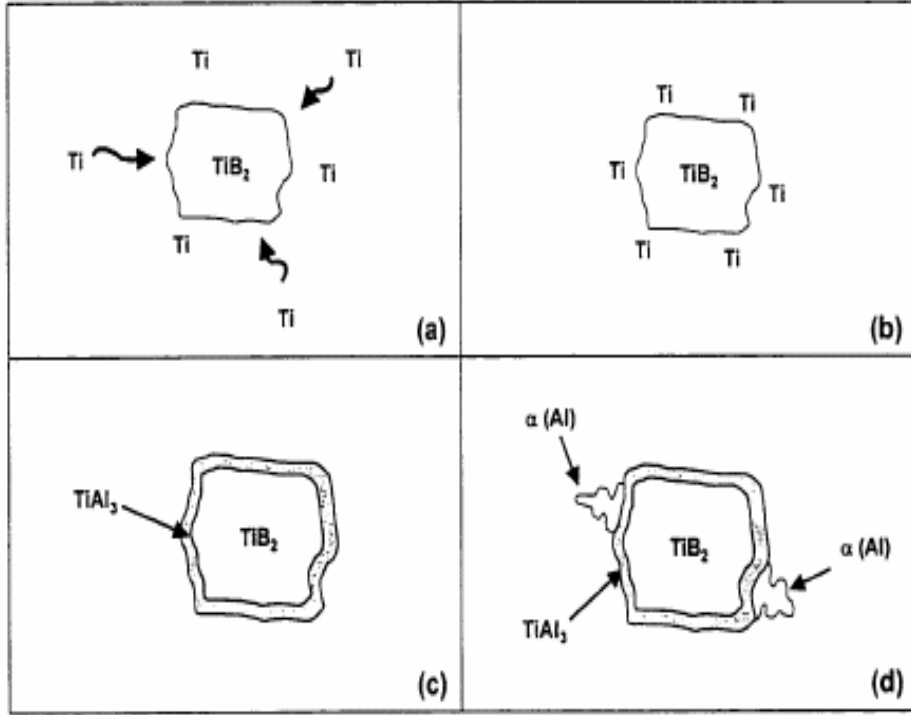
Al-Ti-B master alaşımları al minad fazını çevreleyen (ve bazende fazın içerisinde bulunacak şekilde) boridlerin karışımını içermekte olup, bu TiAl₃ fazının     nmeye karşı korunmasını geliştirmektedir. Bu ikili partiküllerin tane inceltme etkisi, al minadların tamamen     nmesi nedeniyle zamanla s   me uğradığı g   nmektedir, ancak diğer yazarlar inceltme etkisinin kaybının borid partiküllerinin çökelmesinden ortaya çıktığını savunmaktadır. Bu teoride dikkate alınması gerekli diğer bir önemli y  n, aşırı titanyum bulunması (stokimetrik olarak Ti/B 2,21 üzerinde) tane inceltmede kritik bir öneme sahiptir. Resim 3.4’de Al-1Ti-3B master alaşımındaki (AlTi)B₂ partiküllerinin SEM mikro fotoğrafları g  sterilmektedir.



Şekil 3.4. Peritektik Hulk Teorisinin Modeli (4) a) $TiAl_3$ 'ün kısmi çözünmesi ve $TiAl_3$ 'e B 'nin difüzyonu b) TiB_2 'nin çözünme verimini artırır c) $TiAl_3$ üzerinde TiB_2 'nin koruyucu tabaka oluşturması d) Al ve Ti nin koruyucu tabaka boyunca eş zamanlı büyümesi e) Çekirdek ve $\alpha-Al$ 'un büyümesi

3.4.3. Hiper çekirdekleşme teorisi

Jones ve Pearson (4) sıvı alüminyumda aşırı titanyum (Ti/B 2.21 oranı üzerinde) olduğu zaman eriyik titanyum sıvıdan TiB_2 -Sıvı ara yüzeyine segre olur ve ince bir $TiAl_3$ katmanı oluşturur. Soğuma sonucu $\alpha-Al$ 'un çekirdeklenmesi peritektik olarak gerçekleşir. Bu mekanizmaya göre sönüm, borid partiküllerinin topaklanması ve çökmesi nedeniyledir. Deneysel ispat sönüm verimine dayalı bu teoriyi desteklemektedir, ancak bu teorinin termodinamiği net olarak henüz ortaya konmamıştır.



Şekil 3.5. Hiper çekirdeklenme teorisi modeli, a) Eriyikte yoğun Ti miktarı ($Ti/B > 2.21$), b) TiB_2 -Sıvı metal yüzeyinde ayrışan Ti, c) TiB_2 üzerinde $TiAl_3$ tabakasının oluşumu, d) Peritektik reaksiyonla α -Al çekirdeklenmesi

3.5. Tane İnceltmesinde Büyüme Sınırlamasının Etkisi

Alüminyum ve alaşımlarının tane inceltme mekanizmalarının çalışmasında alüminyumun ilk kristallerinin heterojen çekirdeklemeye doğru bir çabaları vardır, buna karşın birkaç araştırmacı alaşımda bulunan diğer elementlerin etkisini belirtti. Jones ve Pearson'a göre, alüminyum alaşımlarında Zn, Mg ve Si etkisi, yapısal aşırı soğumayla tane büyümesini kısıtlamaktadır. Baskerwed ve meslektaşları, alaşım elementlerinin düşük konsantrasyonlarında büyüme için sınırlama faktörü olduğunu belirtti (4).

St. John ve arkadaşları (2) Al-Si alaşımlarında iki farklı çekirdeklenme mekanizmasının bulunduğunu göstermiştir. Bunlardan bir tanesi sıvının türbülans ve konveksiyonu taşınmış olan kristallerin kalıp duvarında çekirdeklenmesini kapsarken, diğeri ise sıvı içerisindeki yapısal aşırı soğuma ile alt katmanların aktivasyonunu göstermektedir. Saf alüminyuma silisyum veya titanyumun başarılı

bir şekilde ilavesi, sıvıda yapısal aşırı soğuma ile ve sıvı/katı ara yüzeyinde büyümenin sınırlandırılması ile tane boyutu azalır. Çekirdeklenmenin hızı güçlü aşılaiıcıların varlığı ile daha da geliştirilir. Al-Si alaşımlarında kritik yapısal aşırı soğuma derecesine ulaşılır, bu minimum tane boyutuna neden olur (Şekil 2.2), bunun daha ilerisinde ise Backeraud ve arkadaşlarının (4) ifade ettiğı gibi, arayüzeyde büyüme modunda bir değışim ile birlikte tane boyutunda artma meydana gelir. Bu konuyu sonuçlandırmak için farklı master alaşım için temel gözlemlerle alüminyumda tane inceltmesinin mekanizması Çizelge 3.1’de gösterilmiştir (4).

Çizelge 3.1. Alüminyumda tane inceltme mekanizmaları (4)

Master Alaşım	Saf Al ve Dövme Alaşımları		Al-Si Döküm Alaşımları	
	Verimlilik	Mekanizma	Verimlilik	Mekanizma
Al-Ti	İyi Ti>%0,15 ise	TiAl ₃ üzerinde α -Al peritektik oluşumu	Zayıf	Likudüs altında Ti _x Si _y Al _{1-(x+y)} in peritektik dönüşümü
Al-Ti-B Ti/B >2,2	İyi	TiB ₂ parçacık yüzeyinde TiAl ₃ tabaka oluşumu	Makul	TiB ₂ üzerinde oluşan Ti _x Si _y Al _{1-(x+y)}
Al-B	Etkili değıl	α -Al yoluyla ıslatılan AlB ₂	Mükemmel	α (Al) de ötektik oluşumu $L \rightarrow \alpha$ (Al) + TiB ₂
Al-Ti-B Ti/B <2,2	Etkili değıl	TiB ₂ üzerinde TiAl ₃ oluşumu için gerekli katı Ti	Ti/B > 2,2 ise İyi	TiB ₂ yüzeyinde α -Al in ötektik oluşumu

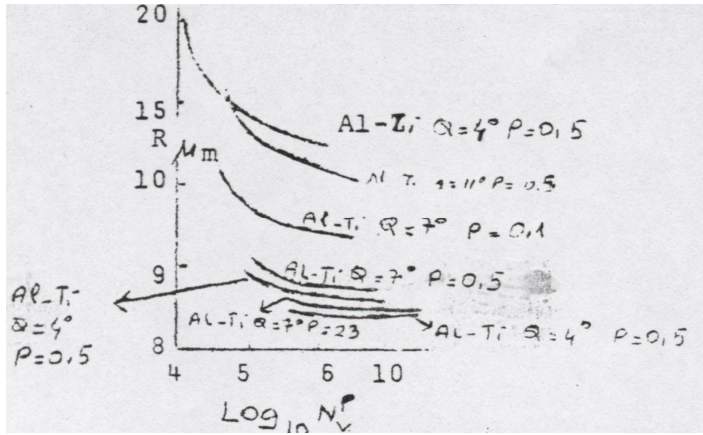
4. Al-Si ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTMEMEYE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

4.1. Bileşimin Tane İnceltme Üzerine Etkisi

Belirli bir tane incelticinin etkisi; inceltilecek ötektik altı alaşıma, ilave oranlarına, yapıya geçen titanyum miktarına, döküm koşullarına ve sıcaklığına bağlıdır. Literatürde tane küçültmesi üzerine bileşimin etkisini incelenmiş, bileşimin ve yapı özelliklerini yansıtan parametreler ile tane boyutu arasındaki bağıntıyı göstermişlerdir (19).

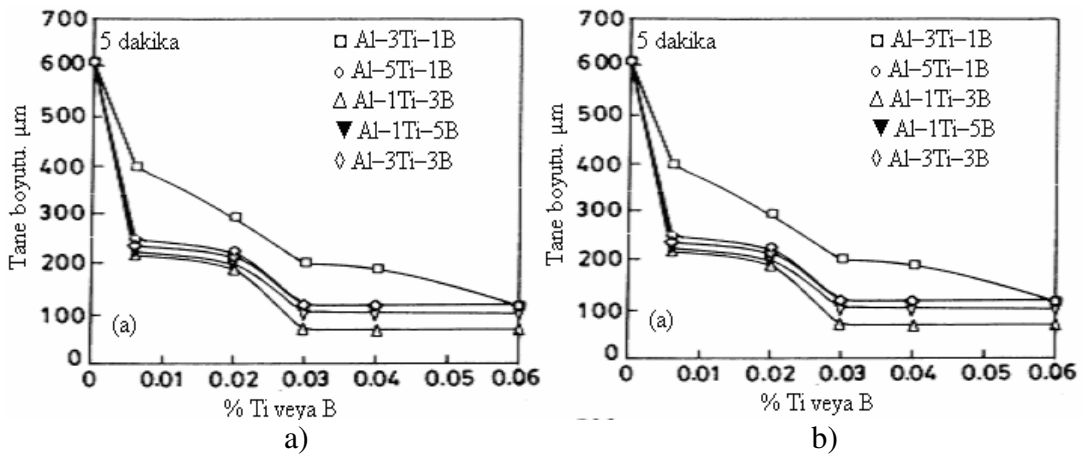
Yapı içerisinde titanyum miktarı 5/1 TiB alaşımlarının tane inceltme performansları üzerinde fazla bir etkiye sahip değildirler (5).

En çok araştırılan Al-Ti sisteminde yapılan deneysel çalışmalar basitçe N_V^P 'nin hesaplanabileceğini göstermiştir. Şekil 4.1'de peritektik sıcaklığın hemen üzerindeki $TiAl_3$ + sıvı faz bölgesinde hacimce %2 $TiAl_3$ tekabül bulunmaktadır. Şekildeki kritik N_V^P değeri yaklaşık 10^3 mm^{-3} 'dür. $R_o=3\mu\text{m}$ olduğu zaman yaklaşık (ağırlıkça) % 2×10^{-3} Ti fazlalığı gereklidir. $C_A=0,15$ olduğuna göre, toplam Ti gereği $0,15+2 \times 10^{-3}=0,152$ dir. Parçacık boyutu ve soğutma hızının etkisi göz önüne alındığında 1:2500 seyreltme oranını aşmayacak master alaşımı kullanılır. Daha yoğun ilaveler tane küçültme etkisini arttırmazlar (3).



Şekil 4.1. Bileşimin tane yoğunluğuna etkisi

Yapılan gözlemler bor ilavesinin Al-Ti sisteminin tane küçültme etkisini arttırdığını göstermiştir. % 1 B-% 5 Ti (ağırlıkça) sistemin daha iyi tane küçülttüğü bulunmuştur. Üçlü master alaşım kaba $TiAl_3$ ve çok ince TiB_2 kristallerini içerir. Master alaşımın metalografik incelenmesi., TiB_2 'un tane küçültücü rol oynamadığı ancak $TiAl_3$ 'ün etkisini arttırdığını göstermiştir. Moriceav (18) ise alüminyum için çekirdek merkezi olarak TiB_2 bileşiğinin rol oynadığını iddia etmektedir. $TiAl_3$ ve TiB_2 bileşiklerinin her ikisinin birlikte bulunduğu zaman $TiAl_3$ 'ün daha etkili bir çekirdekleştirici olduğu bütün araştırmacılarca kabul edilmiştir (7).



Şekil 4.2. Al-7Si döküm alaşımına çeşitli bileşimlerde ve farklı Ti veya B oranlarına sahip master alaşımları ilavesi ile (a) 5 dk. (b) 120 dk. bekleme tane inceltme analizi (18)

Al-3Ti-0B ve Al-1Ti-3B mikro yapılarında AlB_2 'nin varlığını göstermektedir ve X ışını kırınımı ile ve SEM çalışmaları ile bu durum desteklenmiştir. Mevcut sonuçlar daha önceki Mohanty ve Gruzleski'nin raporlarını doğrulamaktadır ki buna göre bor alüminyumun tane inceltmesini sağlayamamaktadır. Yazarlar alüminyumda tane inceltmenin $TiAl_3$ veya TiB_2 üzerinde alüminyumun heterojen çekirdeklenmesi ile var olan α -Al üzerinde çekirdeklenerek oluştuğunu varsaymışlardır (18).

Al-Ti sistemi durumunda α -Al saf alüminyumun ergime sıcaklığı üzerinde $665\text{ }^{\circ}\text{C}$ de peritektik bir reaksiyon ile oluşmaktadır alüminyum bor sisteminde ise α -Al, alüminyumun ergime noktasının altında $659,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de ötektik reaksiyon ile oluşmaktadır. Böylece bu yazarlar Al-Ti master alaşımını alüminyum sıvısına ilave edildiği zaman sıvıyı soğuması sırasında α -Al $665\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de oluşur, ve $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de katılaşma sırasında alüminyum için çekirdeklenme merkezleri olarak görev yaparlar (18).

Al-B master alaşımları alüminyum sıvıya ilave edildiği zaman alüminyumun katılaşmasından önce α -Al'un oluşması beklenmez iken bu durumda her hangi bir tane inceltme meydana gelmez. Her ne kadar bu iddaa alüminyumun tane inceltmesi sonuçlarına uymakla beraber cevaplanması gereken bir kaç soru kalmaktadır. Öncelikle sıvı %0,15 seviyesinde titanyuma sahip olduğu zaman ki bu değer $AlTi_2$ master alaşımları ile alüminyumda iyi tane inceltmeyi başarmak için gerekli miktardan daha yüksektir. α -Al alüminyum titanyum alaşımı durumunda peritektik reaksiyon ile oluşmaktadır. Bununla beraber $TiAl_3$ tane inceltme için kullanılan titanyum ilave miktarlarında alüminyum içerisinde çözünmesi beklenir (18).

Bu çözünme $TiAl_3$ partiküllerinin çevresindeki sıvının bölgesel bileşimini arttırabilir. İkinci olarak 3'lü master alaşımı kullanımı durumunda tartışmalıdır dolayısıyla Mohanty ve Gruzleski'nin (18) yaklaşımları bu alaşımlar için uygun olmayabilir böylece bu tane inceltme mekanizmasının anlaşılmasına yeni bir boyut getirmektedir.

Y.Niyasaki ve arkadaşlarına göre (7), alüminyum alaşımlarında en etkili aşılama (Al-% 5 Ti - % 0,018 B) alaşımıdır. Ayrıca çekirdeklenmenin de TiB_2 ve $TiAl_3$ tarafından olmayıp Ti_nB ve Al_mTi_nB tipi bileşiklerin tarafından gerçekleştirildiği aynı araştırmacılar tarafından ileri sürülmüştür.

Bor elementinden başka Al-Ti sistemlerine tane küçültme açısından etkili bulunan başlıca iki element silisyum ve demirdir. Yapılan çalışmalarda düşük Si ilavelerinin Al-Ti sisteminde tane büyüklüğünü önemli oranda küçülttüğü izlenmiştir. % 4 Silisyumun etkisi düşük titanyum oranlarında ($\cong$ % 0,1 Ti) daha belirgindir. Tüm titanyum oranları için optimum silisyum ilavesi % 0,2 olarak gözlenmiştir. Daha yüksek silisyum ilaveleri tane küçüklüğünde ya çok az ilave artışa neden olmakta veya hiçbir ilave artış göstermemektedirler. Alüminyum içerisinde fazla miktarda katı çözelti yapabilen bakır, magnezyum ve çinko gibi elementler katılma sırasında küçük tane yapısı da oluşmaktadır. Bu nedenle yüksek oranda magnezyum ve bakır içeren alüminyum alaşımlarında tane inceltme yüksek oranda silisyum içeren alüminyum alaşımlarına göre daha kolaydır (7).

4.2. Döküm Sıcaklığının (Fazla Isının) Etkisi

Katılmış ingotların tane boyutu, döküm sıcaklığı arttıkça artar. Artan sıcaklıkta katalitik etkisi olan parçacıkların ergimesi ile izah edilen bu mekanizmaya Ohno (19) tarafından itiraz edilmiştir.

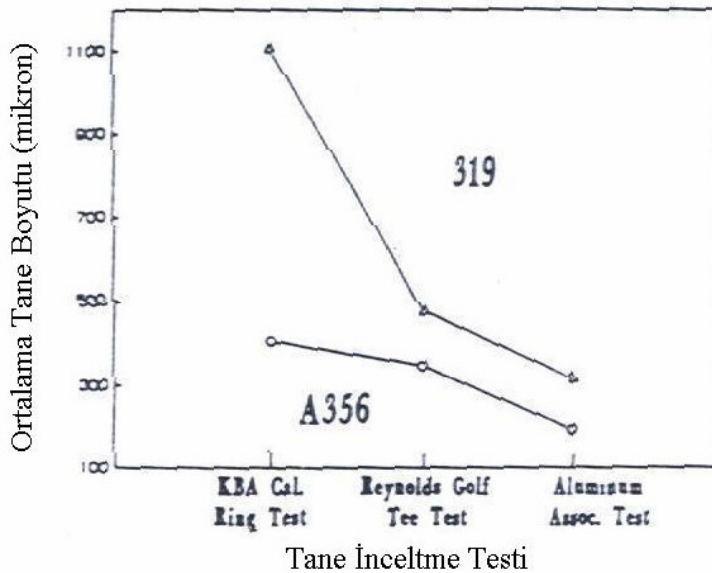
Sıvı metal soğuk kalıba döküldüğü zaman katılmanın ilk safhasında oluşan kristaller sıvı akıntısı ve ısı konveksiyon ile içeriye götürülür ve bunlardan bazıları tekrar ergir. Düşük döküm sıcaklığı kullanılırsa katılmanın ilk safhasında şiddetli kristal kopmaları olur. Sonuç olarak; kopan kristallerin tekrar ergimelerini önlemek için döküm mümkün en düşük sıcaklıkta yapılması gereklidir (3).

4.3. Soğuma Hızının Etkisi

Tane inceltme işleminde soğuma hızı kritik bir faktördür. Soğuma hızlarının yavaş olduğu kalın kesitli parçalarda iyi bir tane inceltme sağlanabilmesi için daha etkin tane düzenleyiciler seçilmelidir.

Metalin sıvı halden katı hale yavaş geçmesi durumunda tanelerin oluşması için gerekli çekirdek sayısının azaldığı gözlenmiştir. Taneler bu şekilde bütün sıvı metal katılaşıncaya kadar rahatça büyüme olanağı bulurlar ve büyük taneler oluştururlar. Hızlı soğuma durumunda ise sıvı halden katı hale geçiş sırasında taneler düzgün büyümeleri için yeterli zaman bulamazlar ve kristalizasyon birçok noktada hızlı başlar. Bunun sonucunda ise ince taneli bir yapı oluşur. Titanyum ve Bor ile tane inceltme işlemi nüveciklerin katılaşmaya başladığı anda durur (15).

Düşük soğutma hızlarında çeşitli tane incelticilerin performansları çok belirgin bir şekilde etkilenir. Düşük soğutma hızlarında daha büyük taneler oluşur (5).



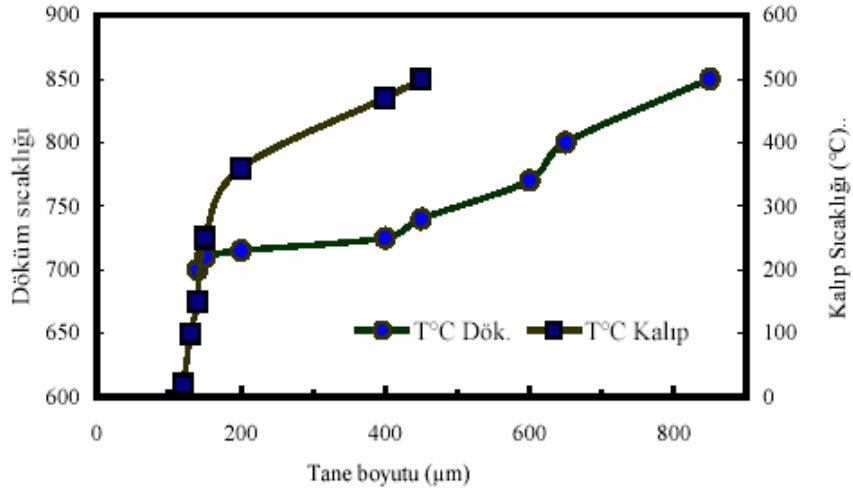
Şekil 4.3. A.356 ve 319 alüminyum döküm alaşımlarında 5/1 TiB tane inceltici ilavesi ile (1 gr/kg 0.005Ti) farklı soğuma hızı test yöntemlerinin tane inceltme etkisi (5)

Şekil 4.3'te KBA Calibrated Ring test yönteminde (19) $2^{\circ}\text{F}/3\text{s}$ 'lik bir soğuma hızı, Reynold Golf Tee test yönteminde (19) kalıp önce 320°C ye kadar ısıtılmış ve soğuma hızı $2^{\circ}\text{F}/2\text{s}$ 'dir. En hızlı soğutma hızı Aluminium Association test yönteminde (19) uygulanır ve bu testle yönlendirilmiş soğutma (undirectional) uygulanır. ($8.5^{\circ}\text{F}/\text{sn}$)

319 ve A.356 döküm alaşımlarında 5/1 Ti/Bor test sonuçları soğutma hızları tarafından etkilenmiştir. Aluminium Assoc. test yönteminde tane boyutu daima KBA Calibrated Ring Test örneklerindeki tane boyutundan daha ince olmuştur. Uygulanan farklı tane inceltme testlerinde % 5 Bor ve 2,5/2,5 Ti/Bor tane incelticilerinin her ikisinde farklı soğutma hızlarında Al5Ti1B ile aynı eğilimi göstermişlerdir (5).

4.4. Döküm ve Kalıp Sıcaklığının Etkisi

Tane incelticilerin yanı sıra döküm ve kalıp sıcaklığında tane boyutunu etkilemektedir. Şekil 4.4'de döküm ve kalıp sıcaklığındaki artışın taneleri kabalaştırdığı görülmektedir. Bu iki parametre birbiri ile ilintilidir çünkü yüksek sıcaklıkta soğuk kalıba döküm yapılsa bile sıvının sıcaklığı katılaşma noktasına ininceye kadar soğuk kalıbın sıcaklığı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Sonuç olarak katılaşma sırasında kalıp ile sıvı metal arasındaki sıcaklık farkı, soğuma oranına ve dolayısıyla tane yapısına etki etmektedir. Yüksek sıcaklık farklılıkları daha fazla alt soğuma sağlayarak, katılaşma sıcaklığındaki ilk oluşan çekirdeklerin kararlı hale geçmesini sağlar. Böylece hem tane incelticilerin çözünerek suni çekirdek etkisini kaybetmesini önler ve çekirdek sayısı artırır, hemde yüksek alt soğuma ile doğal çekirdekler oluşturarak daha fazla çekirdek sayısı elde edilmiş olur. Kalıp ve döküm sıcaklığındaki artış taneleri kabalaştırmasına karşın Şekil 5.4'de görüldüğü gibi kalıp sıcaklığındaki ilk artışlar tane büyüklüğünü fazla etkilemezken, döküm sıcaklığındaki ilk artışlar tane boyutunu oldukça kabalaştırmaktadır (20).

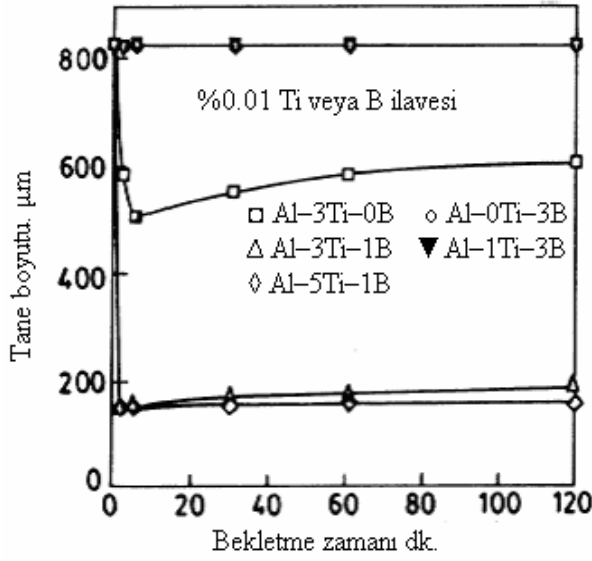


Şekil 4.4. Döküm ve kalıp sıcaklığında artışın tane boyutuna etkisi (20)

4.5. Aşılama Süresinin Etkisi

Aşılama ilavesinden döküm işlemine kadar geçen sürenin iyi saptanması etkili bir tane inceltmenin sağlanmasında çok önemlidir. Aşılama ilavesinin sıvı metal içerisinde iyice dağılabilmesi ve küçültmeyi sağlamak için uygun bir zamanın gerekliliği bu konu üzerinde çalışan tüm araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir.

Hallowel (19), aşılama ilavesinin küçültme etkisinin aşılama zamanından sonra geçen zamanla arttığı ve bir maksimumdan geçtikten sonra azaldığını öne sürmektedir.

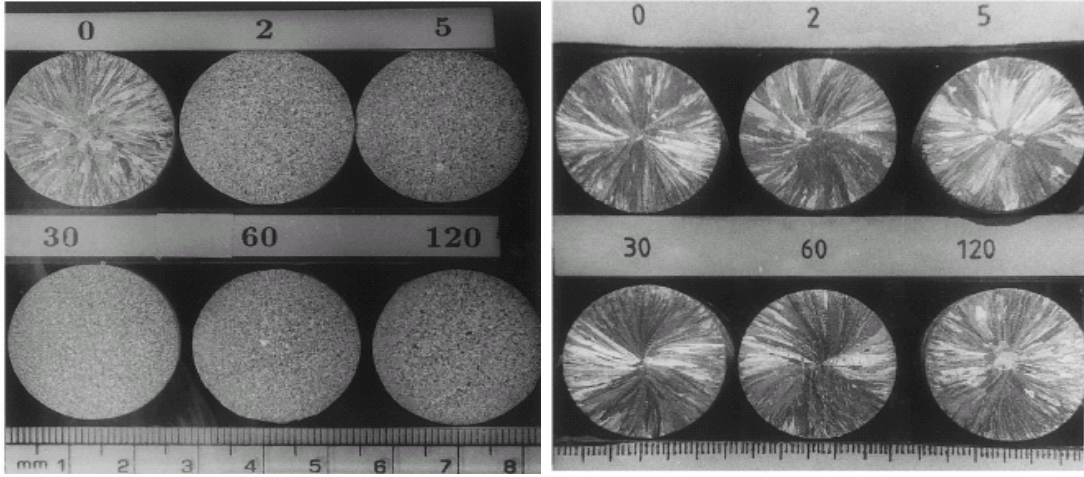


Şekil 4.5. Alüminyum için farklı bekletme zamanlarında 0.01% Ti veya B ilave oranlarında çeşitli tane incelticilerin kullanımı ile tane inceltme analizi (18)

Şekil 4.5’de % 0,01 titanyum veya bor ilaveleri ile Al-3Ti, Al-3B ikili ve Al-5Ti-1B, Al-3Ti-1B, Al-1Ti-3B üçlü master alaşımları ile tane inceltmeden sonra alüminyumun tane büyüklüğü analizini göstermektedir. Şekil 4.5’deki master alaşımlar kıyaslandığı zaman Al-5Ti-1B ile tane inceltmiş alüminyumun tüm bekletme zamanlarında en düşük tane boyutuna sahip olduğu açıkça görülmektedir. Aynı zamanda Al-3Ti-1B yaklaşık olarak Al-5Ti-1B tarafından sağlanan aynı tane boyutunu vermektedir. Bu iki master alaşımın tane inceltme etkinliği sadece titanyum ilave seviyesine dayanmaktadır. Her iki master alaşımında titanyumun bora karşı daha yüksek afinitesi nedeniyle TiB_2 oluşturmak için gerekenden fazla titanyum, $TiAl_3$ oluşturmak için alüminyumla birleşecektir (18).

Her bir % 1 B, % 2,2 titanyum tarafından TiB_2 oluşturmak için tüketilirken TiB_2 ’nin hacimsel oranı hem Al-3Ti-1B hemde Al-5Ti-1B ‘de aynı olacağı beklenmektedir. Al-5Ti-1B’de $TiAl_3$ ’ün oranı daha fazla olacaktır. % 0,01 titanyum ilavesi sağlamak için % 0,33 Al-3Ti1B, % 0,2 Al-5Ti-1B master alaşım alüminyum sıvıya ilave edilmelidir. Al-3Ti-0B beklendiği üzere kısmi tane inceltme sağlamaktadır. Mevcut araştırmacıların daha önceki çalışmaları alüminyumun iyi tane inceltmesinin (200 mikron altında tane büyüklüğü) titanyum ilavesi $< \% 0,05$ olduğu zaman ikili Al-Ti

alaşımları ile mümkün olduğunu göstermiştir. Borca zengin ikili ve üçlü alaşımlar (Al-0Ti-3B - Al-1Ti-3B) alüminyumda tane inceltmeyi başlatmaya müktedir değildir buda AlB_2 'nin alüminyum için çekirdekleşme merkezi olarak görev yapamayacağını ortaya koyar.



a)

b)

Resim 4.1. Al-Si7 alaşımında farklı master alaşımlarıyla tane inceltme makroyapı fotoğrafları a) Al-5Ti-1B b) Al-1Ti-3B (18)

Resim 4.1 Al-5Ti-1B (%0,2 ilave durumunda titanyum ve bor ilave oranı sırasıyla 0,01 0,002) ve Al-1Ti-3B'un daha yüksek miktarları (%1 ilave için titanyum ve bor ilave oranı sırasıyla 0,01 ve 0,03) ve farklı bekletme zamanları (0-2-5-30-60-120 dakika) şartlarında tane inceltmiş alüminyumun makro yapı fotoğrafını göstermektedir. Şekil 4.5'de alüminyumun Al-5Ti-1B ilavesi ile daha hızlı tane inceltmeye cevap verdiğini, 2 dakikalık bekleme zamanı içerisinde sütunsal tanelerden eş eksenli tane yapısına tamamen geçtiğini göstermektedir. Tane yapısı 120 dk'lık bekletmeye kadar ince eş eksenli yapı olarak kalmıştır. Al-1Ti-3B master alaşımı kullanımı durumunda Resim 4.1 a'da görüldüğü gibi 0 dakikadaki numunenin kaba sütunsal tane yapısı 120 dk bekletilenle aynı şekilde kaldığı yüksek ilave oranlarında bile (B%0,03) aynıdır (18).

Cannes ve arkadaşları (16) geliştirdikleri bir test ile bu süreyi incelemişlerdir ve 6063 (% 0,7 Mg, % 0,4 Si) alaşımı için aşılama süresinin bileşimle doğrudan etkili olma süresinin, bileşimle doğrudan etkili olduğu ve eğer ilave ile döküm arasındaki süre çok kısa ise aşılama miktarındaki çok az bir artışın bile tane inceltme işleminde yararlı olduğu ortaya konulmuştur. Tersine olarak, eğer aşılama ilavesi ile döküm işlemi arasındaki süre çok ise aşılama miktarının düşürebileceği savunulmuştur, ancak aşılama süresinin etkisi sayısal bir değer olarak kesin bir belirleme olmamıştır.

4.6. Tane Küçültme Yöntemleri

4.6.1. Isısal yöntemle tane küçültme

Yüksek soğuma hızı katılaştıran metalin büyük bir kısmını liküidüs sıcaklığının altında aşırı soğutmaktadır. Kalıp duvarında aşırı soğuma arttıkça çekirdeklenme hızı arttığından, çekirdeklenme merkezi sayısı çok ve komşu tanelerle temastan önce tanenin büyüyebileceği uzaklık kısa olur. Bu tanelerin döküm merkezine doğru büyümeleri ergime gizli ısının sistemden uzaklaştırılması ve katılaşması ve katı/sıvı ara yüzeyi önündeki bileşim gradyanına bağlıdır. Sistemden uzaklaşma hızı arttıkça bileşim gradyanı artar ve yavaş soğumaya oranla daha kısa kolonsal büyümeden sonra eşeksenli kristallerin oluşumu için gerekli kritik aşırı soğumaya erişilir. Hızlı soğumada elde edilen merkezdeki eşeksenli taneler daha incedir. Katılaşma hızının sıcaklık gradyanına oranı da alaşımın yapısal aşırı soğumasına bağlıdır (3).

Çekirdekler büyümeye fırsat bulamadan birbirine temas ederler ve ince taneli bir yapıyı oluştururlar. Tane boyutu ile soğuma hızı arasındaki bağıntı, dendritler arası açıklığın soğuma hızı ile ilişkisine benzer şekilde aşağıdaki gibi gösterilebilir (3).

$$D = a/v^b$$

[1]

Isısal tane küçültme yöntemleri kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Çok hızlı soğutma yöntemleri (Splat cooling)

Daha ziyade laboratuvar çalışmalarında kullanılan bu yöntemde küçük hacimdeki sıvı metal soğutma ortamı ile ani temas edince çok ince taneli yapı sağlanmıştır. Soğuma hızının çok hızlı olması durumunda ise amorf yapı gözlenmiştir.

Dökümde çil uygulaması

Çil uygulaması ile sıvının, taşıdığı ısının sistemden hızlı uzaklaştırılarak ince taneli bir yapı elde edilebilir.

Düşük döküm sıcaklığında döküm

Döküm sıcaklığını düşürerek de yapıyı inceltmek mümkündür. Fakat bunun için bütün döküm boşluğunun doldurulması ve ince kesitten geçmesi için bir alt sınır vardır. Ayrıca düşük döküm sıcaklıklarında çalışmalarda, besleme güçlükleri ile karşılaşılır.

Uhlman ve arkadaşları (7) Al%2Cu sisteminde döküm sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. 10°C aşırı ısıda döküldüğü zaman bütün yapının eş eksenli tanelerden oluştuğu, 25-30°C aralığında ingotlarca karşılaşılan 3 bölgenin oluştuğu, 65°C aşırı ısıda ise bütün dökümün kolonsal tanelerden oluştuğu bulunmuştur. Manyetik alan uygulandığı zaman 20°C den yüksek aşırı ısılarda yapı kolonsaldır.

4.6.2. Dinamik yöntemlerle tane küçültme

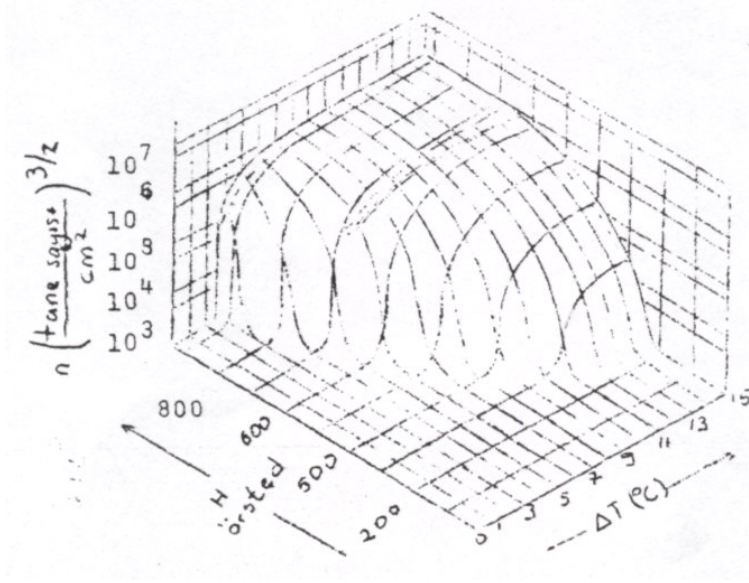
İngotun tane yapısı katılaşma sırasında dış bir etki ile sıvı akışını değiştirilerek kontrol edilebilir. Katılaşma sırasında enerji veren bir dış etki uygulanarak büyüyen dendritlerin dinamik olarak koparılması ve ingotun iç bölgelerine taşınarak eşeksenli tanelerin büyümesinin sağlanmasına “dinamik tane küçültme” yöntemleri denir. Başlıca dinamik tane küçültme yöntemleri, düşük ve yüksek frekansta titreşim, manyetik ve elektromanyetik karıştırma, çalkantı, gaz üfleyerek karıştırma, kalıp boyası kullanımı, döndürme, doğal konveksiyonun attırılmasıdır. Bu yöntemlerin

amacı sıvı metal içinde fiziksel bir karıştırma doğurarak sıvı içine uzanan dendrit kollarını koparmak ve kopan parçacıkların sıvının aşırı ısısında tekrar ergimeden yeni tanelerin oluşması için çekirdek merkezi olarak davranmalarını sağlamaktır. Aralarındaki fark sadece fiziksel karışmayı oluşturma biçimleri açısındanndır.

4.6.3. Manyetik ve elektromanyetik karıştırma

Manyetik ve elektromanyetik karıştırma kullanılarak, doğal konveksiyon bastırılıp kolonsal tanelerin oluşumu arttırılır veya doğal konveksiyonun şiddetlendirilmesi ile dendritlerin koparılaraq iç bölgelere taşınıp eş eksenli taneleri oluşturmaları sağlanır.

Elektromanyetik karıştırmanın çekirdekleşme üzerine etkilerinin incelenmesinde manyetik alan şiddetinin (H) ilk katı çekirdeğinin oluştuğu kritik aşırı soğumayı etkilemediği bulunmuştur. Buna karşılık birim hacimdeki çekirdek sayısı (n) sabit aşırı soğumada H ile artmaktadır. Sabit H için aşırı soğuma arttıkça (n) artmaktadır. Şekil 4.7’de üç boyutlu olarak tane sayısının, manyetik alan şiddeti ve yapısal aşırı soğuma ile değişimi gösterilmiştir. Manyetik alan şiddetinin yüksek olması, sıvı metalin yüksek hızda karışmasına ve ingot merkezince porozite oluşumuna yol açmaktadır. Eğer alan şiddeti yetersiz ise tane küçültme sağlanamaz. Şekil 4.6’de manyetik karıştırma sistemleri görülmektedir (7).



Şekil 4.6. Manyetik alan şiddeti, aşırı soğuma fonksiyonu olarak tane küçültme derecesinin değişimi (3)

Manyetik alanda tane küçültme mekanizmasını incelemek için çeşitli teoriler öne sürülmüştür.

1. Aglomerasyon mekanizması, kritik boyutun altındaki çekirdeklerin topaklaşmasıyla tane çekirdeğini oluşturması.
2. Basıncılı dalga mekanizması, katı/sıvı ara yüzeyinden dalga geçişi sırasında bölgesel basınç artışı ile çekirdek oluşumundaki artış.
3. Sıvı metal kalıba girdiği zaman kalıp yüzeyinde katılaşma başlar. Katı/sıvı arayüzeyi ilerledikçe ara yüzey önündeki sıvı metal elektromanyetik karıştırma etkisi ile dendritleri koparır ve iç bölgelere taşıyarak eş eksenli tane oluşumuna yol açar.

Dondurma tipi	Uygulama yönü	Karıştırma hareketi (3 faz 1→2→3)	
		Simetrik	Zıt
Rotary	Düğümlü (kuluk - blum)		
Linear	Düğümlü (blum - blum)		
Linear	Yatay (blum)		
Tubular (dışarı)	Düğümlü (kuluk - blum)		
Tubular (dışarı)	Yatay (blum)		

Şekil 4.7. Elektromanyetik karıştırma yöntemleri (3)

4.6.4. Çalkantı

Sıvı metale yönü belirli frekansta değişen çalkantı uygulandığında bilhassa sıvı metalin serbest yüzeyinin kalıp duvarı ile kesiştiği bölgeler ve kalıp duvarındaki taneler kolayca kopabilir. Kopan taneler yeni taneler için çekirdek olarak davranır. Wojciachowski ve arkadaşları (7) Al - % (1-4) Cu alaşımlarında 3,5 çapında 15,5 cm yüksekliğindeki numuneye 1/3-1,5 Hz frekansta 180° genlikte çalkantı uygulamışlardır. Çalkantının şiddeti, eriyen element miktarı arttıkça ve döküm sıcaklığı düştükçe, kolonsal tanelerin boyunun azaldığını bulmuşlardır. Çalkantının tane küçültme etkisini dendritlerin kopma mekanizması ve karıştırmanın katı/sıvı ara yüzeyinin önündeki sıcaklık dağılımını değiştirerek, kopan dendrit tanelerinin tekrar ergimeden eş eksenli taneleri oluşturduğu öne sürülmüştür.

4.6.5. Üfleme ile karıştırma

Sıvı metal içersinde Ar, N₂, He gibi sıvı metalle reaksiyona girmeyen gazlar göndererek sıvı metalin karıştırılması sonucu kolonsal büyüme bastırılarak eşeksenli tanelerin arttığı bulunmuştur.

Al-0,2 Cu alaşımı 680°C'de ergitilmiş ve 65 mm çapında 150 mm yüksekliğinde grafit kalıba dökülmüştür. Kalıba 20 ve 100 mm derinliğinde 6 mm çapında alümina tüp daldırılmış ve 200 cc/dk hızla 10 sn azot gazı gönderilerek yapının değişimi incelenmiştir Gaz üfleme ile tane küçültme sağlanmıştır. 100 mm derinlikte ise gazın soğutma etkisinden dolayı daha ince tane elde edilmiştir (3).

4.6.6. Kalıp boyası kullanma

Tane boyutunu küçültmek için kalıp boyaları kullanımı, son yıllarda artmış bu konuda birçok patent alınmıştır. Aşılaiıcılar kullanılarak tane küçültme mekanizması tam olarak anlaşılmasına karşılık, kalıp boyasının tane küçültme etkisi tam olarak bilinmemektedir.

Hekzakloreten, toz alüminyum ve su karışımının kalıp boyası olarak kullanılmasıyla etkili tane küçültmesi beklenir. Dökümden sonra katılaşma sırasında kalıp boyasından gaz kabarcıkları çıkar. Sıvı metalde türbülanslı akışı arttırır ve dinamik olarak tane küçülttür. Gaz çıkış etkisi yeterli olabilmesi için hekzakloreten'in en az % 10 olmalıdır (3).

Sistemin etkenliği aşırı ısıya bağlıdır. Katılaşma süresinin etkisi yoktur. Kalıp boyası ancak 80°C kadar düşük aşırı ısılarda etkilidir. Ti-B ile aşılaiarak yapılan tane küçültme ile kalıp boyası ile yapılan tane küçültme sağlandığı görülmüştür (7).

4.6.7. Momentum konveksiyonunun arttırılması

Sıvı metalde sıcaklık ve bileşim gradyanlarının yanında sıvı metalin kalıp boşluğuna dökümü sırasında oluşan momentum konveksiyonunun arttırılması ile sıvı metalin serbest yüzeyinde titreşim oluşur. Sıvı serbest yüzeyi kalıp temas noktası başta olmak üzere kalıp yüzeyinde oluşan taneler momentum konveksiyonu ile koparıl原因 olarak iç bölgelere taşınır ve eşeksenli taneleri oluşturur.

Sıvı alüminyumun kalıba boşaltma tarzları değiştirilerek farklı döküm yapıları elde edilmiştir.

- a) Alttan beslenen, serbest yüzeyi sakın olan sistemlerde döküm sıcaklığı düşük olsa dahi kaba taneli yapı elde edilmiştir.
- b) Sıvı metal çalkantılı bir şekilde üstten döküldüğünde eşeksenli bölge oranı yüksek bulunmuştur.
- c) Sıvı metalin çok sayıda yolluktan üstten kalıba döküldüğünde momentum konveksiyonu yüksektir. Bu durumda serbest yüzey kalıp temas noktasındaki tanelerin kopma oranı farklı olduğundan daha ince taneli yapı sağlanmıştır.

4.6.8. Döndürme

Kalıp ile eşeksenli döndürme kullanıldığında merkezde kaba taneli yapı, çevrede ince taneli yapı elde edilmiştir. Bu iki bölgenin uzunluğu döküm sıcaklığı, döndürme hızı ve kalıptan sıcaklığın uzaklaştırılma hızına bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Kalıp ile döndürme eksenleri arasında 20-30 mm fark olduğundan homojen eşeksenli tane dağılımı sağlanmıştır. Sn-Zn alaşımlarının katılaşması sırasında kalıpla eş merkezli döndürme uygulamasında sıvıda konveksiyon bastırıldığından kolonsal tane bölgesi artmıştır (3).

4.6.9. Titreşimle tane küçültme

Katılaşma sırasında sıvı metale uygulanan titreşimin; gaz giderme, tane küçültme etkisinin ilk defa 1926'da Boyle ve Taylor tarafından gözlenmesinden beri titreşim ile döküm yapısını kontrol etmek için 200'ü aşkın çalışma yapılmıştır. Birçok patent alınmıştır. Bu çalışmalarda maalesef titreşim uygulama şartları ve elde edilen özellikler açık olarak belirli değildir. Ancak 32 tanesinde uygulanan titreşim frekansı ve genliği verilmiştir (3). Farklı metal ve alaşımlarda katılaşma sırasında uygulanan titreşim şartları ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.8-4.9'da verilmiştir.

Titreşim uygulaması genellikle titreşim frekansına göre üç gruba ayrılır:

- a) Düşük frekans titreşim 0-300 Hz
- b) Orta frekans titreşim 300 Hz -16 kHz
- c) Yüksek frekans titreşim >16 kHz

Sadece titreşim enerjisinin katılaştıran sisteme verilmesi açısından farklılık gösteren bu üç sistemin etkileri frekans / genlik (fa) haritaları ile basitleştirilerek gösterilebilir. Farklı metaller, farklı titreşim uygulama tarzları, farklı kalıp geometrisi, değişik frekans ve genlik değerlerinin etkilerini karşılaştırmada (fa) haritaları başarı ile kullanılabilir. Ayrıca tane küçültme mekanizmasının dentrit kolunun kopması ile mi yoksa kavitasyon oluşumu ile mi olduğu kolayca bulunabilir.

Şekil 4.8'de alüminyum, dökme demir, çelik ve bizmut alaşımlarına uygulanan titreşimin tane küçültme etkisinin, (fa) değerinin fonksiyonu olarak değişimi gösterilmiştir. % 10, % 5 ve % 90 tane küçültme şartları frekans genlik haritasında gösterildiği zaman tane küçültmenin etkili olduğu bölgenin dar bir alan olduğu görülmüştür (3).

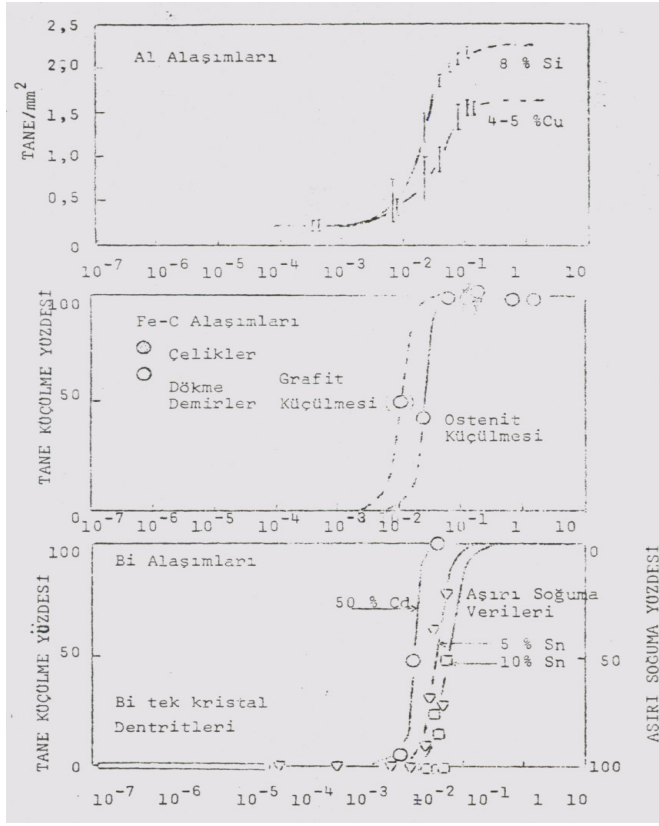
Çeşitli amaçlarla kullanım alanı bulmuş bir çok titreşim kaynağı vardır. 350 Hz frekansa kadar düşük frekanslı titreşim elde etmek için en yaygın yöntem bir elektrik motoru ile tahrik edilen eksantrik mil vasıtasıyla elektro mekanik titreşim uygulamasıdır. Lineer olmayan dairesel veya daha karmaşık titreşim hareketi

uygulayan bir sistemle başarılı tane küçültülmüştür. Bu sistemde birbiri içinde dönen iki eksantrik milin değişik konumu ile, farklı genlikte titreşim sağlayan eksantrik hareket sistemi üzerindeki yaylı şaft vasıtasıyla, titreşim kalıba aktarılır.

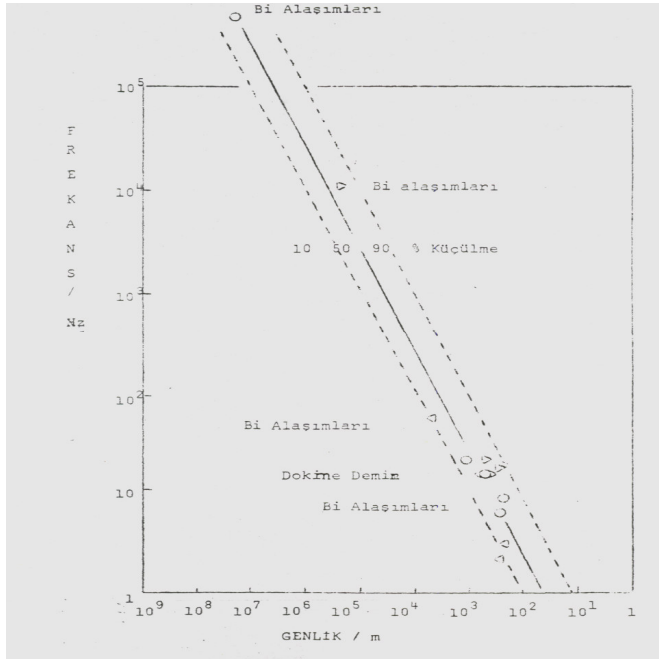
Uygulamada karşılaşılan diğer titreşim kaynağı, elektromanyetik titreştiricilerdir. Karmaşık elektroteknik cihazlar kullanımı ile elektromanyetik yöntemle 500 Hz üzerinde titreşimler sağlanabilir.

Pnomatik titreştiriciler ise 300 Hz'e kadar sürekli değişen frekanslar ve kolay ayarlanan genlikteki titreşim veren sistemlerdir.

Piezastriotnon ve magneto striction titreştiriciler oldukça pahalı, işletilmesi ve sıvı metal sıçramalarına karşı korunması güç sistemleridir. Genellikle 16 Hz'den yüksek frekanslı titreşim sağlaması için kullanılır. Bu sistemde güçlü ultrasonik enerjiyi sıvı metale verimli bir şekilde taşımaktır. Ayrıca kalıp duvarından katı/sıvı ara yüzeyinden yansıyan enerji karışıklık doğurur. Lane ve arkadaşları vakumu ark ergitmede su soğutmalı potada 304 paslanmaz çelik katılaşıırken ingot tabanından titreşim uyguladıklarında ingot duvarından yansımayı önlemek için dalga boyu/ingot çapı oranın birden büyük olması gerektiğini bulmuştur (3).



Şekil 4.8. Al, Fe-C ve Bi alaşımlarına uygulanan titreşim şartlarının tane küçültmeye Etkileri



Şekil 4.9. % 10, % 50 ve % 90 tane küçültme değerlerinin, frekans genlik haritasında gösterilmesi

Bilindiği gibi yüksek frekans titreşim enerjisi nüfuz ettiği derinlikle üstel olarak azalır. Dolayısıyla katılma ilerlerken rezonans durdurucunun korunması için frekansı sürekli olarak değiştiren sistemler seçilmelidir. Eğer rezonans sağlanmazsa titreşim çubuğunun sadece çevresinde tane küçültme sağlanabilir.

Yüksek frekanstaki titreşimin katılma sisteme verimli bir şekilde ulaştırılması için titreşim çubuğu ile katılma metal arasında titreşim arasında gaz ortam olmamalıdır. Eğer sıvı metale daldırılan titreşim çubuğu kullanılıyorsa katılma sıvı metal tarafından ısıtılan bir titreşim çubuğu kullanılmalıdır. Ancak bu durumda da titreşim çubuğunun bileşimi bozucu etkisi olabilir.

İkinci Dünya savaşından sonra daha yüksek mekanik özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesi üzerine araştırmalar artmıştır. Başta Rusya ve Almanya olmak üzere birçok ülkede titreşim ile tane küçültme yöntemi bu amaçla denenmiştir. Düşey yöndeki titreşim uygulaması en yaygın yöntemdir. Tek yönlü katılma sırasında titreşim uygulamasında, bilinen döküm şartlarının birbirinden bağımsız olarak değiştirilip kontrol edilmesine imkan verdiği için titreşimin tane küçültme mekanizmasına ışık tuttuğu kabul edilmektedir.

5.6.10. Kalıbın titreştirilmesi

Katılma sırasında ince taneli yapı elde etmek için kullanılan en etkili yöntem kalıbın titreştirilmesidir. Genellikle titreşim sırasında, dağılmayan metal ve grafit kalıp kullanılması zorunluluğu bu yöntemin kullanılabilirliğini sınırlar. Son senelerde bağ sistemleri geliştirilmiş ve çelik ağ ile kuvvetlendirilmiş CO₂/sodyum silikat bağlı kum kalıp larda kullanılmaktadır. Kabuk döküm ve hassas döküm kalıpları da başarı ile bu yöntemde kullanılabilir. Titreşim söndürme özelliği olan "loom" kalıplar bu yöntemde kullanılamaz.

Kalıbın titreştirilmesi ancak düşük frekanstaki ve yüksek genlikteki titreşimlere uygulanabilir. Ultrasonik frekanslarda titreşim enerjisi kalıp/metal ara yüzeyinden

yansır ve çok az bir enerji katılaşılan bir sisteme taşınabilir. Ayrıca sıvı metal katılaşıırken hacimce çekilmeye uğrar ve kalıp ile katı metal arasında açıklık oluşur.

Bu açıklık (L)

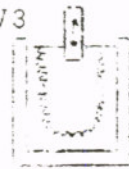
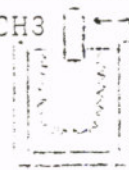
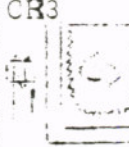
$$L = \alpha \times D \times T \quad [2]$$

Titreşimlerin kalıp/metal arasındaki bu açıklığı geçebilmesi için genliğin bu açıklıktan büyük olması zorunludur. 100 mm çapındaki bir dökümün bu yöntemle titreştirilmesi için genliğin 10^{-2} mm den büyük olması gerekmektedir. Bir Sovyet çalışması (7) 0,2 mm genlikte 20 kHz frekans ile kalıbın titreştirilmesi ile kalıptan sıvı metale titreşimin taşınabildiğini göstermiştir. Ancak verim sıvının titreştirilmesine oranla düşüktür.

4.6.11. Sıvının titreştirilmesi

Katılaşılan sisteme farklı etkileri olan değişik yöntemlerle sıvının titreştirilmesi sağlanmıştır. Bunlar :

1. Sadece sıvı metalin serbest yüzeyine titreşim uygulanması, bu durumda serbest yüzeyde çekirdeklenen taneler sıvı içine yağmur gibi yağarak ingot merkezindeeş eksenli taneleri oluşmuştur.
2. Sıvı kitlesinin uzaktan kontrollü endükleme ile titreştirilmesi, bu titreşim ya hareketli manyetik olan uygulaması ile veya sabit elektrik akımı ve manyetik alan uygulanması ile sağlanır.
3. Titreşim çubuğunun daldırılması ile sıvı metale titreşim uygulanması, daldırılan titreşim çubuğu ve döküm boşluğunun boyutlarına bağlı olarak sıvıya farklı titreşim uygulanır.

YÖN	DÖKÜM PARÇASI VE KALIBIN TİTREŞ.	DÖKÜM PARÇASININ TİTREŞ.	TİTREŞİM ÇUBUĞU DALDIRARAK SIVININ TİTREŞ.	SOĞUTULMUŞ TİTREŞİM ÇUBUĞU İLE SIVININ TİTREŞ.
DÜŞEY	CV1 	CV2 	CV3 	CV4 
YATAY	CH1 	CH2 	CH3 	CH4 
DAİRESEL	CR1 	CR2 BİLİNMEYOR	CR3 	CR4 

Şekil 4.10. Döküm parçasına uygulanan farklı titreşim yöntemlerinin şematik gösterimi

Titreşim çubuğunun daldırılmasıyla titreştirilmesinde önemli olan özellik sıvı metalin titreşim çubuğunun ucunu ıslatmasıdır. Tam ıslatmada enerji transfer verimi yüksektir. Aksi halde titreşim çubuğu titreşen sıvı metale vurur. Çubuğun ucu aşınır ve sıvı metalin bileşimini bozar. Bunu önlemek için dökümü yapılacak malzeme ile aynı bileşimdeki parça titreşim çubuğunun önüne kaynaklanır. Alüminyum alaşımlarının demir esaslı titreşim çubuğu ile titreştirilmesi sırasında titreşim çubuğunun hızla aşındığı görülmüştür. Bu özellikten hareketle düşük ergime noktalı alaşımların ultrasonik titreşimle tane küçültmesi sırasında titreşim çubuğundan alaşımlandırma düşünülmüştür.

Titreşim çubuğunun daldırılması ile sıvı metale titreşim uygulanmasının bazı özel durumları vardır. Bunlar:

1. Titreşim çubuğunun döküm boşluğuna sıkı geçmeli uygulaması
 2. Katı/sıvı ara yüzeyine kadar daldırılan titreşim çubuğu ile titreşim uygulama
 3. Su ile soğutulmuş titreşim çubuğu daldırarak titreştirme. Titreşim çubuğu aynı zamanda sıvının ısını da sistemden uzaklaştırır ve üst yüzeyde çekirdek oluşumun arttırır. Ancak katılaşma sırasındaki çekilmeden dolayı titreşim çubuğu ile katı metal arasında hava boşluğu oluşur.
- a) Döküm parçasının titreştirilmesi: Katının titreştirilmesinin sıvının titreştirilmesine oranla daha etkili olduğu bulunmuştur. Sıvı metalin titreşim çubuğunun ucunu ergiterek kaynaması ile veya döküm başlangıcında titreşim çubuğu ucundaki başlık çevresinde sıvı metalin katılaşması ve çekilme ile, katı metal ile titreşim çubuğu başlığının tam teması sağlanır. Birinci yöntem daha çok kullanım sahası bulmuştur.
- b) Yolluk sisteminin titreştirilmesi: Yapılan çalışmalarda yolluk sisteminin titreştirilmesi, kalıbın titreştirilmesinden daha etkili olduğu gözlenmiştir. Ancak yeterli bilgi verilmemiştir.
- c) Duraklamalı titreşim uygulaması: Sıvı içine daldırılan titreşim çubuğu ile yüksek frekans uygulamanın, düşük ergime noktalı metallerin katılaşmasında etkileri incelenmiştir. Yüksek frekans titreşimi uygularken kısa duraklamalar yapmanın tane küçültmede daha etkili olduğu bulunmuştur. Titreşim uygulama safhasında kavitasyon oluşumu ısı doğurur ve dendrit kollarının tekrar ergimesine yol acar. Takip eden duraklama safhasında katılaşma ilerler. Katılaşma bu safhada hızlı ilerleyeceğinden dendrit kolları daha incedir ve daha kolay kopabilir. Ayrıca kopan tanelerin titreşim uygulama safhasından daha kolay sıvı içine dağılmaları sağlanabilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Döküm Alaşımlarının Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilen Etial 177 Al-Si alaşımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan Al-Si alaşımı birincil malzeme olup, Seydişehir’de bulunan Seydişehir Eti Alüminyum firmasından temin edilmiştir.

Alaşımanın ergitme ve döküm işlemi 60 kW gücünde, 350 kg Al ergitme kapasitesine sahip yer tipi, rezistanslı ocakta ve grafit pota içerisinde yapılmıştır. Sıvı metal sıcaklığı, ergitme ocağında Cr-Ni termokupl, ± 2 °C’lik hata sınırları içerisinde ölçülmüş ve döküm esnasında daldırma tipi termokupl ile kontrol edilmiştir.

Çizelge 5.1. Dökümde kullanılan alaşımların kimyasal bileşim aralığı (%)

Alaşım	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	B	Ti
Etial 177	6,6-7,4	0,2	0,02	0,03	0,3-0,45	0,01	-	0,8-0,15
Başlangıç Bileşimi	7,02	0,19	0,003	0,004	0,332	0,01	-	0,114
1. Bileşim	7,05	0,194	0,004	0,003	0,32	0,01	-	0,154
2. Bileşim	7,04	0,193	0,003	0,001	0,32	0,01	-	0,212
5/1 TiBor	0,6	0,17	-	-	-	-	0,95	4,9

Döküm öncesi sıvı metalin gaz alma işlemi 10 dak. süre ile 12 lt./dak. debide N₂ gazı, grafit başlıklı döner bir sistemle sıvı metal içerisine üflenmiştir. Gaz alma işlemi öncesinde sıvı metal üzerine atmosferle ilişkisini kesmek için SCHAEFER marka ARSAL 2120 tipi örtü tozu kullanılmıştır. Gaz alma sistemi Resim 5.1’de gösterilmiştir.

Döküm işlemi % 0,15 ve % 0,20 Ti ile 250-280 °C kalıp sıcaklığı, 60-90 saniye kalıp açma süresi ve 730-750-770 °C döküm sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada seçilen deney şartları Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Resim 5.1. Gaz alma sistemi

Çizelge 5.2. Döküm sonrası elde edilen deney numuneleri ve deney şartları

Numune No	Numune Kodu	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Kalıp Açma Zamanı	% Kalıntı Titanyum Oranı	Isıl İşlem	Numune Sayısı
1	0,15Ti730C250C60T6	730 °C	250°C	60 s	0.15	T6	2
2	0,15Ti730C250C60F	730 °C	250°C	60 s	0.15	Yok	2
3	0,15Ti730C250C90T6	730 °C	250°C	90 s	0.15	T6	2
4	0,15Ti730C250C90F	730 °C	250°C	90 s	0.15	Yok	2
5	0,15Ti730C280C60T6	730 °C	280°C	60 s	0.15	T6	2
6	0,15Ti730C280C60F	730 °C	280°C	60 s	0.15	Yok	2
7	0,15Ti730C280C90T6	730 °C	280°C	90 s	0.15	T6	2
8	0,15Ti730C280C90F	730 °C	280°C	90 s	0.15	Yok	2

Çizelge 5.2. (Devam) Döküm sonrası elde edilen deney numuneleri ve deney şartları

Numune No	Numune Kodu	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Kalıp Açma Zamanı	% Kalıntı Titanyum Oranı	Isıl İşlem	Numune Sayısı
9	0,15Ti750C250C60T6	750 °C	250°C	60 s	0.15	T6	2
10	0,15Ti750C250C60F	750 °C	250°C	60 s	0.15	Yok	2
11	0,15Ti750C250C90T6	750 °C	250°C	90 s	0.15	T6	2
12	0,15Ti750C250C90F	750 °C	250°C	90 s	0.15	Yok	2
13	0,15Ti750C280C60T6	750 °C	280°C	60 s	0.15	T6	2
14	0,15Ti750C280C60F	750 °C	280°C	60 s	0.15	Yok	2
15	0,15Ti750C280C90T6	750 °C	280°C	90 s	0.15	T6	2
16	0,15Ti750C280C90F	750 °C	280°C	90 s	0.15	Yok	2
17	0,15Ti770C250C60T6	770 °C	250°C	60 s	0.15	T6	2
18	0,15Ti770C250C60F	770 °C	250°C	60 s	0.15	Yok	2
19	0,15Ti770C250C90T6	770 °C	250°C	90 s	0.15	T6	2
20	0,15Ti770C250C90F	770 °C	250°C	90 s	0.15	Yok	2
21	0,15Ti770C280C60T6	770 °C	280°C	60 s	0.15	T6	2
22	0,15Ti770C280C60F	770 °C	280°C	60 s	0.15	Yok	2
23	0,15Ti770C280C90T6	770 °C	280°C	90 s	0.15	T6	2
24	0,15Ti770C280C90F	770 °C	280°C	90 s	0.15	Yok	2
25	0,2Ti730C250C60T6	730 °C	250°C	60 s	0.20	T6	2
26	0,2Ti730C250C60F	730 °C	250°C	60 s	0.20	Yok	2
27	0,2Ti730C250C90T6	730 °C	250°C	90 s	0.20	T6	2
28	0,2Ti730C250C90F	730 °C	250°C	90 s	0.20	Yok	2
29	0,2Ti730C280C60T6	730 °C	280°C	60 s	0.20	T6	2
30	0,2Ti730C280C60F	730 °C	280°C	60 s	0.20	Yok	2
31	0,2Ti730C280C90T6	730 °C	280°C	90 s	0.20	T6	2

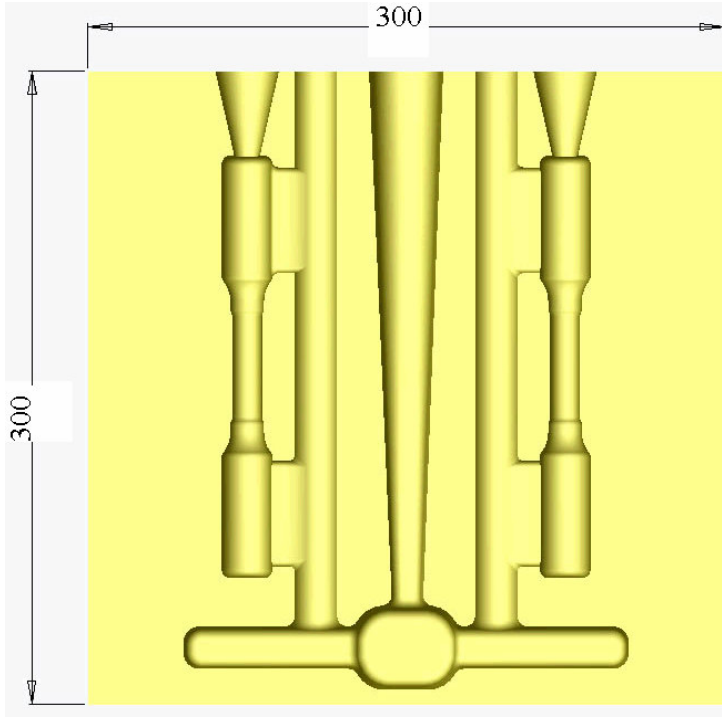
Çizelge 5.2. (Devam) Döküm sonrası elde edilen deney numuneleri ve deney şartları

Numune No	Numune Kodu	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kalıp Sıcaklığı (°C)	Kalıp Açma Zamanı	% Kalıntı Titanyum Oranı	Isıl İşlem	Numune Sayısı
32	0,2Ti730C280C90F	730 °C	280°C	90 s	0.20	Yok	2
33	0,2Ti750C250C60T6	750 °C	250°C	60 s	0.20	T6	2
34	0,2Ti750C250C60F	750 °C	250°C	60 s	0.20	Yok	2
35	0,2Ti750C250C90T6	750 °C	250°C	90 s	0.20	T6	2
36	0,2Ti750C250C90F	750 °C	250°C	90 s	0.20	Yok	2
37	0,2Ti750C280C60T6	750 °C	280°C	60 s	0.20	T6	2
38	0,2Ti750C280C60F	750 °C	280°C	60 s	0.20	Yok	2
39	0,2Ti750C280C90T6	750 °C	280°C	90 s	0.20	T6	2
40	0,2Ti750C280C90F	750 °C	280°C	90 s	0.20	Yok	2
41	0,2Ti770C250C60T6	770 °C	250°C	60 s	0.20	T6	2
42	0,2Ti770C250C60F	770 °C	250°C	60 s	0.20	Yok	2
43	0,2Ti770C250C90T6	770 °C	250°C	90 s	0.20	T6	2
44	0,2Ti770C250C90F	770 °C	250°C	90 s	0.20	Yok	2
45	0,2Ti770C280C60T6	770 °C	280°C	60 s	0.20	T6	2
46	0,2Ti770C280C60F	770 °C	280°C	60 s	0.20	Yok	2
47	0,2Ti770C280C90T6	770 °C	280°C	90 s	0.20	T6	2
48	0,2Ti770C280C90F	770 °C	280°C	90 s	0.20	Yok	2

5.2. Deney Numunesi

Deney numuneleri kokil kalıba serbest döküm yöntemi ile üretilmiştir. Kokil kalıbın yolluk ve besleyici tasarımı ASTM B108-95 normu kullanılarak hazırlanmıştır (21). Kokil kalıp ve yolluk tasarımı Şekil 5.1 de gösterilmiştir. Deney numunelerinin

dökümde elde edilen ölçüleri 150 mm boy, Ø25X60 mm çekme başlığı ve Ø15X50 mm çekme bölgesinden oluşmaktadır. Parçanın yolluklu ağırlığı 1270 gram, yolluksuz ağırlıkları $170 \times 2 = 340$ gramdır.



Şekil 5.1. Kokil kalıp yolluk tasarımı (21)

5.3. Simülasyon Testi

Simülasyon testi Kosgeb Sincan laboratuvarlarında MagmaSoft marka simülasyon cihazında yapılmıştır. MagmaSoft simülasyon programı sonlu farklar yönteminde iterasyon tekniği ile çalışan 3 boyutlu ticari bir simülasyon programıdır. Simülasyon test cihazı Silicon Graphics OCTANE/SER 10000 iş istasyonu ve IRIX 6.4 işletim sistemiyle çalışmaktadır. Programın sağlıklı sonuçlar üretebilmesi, kalıp ve döküm malzemelerinin termo-fiziksel özelliklerinin, yüzey ve ara yüzey soğuma şartlarının programa doğru olarak girilmesine bağlıdır. Bu uygulamada döküm alaşımı (A.356) ve kalıp malzemesi (GGG45) standart ticari malzemeler olduğundan bu malzemelerin termo-fiziksel değerleri MagmaSoft programının veri tabanından

direkt olarak yüklenmiştir. Katılaşma aşamasında ısı transferi ve mikro yapı değişimleri baz alınmıştır.

Kalıp ve dökümün CAD tasarımı Şekil 5.1’de görülmektedir. Tasarım, katı model olarak (STL dosya formatında) MagmaSoft simülasyon döküm programına transfer edilmiş ve sanal ortamda döküme hazır hale getirilmiştir.

5.4. Kimyasal analiz

Kimyasal analiz testi Spectro marka, Spectromax model analiz cihazında yapılmıştır.

5.5. Isıl İşlem

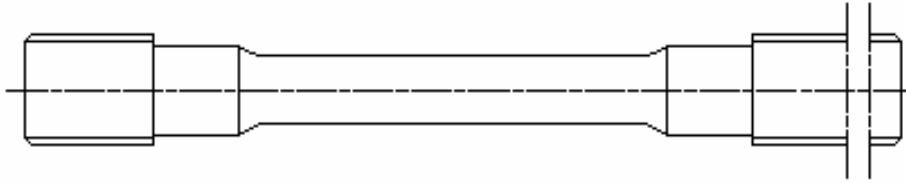
Döküm numunelerin yarsına T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Numuneler kule tipi ısıl işlem fırınında 525 °C’de 6 saat tutulduktan sonra kapak açılmış ve 6 saniyede içerisinde 30 °C sıcaklıktaki suda soğutulmuştur, soğutulan numunelerin sıcaklığı 60 °C’dir. Yaşlandırma işleminde ise 160 °C 6 saat tutulduktan sonra oda sıcaklığında kendi halinde soğumaya bırakılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan ısıl işlem fırını Resim 5.2’de gösterilmiştir.



Resim 5.2. Kule tipi ısıt ısıt ısıt fırını

5.6. Metalografik Numune Hazırlama

Kokil döküm ve ısıt ısıt ısıt sonrası elde edilen deney numunelerinin uç kısımlarından şerit testere ile kesilerek metalografik incelemeler için numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen numuneler şematik olarak Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Metalografik numune alma ve inceleme bölgeleri

Silindirik olarak elde edilen metalografik deney numunelerinin bir yüzeyi tornalanarak zımparalanacak hale getirildi. Numuneler sırasıyla 220, 320, 400, 600,

800 ve 1200 mesh'lik zımparalar ile zımparalandı. Zımpara işleminden sonra 1 μ m polisaj ke esinde, 1 μ m alümina pasta kullanılarak polisaj işlemi tamamlandı. Olympus marka ters metal mikroskobunda 35, 70, 140, 280 ve 350 büyütmelerde mikroyapı görüntüleri alındı. Bu mikroyapı görüntüleri CCD kamera ve TV kartı bulunan bir bilgisayar vasıtasıyla bilgisayar ortamında kayıt edildi. Mikroyapı görüntüleri, numunenin yüzeyine yakın ve merkez bölgesinden alınmıştır.

Çekme neticesi elde edilen kırık yüzey incelemeleri için JOEL JSM-6060 marka tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

5.7. Mekanik Testler

5.7.1. Sertlik testi

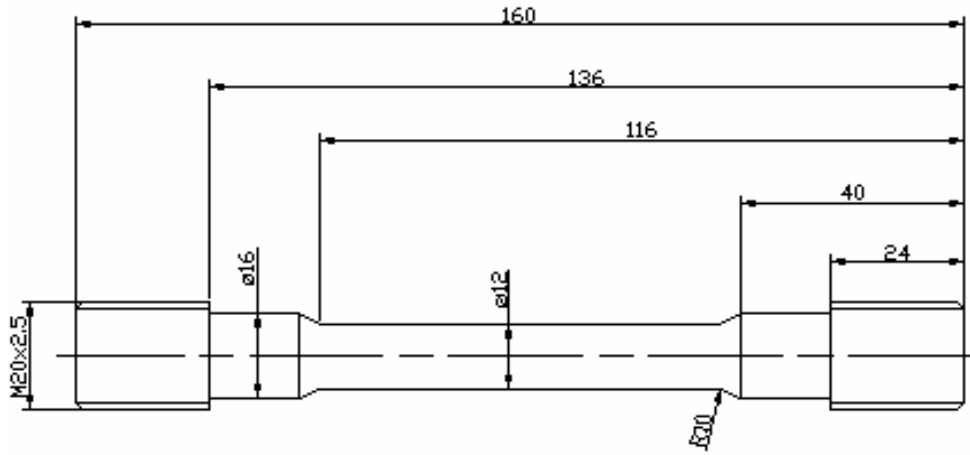
Sertlik testi Affri marka 206.RTD model sertlik cihazında Brinell cinsinden 62,5 kg yük ve $\varnothing$ 2,5 mm bilye u  kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan sertlik test cihazı Resim 5.3'de gösterilmiştir.



Resim 5.3. Sertlik test cihazı

5.7.2. Çekme testi

Çekme numunelerinin yolluklu parçadaki pozisyonları Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Çekme numuneleri TSE 138 EN 10002-1/1996 standartlarına göre hazırlanmıştır. TSE 138 EN 10002-1/1996 standardında belirtilen çekme numunesi boyutları Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Çekme numuneleri boyutları

Çekme numuneleri Dartec marka M 9000 model 600 kN’luk universal test cihazında TSE 138 EN 10002–1/1996 standartlarına göre Kosgeb laboratuvarlarında yapılmıştır. Çekme testi oda sıcaklığında 2 mm/dak. çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarından L_0 , L_S ve A_0 , A_S çekme testinden önce ve sonra kumpas kullanılarak tespit edilmiştir. Elde edilen % uzama değerleri aşağıda verilen formüle göre hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Uzama} = \frac{L_S - L_0}{L_0} \times 100$$

[3]



Resim 5.4. Çekme deneyi cihazı

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

6.1. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon çalışması, Etial 177 kalite alüminyum döküm alaşımının 750 °C döküm sıcaklığı, 250 °C kalıp sıcaklığı ve 60 saniye kalıp açma süresi sabitleri alınarak yapılmıştır.

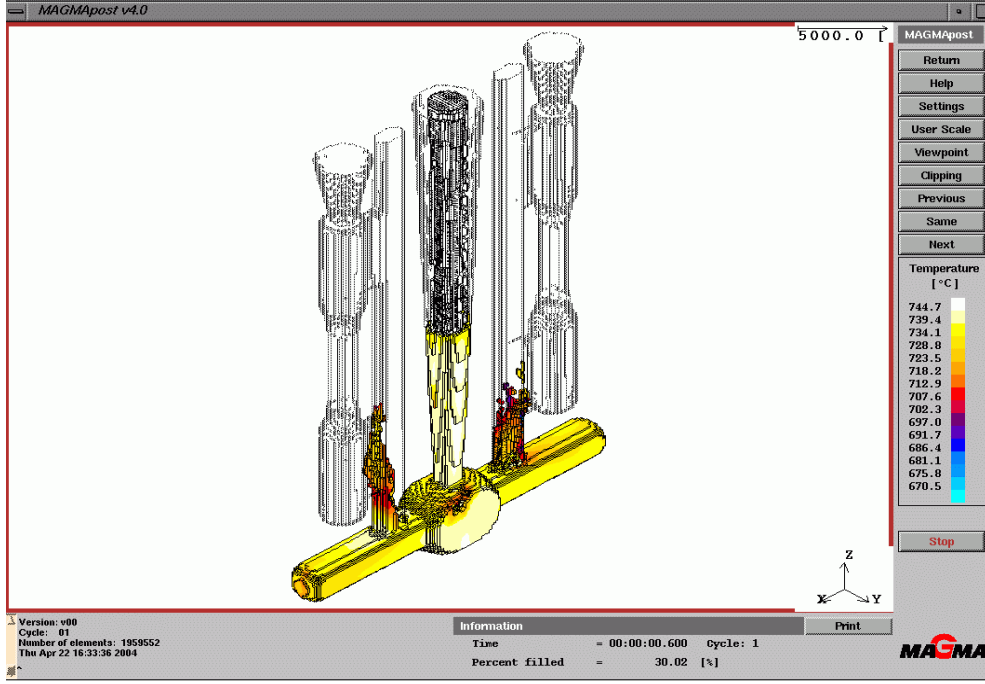
Numunenin yolluk ve besleyici tasarımı ASTM B108–95 (Standart Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings) numaralı standart kullanılarak yapılmıştır (21).

İki parçalı kokil kalıbın tasarımı uygun CAD teknikleri kullanılarak yapıldıktan sonra 3 boyutlu bir döküm simülasyon paketi olan MagmaSoft programına aktarılmıştır. Malzemenin termo-fiziksel özellikleri ve soğuma şartları belirlendikten sonra sanal ortamda çalıştırılmıştır.

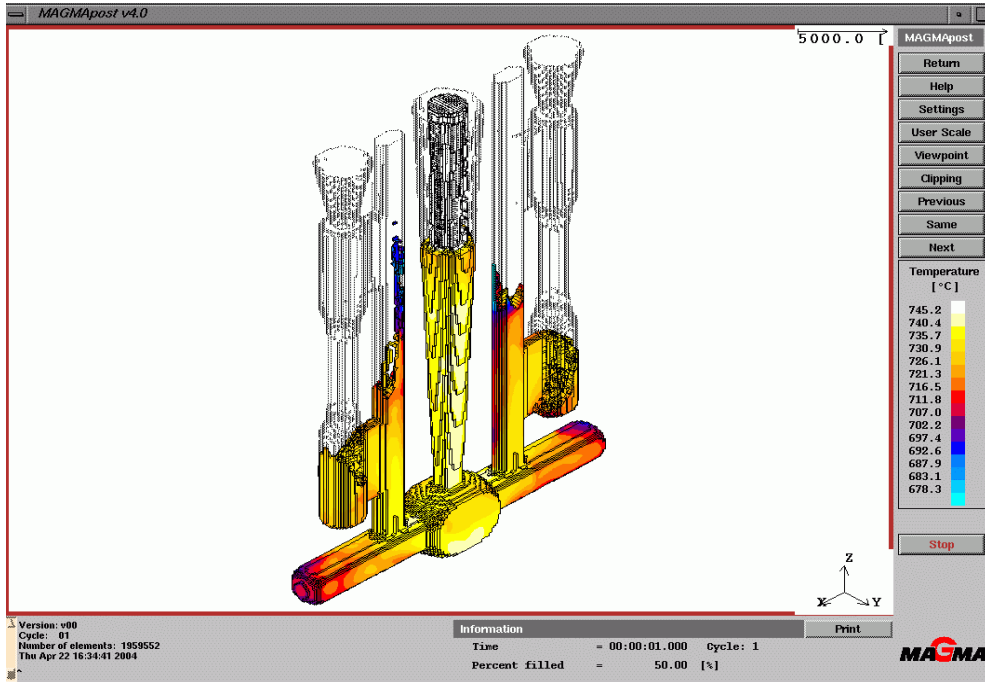
6.1.1. Sıvı akışı

Döküm başlangıcında yolluktan kalıba giren ilk sıvı metal yolluktan geçerek kalıbın alt bölgesinde bulunan yatay yolluk vasıtasıyla çekme çubuğu kalıp boşluklarına doğru ilerlemektedir. Burada kalıp boşluğuna ilk giren sıvı metalin kalıp duvarlarına çarpmasından dolayı sıcaklığı düşecek ve meydana gelen türbülans sebebiyle oksit tabakaları meydana gelecektir. Yolluk dizaynı, oluşan bu oksit tabakalarını ve kalıba ilk giren soğuk metali çekme çubuklarının yan taraflarında bulunan süzmelere yönlendirerek çekme çubuklarının içerisinde oluşabilecek hataları önleyecek şekilde yapılmıştır. Bu nedenle çekme çubukları yolluktan gelen temiz ve sıcaklığı yaklaşık 730 °C olan sıvı metalle dolmaktadır. Sıvı akışının ilerleyen bölümlerinde kalıp tamamen dolduğunda çubukların üst kısımlarında bulunan besleyiciler hem besleme görevi yapmakta hem de metal akışı sırasında oluşan hataları çekme kuponlarının üst kısımlarında toplamaktadır. Sıvı akışı tamamlandığında en sıcak bölge olan yolluğun

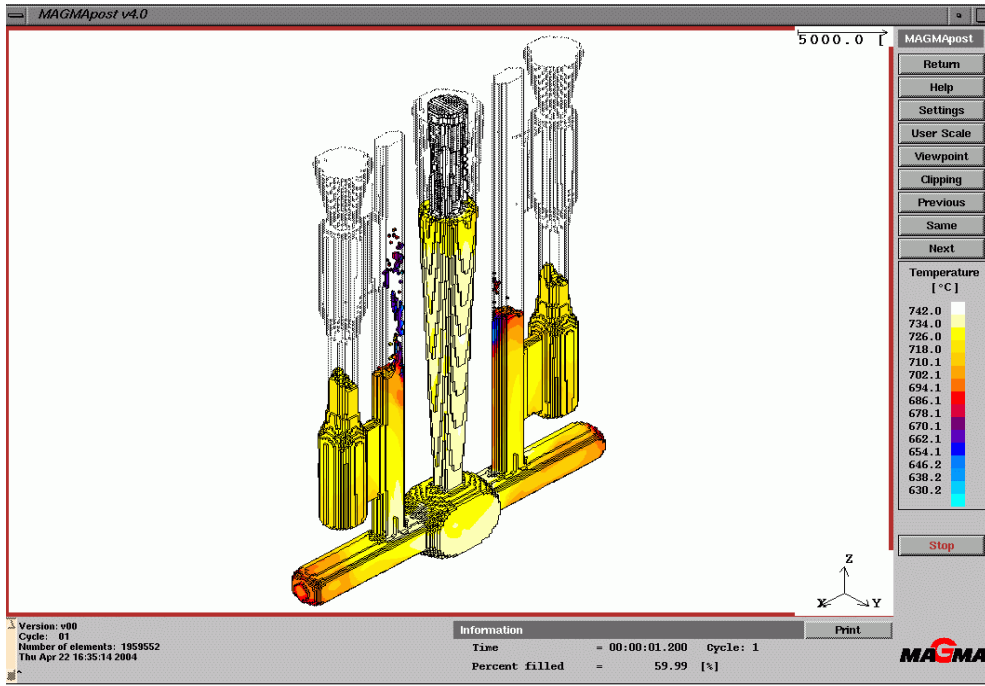
sıcaklığı yaklaşık 725 °C'dır. Yan tarafta bulunan besleyicilerin sıcaklığı 712 °C ve üst besleyicilerin sıcaklığı da 700 °C civarındadır.



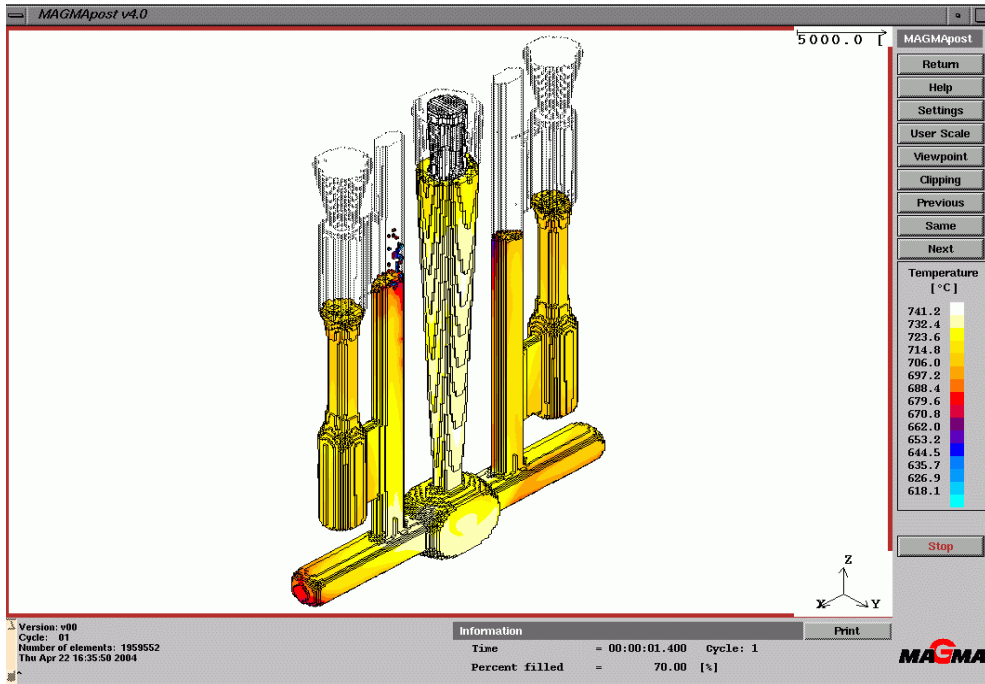
Şekil 6.1. Sıvı akış süreci 0,6 s.



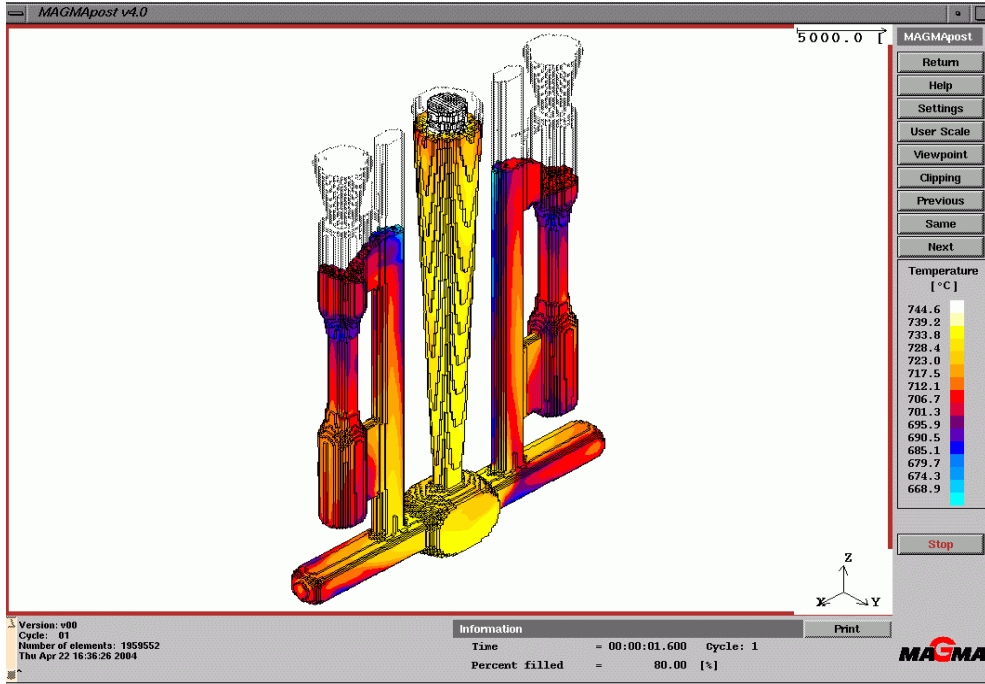
Şekil 6.2. Sıvı akış süreci 1 s.



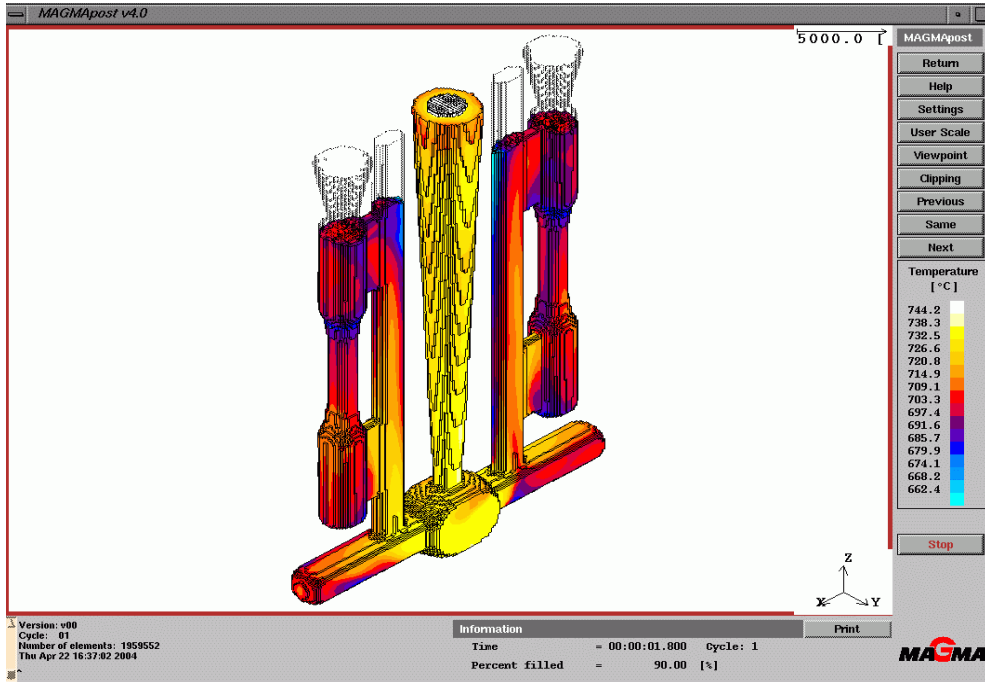
Şekil 6.3. Sıvı akış süreci 1,2 s.



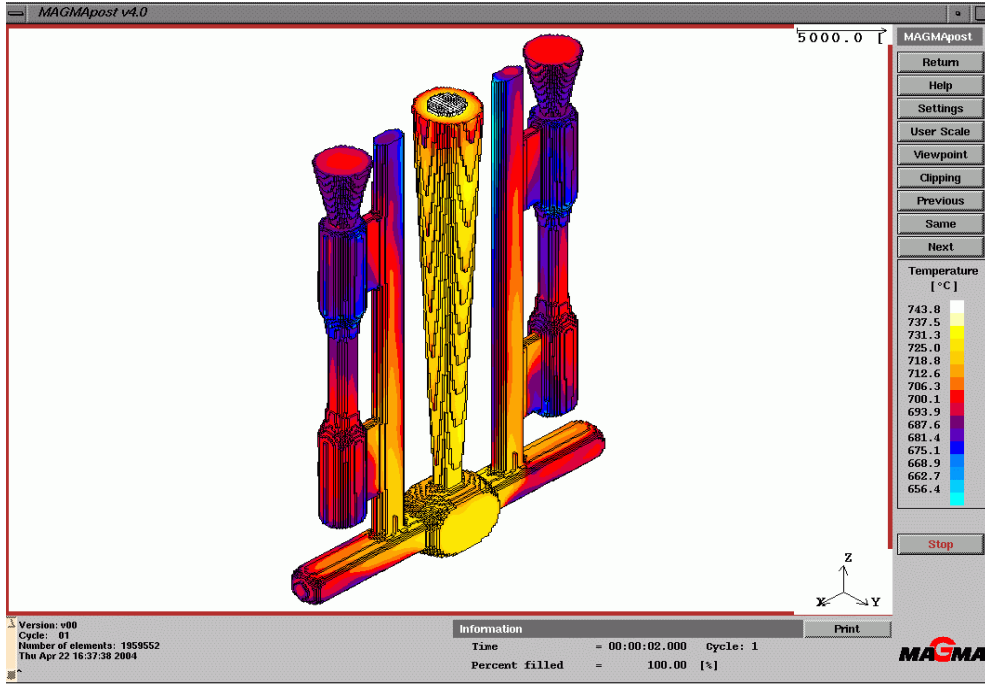
Şekil 6.4. Sıvı akış süreci 1,4 s.



Şekil 6.5. Sıvı akış süreci 1,6 s.



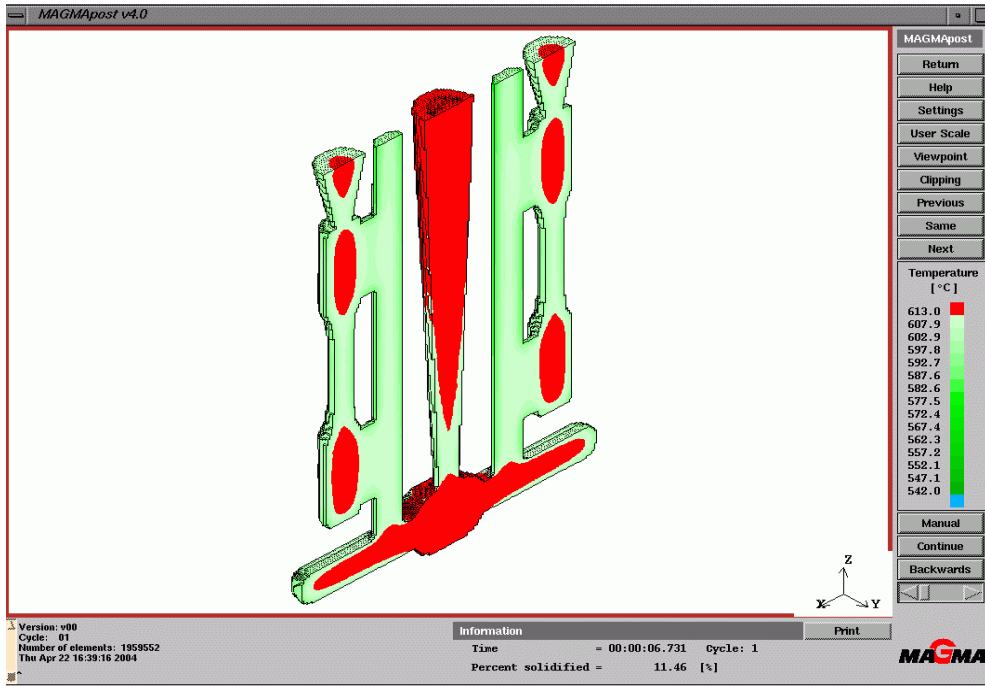
Şekil 6.6. Sıvı akış süreci 1,8 s.



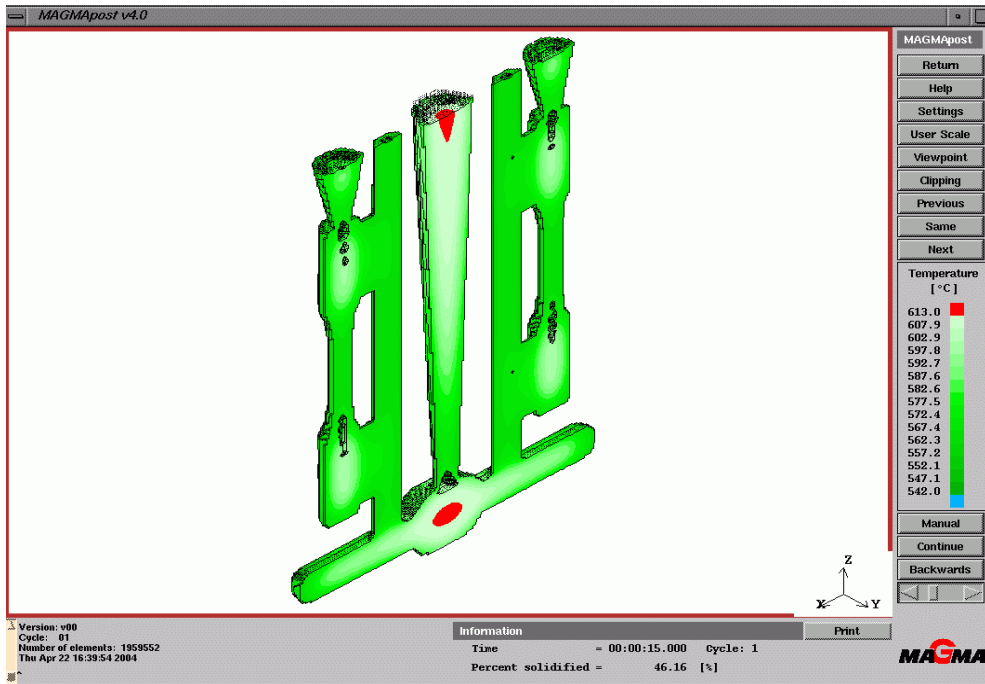
Şekil 6.7. Sıvı akış süreci 2 s.

6.1.2. Katılaşma

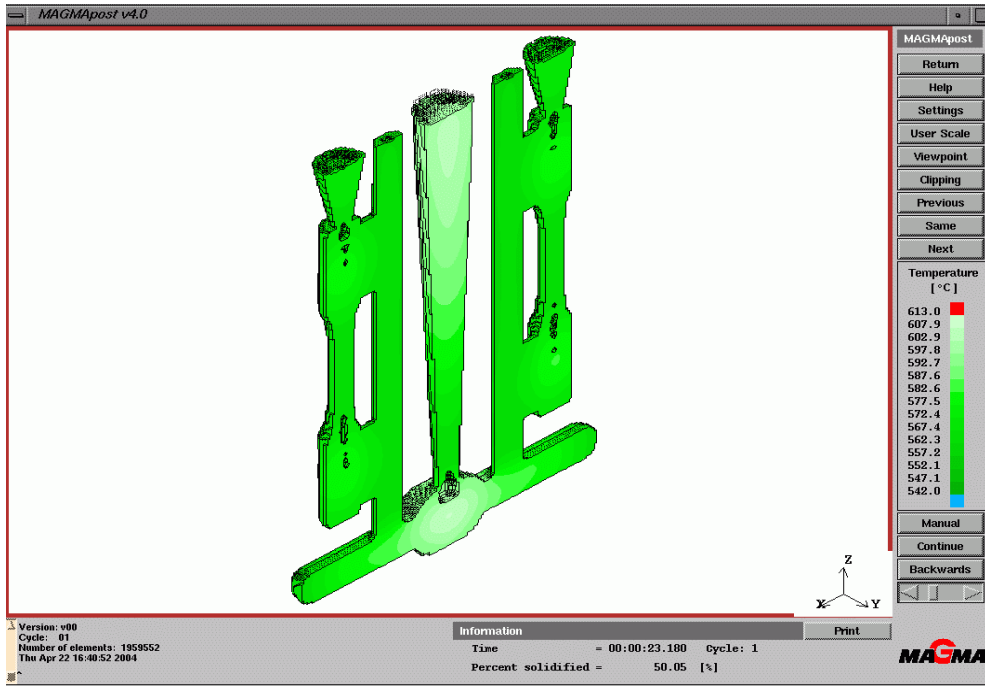
Yolluklu parça katılaşmaya başlarken metal girişinin sağlandığı dikey yolluk ve alt tarafta bulunan yatay yolluğun kesiştiği bölge en sıcak kalan bölgelerdir ve yaklaşık olarak 635 °C'dir. Katılaşma zamanı ilerledikçe dikey ve yatay yolluk arasında kalan bölge kesitinin küçük olmasından dolayı diğer bölgelere oranla erken katılaşmış ve dikey yolluğun katılaşma esnasında beslemeye bir faydası olmamıştır. Katılaşmanın ilerleyen safhalarında en son katılaşan bölge, numune kesitlerinin kalın olmasından dolayı numunenin alt ve üst uçlarıdır. Bu bölge ile en sıcak bölge olan yolluklar arasında yaklaşık olarak 25 °C sıcaklık farkı vardır.



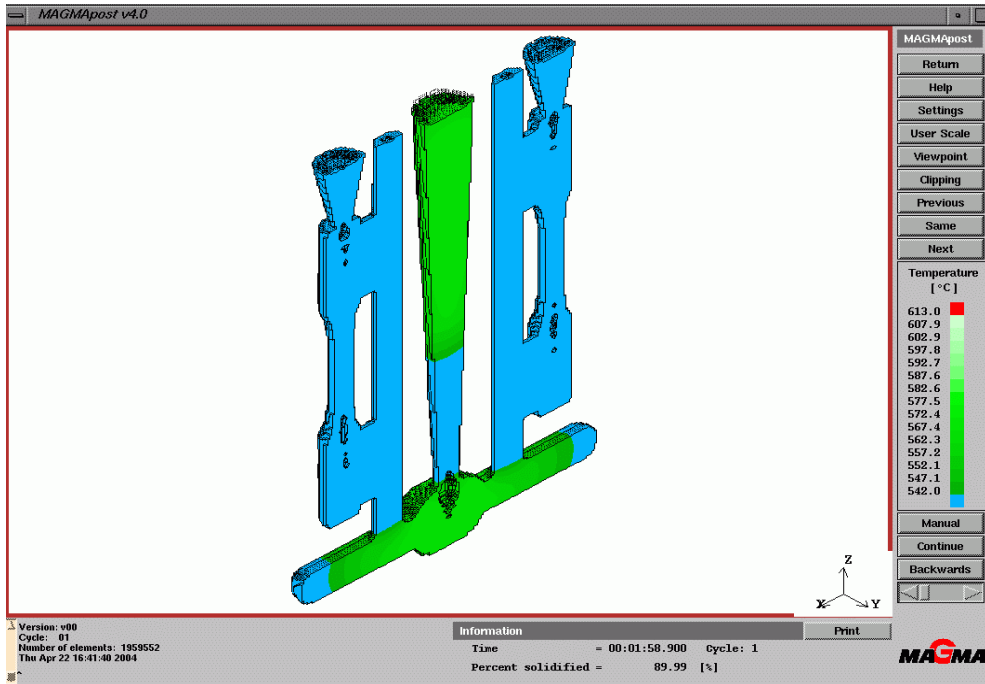
Şekil 6.8. Katılaşma süreci 6.731 s.



Şekil 6.9. Katılaşma süreci 15 s.



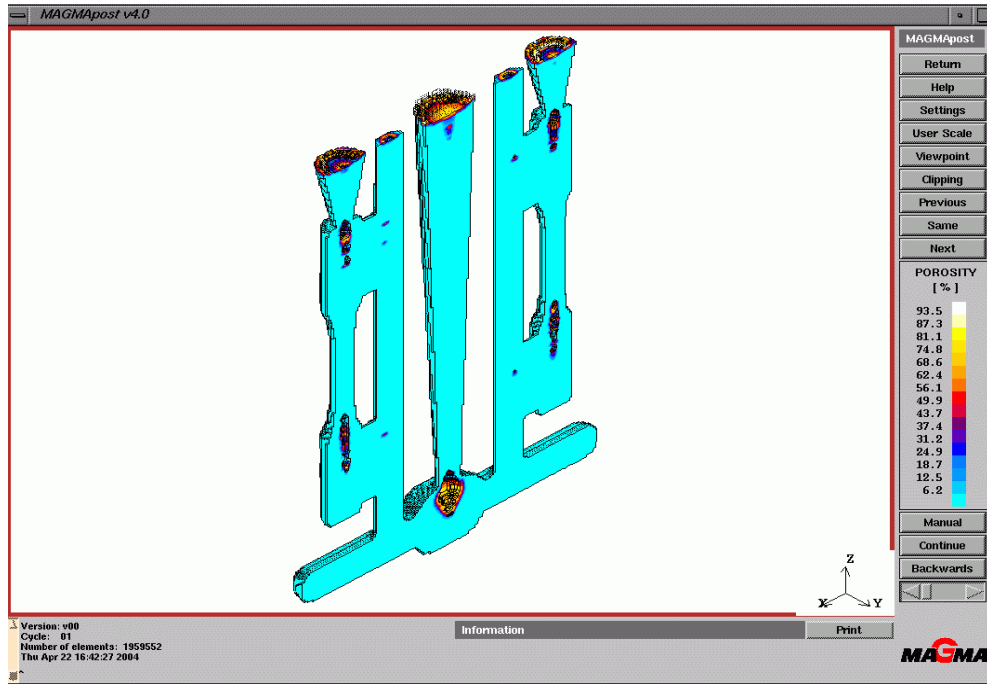
Şekil 6.10. Katılaşma süreci 23,18 s.



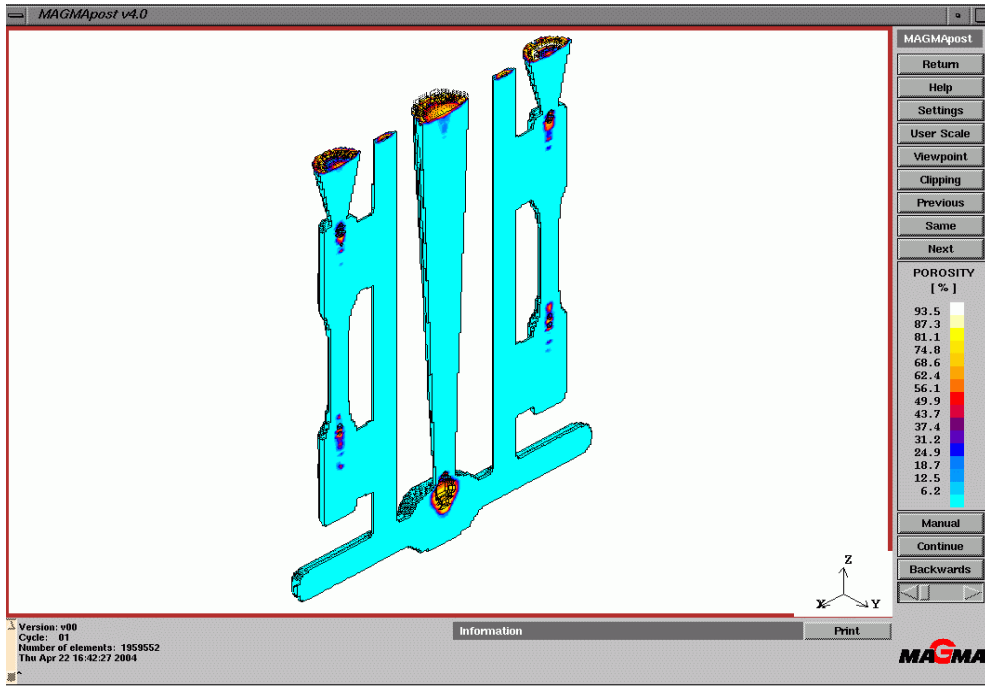
Şekil 6.11. Katılaşma süreci 58,9 s.

6.1.3 Çekinti

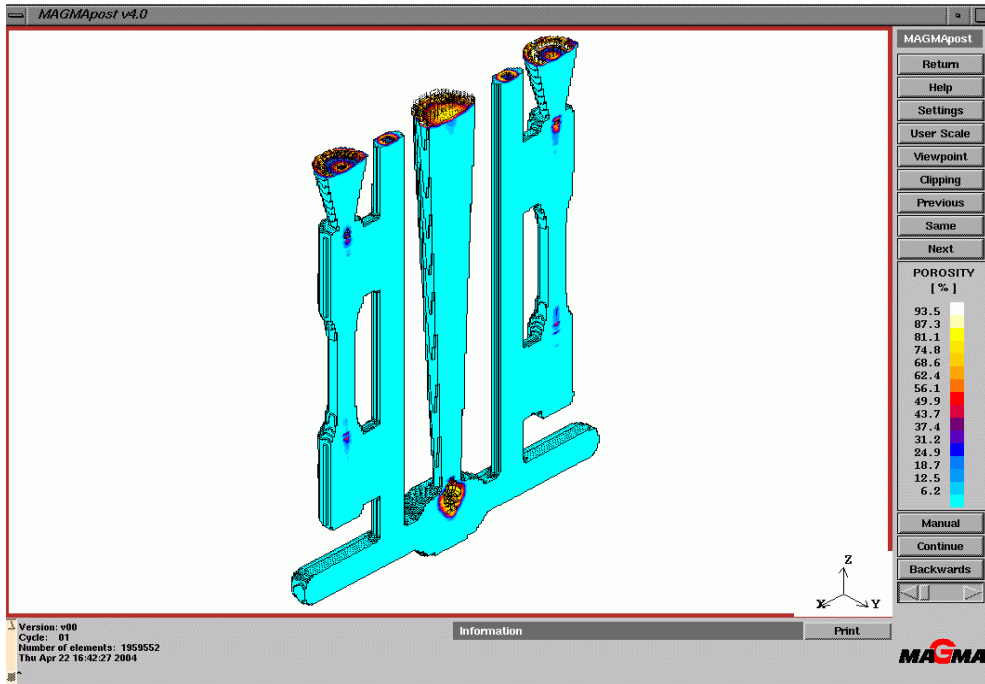
Döküm sonucunda yapılan incelemede her iki kalıptan alınan dökümlerde de fiziksel olarak herhangi bir döküm hatasına rastlanmamıştır. Simülasyon neticesinde çekme bölgesinde olmasa da çekme çubuklarının uçlarında çekinti izlerine rastlanmıştır. Bunun nedeni, üst ve yan besleyicilerden verimli metal beslemesi sağlanamamış olmasıdır. Çekintinin en fazla olduğu bölge üst taraftan gelen dikey yollukla alt tarafta bulunan yatay yolluğun kesişim bölgesidir, bunun nedeni ise katılma esnasında yolluk kesitlerinin dar olmasından dolayı bölgeye üst ve yan yolluklardan herhangi bir besleme olmamasıdır. Yapılan çekme deneyleri neticesinde çekinti izleri olan bölgelerde kopmaya rastlanmamıştır.



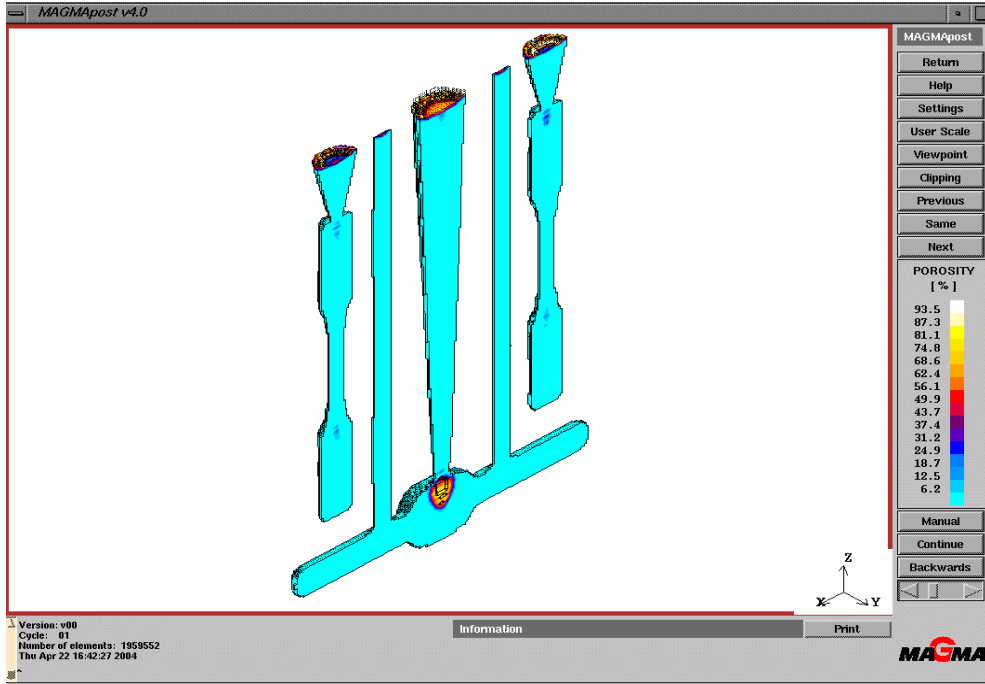
Şekil 6.12. Çekinti süreci kesit 1



Şekil 6.13. Çekinti süreci kesit 2



Şekil 6.14. Çekinti süreci kesit 3

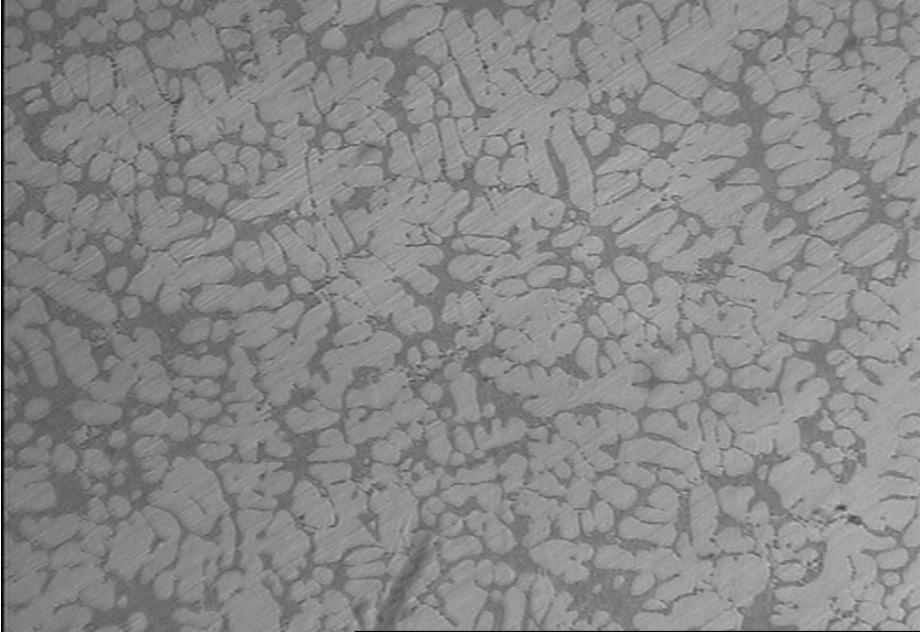


Şekil 6.15. Çekinti süreci kesit 4

6.2. Mikroyapı İncelemeleri

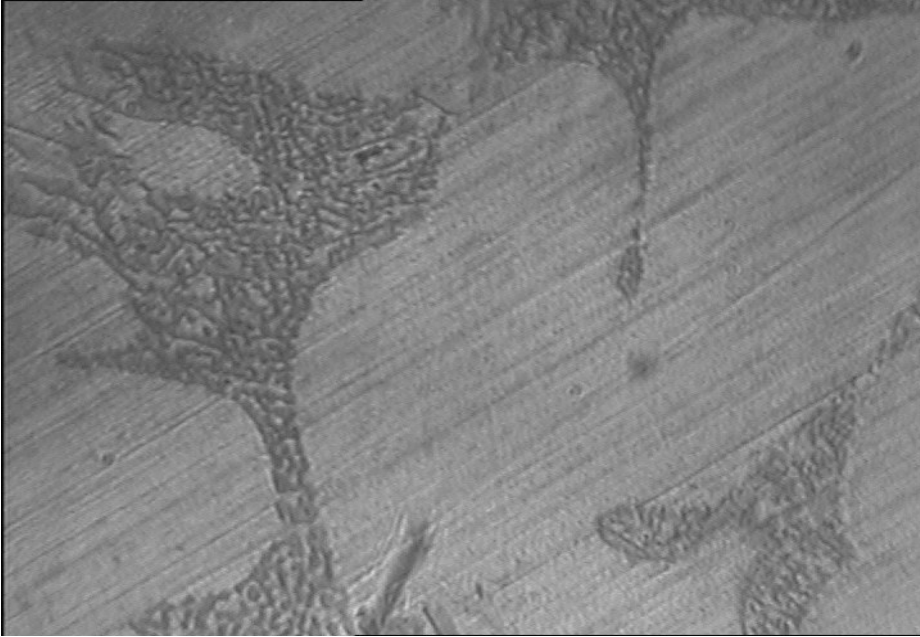
Tane inceltici olarak kullanılan Al5Ti1B ön alaşımı 730 °C sıcaklıktaki sıvı metale ilave edilmiştir. Alüminyum döküm alaşımlarının mekanik özellikleri döküm parçadaki mikro yapıya bağlı olarak değişim göstermektedir. Mikroyapının katılaşma sırasında ve katılaşmadan sonra kontrol altında bulundurulması ve amaçlara göre yönlendirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Genel olarak mikroyapı fotoğraflarında kokil dökümden dolayı oluşan hızlı soğumanın meydana getirdiği ince bir döküm yapısı elde edilmiştir. Numunelerin kokil kalıba dökümünden dolayı oluşan soğuma hızının bilinen bu etkisi tüm deney örnekleri üzerinde gözlenmiştir. Mikroyapı birincil α -alüminyum ve ötektikten meydana gelmektedir.

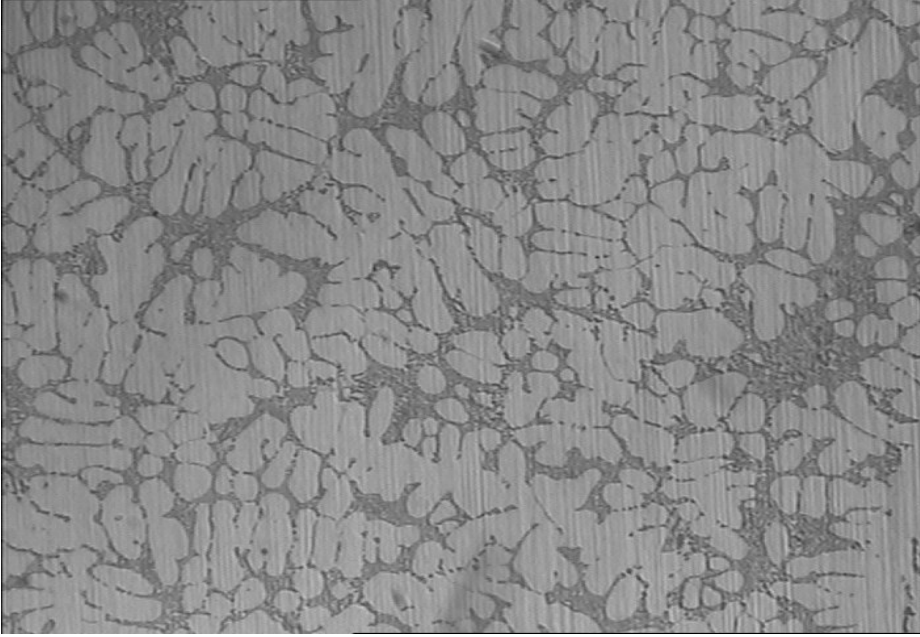


Resim 6.1.a. 0,15Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)

Wang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, ötektik altı A356 alaşımında birincil α -Al dendiritleri sıvı metale uygulanan işlemlerle önemli derecede inceltilebildiği tespit edilmiştir (25).



Resim 6.1.b. 0,15Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)



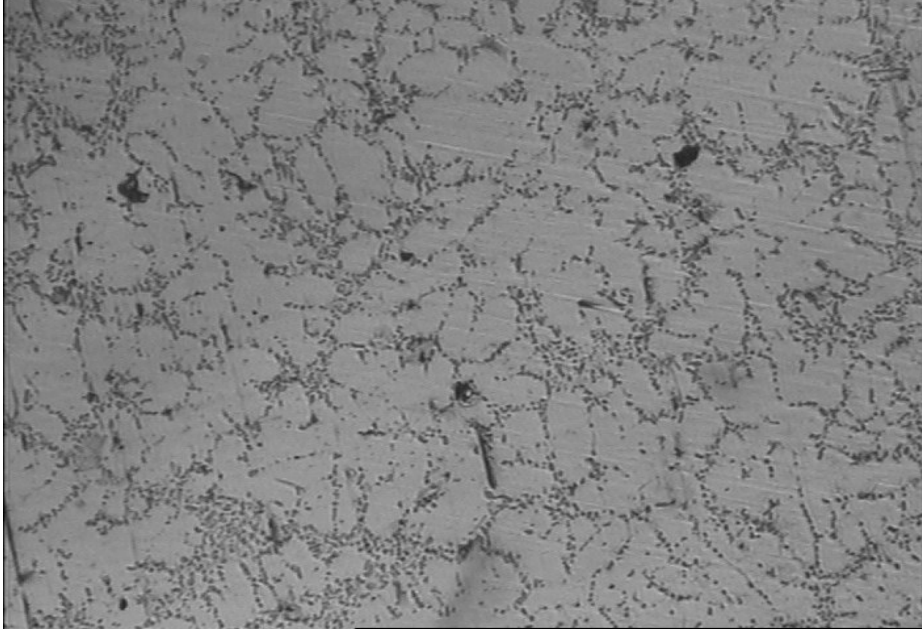
Resim 6.2.a. 0,15Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)

Resim 6.1 ile 6.2 incelendiğinde döküm sıcaklığının yüksek olduğu Resim 6.2’de mikroyapıdaki birincil α -alüminyum tanelerinin kabalaştığı gözlenmiştir.

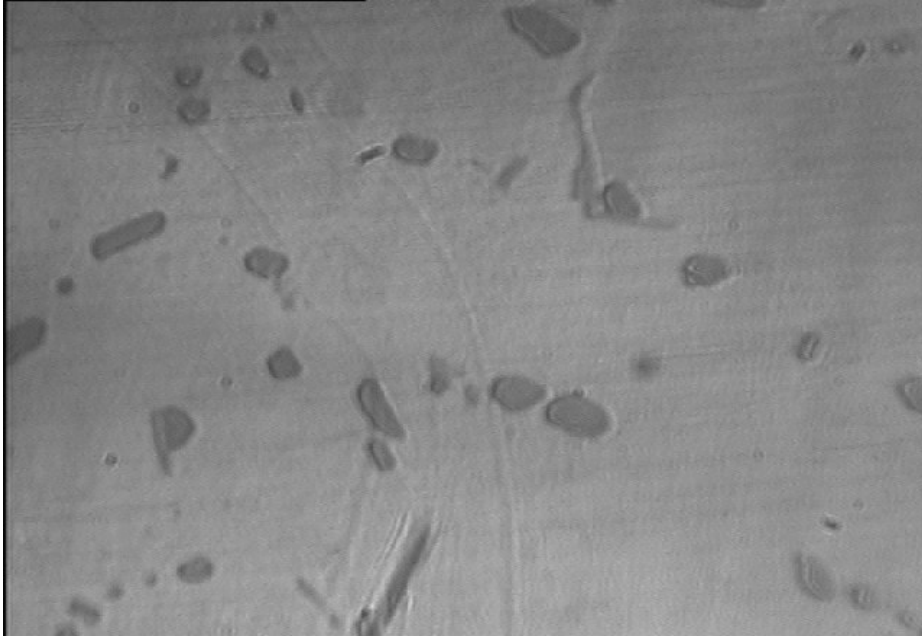


Resim 6.2.b. 0,15Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

Resim 6.1 ve 6.2’de farklı büyütmelerde içerisinde % 0,15 Ti bulunan, ısıt işlem yapılmamış, aynı kalıp sıcaklığı ve sürelerinde dökülmüş numunelerin 730 ve 770 °C döküm sıcaklıklarında karşılaştırılması gösterilmiştir.

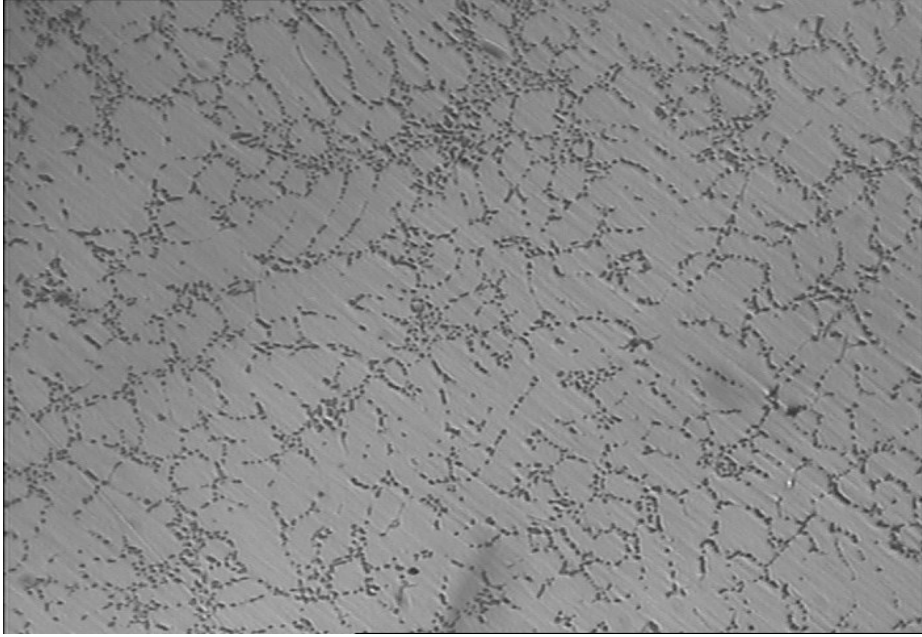


Resim 6.3.a. 0,15Ti730C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X35)

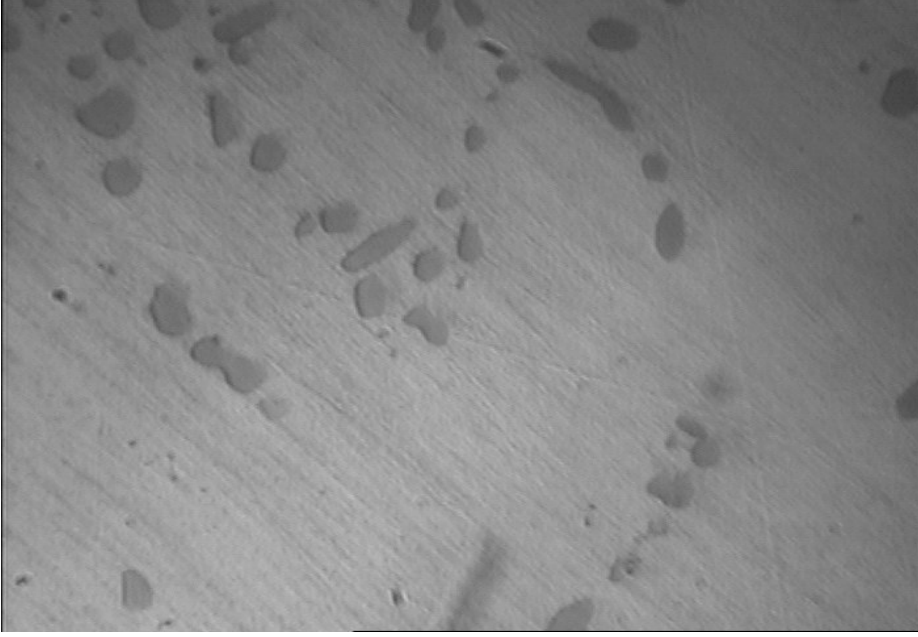


Resim 6.3.b. 0,15Ti730C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

Ön alaşım içinde oluşturulan $TiAl_3$ partikülleri, ön alaşımın sıvı alüminyum içerisine katılmasından itibaren erimeye başlar, erimeden kalabilenler ise peritektik reaksiyon ile alüminyum tanelerini çekirdekletirirler. Peritektik olarak çekirdekleşen taneler genellikle çok ince kalır. Çekirdekleşmeden sonra, sıvı alüminyum tarafından çevrelenen bu yeni taneler heterojen kenarlar olarak davranırlar ve onların üzerinde esas faz olan αAl fazı, sıcaklık değişimi yeterli hale geldiğinde çekirdekleşir (6).



Resim 6.4.a. 0,15Ti770C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X35)

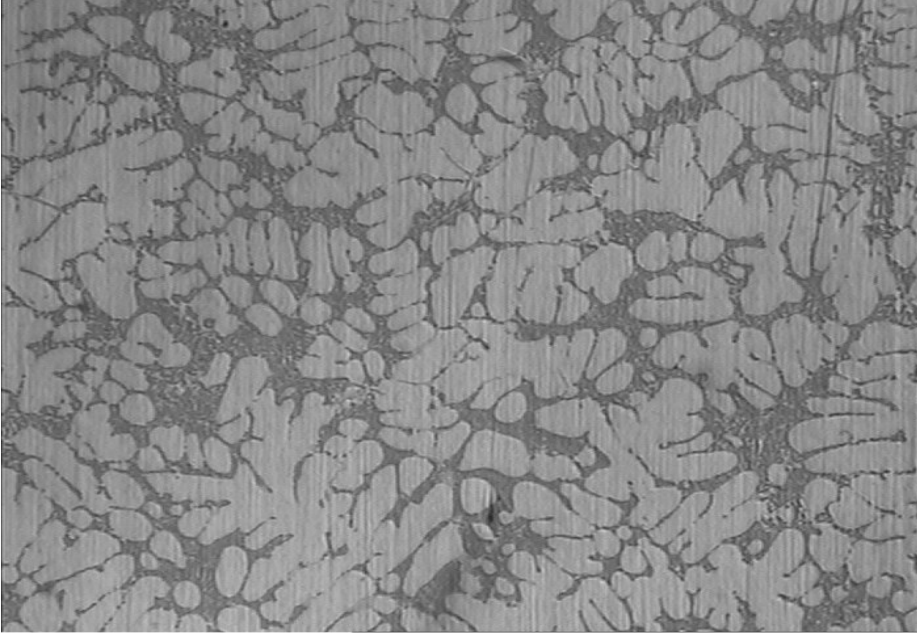


Resim 6.4.b. 0,15Ti770C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

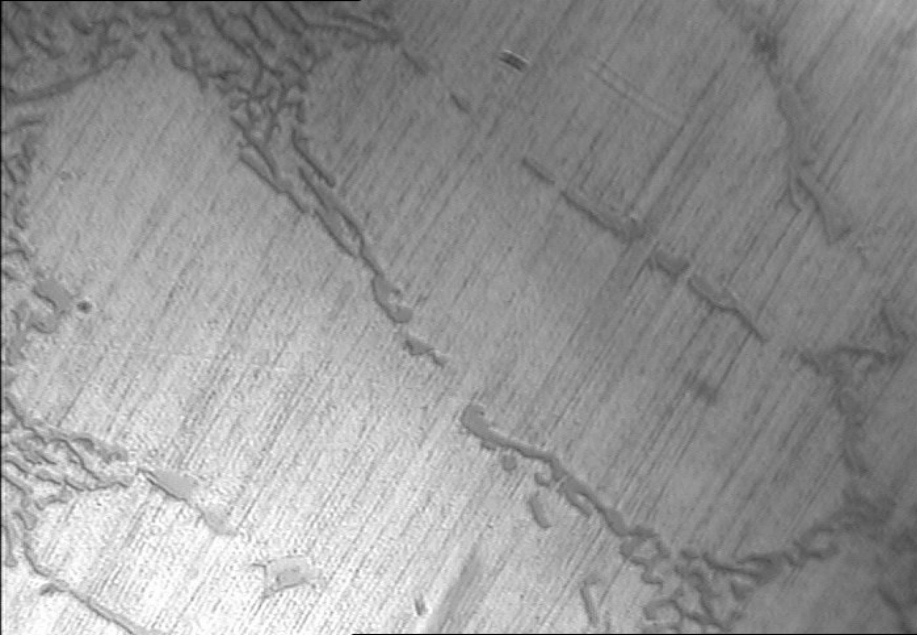
Resim 6.3 ve 6.4’de farklı büyütme ölçeklerinde içerisinde % 0,15 Ti bulunan, T6 ısıtma işlemi yapılmış, aynı kalıp sıcaklığı ve kalıp açma sürelerinde dökülmüş numunelerin 730 ve 770 °C döküm sıcaklıklarında karşılaştırılması gösterilmiştir. Yüksek döküm sıcaklığının oluşturduğu çözünme nedeni ile % 0,15 Ti içeren numunelerin mikro yapı görüntülerinde tane inceltme etkinliği azaldığı gözlenmektedir.

Mekanik özellikleri arttıran çökeltilerin oluşması ötektik alüminyum ve ötektik silisyumun oluşturduğu ötektik fazın sınırları belirgin iken sıcaklığın artması ile sınırlar belirginliğinin azaldığı gözlenmektedir (22).

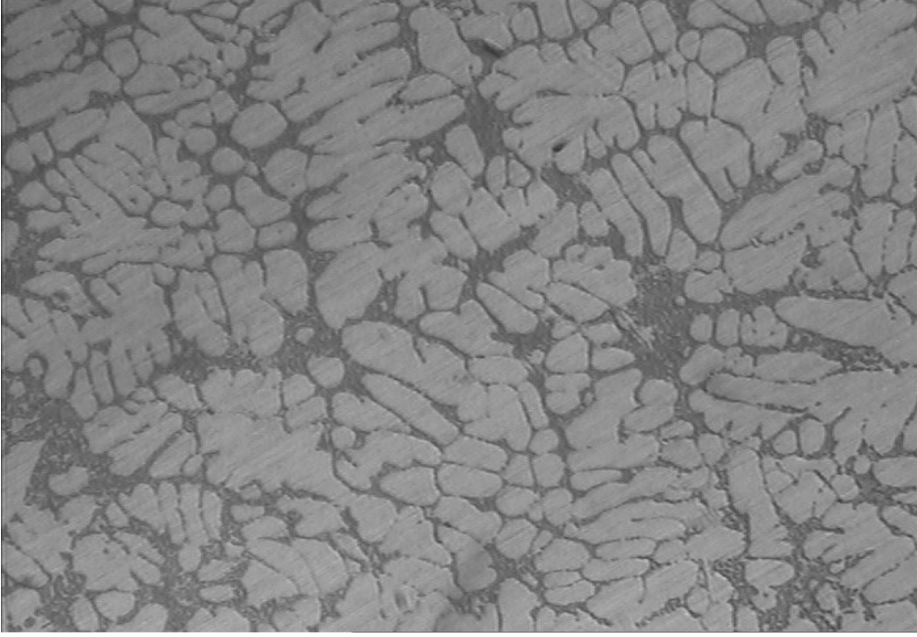
İnce taneli döküm parçalarda alaşım elemanları bütün yapıda eş dağılım gösterdiğinden ısıtma işlemde daha kararlı bir sonuç alınır (8).



Resim 6.5.a. 0,2Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)



Resim 6.5.b. 0,2Ti730C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)



Resim 6.6.a. 0,2Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)



Resim 6.6.b. 0,2Ti770C250C60F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

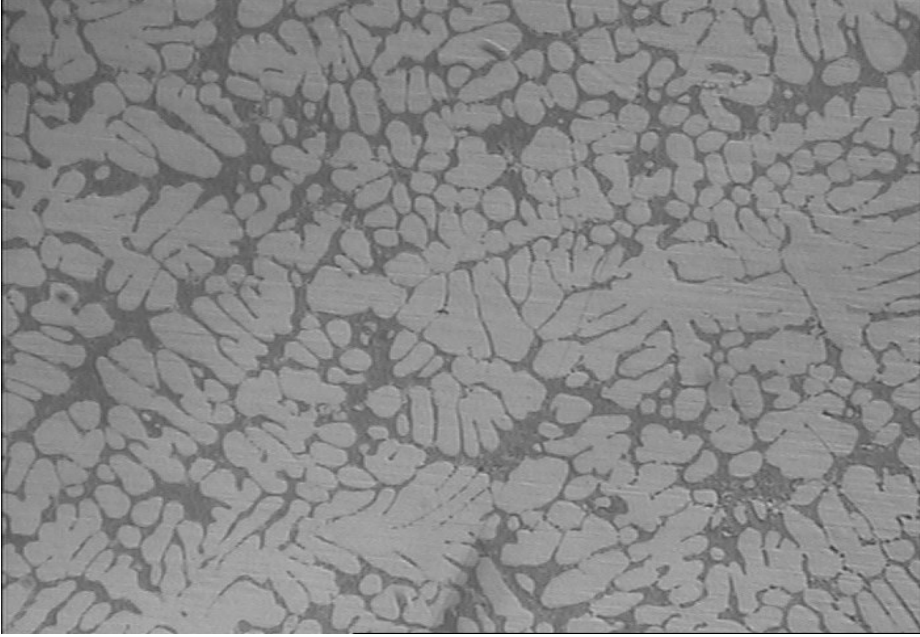


Resim 6.7. 0,2Ti730C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X35)

Kori ve arkadaşlarının (18) yapmış olduğu çalışmada % 1 AlTi5B1 tane inceltici ilave edildiğinde tanelerin önemli derecede incelmesini, eş eksenli tanelere dönüştürdüğünü ve ötektik silisyum tanelerinin inceltici katkısından etkilenmediğini tespit etmişlerdir (18).



Resim 6.8. 0,2Ti770C250C60T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

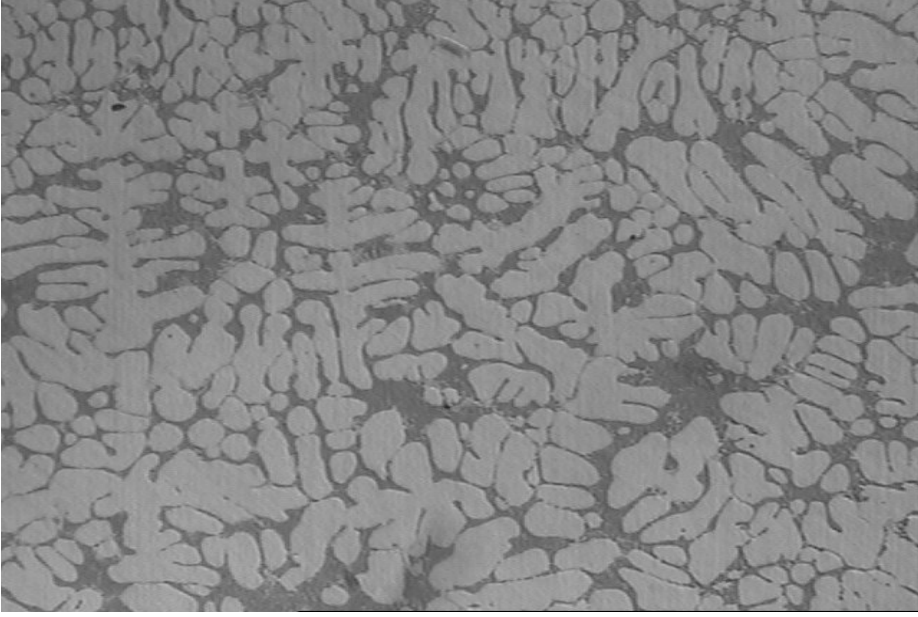


Resim 6.9.a. 0,15Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)

Aynı döküm şartlarına sahip Resim 6.9.a ve Resim 6.10.a karşılaştırıldığında 0,15 ve 0,2 kalıntı titanyum oranı sahip numunelerde artan titanyum oranı ile birincil α -Al tanelerinin incelendiği görülmektedir.

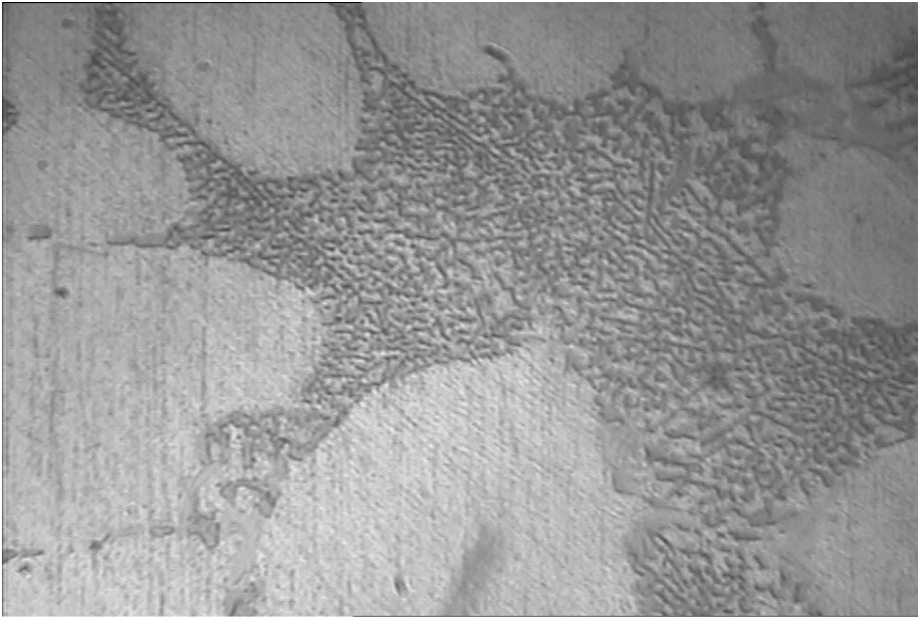


Resim 6.9.b. 0,15Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)



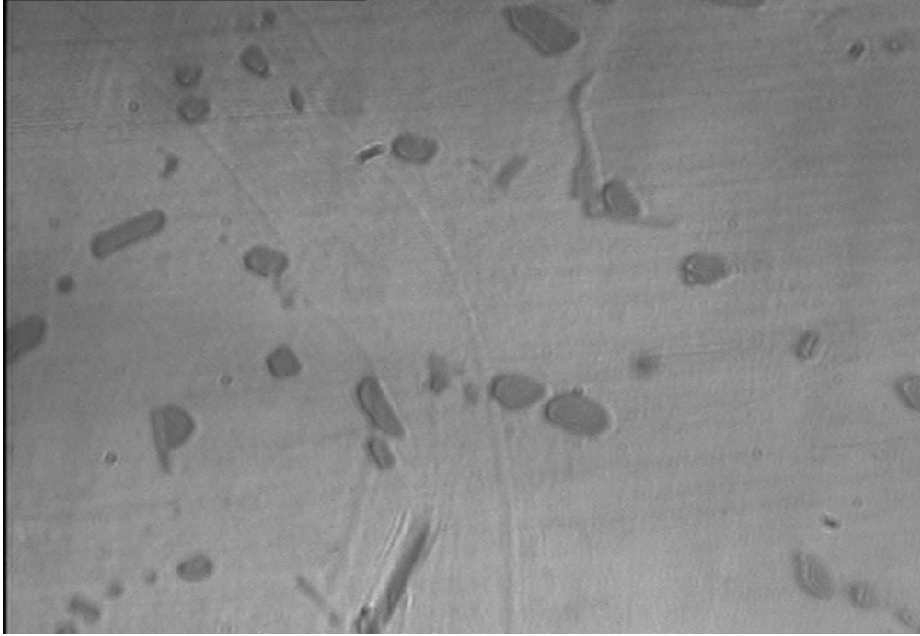
Resim 6.10.a. 0,2Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)

Resim 6.1 ve 6.9'daki mikroyapı görüntülerindeki numuneler % 0,15 kalıntı titanyum içeriği, 730 °C döküm, 250 °C kalıp sıcaklığı kullanılarak dökülmüştür. İki numune arasındaki fark kalıp açma süresinin Resim 6.1'de 60 saniye, Resim 6.9'da 90 saniye olmasıdır. Kalıp açma süresindeki 30 saniyelik bu fark numunelerin mikroyapı morfolojisinde değişikliğe neden olmamıştır.

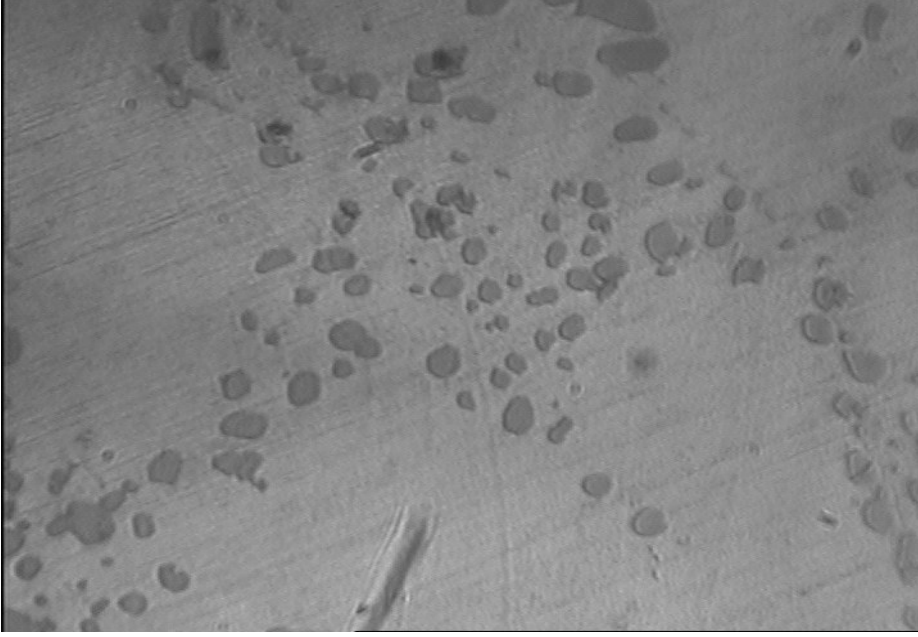


Resim 6.10.b. 0,2Ti730C250C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

Prasada Rao ve arkadaşları (22) yaptıkları çalışmada ikili Al-Si alaşımlarına titanyum ilavesinin, yeterince yüksek seviyelerde $TiAl_3$ fazının çökmesine neden olduğunu ve ayrıca çözünme nedeniyle sıvıda Ti içeriği artarken partiküllerin hacminin küçüldüğü belirtilmektedir. Bununda sıvının yüzey gerilim karakteristiğini değiştirebileceği sıvı içerisinde kalan B, $TiAl_3$, TiB_2 ve ikili partiküllerin sağladığı çok sayıda nokta üzerinde heterojen çekirdeklenmenin meydana geldiği ifade edilmektedir (22).

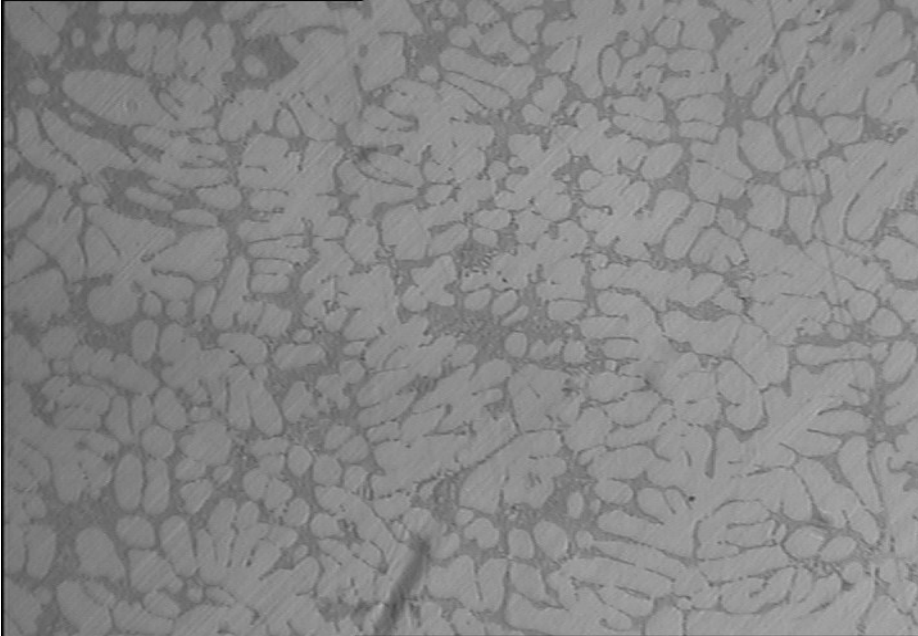


Resim 6.11. 0,15Ti730C250C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

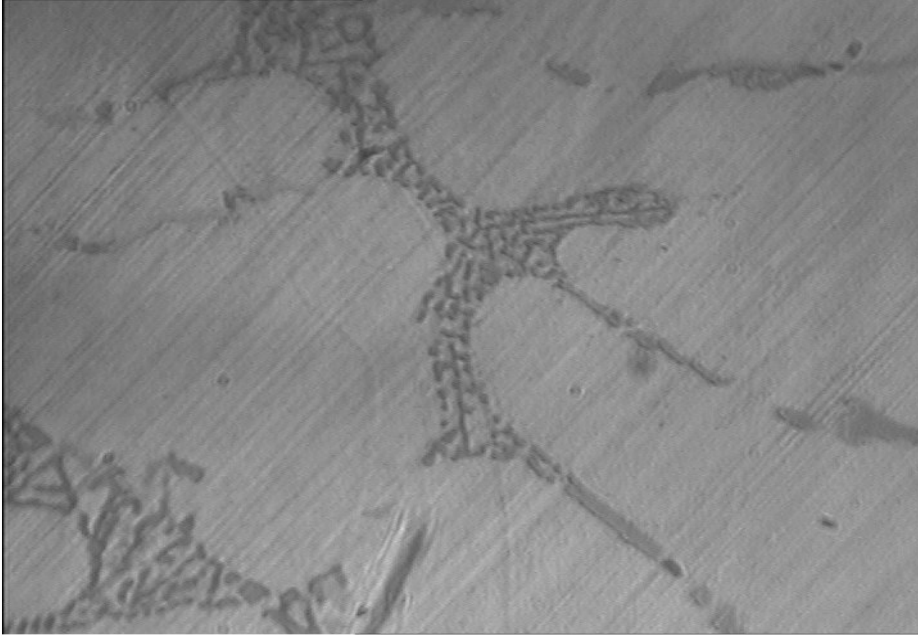


Resim 6.12. 0,2Ti730C250C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

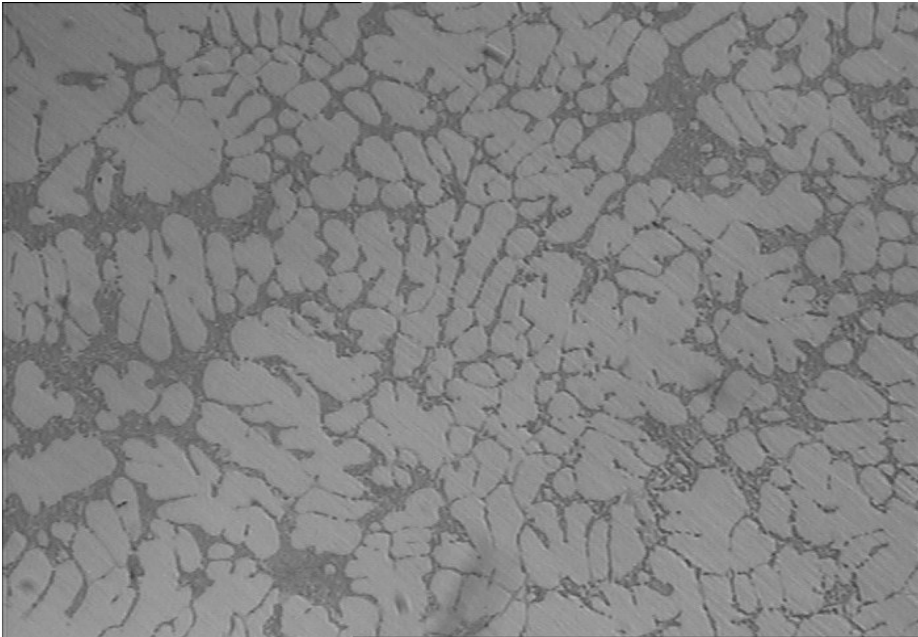
% 0,15 kalıntı titanyum içeriği, 730 °C döküm, 250 °C kalıp sıcaklığı ve 90 saniye kalıp açma süresi kullanılarak dökülmüş numunelerin ısıtılma işlem sonrasında kalıp açma süresindeki fark mikroyapı morfolojisinde değişikliğe neden olmadığı gözlenmiştir.



Resim 6.13.a. 0,15Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)



Resim 6.13.b. 0,15Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

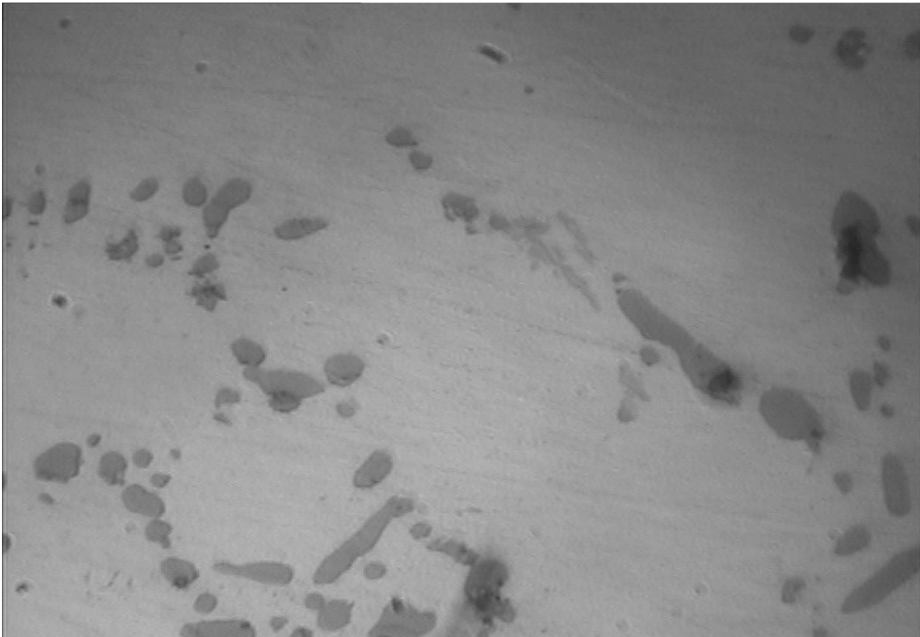


Resim 6.14.a. 0,2Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X35)



Resim 6.14.b. 0,2Ti770C280C90F kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

Resim 6.14'de % 0,2 titanyum, 770 °C döküm, 280 °C kalıp sıcaklığı ve 90 saniye kalıp açma süresi kullanılarak dökülmüş numuneler Resim 6.5 ile karşılaştırıldığında artan döküm ve kalıp sıcaklıklarının % 0.2 titanyum içeren numunelerde tane inceltmeyi daha etkin hale getirdiği gözlenmektedir.

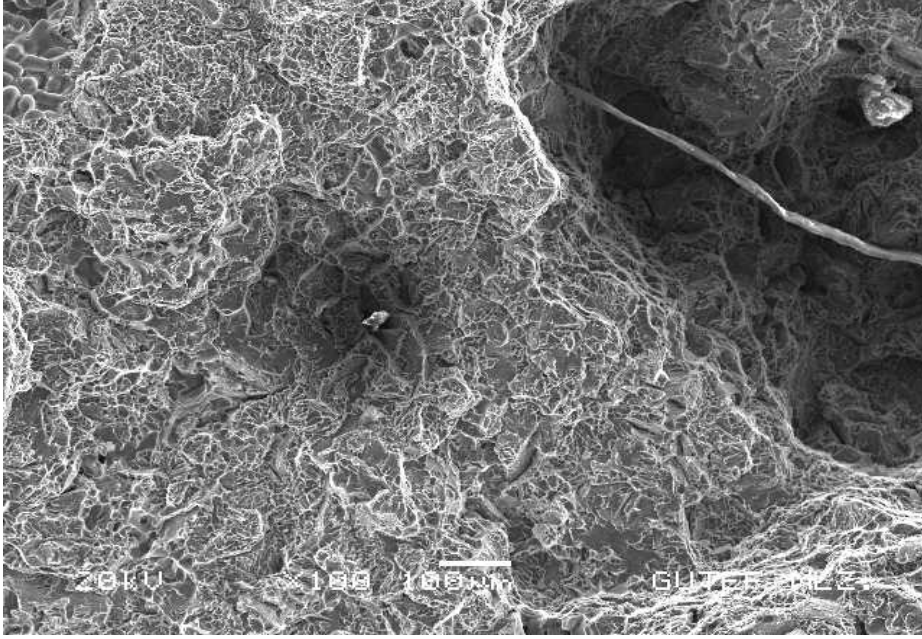


Resim 6.15. 0,15Ti770C280C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

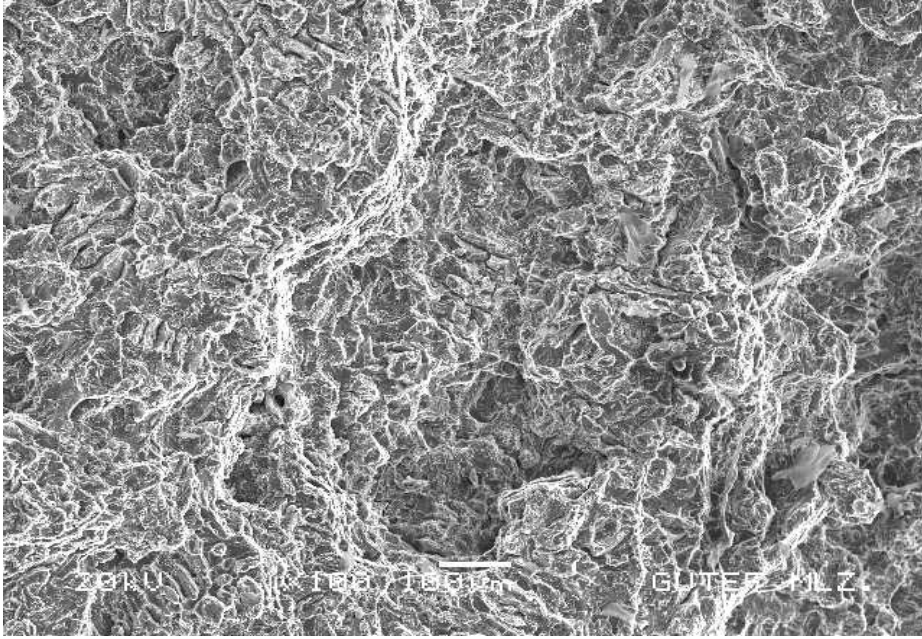


Resim 6.16. 0,2Ti770C280C90T6 kodlu numunenin mikroyapısı (X350)

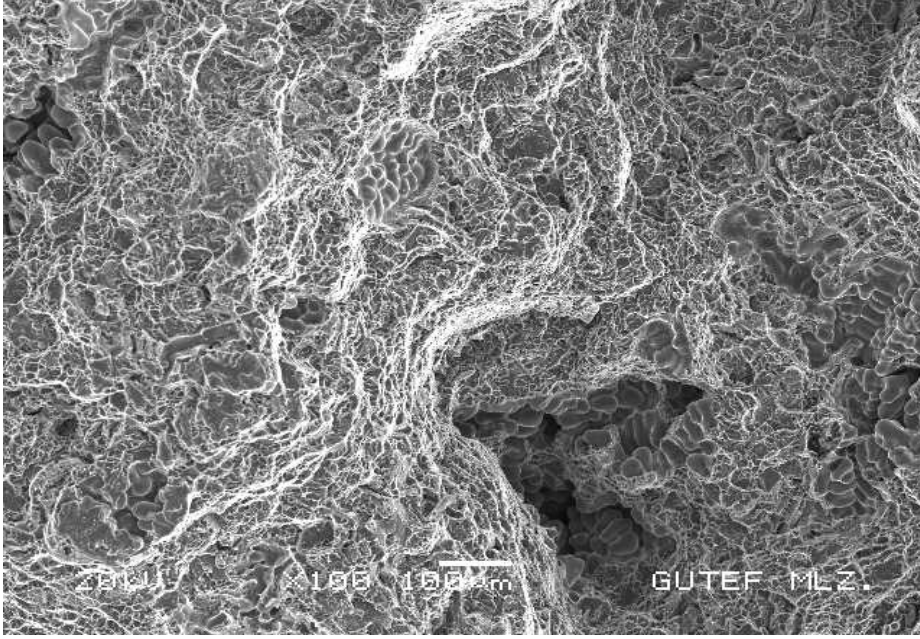
Yapılan deneysel çalışmada elde edilen mikroyapı görüntülerinden de anlaşıldığı üzere; % 0,2 Ti içeren numunelerde döküm sıcaklığının arttırılması ile mikroyapıda birincil α -alüminyum tanelerinin kabalaştığı görülmektedir. Öte yandan kullanılan alaşımın içerisinde bulunan silisyumun malzemenin tane yapısını da incelttiği bilinmektedir. Lee ve arkadaşlarının (2) yapmış olduğu çalışma açıkça ortaya koymaktadır ki silisyum içeriği arttığı zaman tane boyutu başlangıçta azalır ve minimum bir değere ulaşır (% 3 Si) ve daha sonra silis içeriği arttıkça tekrar artar.



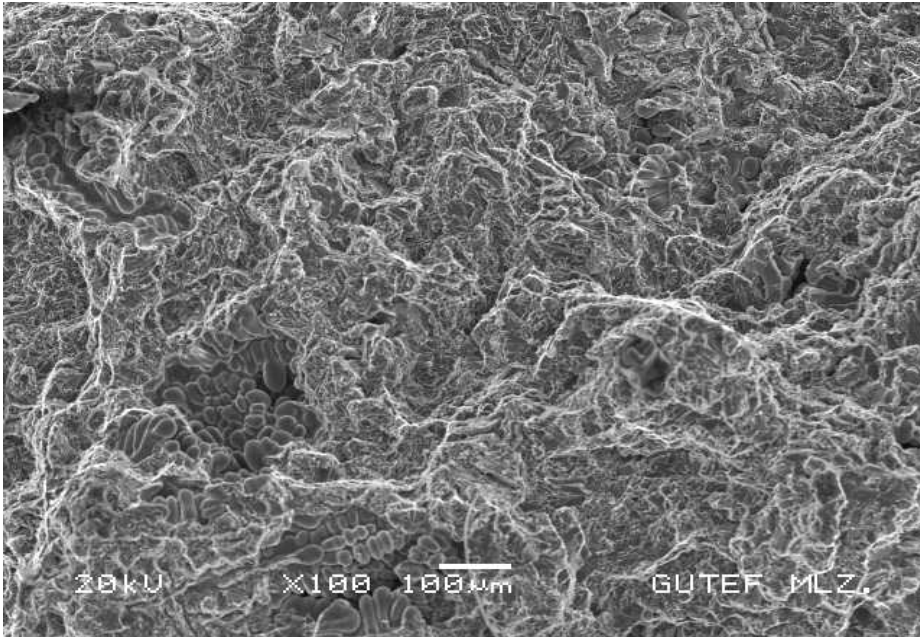
Resim 6.17. 0,15Ti730C250C60T6 kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları



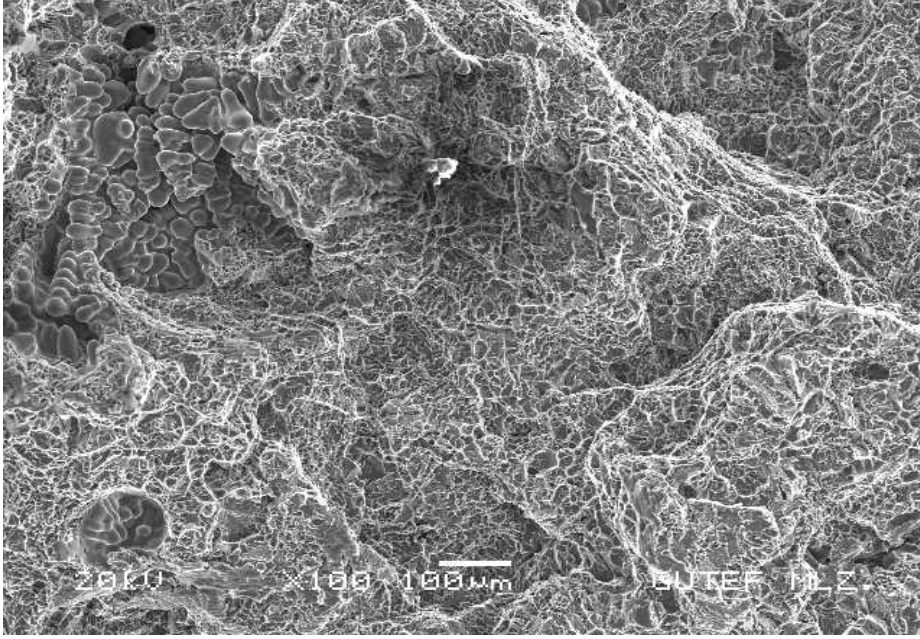
Resim 6.18. 0,15Ti730C250C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları



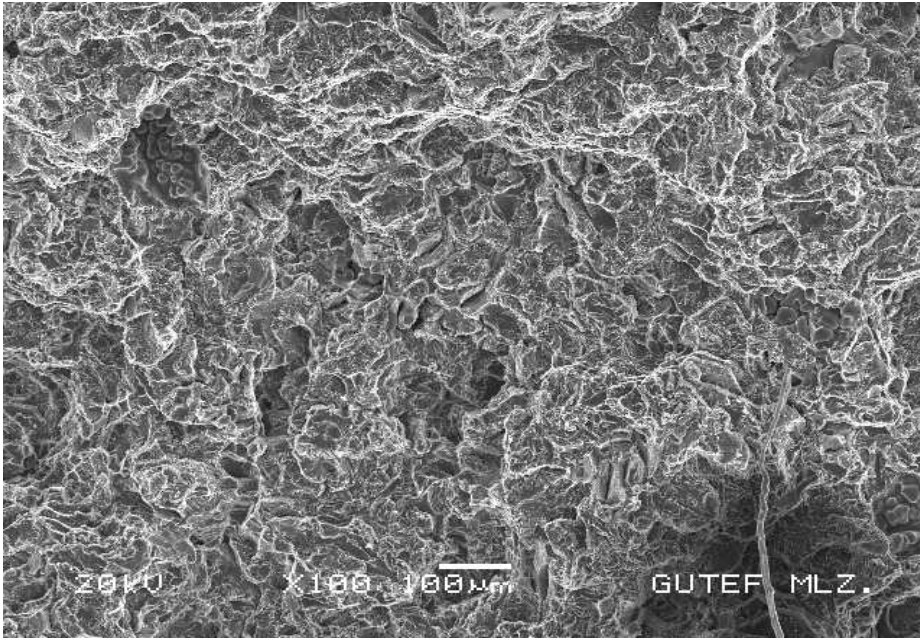
Resim 6.19. 0,2Ti750C250C60T6 kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları



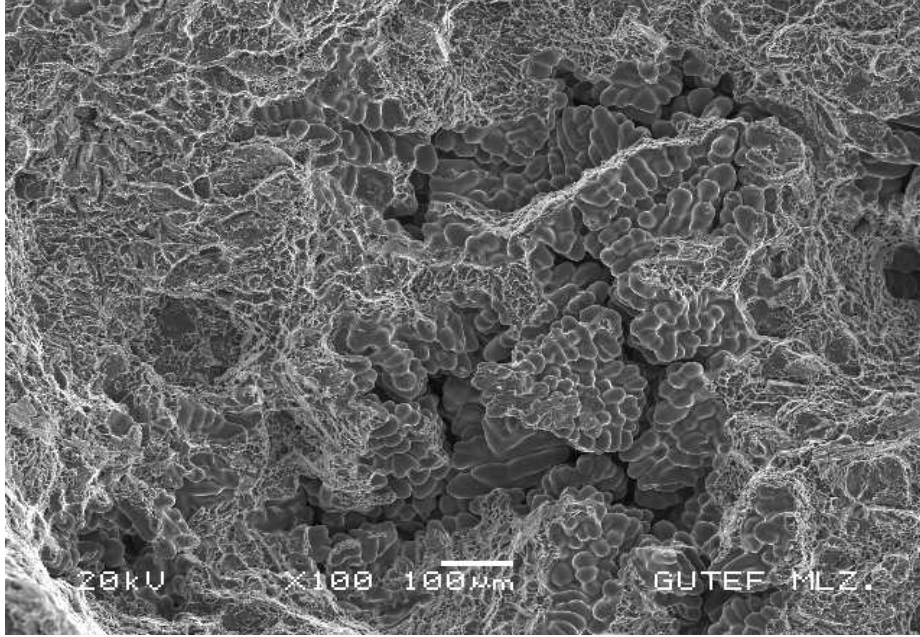
Resim 6.20. 0,2Ti750C250C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları



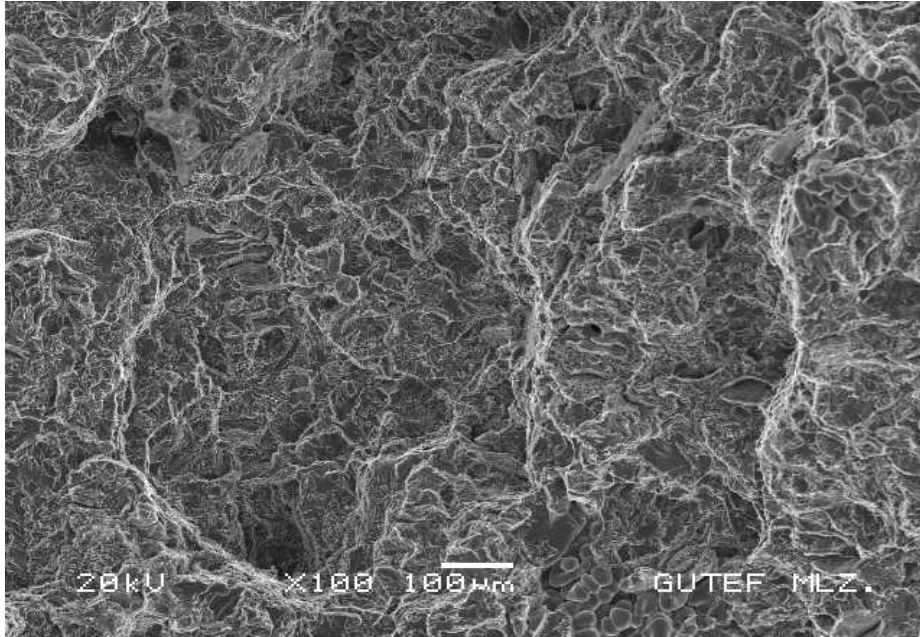
Resim 6.21. 0,2Ti750C280C60T6 kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları



Resim 6.22. 0,2Ti750C280C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları



Resim 6.23. 0,2Ti770C280C60T6kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları



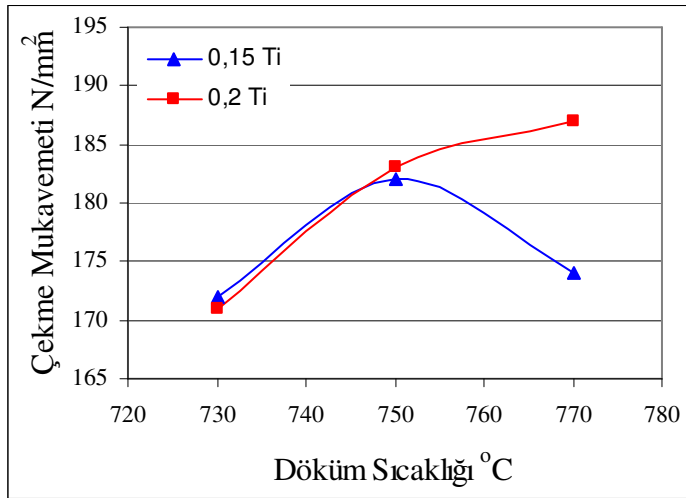
Resim 6.24. 0,2Ti770C280C60F kodlu numunenin SEM mikro fotoğrafları

6.3. Çekme ve Sertlik Deney Sonuçları

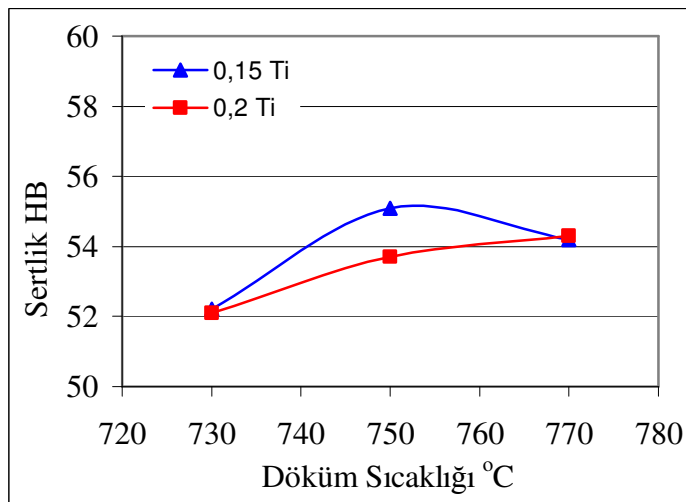
TSE 138 EN 10002–1/1996 normunda hazırlanan çekme deney çubukları ile elde edilen çekme testi ve sertlik deney sonuçları aşağıdaki şekillerde tartışılmıştır. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen çekme test sonuçlarından elde edilen veriler, genel verilere göre Etial 177 alaşımının çekme dayanımından oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir.

% 0,15 kalıntı titanyum içeren numunelerin çekme test sonuçları incelendiğinde döküm sıcaklığının 730°C'den 750 °C'ye yükselmesi ile çekme mukavemetinin artmış, sıcaklığın 770°C'ye yükselmesi ile çekme mukavemetinde azalma meydana gelmiştir. Mekanik özelliklerdeki bu düşüşün sebebi döküm sıcaklığının artışı ile içerisinde % 0,15 kalıntı titanyum ihtiva eden numunede titanyumun yapı içerisinde etkisinin azalmaya başlaması ve sıvı faz içerisinde çözünme gerçekleşmesidir.

Alüminyum döküm alaşımlarında <% 0,1 kalıntı titanyum ihtiva eden konsantrasyonlarda bile tane inceltme elde edilir, fakat bu etki yüksek sıcaklıklarda $TiAl_3$ parçacıklarının sıvı metal içerisinde çözünmesine bağlı olarak zamanla kaybolur (4).



(a)



(b)

Şekil 6.16. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtıl işlemsiz, 250°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi

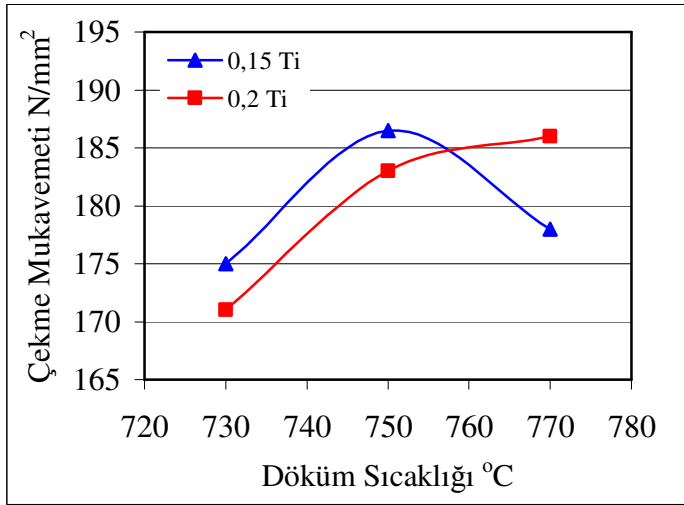
D. Ibarra'nın (4) yapmış olduğu çalışmada döküm sıcaklığının artışı ile yüksek kalıntı titanyum içeren konsantrasyonlarda titanyum-alüminyum karma tanelerin katılaşması için çekirdek gibi hareket etmesinden daha fazla çekirdek oluşacağını tespit etmiştir. Meydana gelen bu durum mekanik özelliklerde artış sağlamaktadır.

Şekil 6.16'da % 0,2 kalıntı titanyum içeren numunenin çekme mukavemeti 730°C döküm sıcaklığında 171 N/mm², 750°C'de 183 N/mm² ve 770°C'de 187 N/mm²'dir. % 0,2 kalıntı titanyum içeren numunelerde döküm sıcaklığı yükseldikçe mukavemette ve sertlikte artış gözlenmiştir.

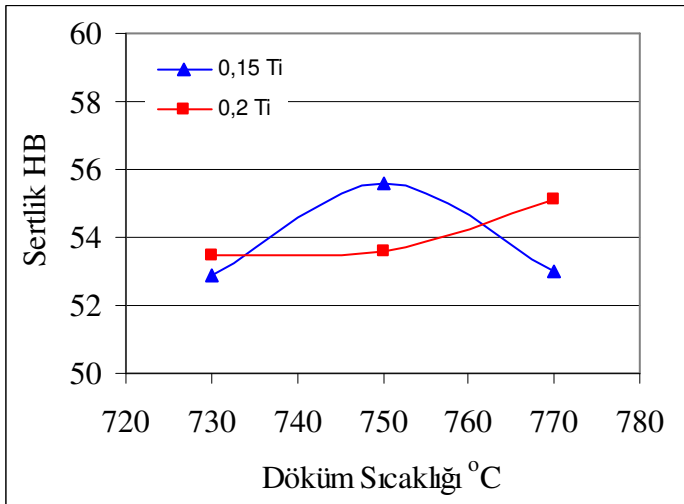
AlSi7Mg döküm alaşımında tane inceltmeye örnek olarak % 0,2 titanyum veya % 0,02 bor ile yapılan tane inceltme işlemi sonucu tane büyüklüğü çapı 2,5 mm'den 0,13 mm'ye düşürülmesi gösterilebilir. Saf alüminyumun kopma dayanımı 80 N/mm², akma sınırının 30 N/mm² ve kopma uzamasının % 30 olduğu göz önüne alınırsa alüminyum alaşımlama, silisyum inceltme, tane inceltme ve ısıtma işlemi yolu ile özelliklerin nasıl arttırılabileceği konusunda bir bilgi edinilmiş olur (8).

Şekil 6.17'de gösterilen numuneler ile Şekil 6.16'daki numuneler aynı döküm şartlarına sahiptir. Şekil 6.16 ile 6.17 arasındaki fark, kalıp açma süresinin 60 saniye yerine 90 saniye olmasıdır. Kalıp açma süresinin 60 saniyeden 90 saniyeye arttırılması ile oluşan 30 saniye fark numunelerin çekme mukavemetlerinde ve sertliklerinde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır.

S. Muthukumarasamy ve arkadaşlarının (23) yapmış oldukları çalışmada Al-Si alaşımlarının kokil kalıba dökümünde artan kalıp açma süresi ile çekme dayanımında azalma tespit etmişlerdir. Kalıp açma süresinin yüksek olması, soğuma hızını azaltacak yönde bir etkiye sahip olduğu için mikroyapı içerisinde kabalaşmaya neden olduğu ve bu kabalaşmanın çekme dayanımını düşürdüğü vurgulanmıştır (23).



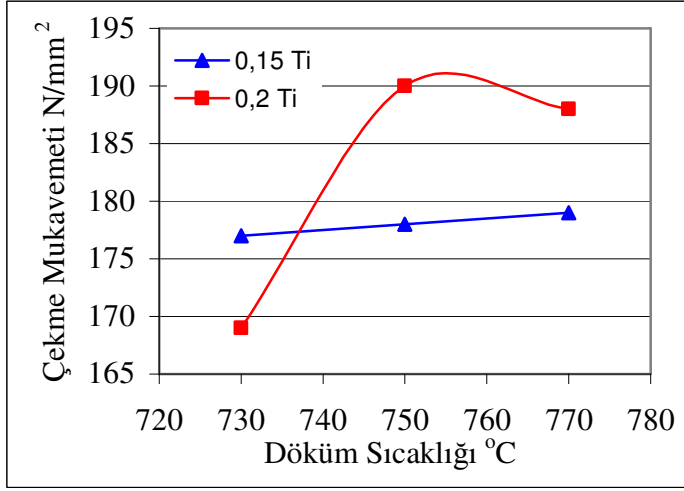
(a)



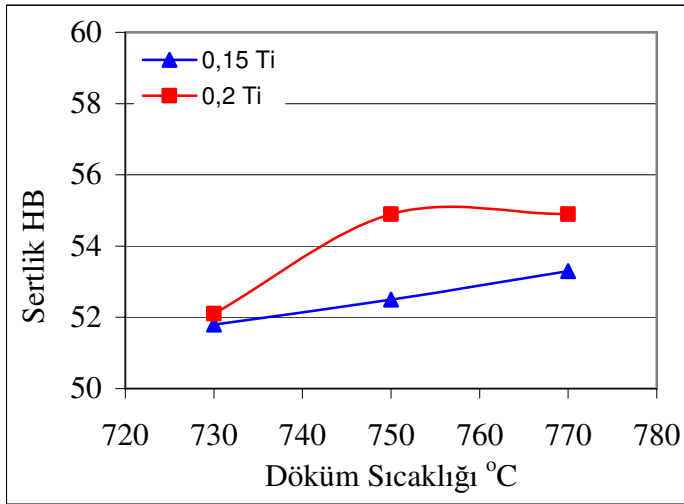
(b)

Şekil 6.17. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtıl işlemsiz, 250°C kalıp sıcaklığı, 90 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi

Haque ve arkadaşlarının (24) tane inceltme uygulanmış LM6 Al-Si alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmada döküm sıcaklığının 730°C'den 750°C'ye yükselmesi ile mukavemet değerinin az miktarda arttığı tespit edilmiştir (24).



(a)



(b)

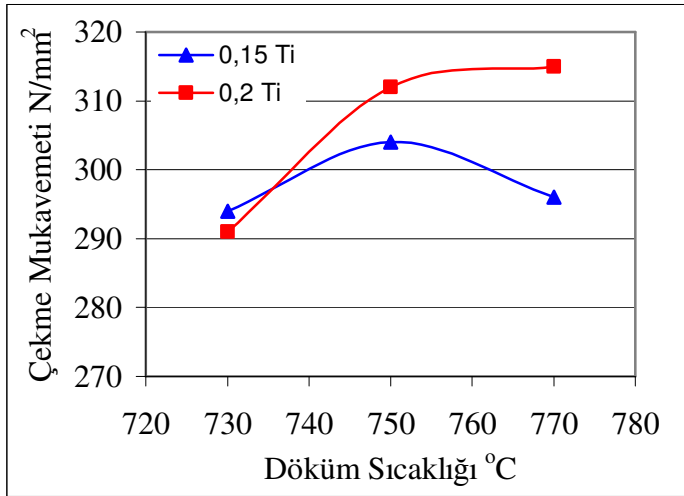
Şekil 6.18. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtıl işlemsiz, 280°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi

Şekil 6.18’de döküm ve kalıp sıcaklığı yükseldikçe % 0,2 kalıntı titanyum içeren numuneler 770°C döküm sıcaklığında % 0,15 kalıntı titanyum ihtiva eden numunelere benzer bir şekilde davranmış ve mukavemette bir azalma gözlenmiştir. Bunun nedeni döküm ve kalıp sıcaklıklarının aynı zamanda yükselmesi ile tane inceltmeyi sağlayan $TiAl_3$ parçacıklarının yüksek sıcaklıkta etkinliğini kaybetmesine neden olmasıdır.

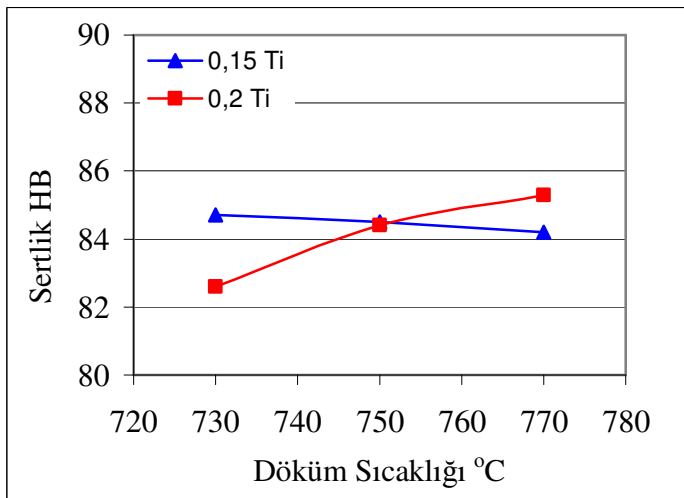
Al-Ti-B master alaşımlarında peritektik altındaki titanyum seviyeleri için inceltme etkisinin sıvı metaldeki $TiAl_3$ parçacıklarının sıvı faza geçmesine bağlı olarak azaldığı ve kaybolduğu tespit edilmiştir. Ayrıca $TiAl_3$ parçacıklarının morfolojisinin master alaşımın inceltme verimliliğini etkilediği görüldü. Blok şeklindeki tane incelticiler için inceltme etkisi, ilave edildikten sonra etkili hala gelmesi zaman almasına rağmen etkinliği uzun sürer (4).

Alüminyum döküm parçaların mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için üretimin her aşamasında özel işlemler ve özel ilgi gerektirmektedir. Isıl işlem uygulanmış alüminyumun ana yapısında önemli oranlarda magnezyum ile silisyum çözeltisi bulunur. Eğer bu malzemeye zorunlu yaşlandırma uygulanırsa, Mg_2Si fazı oluşturularak sertleşme sağlanmaktadır. Bu şekilde elde edilen mekanik özellikler alaşım içerisindeki magnezyum ve silisyum oranına bağlıdır (8).

Mg_2Si fazı, çoğunlukla birincil alüminyum içerisinde oluşmaktadır. Mg_2Si fazının mikroyapı içerisindeki dağılımı, homojen dağılıma yakın ve boyutları, düşük döküm sıcaklıklarında oluşan mikroyapı boyutlarından daha küçük şekilde olmaktadır (8).



(a)



(b)

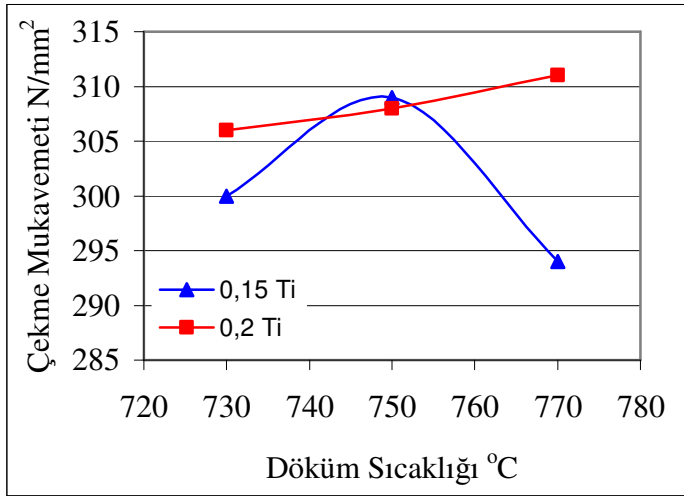
Şekil 6.19. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, T6 ısııl işlemli, 250°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi

Şekil 6.19'de içerisinde % 0,15 ve % 0,2 kalıntı titanyum ihtiva eden T6 ısııl işlemi görmüş numunelerin mukavemet ve sertlik değerleri gösterilmektedir. Aynı döküm şartlarında üretilen ısııl işlem yapılmamış numunelere göre mukavemette yaklaşık olarak % 50 oranında artış gözlenmiştir. İçerisinde % 0,2 kalıntı titanyum ihtiva eden numunede döküm sıcaklığı 730°C'de 291 N/mm², 750°C 312 N/mm² ve 770°C'de 315 N/mm²'ye yükselmiştir ve en yüksek çekme mukavemetine ulaşmıştır

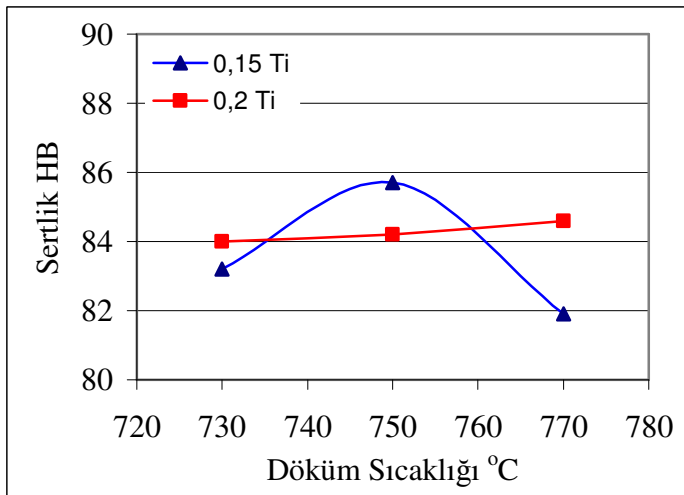
(Şekil 6.19). Genel olarak içerisindeki kalıntı titanyum oranı % 0,2 olan numunelerde sıvı metal sıcaklığı 770 °C'ye ulaşıldığında en yüksek çekme mukavemetlerine ulaşılmıştır.

Döküm sıcaklığının artması ile alüminyum içerisinde silisyumun çözünürlüğü artmaktadır ve buda katılaşma esnasında daha fazla çekirdek merkezi oluşmasına neden olmuştur (4).

% 0,15 kalıntı titanyum içeren numunelerde T6 ısıtıl işlemi yapılmış numuneler, ısıtıl işlem uygulanmamış numunelere benzer şekilde davranarak çekme mukavemeti döküm sıcaklığı 730°C'de 293 N/mm²'den 750°C'de 304 N/mm²'ye yükselmiş ve döküm sıcaklığının 770°C'ye yükselmesi ile 286 N/mm²'ye gerilemiştir (Şekil 6.19). Numune ısıtıl işlem uygulanmış olmasına rağmen 750°C döküm sıcaklığından sonraki sıcaklık artışında mekanik özelliklerde bir düşüş gözlenmiştir.



(a)

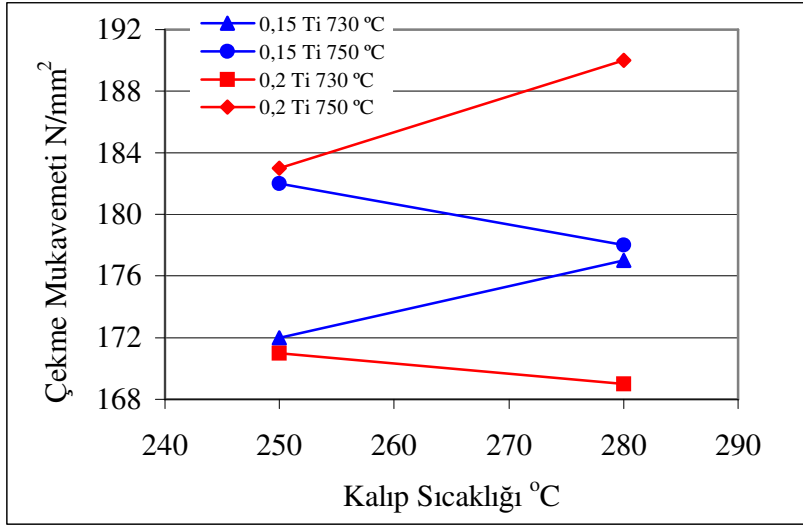


(b)

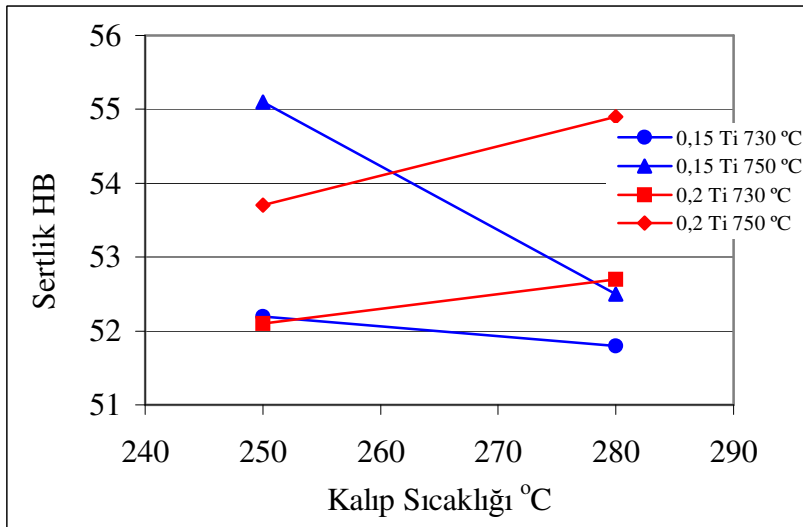
Şekil 6.20. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, T6 ısıtılmış, 280°C kalıp sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin döküm sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi

Şekil 6.20 a ve b’de içerisinde % 0,15 ve % 0,2 kalıntı titanyum ihtiva eden T6 ısıtılmış işlemi görmüş numunelerin çekme mukavemetleri ve sertlik değerleri gösterilmektedir. Aynı döküm şartlarında üretilen sadece kalıp sıcaklığı düşük olan Şekil 6.19 a ve b’deki numunelere göre çekme mukavemetlerinde kalıp sıcaklığının artmasıyla azalma gözlenmemiştir. Yapılan ısıtılmış işlem sonrasında kalıp sıcaklığının

etkisinin sürdüğü fakat kalıp açma süresinin ısıtma işlem sonrasında etkisi gözlenmemiştir.



(a)

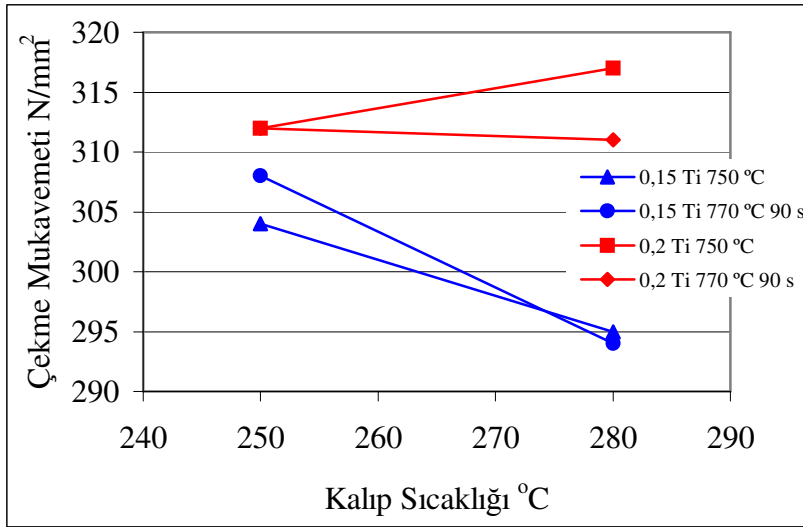


(b)

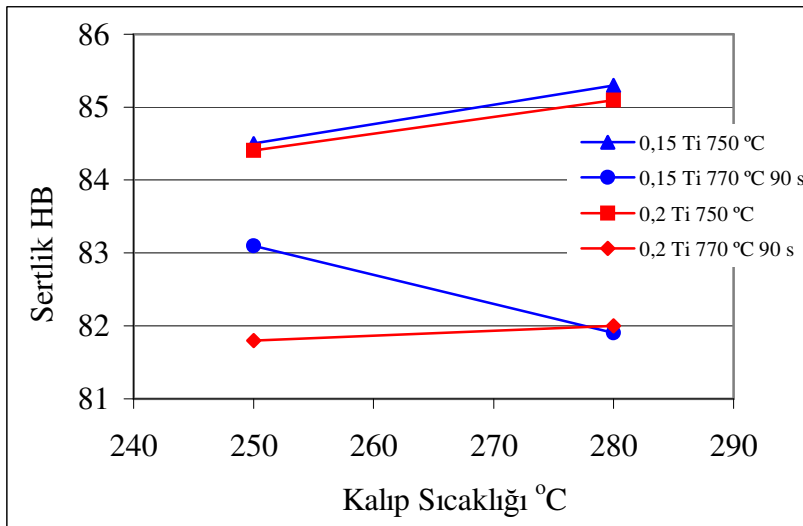
Şekil 6.21. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, ısıtma işlemleri, 730 ve 750°C döküm sıcaklığı, 60 saniye kalıp açma süresi sahip numunelerin kalıp sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi

Sertlik testi ile elde edilen verilere göre genel olarak tane inceltilmiş numunelerin sertlik değerlerinde bir artış görülmektedir.

Alüminyum içerisinde fazla miktarda katı çözelti yapabilen bakır, magnezyum ve çinko gibi elementler katılaşma sırasında küçük tane yapısının oluşmasına neden olurlar. Bundan dolayı yüksek oranda magnezyum ve bakır içeren alüminyum alaşımlarının kristal yapılara yüksek oranda silisyum içeren alüminyum alaşımlarına göre daha kolay inceltirilirler (5).



(a)



(b)

Şekil 6.22. Farklı oranlarda kalıntı titanyum içerikli, T6 ısıtılmış, 750 ve 770°C döküm sıcaklığı, 60 ve 90 saniye kalıp açma süresine sahip numunelerin kalıp sıcaklığına bağlı olarak a) çekme mukavemeti b) sertlik değerlerinin değişimi

Silisyum etkisi düşük titanyum oranlarında (% 0,1 Ti) daha belirgindir. Yüksek silisyum ilavelerinde tane küçültücülüğünde ya çok az ilave artış olmakta yada hiçbir ilave artış görülmemektedir (18).

Aynı döküm şartlarda sahip ısıtıl işlemsiz ve T6 ısıtıl işlemi yapılmış numunelerin çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinin karşılaştırılması Şekil 6.21 ve 6.22’de gösterilmiştir. Yapılan incelemelerde katılaşma hızındaki yavaşlamaya bağlı olarak dökümlerin mekanik özelliklerinde azalma meydana geldiğini göstermiştir. Bunun başlıca nedenleri düşük katılaşma hızının neden olduğu gaz gözenekleri ve zayıf besleme, mikro çekme poroziteleri ve tane boyutunun büyümesidir (3). Kalıbın sıcaklığı ve kalıp açma süresi arttıkça katılaşma hızı yavaşlar. Genel incelemelerde aynı döküm şartlarına sahip olarak üretilmiş çekme kuponlarında kalıp açma süresinin 60 ve 90 saniye olarak değiştirilmesinin numunelerin mekanik özelliklerinde bir değişime neden olmadığı gözlenmemiştir.

Şekil 6.22’de T6 ısıtıl işlem uygulanmış numunelere yapılan incelemelerde kalıp sıcaklığı ve kalıp açma süresinin değişiminin ısıtıl işlem sonunda bir etkisinin kalmadığı tespit edilmiştir.

Wang ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada tane inceltme işlemi uzamaya % 8,6 çekme mukavemetine % 46,2 etki etmektedir (25).

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ticari Etial 177 döküm alaşımı, Al5Ti1B ön alaşımı ile başarılı bir şekilde tane inceltirilmiştir. Etial 177 döküm alaşımının mekanik özellikleri tane inceltme ile geliştirilmiştir. Sıvı alüminyum içerisine çözülebilen aşılایıcılar ilave etmek en etkin tane inceltme metodudur.

Tane inceltirilmiş, içerisinde % 0,15 ve 0,2 kalıntı titanyum bulunan Etial 177 kalite döküm alaşımı ile farklı döküm, kalıp sıcaklıkları ve kalıp açma sürelerinde yapılan dökümlerde % 0,2 kalıntı titanyum ihtiva eden numunelerin sertlik ve çekme mukavemetleri % 0,15 kalıntı titanyum içeren numunelere göre daha iyidir.

% 0,15 kalıntı titanyum içeren numunelerin farklı döküm sıcaklıklarında dökülmesinde, döküm sıcaklığının 770 °C çıkmasıyla numunelerin çekme mukavemetlerinde düşüş gözlenmiştir. % 0,2 kalıntı titanyum içeren numunelerde 770 °C döküm sıcaklığında böyle bir düşüş görülmemiştir fakat 770 °C döküm sıcaklığı ile beraber kalıp sıcaklığının yükselmesiyle % 0,15 kalıntı titanyum içeren numunelerdeki gibi olmasada mekanik özelliklerinde az bir düşüş gerçekleşmiştir.

Kalıp açma süresindeki 30 saniyelik fark genel olarak numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinde değişikliğe neden olmamıştır.

T6 ısıt işlemleri uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerinde ısıt işlemleri görmemiş numunelere göre yaklaşık % 50 artış sağlanmıştır. İçerisinde % 0,2 kalıntı titanyum içeren numunelerde optimum proses parametreleri 770°C döküm sıcaklığı, 250°C kalıp sıcaklığı ve 60 s kalıp açma süresidir. İçerisinde % 0,15 kalıntı titanyum içeren numunelerde ise optimum proses parametreleri 750°C döküm sıcaklığı, 250°C kalıp sıcaklığı ve 90 s kalıp açma süresidir.

KAYNAKLAR

- 1) Ermiş, H. M., Yaman, B., Küçükkaragöz, S., Çiğdem, M., “Etial 145 Al-Si (A.A332) alaşımlarının modifikasyonu”, **2.Alüminyum Sempozyumu**, Seydişehir 98-113 (2003).
- 2) Lee, Y. C., Dahle, A. K., Stjohn, D. H., Hutt, J. E. C., “The affect of grain refinement and silicon content on grain formation in hypoeutectic Al-Si alloys”, **Journal of Materials Processing Technology**, A259 43-52 (1998).
- 3) Eruslu, N., “Alüminyum Alaşımlarının Dökümü ve Yapı Kontrolü” , **Segem Yayınları**, İstanbul 7-95 (1984).
- 4) Ibarra D. G., “Control of Grain Refinement of Al-Si Alloys by Thermal Analysis”, **Department of Mining and Metalurgical Engineering McGill University**, Montreal Canada 1-38 (1999).
- 5) Çavuşoğlu, E., Eruslu, N., Akdeniz, A., Altınışoğlu A., “Alüminyum ve Alaşımlarında Aşılama ile Tane Küçültme”, **3. Ulusal Alüminyum Kongresi**, Seydişehir, 136-139 (1978).
- 6) Uygun, G., Bozkurt, N., Geçkinli, E., “Alüminyum Bor ile Tane Küçültme ve Bor Dağılımının Otoradyografi ile Tespiti”, **4. Ulusal Metalurji Kongre ve Sergisi**, Seydişehir, 753-765 (1986).
- 7) Şenel, L., “Al-Si Döküm Alaşımlarının Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 31-56 (2004).
- 8) Muter, Ş., “Alüminyum Döküm Parçalarında Mekanik Özelliklerin Geliştirilmesi”, **4. Ulusal Metalurji Kongre ve Sergisi**, Seydişehir, 664-678 (1986).
- 9) Çakmak, H. F., “Eritilmiş Alüminyumun Özelliklerinin İyileştirilmesi ve Nitelik Denetimi”, **2. Alüminyum Sanayi Kongresi**, Seydişehir, 215-239 (1984).
- 10) K, Venkatesworlu, S. K., Das, M. Chakraborty, B. S., Murty “Infulunce of thermo-mechanical treatment of Al-5Ti master alloy on its grain refining performance on aluminium”, **Metarials Science and Engineering**, A 351 237-243 (2003).
- 11) Krishnan, T. S., Rajakopalan, P. K., Gund, B. R., Krishnan, J., Bose, D. K., “Development of Al-5%Ti-1%B master alloy”, **Journal of Alloys and Compounds**, 269 138-140 (1998).
- 12) Bryant, M., Pearson, J., “Tane İnceltme ve Alaşımlandırma”, **Alüminyum Dergisi**, Sayı:7 15-18 (1990).

- 13) Akgündüz, B., Altıntaş, S., “Al-5Ti-1B Alaşımlarının Alüminyum İngotlar Üzerine Tane İnceltme Etkileri”, **4. Ulusal Metalurji Kongre ve Sergisi**, Seydişehir, 1090-1108 (1986).
- 14) Serdaroğlu, R., “Alüminyum Dökümlerde Tane İnceltme ve Alaşımlandırma”, **Alüminyum Dergisi**, Sayı:4 35-38 (1990).
- 15) Lieserberg, O., Drossel, G., “Casting”, Aluminium Hand Book 2, **Aluminium Verlag GMBH**, Düsseldorf, 386-388-406 (2001).
- 16) Young, G. D. K., Dunville, B. T., Setzer, W. C., and Koch, F. P., “A Survey of Grain Refiners for Hypoeutectic Al-Si Alloys”, *Light Metals*, 72-84 (1991).
- 17) Birol, Y., “Tane Küçültme Uygulamaları için Yüksek Karbonlu Al-Ti-C Alaşımları”, **11. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 1497-1504 (2003).
- 18) Kori, S. A., Murty, B. S., Chakraborty, M., “Development of an Grain Refiner for Al-7Si Alloy and its Modification with Strontium”, **Materials Science and Engineering**, A283 94–104 (2000).
- 19) Erdoğan, R., “Ötektik Altı Alüminyum Silisyum Alaşımlarında 5/1 TiBor Ön Alaşımı ile Tane İnceltme İşleminin Sertlik ve Mikroyapı Üzerindeki etkisinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 24-32 (1993).
- 20) Demir, A., Açıkalmaz, M., “CaAl₄ İntermetaliklerinin Alüminyum Alaşımlarında Tane İnceltilmesine Etkisi”, **11. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 1448-1496 (2003).
- 21) Dorcid J. L., Verma, S. K., “Designation Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Casting”, **ASM Handbook 9nth Edition Volume 15**, B108-95 72-82 (1982).
- 22) Prasada, A. K., Rao, Das, K., Murty, B. S., Chakraborty, M., “Effect of Grain Refinement on Wear Properties of Al and Al-7Si alloy”, **Metarials Science and Engineering**, A 354 180-189 (2003).
- 23) Muthukumarasamy, S., Seshan, S., “Structure and Properties of Squeeze-Cast, ZA-27 Alloy-Based, Fiber-Reinforced MMC”, **AFS Transactions**, 537-546 (1995).
- 24) Haque, M. M., Ismail, A. F., “Effect of Superheating Temperatures on Microstructure and Properties of Strontium Modified Aluminium-Silicon Eutectic Alloy”, **Journal of Materials Processing Technology**, 162–163 312–316 (2005).

- 25) Wang, J., He, S., Sun, B., Guo, Q., “Grain Refinement of Al–Si Alloy (A356) by Melt Thermal Treatment”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141 29–34 (2003).

Fatih BAYPINAR 1980 yılında Konya’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Konya'da tamamladı. 1998-2002 yıllarında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği programını bitirdi. Şubat 2002 döneminde Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Yüksek Lisans eğitimine başladı, halen devam etmektedir. Yabancı dili İngilizce'dir.