



**TANE İNCELTİSİ İLAVELERİNİN
Al₇Si_{0,3}Mg ALAŞIMININ
TİTREŞİMLİ DÖKÜMÜNE ETKİSİ**

Abdulahdi KOŞATEPE

**Yüksek Lisans Tezi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Bilim Dalı
Dr. Öğretim Üyesi Çağlar YÜKSEL
2019
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TANE İNCELTİSİ İLAVELERİNİN $Al_7Si_{0,3}Mg$ ALAŞIMININ
TİTREŞİMLİ DÖKÜMÜNE ETKİSİ**

Abdulahdi KOŞATEPE

**METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Malzeme Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU



**TANE İNCELTİSİ İLAVELERİNİN $Al_7Si_{10}Mg$ ALAŞIMININ
TİTREŞİMLİ DÖKÜMÜNE ETKİSİ**

Dr. Öğretim Üyesi Çağlar YÜKSEL danışmanlığında, Abdulhadi KOŞATEPE tarafından hazırlanan bu çalışma 26/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı – Malzeme Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği (3/0)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi. Çağlar YÜKSEL

İmza :

Üye : Prof. Dr. Ersin ARSLAN

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 18.07.2019 tarih ve 29 / 80 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans

TANE İNCELTİSİ İLAVELERİNİN $Al_7Si_0,3Mg$ ALAŞIMININ TİTREŞİMLİ DÖKÜMÜNE ETKİSİ

Abdulahdi KOŞATEPE

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Malzeme Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YÜKSEL

Tane inceltme uygulaması alüminyum ve alaşımlarına uzunca bir süredir uygulanmaktadır. Bu uygulamanın temelinde titanyum ve bor elementlerinin hem kendileriyle hem de alüminyum ile oluşturduğu intermetalik fazlardan faydalanılmaktadır. Bu intermetalik fazlar sıvı fazdaki alüminyum atomlarının çekirdeklenmeleri için altlık görevi görmektedirler. Bununla birlikte tane inceltmede alaşım elementi ilavesi dışında titreşim de kullanılmaktadır. Bu titreşim ultrasonik ve mekanik titreşim olmak üzere en yaygın iki şekilde uygulanmaktadır.

Bu çalışmada titanyum ve bor ilaveleri yapılarak titreşimsiz ve titreşimli $Al_7Si_0,3Mg$ alüminyum alaşımının basamaklı kalıba dökümü gerçekleştirilmiştir. Bu dökümlerden 20, 10 ve 5 mm olmak üzere üç farklı kesit kalınlığına sahip numuneler incelenmiştir. Bu numunelerin her birine optik mikroskobundan alınan içyapı görüntülerine ImageJ görüntü analiz yazılımı kullanılarak ikincil dendrit kolları arası mesafe (SDAS), ikincil dendrit kolları uzunluğu (SDAL) birincil ve ötektik fazların oranları tayin edilmiştir. Ayrıca sertlik, içyapısal özellikleri ve elektrik özellikleri arasında ilişki kurulması için elektriksel iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2019, 50 sayfa

Anahtar Kelimeler: Tane inceltme, titreşimli döküm, katılaşma, alüminyum alaşımı, $Al_7Si_0,3Mg$

ABSTRACT

MS Thesis

EFFECT of GRAIN REFINEMENT ADDITIVES on VIBRATED CASTING Al7Si0,3Mg ALLOY

Abdulahdi KOŞATEPE

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy and Materials Engineering
Material Science Branch

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Çağlar YÜKSEL

For a long time, grain refinement process was applied to aluminium and its alloys. On the basis of this application, intermetallic phases consisting of titanium and boron elements reacted, both each other and aluminium were exploited. These intermetallic phases serve as nucleants for liquid aluminium atoms to nucleate. However, apart from alloying elements, vibrational methods were conducted to execute grain refinement in aluminium and its alloys. Ultrasonical and mechanical vibration methods are the most common applications in the vibrational casting techniques.

In this work, a metal cascaded mold was used to cast with vibration and without vibration having different amount of titanium addition to Al7Si0,3Mg aluminum alloy. Cascaded metal mold has three different section of 20, 10 and 5 mm and specimens from these sections were examined. Secondary dendrite arm spacing (SDAS), secondary dendrite arm long (SDAL), %proportion of primary and eutectic phases, section microstructures taken from optical microscope were determined via ImageJ image analysis software. Also, hardness, apart from microstructural characteristics, electrical conductivity values were measured to evaluate correlation between microstructure and mechanical and electrical properties.

2019, 50 pages

Keywords: Grain refinement, vibrational casting, solidification, aluminium alloys, Al7Si0,3Mg

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum bu çalışmada bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, çalışmalarım da bana içtenlikle yardımcı olan, yoluma ışık tutup her daim yanımda bulunan, onunla birlikte çalışmaktan onur duyduğum kıymetli hocam Sayın Dr.Öğr.Üyesi Çağlar YÜKSEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım da bana yardımcı olan arkadaşım Sayın Arş.Gör.Ahmet KABİL'e, cihaz kullanımlarında destekte bulunan Sayın Arş. Gör.Taha Çağrı ŞENOCAK'a teşekkür ederim. Çeşitli deney ve karakterizasyonda bizlere destek olan meslektaşım Özlem ÇELİKASLAN'a, aynı zamanda analizlerimizde ekipman ve cihaz desteği sağlayan ASSAN Alüminyum A.Ş ve çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca döküm deneylerinin gerçekleştirilmesini sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne ve laboratuvarlarını çalışmalarımızda bizlerle paylaşan değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Derya DIŞPINAR ve Sayın Prof. Dr. Ersin ARSLAN'a teşekkür ederim.

Hayat akışı içinde bana güvenen ve inanan eşim Kamile KOŞATEPE'ye, moral kaynağım olan kızım Miray Erva KOŞATEPE'ye, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan anneme, babama ve kardeşlerime teşekkür ederim.

Yapmış olduğum bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum

Abdulhadi KOŞATEPE

Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Alüminyum ve Alaşımları	3
2.1.1 Alüminyum-Silisyum alaşımları	7
2.1.2. Al-Si alaşım içyapılarının özelliklere etkileri	8
2.2. Dendritler Arası ve Dendrit Kol Mesafesi	8
2.2.1 Katışkı (İnklüzyon) ve gözeneklilik	10
2.2.2. Tane inceltilmesinin faydaları	12
2.3. Al-Si Alaşımlarında Tane İnceltme Sistemleri	13
2.3.1. Ti eklenmesi ile tane inceltme	14
2.3.2. B eklenmesi ile tane inceltme.....	15
2.3.3. Al-Ti-B eklenmesi ile tane inceltme	16
2.3.4. Al-Ti-C eklenmesi ile tane inceltme	17
2.3.5. Titreşim ile tane inceltme	18
2.4. Tane İnceltme Yöntemlerine Etki Eden Parametreler.....	19
2.4.1. Alaşım elementi etkisi	19
2.4.2. Döküm sıcaklığının etkisi.....	20
2.4.3. Döküm yapılan kalıp sıcaklığının etkisi	21
2.4.4. Dökümün soğuma hızının etkisi.....	21
2.4.5. Element ilavesini ve uygulanan yöntem süresinin etkisi.....	22
2.4.6. Katılma yöntemlerinin etkisi.....	22
2.4.6.a. Mekanik titreşim.....	22
2.4.6.b. Ultrasonik titreşim	23

2.4.6.c. Elektromanyetik titreşim	24
2.4.6.d. Çalkantı ve dinamik metotlar	25
2.4.6.e. Döndürme ve üfleme ile karıştırma	25
2.4.6.f. Isıl yöntem ve kalıp boyası kullanma	26
2.4.6.g. Manyetik ve elektromanyetik karıştırma.....	26
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	28
3.1. Deneysel Malzemeler	28
3.1.1. Dirençli fırın	29
3.1.2. Titreşim cihaz ve döküm kalıbı	30
3.2. İy yapı Karakterizasyon Çalışmaları	30
3.2.1. Metalografik ölçümler	30
3.2.2. Faz, DAS, SDAS, DAL, SDAL analizi.....	31
3.2.3. Elektriksel iletkenlik ölçümleri	32
3.2.4. Sertlik ölçümleri	33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	34
4.1. Giriş	34
4.2. İy yapı Karakterizasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	34
4.3. Birincil ve Ötektik Fazlar ile SDAS ve SDAL Sonuçlarının Değerlendirilmesi	36
4.4. Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	42
4.5. Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi	44
5. SONUÇ.....	46
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	51

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	: Alüminyum
B	: Bor
BSD	: Brinell Sertlik Değeri
C	: Karbon
HV	: Vickers Sertlik
Si	: Silisyum
ρ	: Yoğunluk

Kısaltmalar

%IACS	: % Uluslararası Tavlanmış Bakır Standardı
DAL	: Birincil Dendrit Kolları Uzunluğu
DAS	: Birincil Dendrit Kolları Arası Mesafe
DCS	: Dendrit Hücre Boyutu
GC	: Yerçekimi Döküm
HPDC	: Yüksek Basıncılı Döküm
ND	: Titreşimsiz Döküm
SDAL	: İkincil Dendrit Kolları Uzunluğu
SDAS	: İkincil Dendrit Kolları Arası Mesafe
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TD	: Titreşimli Döküm
UST	: Ultrasonik Titreşim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Alüminyum metalinin dünyada kullanım alanları ve üretim yöntemleri.....	4
Şekil 2.2. İmal usullerinin enerji kullanımı ve verimlilik kıyaslaması	6
Şekil 2.3. Mekanik titreşim ve duvar kalınlığının tane büyüklüğü ve SDAS üzerindeki etkileri	9
Şekil 2.4. Numune içyapısındaki gözeneklilik (a) interdendritik gözenekliliğe eşlik eden gaz gözenekliliği (b) interdendritik gözeneklilik	10
Şekil 2.5. Al-Si faz diyagramı.....	13
Şekil 2.6. Al-Ti faz diyagramı	15
Şekil 2.7. Al ₅ Ti ₁ B ilave edilmesi ile kesit kalınlığına göre tane boyutları.....	17
Şekil 2.8. Al-5Ti-1B ve Al-3Ti _{0,75} C tane inceltme etkileri	18
Şekil 3.1. Ergitmede kullanılan alüminyum külçesi	28
Şekil 3.2. Al ₅ Ti ₁ B ön alaşımı	29
Şekil 3.3. Dirençli fırın	29
Şekil 3.4. (a) Titreşim cihazı (b) Döküm kalıbı	30
Şekil 3.5. Optik mikroskop	31
Şekil 3.6. İmageJ programı	32
Şekil 3.7. Elektrik iletkenlik ölçüm cihazı.....	32
Şekil 3.8. Brinell sertlik ölçüm cihazı.....	33
Şekil 4.1. Döküm parçası	34
Şekil 4.2. Kalın kesit (20 mm) için ağırlık %0,1, 0,2 ve 0,3 titreşimli ve titreşimsiz dökümlerin içyapı görüntüleri	36
Şekil 4.3. Orta kesit (10 mm) için ağırlık %0,1, 0,2 ve 0,3 titreşimli ve titreşimsiz dökümlerin içyapı görüntüleri	37
Şekil 4.4. İnce kesit (5 mm) için ağırlık %0,1, 0,2 ve 0,3 titreşimli ve titreşimsiz dökümlerin içyapı görüntüleri	38
Şekil 4.5. (a) Titreşimsiz numuneler (b) Titreşimli numuneler için SDAS ölçümleri (c) Titreşimsiz numuneler (d) Titreşimli numuneler için SDAL ölçümleri	40
Şekil 4.6. SEM görüntüsü %0,2 Ti içeriği	41

Şekil 4.7. SEM görüntüsü %0,3 Ti içeriği	41
Şekil 4.8. Titanyum içeriğine göre titreşimsiz numunelerin iletkenlik değerleri	43
Şekil 4.9. Titanyum içeriğine göre titreşimli numunelerin iletkenlik değerleri.....	43
Şekil 4.10. Al ₇ Si _{0,3} Mg alaşımının titreşimli ve titreşimsiz döküm ürünlerinin ortalama iletkenlik değerleri.....	44
Şekil 4.11. Ti oranlarına göre titreşimsiz numunelerin sertlik ölçümleri	44
Şekil 4.12. Ti oranlarına göre titreşimli numunelerin sertlik ölçümleri	45



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırması.....	5
Çizelge 2.2. Al-Si alaşımlarının kimyasal kompozisyonu.....	7
Çizelge 2.3. Alüminyum alaşımlarında görülen inklüzyon türleri	11
Çizelge 2.4. Inklüzyon türleri ve boyutları	11
Çizelge 2.5. Alüminyumda tane inceltme etkileri	20
Çizelge 3.1. Alüminyum külçenin kimyasal bileşimi.....	28
Çizelge 4.1. Üretilen numunelerin kimyasal kompozisyonları.....	35

1. GİRİŞ

Günümüz otomotiv ve havacılık endüstrisi başta olmak üzere hemen her alanda maliyet, kalite emniyet ve estetik oldukça önemlidir. Bu parametreler birbirine bağlı olmakla birlikte, kalite ve emniyetin artışına bağlı olarak maliyetin düşük oranlarda artması mühendislik araştırmalarının ve üretim yöntemlerinin temelini oluşturmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının hafifliği, yüksek korozyon dayanımı, yüksek spesifik mukavemeti, iyi dökülebilirliği, geri dönüştürülebilir olması, alev almazlık ve toksik olmayışı, iyi işlenebilir olması ve dekoratif özelliklerinden dolayı dünyada yaklaşık 25 milyon tonun üzerinde tüketimi ile en çok kullanılan demir dışı metalidir. Alüminyum döküm alaşımları düşük maliyetleri, iyi dökülebilirliği, istenilen mukavemet değerlerine ulaşabilirliği ve üstün özelliklerinden dolayı otomotiv sektöründe fren, motor ve araç iskelet parçalarında kullanıldığı gibi uçak endüstrisinde de oldukça önemli parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada $Al7Si0,3Mg$ (A356) alaşımına, ön (master) alaşımlarından biri olan $Al5Ti1B$ eklenerek ağırlık %0.1, 0.2 ve 0.3 Ti içeriğinde sabit genlikli mekanik titreşim altında basamaklı kalıba dökülmüştür. Sabit genlikli mekanik titreşim altındaki kalıp içerisine yapılan dökümün titanyum içeriği ve kalıp basamak kesiti (20, 10 ve 5 mm) dikkate alınarak içyapı, sertlik, yapı içerisinde oluşan fazlar, ve elektrik iletkenlik değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Üretilen alaşımlarda, oluşan fazları ve içyapı incelemeleri için optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Sertlik incelemeleri için Brinell sertlik (HB) cihazı, elektrik iletkenlik incelemeleri için uluslararası tavlanmış bakır standardına (% IACS) uygun ölçüm yöntemi belirlenmiştir.

Belirlenmiş olan yöntem ve teknikler ışığında yapılan bu çalışmada amaçlanan tane inceltme yöntemlerinin bir arada kullanarak, katılaşma sırasında oluşan dendritlerin boyutlarının küçültülmesini ve kırılmalarını sağlayarak küresel hale getirilmesi ve döküm ürününün tane büyüklüğünün düşürülmesidir. Bu sayede döküm alaşımının

mukavemetini arttırarak düşük maliyetli yüksek kalitede alüminyum alaşımların üretilmesi hedeflenmektedir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Alüminyum ve Alaşımları

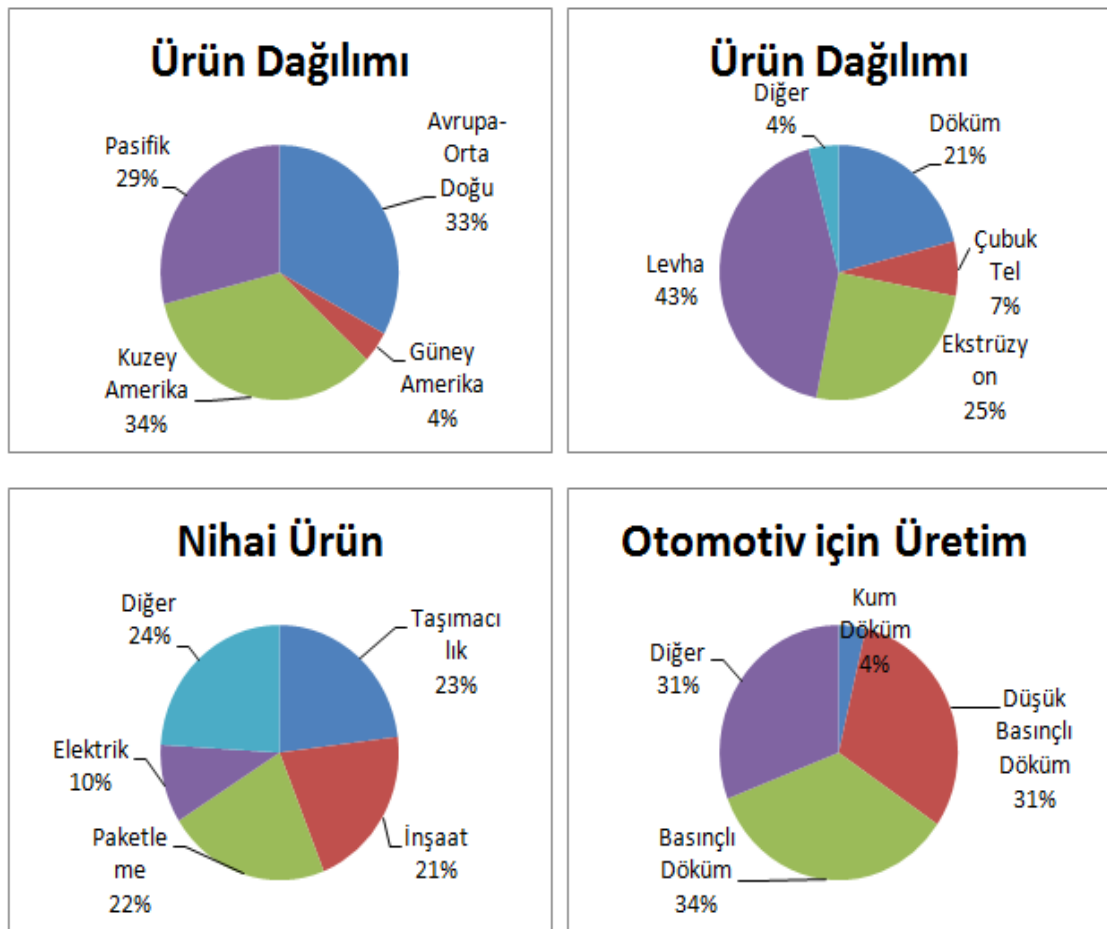
Alüminyum doğada oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan elementtir. Bununla birlikte mühendislik yapılarında demir esaslı malzemelerden sonra alüminyum diğer metallere göre sahip olduğu üstün mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikler sayesinde günümüzün en çok kullanılan metalidir. Alüminyumun ideal ve ekonomik bir malzeme olarak seçilmesini ve bu sayede en çok kullanılan malzemeler arasında yerini almasını aşağıda sıralanan özellikler sayesinde sağlanmaktadır (Başer 2012). Alüminyum metali ışığı iyi yansıtmasından ve kolay işlenebilir olmasından dolayı dekorasyon malzemesi olarak tercih edilme sebebidir (Koşatepe 2016).

- Düşük yoğunluk,
- Yüksek özgül (spesifik) mukavemet,
- Geri dönüştürülebilir,
- Yüksek korozyon direnci,
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenliği,
- Dekoratif ve parlaklık,
- Toksik olmayışı, patlama ve alev almazlık,
- Kolay işlenebilirlik, birçok yöntemle yüzey işlemine tabi tutulabilmesi,
- Çok geniş malzeme çeşitliliği,
- Manyetik nötralize

Alüminyumun yukarıda sayıldığı gibi üstün özelliklere sahip olması, geniş ölçekte kullanılması için çok uygun olmasını göstermesine rağmen, saf halde alüminyumun mukavemetinin oldukça düşük olması sebebiyle kullanım alanı oldukça sınırlı kalmaktadır. Bu sebeple alüminyum esaslı bir malzeme üretmek ve kullanmak için alaşımlama yapılması gerekmektedir. Saf alüminyumun mekanik, fiziksel ve kimyasal

özelliklerini geliştirmek için Si, Mg, Cu, Ti, Cr ve Zn gibi elementler eklenilerek alaşımlandırma yapılmaktadır (Moon *et al.* 1999).

Şekil 2.1’de alüminyum ve alaşımlarının dünyada bölgelere göre, kullanım oranları, üretim yöntemleri ve otomotiv sanayisinde kullanılan parçaların üretim yöntemleri grafik üzerinde verilmiştir.



Şekil 2.1. Alüminyum metalinin dünyada kullanım alanları ve üretim yöntemleri (Başer 2012)

Alüminyum alaşımları döküm ve işlem (dövme) alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Alüminyum alaşımları sınıflandırılmasında ABD Alüminyum Birliği (U.S. Aluminum Association) tarafından alaşımı tespit etmek için 4 haneli rakam sistemi

kullanılmaktadır. Bu isimlendirme sistemine göre döküm alaşımları Çizelge 2.1’de verilmektedir (Başer 2012).

Çizelge 2.1. Alüminyum döküm alaşımlarının ticari sınıflandırması (Başer 2012)

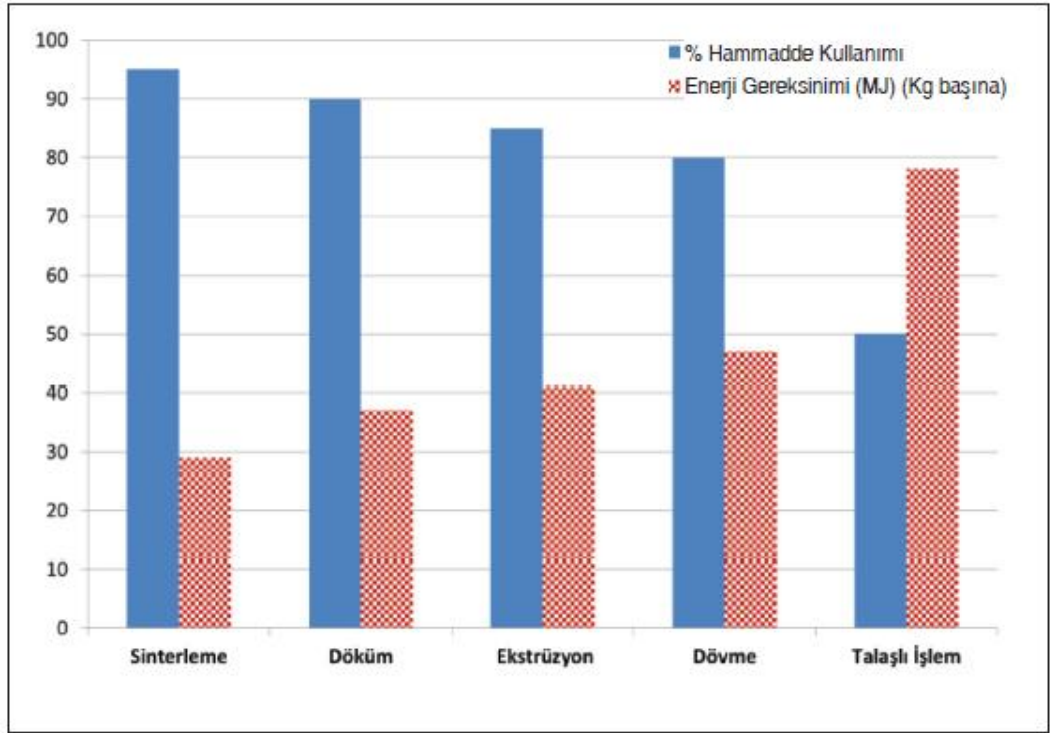
Sınıflandırma	Temel Alaşım Elementi	Kullanım Alanları
1xx.x	Saf alüminyum (%99,00 ve üzeri saflıkta)	Elektrik ve Kimya Endüstrisinde
2xx.x	Bakır	Havacılık Sanayi
3xx.x	Silis ile Magnezyum ve/veya Bakır	Boru, Sıvı tankları, Mimari uygulamalarında
4xx.x	Silisyum	Otomobil Sanayi
5xx.x	Magnezyum	Korozyona dirençli alanlar
6xx.x	Kullanılmıyor	Ekstrüzyonla imal edilen parçalar
7xx.x	Çinko	Uçak parçaları ve yüksek dayanım istenilen alanlar
8xx.x	Kalay	Uçak ve Uzay yapılarında
9xx.x	Diğer Elementler	

Alüminyum döküm alaşımları yüksek korozyon direnci, yüksek ısı iletkenlik, iyi işlenebilirlik, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve süneklik gibi üstün özelliklere sahip olması, başta otomotiv sanayisi olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Ancak katılaşma esnasında %(3,5–8,5) arasındaki hacimsel çekme oranları alüminyum alaşımları dökümlerinin başlıca problemlerinden biridir (Campbell 2015).

Alüminyum üretim yöntemlerinden biri olan döküm teknolojisi, üretim yöntemlerinin en çok kullanılanları arasında yerini almaktadır. Döküm yöntemini etkin kılan avantajları;

- Karmaşık yapıli parçaların üretimi basit ve tek parça olarak elde edilir,

- Döküm sonrası ek işlemlere gerek duymadan kullanılabilir,
- Hızlı ve etkili seri üretime uygundur,
- Bazı parçaların döküm ile üretilmesinin kolay ve avantajlı olması,
- Büyük ve geniş boyutlarda üretilmesi imalat zorluğunun aşılması ve ekonomiklik açılardan avantajlar sağlar,
- Farklı durumlarda dökümle üretim oldukça ekonomiktir,
- Bazı malzemeler döküm dışında çok zor üretilebilir hatta üretilemezler.



Şekil 2.2. İmal usullerinin enerji kullanımı ve verimlilik kıyaslaması (Çam 2001)

Şekil 2.2’de döküm yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlarının diğer geleneksel yöntemlere kıyaslandığında ürün/harcanan enerji bakımından oldukça avantajlı olduğu görülmektedir (Çam 2001).

2.1.1 Alüminyum-Silisyum alaşımları

Alüminyum alaşımları içerisinde bulunan Alüminyum-Silisyum (Al-Si) alaşımları, yüksek dayanım, tokluk ve yüksek sertlik özellikleri sergilemekte olup, bu özellikler tıpkı diğer tüm mühendislik malzemeleri gibi Al-Si alaşımlarının da içyapıları ile doğrudan alakalıdır. Ayrıca fiziksel ve kimyasal özellikleri açısından karbon (C) elementine benzerlik gösteren silisyum (Si) elementi, Al alaşımlarında en çok kullanılan elementler arasında ilk sıralarda yer almaktadır. Bunun sebebi alüminyumun ergime noktasını düşürmesi, döküm katılaşırken çekmeyi azaltması, ayrıca döküm kabiliyetini de (akışkanlık) oldukça arttırmasıdır (Palazzo 1988).

Al-Si alaşımları toplam alüminyum döküm parçalarının %(85–90) gibi bir oranını teşkil etmektedir (Palazzo 1988). Silisyum elementi sıvı metalin akıcılığını ve mekanik özelliklerini arttırmakta iken yoğunluk ile ısı genleşme katsayısını azaltmaktadır. Al-Si alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyi dökülebilirlik özellikleri ve yaşlandırma ile mekanik özellikleri geliştirildiğinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır (Edwards 2004).

Alüminyum alaşımlarının dökümle üretimi ve yapı kontrolü incelemelerinde silisyum içeriğinin artması ile döküm ürünün mekanik özelliklerinde artış meydana getirdiği görülmüştür. Al-Si alaşımları içerisinde esas element olan silisyumun yanında ağırlıkça %0,3 oranında Mg bulunur (Chen 2014).

Çizelge 2.2. Al-Si alaşımlarının kimyasal kompozisyonu (Chen 2014)

Element	Oran	Element	Oran
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	%0-3	P	%0,01'den az
Zn	%0-3	Al	Geri Kalan

2.1.2. Al-Si alaşım ıçyapılarının özelliklere etkileri

Alüminyum alaşımlarında mekanik özelliklere en önemli etkiyi yapı ıçerisindeki ötektik silis boyutu, dağılımı ve morfolojisi yapmaktadır.  çyapı ıçindeki silisyumun boyutu, morfolojisi ve dağılımı, alaşımın döküldükten sonra soğuma hızının değiştirilmesi veya silisyumun yapı ıçerisindeki davranışını değiştiren farklı elementler eklenmesi ile değişebilir.

Alüminyum-Silisyum alaşım sisteminde ötektik silikonun morfolojisi ve dağılımı, mekanik özelliklerde meydana gelen değişiklik üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu göstermiş olsa da birincil alüminyum fazın boyutu ve morfolojisi ile gözeneklilik dağılımının da önemli bir rol oynayabileceğini göstermiştir (Puga *et al.* 2011). Bu değişiklik Al-Si alaşımlarının modifikasyonu olarak tanımlanmakta ve bu modifikasyon genellikle alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirmek ıçin yapılmaktadır (Lee *et al.* 1999).

Ötektik karışımı oluşturan fazlardan α -fazı oda sıcaklığında %1'den daha az silisyum ıçeren alüminyum esaslı bir katı eriyiktir. Ötektik fazı oluşturan bir diğer faz olan β ise, ıçerisinde çok az alüminyum bulunduran neredeyse saf silisyum olan katı eriyiktir (Chen 2014).

2.2. Dendritler Arası ve Dendrit Kol Mesafesi

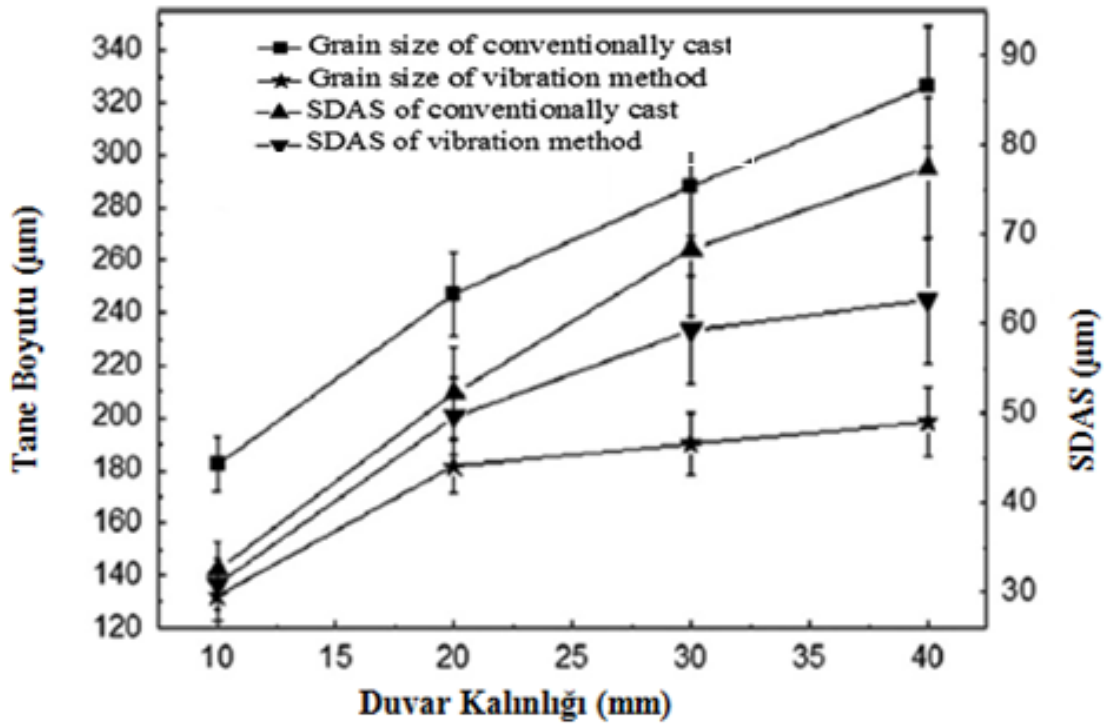
Katılaşma başladığında ilk olarak oluşan faz dendritik morfolojiye sahip birincil alüminyum fazıdır (Yüksel 2016).

Döküm  retim yönteminde, metal ve alaşımlarının katılaşma sırasında katılaşma hızı, termal gradyant, yolluk sistemi, soğuma oranı ve lokal katılaşma zamanı dendritik yapıyı doğrudan etkilemektedir. Dendritik yapı, katılaşma parametrelerine bağlı olarak birincil, ikincil veya üçüncül olabilir. Bölgesel katılaşma zamanının artması ile SDAS

artmakta iken soğuma hızının artması ile SDAS azalmaktadır ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin arttığı belirlenmiştir (Tunçay 2012).

Döküm yapılan kalıplarda soğutucu etkisi dendrit kolları arasındaki mesafeyi (DAS) ve bundan dolayı da malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. İkincil dendrit kolları arası mesafenin (SDAS) uzun ya da kısa olması tercih edilen soğutucunu türüne ve kalınlığına bağlıdır (Peres *et al.* 2004).

Çalışmada ortalama tane büyüklüğü, SDAS ve α -Al birincil fazının morfolojisi ölçülmüştür. Konvansiyonel dökümden elde edilen numunelerde duvar kalınlığının 10mm'den 40mm yükselmesiyle tane büyüklüğü ve SDAS'da yaklaşık $182\mu\text{m}$ 'den $326\mu\text{m}$ 'ye ve $33\mu\text{m}$ 'den $77\mu\text{m}$ 'ye kadar artışlar gözlemlenmiştir. Kalıp et kalınlığı arttıkça da tane inceltme derecesinin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 2.3'de mekanik titreşimin tane boyutu, SDAS ve morfoloji değişikliği verilmiştir (Jiang *et al.* 2014).

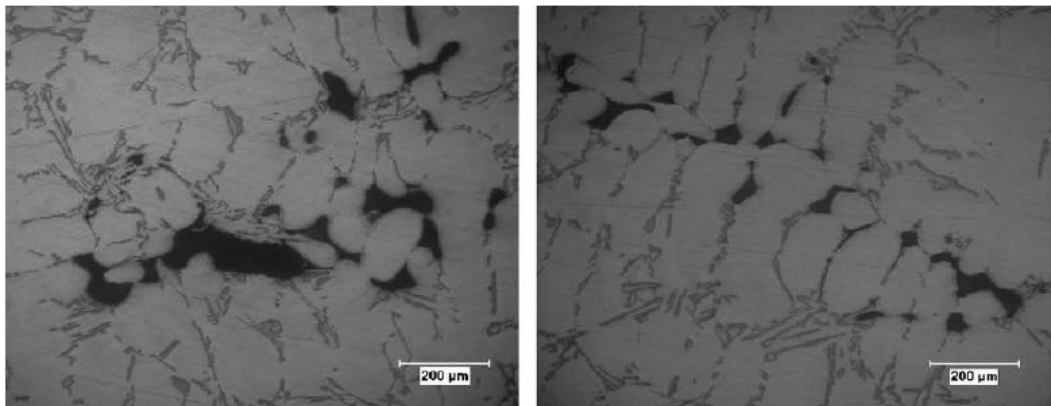


Şekil 2.3. Mekanik titreşim ve duvar kalınlığının tane büyüklüğü ve SDAS üzerindeki etkileri (Jiang *et al.* 2014)

2.2.1 Katışkı (İnklüzyon) ve gözeneklilik

Döküm işleminde içyapıyı kontrol etmek, bugünkü döküm endüstrisinin karşılaştığı ana zorluklardan biri olarak kabul edilir (Chirita *et al.* 2009). Birçok araştırmacı metal ve alaşımlarının katılaşması esnasında sonik ve ultrasonik karakterli mekanik titreşimlerinin, geleneksel olarak elde edilen ürünlerin makro ve mikro yapıları değiştirdiğini keşfetmişlerdir. En çok gözlenen etki istenmeyen kolan bölgelerinin engellenmesi ve ince taneli yapıların oluşturulmasıdır. Yüksek yoğunluklu sonik ve ultrasonik titreşim erimiş metallere yayılırken gözenekliliğin azalmasıyla ortaya çıkan etkiler şu başlıklar altında sıralanabilir; inceltme, dağıtma etkileri ve gaz almadır (Vivès 1993).

Mekanik titreşimin, Al-Si alaşımlarının gözeneklilik ve yoğunluk özellikleri üzerindeki etkisi hakkında farklı bildiriler bulunmaktadır. Bazı araştırmacılar titreşim ve kontrastın uygulanmasıyla gözeneklilik oranının azaldığını bildirirken bazı araştırmacılar ise gözenekliliğin arttığını bildirirler. Sözü edilen bu çalışmalar yüksek soğuma oranında mekanik titreşim etkisi altında katılaşan alaşım sistemleridir. Son olarak döküm ürünlerinin yapısındaki gözenekliliğin, metal sıvısı içerisinde çözünmüş hidrojen ve sıvının dendrit kolları arasındaki boşluklara yetersiz kütle beslemesinden kaynaklandığı bilinmektedir (Taghavi *et al.* 2009).



(a)

(b)

Şekil 2.4. Numune içyapısındaki gözeneklilik (a) interdendritik gözenekliliğe eşlik eden gaz gözenekliliği (b) interdendritik gözeneklilik

Elde edilmiş numunedeki gözenekler genellikle Şekil 2.4 (a-b)'de gösterildiği gibi, dendrit kolları arasında, interdendrit bölgelerinde veya ötektik bölgelerinde bulunur (Taghavi *et al.* 2009).

İnklüzyonlar döküm malzemelerinde mekanik özellikleri, işlenebilirlik kabiliyetini ve korozyon dirençlerini olumsuz etkilemektedir. Bu yüzden yapıda inklüzyonların oluşumu engellenmelidir. İnklüzyonlar malzemede farklı boyut ve görünüşte, mikron-milimetre seviyesine kadar değişebilir. Döküm alaşımlarında görülen inklüzyon türleri ve boyutları Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'de verilmiştir (McDowell *et al.* 2003; Tunçay 2012).

Çizelge 2.3. Alüminyum alaşımlarında görülen inklüzyon türleri (Tunçay 2012)

Türü	Oksitler	Karbürler	Boritler	Nitrürler	İnter metalikler
Formüller	MgAl ₂ O ₄	AlC ₄	TiB ₂	AlN	TiAl ₃
	Al ₂ O ₃	SiC	AlB ₂		TiAl
	MgO				NiAl
	SiO ₂				Ni ₃ Al
	CaO				

Döküm malzemelerinin içerdiği inklüzyon boyutları A, B, C, D, E olarak sınıflandırılır. Çizelge 2.4'de türlerin boyutları verilmiştir

Çizelge 2.4. İnklüzyon türleri ve boyutları (McDowell *et al.* 2003)

İnklüzyon Tipi	İnklüzyon boyutları
A	Dağıtılmış mikro boşluklar ve Si parçacıkları büyük boşluk değildirler.
B	Yüksek seviyede mikro gözeneklilik; Yaklaşık 60-300µm
C	Büyük gözenekler > 3 DCS
D	Serbest yüzeydeki gözenek çapı > 3 DCS
E	Geniş oksit filmler > 3 DCS

Çizelge 2.3’de alüminyum alaşımlarında oluşan inklüzyonların boyutları yaklaşık 0.1-5000µm arasında değişiklik gösterirken, alüminyumun ergime sıcaklığından çok daha yüksek sıcaklıklarda ergime sıcaklığına sahiptirler (Campbell 2006). Ayrıca Çizelge 2.4’de verilen boyut ifadelerinde dendrit hücre boyutuna (DCS) göre kıyaslama yapılmaktadır.

2.2.2. Tane inceltilmesinin faydaları

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, alaşımların ince taneli olması mekanik ve morfolojik özellikler açısından çok önemli etkilere sahip olduğu bulunmuştur. Bunlardan bazıları, kaba taneli alaşıma göre ince taneli alaşımlarda çekme özellikleri, sertlik ve mukavemet değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Pongen *et al.* 2019). Ayrıca döküm işlemini kolaylaştırdığı, döküm hatalarını azalttığı ve dolayısıyla döküm kalitesini arttırdığı için alüminyum alaşımlarının tane inceltilmesi arzu edilir (Fan *et al.* 2015).

Alaşım sistemleri üzerine yapılan çalışmalarla elde edilen ince taneli yapılarda, işlem görmemiş ürünlere göre mekanik özelliklerinde artış, içyapının daha homojen olması ve gözeneklilikte azalma gözlemlenmektedir. Tane boyutu ile mekanik özellikler arasındaki ilişki Hall-Petch denklemi yardımıyla irdelenmiş ve bu denkleme göre tane boyutu-mekanik özellikler arasında ters orantı olduğu iddia edilmiştir (Gürsoy vd 2015).

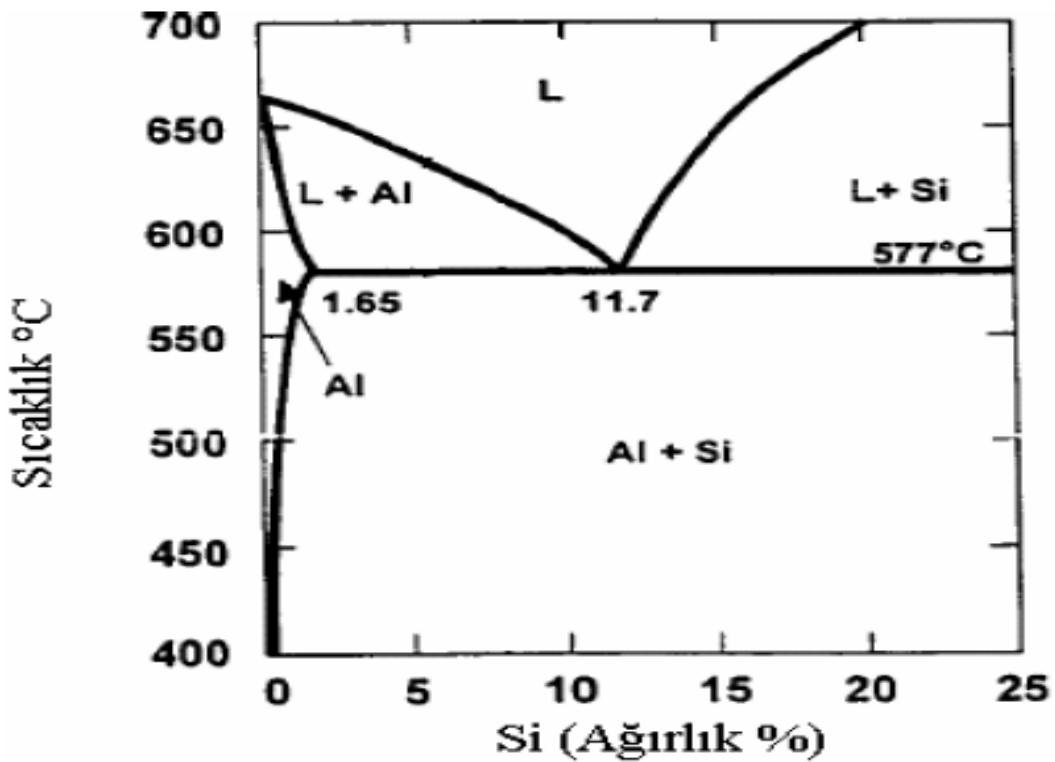
Tane inceltici olan ön alaşımlar nihai ürünün daha ince taneli olarak elde edilmesi amacıyla sıvı metale ilave edilirler. Bu ön alaşımlar ince taneli yapının oluşmasını sağlarken tane sınırı sayısını da arttırmaktadır. Artan tane sınırı sayısı mekanik özelliklerde bir artışa ve empürüte seviyesinde de azalışa neden olmaktadır (Uludağ 2016).

Sonuç olarak döküm işleminde ince tanelere ulaşmakla, mikro gözeneklerin ve ikincil fazların dağılımıyla döküm ürünün homojenliği sağlanmış olacaktır. Aynı zamanda tane inceltme ile tokluk, akma mukavemeti, dökülebilirlik, işlenebilirlik ve yüzey pürüzlülüğü özelliklerinde önemli iyileşme görülmektedir (Kurban vd 1997).

2.3. Al-Si Alaşımlarında Tane İnceltme Sistemleri

Alüminyum döküm alaşımlarında içyapı ve tane boyutu, eriğinin katılaşma esnasında ve katılaşmadan sonra kontrol altında tutulması ve uygun amaçlar için üretilmesi ile sağlanabilir.

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi alüminyum–silisyum faz diyagramında denge koşullarında ötektik sıcaklığına $\sim 577^\circ\text{C}$ ve %11,7 Si oranında ötektik bileşimine sahiptir. Ötektik karışımı oluşturan fazlardan α fazı oda sıcaklığında %1’den daha az Si ihtiva eden Al temelli bir eriyiktir. Ötekiği oluşturan diğer faz β ise, nerdeyse saf Si olan çok az Al içeren Si temelli bir katı eriyiktir. Ötektik altı Al-Si alaşımlarının yapısı, dallantılı bir şekilde olup α birincil fazı ile bu dallantılar arasında kümelenmiş ötektik karışımdan oluşur. Ötektik üstü Al-Si alaşımlarında ise yapı ötektik karışımı ile β fazından oluşmuştur (Baypınar 2005).



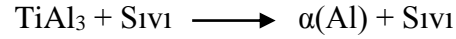
Şekil 2.5. Al-Si faz diyagramı

Çözünmüş elementlerin alaşım içerisinde tane inceltme üzerindeki etkisi incelendiğinde hem Çözünen Büyüme Teorisi hem de Serbest Büyüme Teorisi, çözünen elementlerin α -Al fazının büyüme hızı üzerindeki engelleme etkisini, özellikle de büyüme engelleme parametresinin saf Al'nin ortalama tane büyüklüğü üzerindeki etkisini vurgulamaktadır (Hong *et al.* 2018).

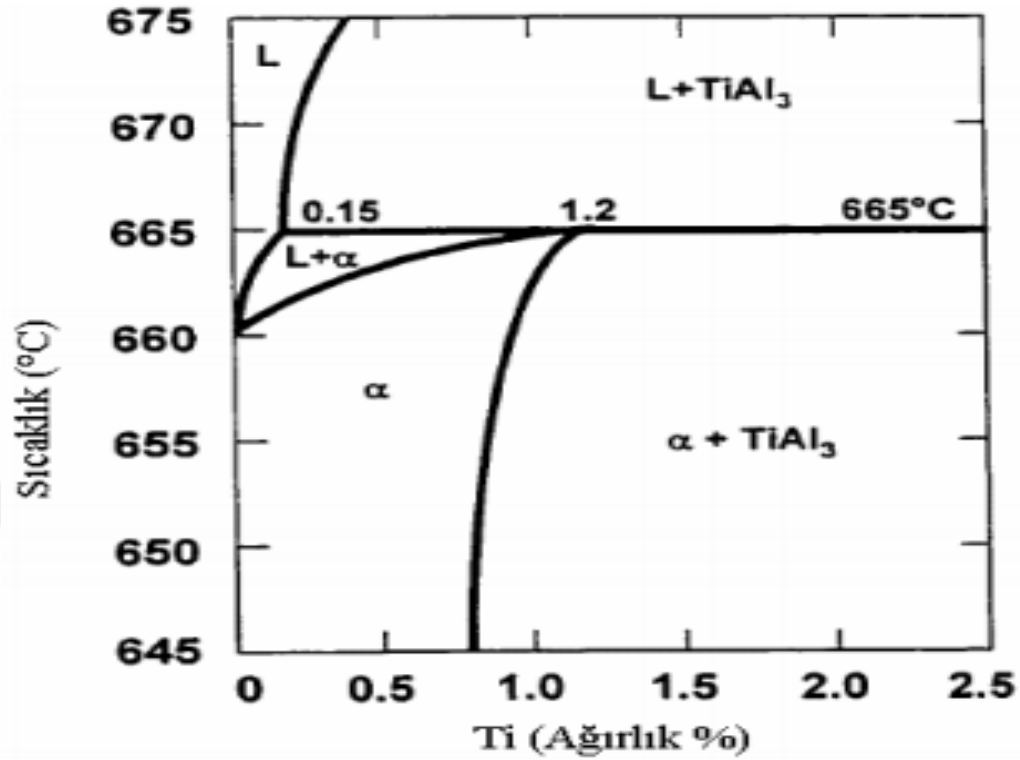
2.3.1. Ti eklenmesi ile tane inceltme

Araştırmacılar tarafından sunulan çeşitli teoriler arasında bulunan Crassley ve Mondolfo tarafından bildirilen peritektik teorisi, titanyum eklenmesi ile alüminyum alaşımlarında tane inceltmesini açıklamada temel mekanizma olarak görülmektedir (Ibarra 1999).

Alaşım erişimin içerisinde yeterli oranda bulun Ti (>%0.15) peritektik olarak bulunan TiAl_3 sıvı eriyik de oluşan birincil α -Al'nin ilk kristallerini meydana getirir. Bileşim genellikle peritektik altı sıcaklığında olup reaksiyon aşağıdaki gibidir.



Alüminyum-Titanyum sistemi Şekil 2.6'da görüldüğü gibi 665°C'de %0,15 Ti içeriğinde peritektik reaksiyon vermektedir (Ibarra 1999).



Şekil 2.6. Al-Ti faz diyagramı

Eriyikte bulunan Ti derişimindeki artışın, tane büyümesini engelleyici parametrelerini arttırabileceği ve böylece saf Al taneleri üzerindeki nihai tane inceltme etkisinden faydalanılacağı sonucuna varılmıştır. Bu tane inceltme etkisi ile alaşım sistemlerinde tokluk ve mukavemet artışı sağlanabilmektedir (Bryant *et al.* 1990).

Al₅Ti₁B tane inceltici eklenerek sıvı alaşımın, mekanik özelliklerine etkilerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmış olup özelliklerin geliştirilmesindeki ana mekanizmaların Ti'nin birincil α-Al tane sınırlarında katılaştırılması ve tane sınırlarının ayrılması ile tane arttırılmasından kaynaklandığını belirtilmiştir (Pongen *et al.* 2019).

2.3.2. B eklenmesi ile tane inceltme

Tane inceltici olarak kullanılan ön alaşımları daha ince taneli içyapı elde etmek için sıvı metale ilave edilir. Ön alaşımları tanelerin büyüklüğünü düşürürken tane sınırı sayısını

da arttırmaktadır. Artan tane sınırı sayısı mekanik özellikleri iyileştirirken aynı zamanda da safsızlık seviyesinde de azalışa sebep olmaktadır. Titanyum tane incelticilerine alternatif olarak kullanılan titanyum içermeyen Al-B gibi ön alaşımları tane inceltmek için kullanılmaktadır (Uludağ 2016).

Lu Wang ve Kung tarafından ötektik altı Al-Si alaşımı olan Al7Si0,3Mg (A356) alaşımında üç farklı ön alaşımı (Al-%5Ti, Al-%5Ti-%1B ve Al-%4B) ile uygulanan tane inceltme çalışmalarında bor'un tane inceltici olarak titanyumdan daha etkili olduğu bildirilmiştir ancak performansının yetersiz olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmanın bir benzeri olan çalışmada Sigworth ve arkadaşları, AlB₂ partikülleri ihtiva eden Al-B ön alaşımlarının iyi tane inceltme etkisi gösterdiği bildirilmiştir (Çolak ve Kayıkcı 2009).

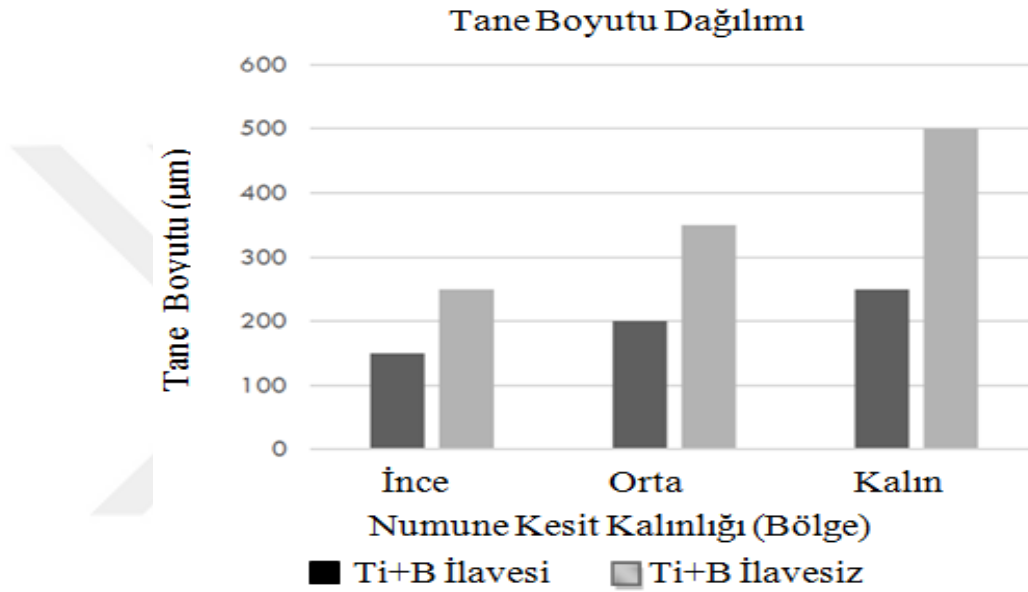
2.3.3. Al-Ti-B eklenmesi ile tane inceltme

1970'lerden bu yana Al-Ti-B ana alaşımlarıyla aşıl原因 Al alaşımlarının katıl原因 davranışlarını araştırmak için çalışmalar yapılmıştır. Maxwell-Hellawell modeli (Maxwell and Hellawell 1974) Serbest Büyüme modeli ve Bağımlılık Teorisi gibi modeller ön alaşımlarının etkisiyle içyapı oluşumunu açıklamak için önerilmiştir (Zhang *et al.* 2017).

Al-Ti-B ön alaşımları özellikle de Al5Ti1B son birkaç on yıl boyunca tane inceltici olarak oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Al5Ti1B ön alaşımı, dövme alaşımlarının döküm işleminde önemli bir performans sunar, fakat özellikle Al-Si alaşımlarında ağırlıkça %7 Si içeriğinde beklentileri karşılamak zor olmuştur. Bunun nedeni, Si'nin Ti-Si fazları oluşturmak için Ti ile reaksiyona girmesidir (Dong *et al.* 2017).

Alüminyum döküm alaşımlarında kimyasal olarak tane inceltme işlemi sıvı metale az miktarda Ti ve B elementlerinin eklenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Al%5Ti%1B ön alaşımları çubuk şeklinde çok yaygın bir şekilde tane inceltici olarak bulunmaktadır. Alaşıma eser miktarda Ti etki edecek şekilde Al5Ti1B ön alaşımı eklenir. Ti ve B

elementleri alüminyum atomları ile reaksiyona girerek sıvı metal içerisinde çok sayıda Al_3Ti ve AlB_2 intermetalik bileşiklerini oluştururlar. Bu bileşikler yüksek ergime sıcaklık değerlerine sahip olduklarından sıvı alüminyum içerisinde katı çekirdeklenme merkezi olarak işlev görmekte ve tane inceltme sağlanmış olmaktadır. Tane boyutu ölçümleri Şekil 2.7’de bu iddia desteklenmektedir (Çolak ve Balcı 2016).



Şekil 2.7. Al_5Ti_1B ilave edilmesi ile kesit kalınlığına göre tane boyutları (Kayıkçı 2015)

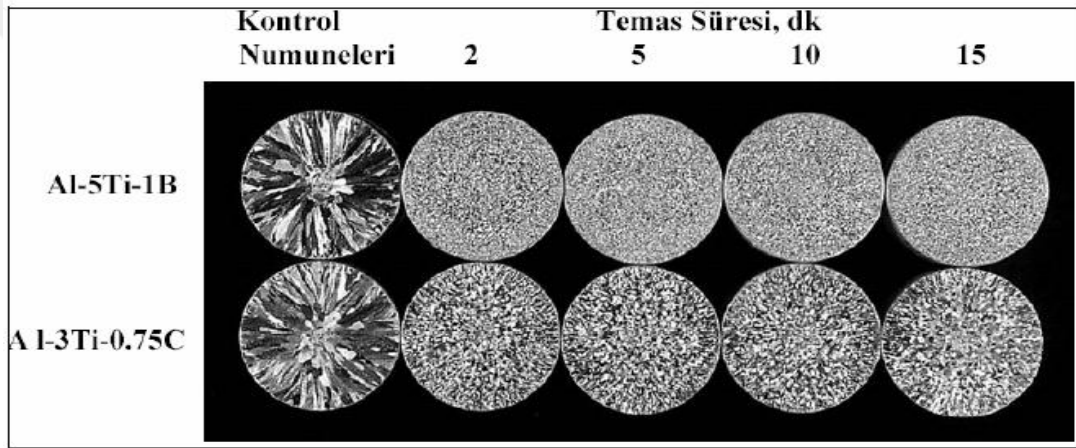
2.3.4. Al-Ti-C eklenmesi ile tane inceltme

Alüminyum alaşımlarında tane inceltici olarak bugüne kadar $AlTiB$ ön alaşımları kullanılıyor olmalarına rağmen bazı sorunlardan dolayı borsuz tane incelticileri üzerine çalışmalar artmıştır.

Son yıllarda TiC içeren alüminyum alaşımları, alüminyum taneleri için doğrudan bir çekirdek işlevi görerek potansiyel faydalarının araştırılması oldukça ilgi uyandırmıştır. Ticari olarak elde edilebilen Al-Ti-C tane incelticilerinde, Al_3Ti partikülleri sıvı metal içerisine TiC partikülleri ile birlikte ilave edilirler. TiC partikülleri $\alpha-Al$ doğrudan çekirdeklendirdiği öne sürülmüş olup, tane arttırıcı C içeriğinin arttırılmasının bu

alaşımların tane arttırma verimliliğinde bir artış sağlayıp sağlamadığını tespit etmek teknolojik açıdan oldukça önemlidir (Birol 2006).

Sıvı alüminyum alaşımlarına Al-Ti-C ön alaşımları eklendiğinde çekirdeklenmenin doğrudan TiC tanecikleri üzerinde oluştuğunu ve bu sebeple başarılı bir tane inceltme için fazladan titanyumun gerekli olmadığı öne sürülmüştür. %99,7 saflıktaki alüminyum alaşımına uygulanan Al-3Ti-0,75C alaşımının içyapısı Şekil 2.8’de verilmektedir (Baypınar 2005).



Şekil 2.8. Al-5Ti-1B ve Al-3Ti-0,75C tane inceltme etkileri (Baypınar 2005)

Şekil 2.8’da görüldüğü gibi Al-5Ti-1B ön alaşımı Al-3Ti-0,75C ön alaşımına göre farklı temas sürelerinde daha küçük tane yapılar göstermektedir (Baypınar 2005).

2.3.5. Titreşim ile tane inceltme

Titreşim kullanılan mekanik, elektromanyetik ve ultrasonik uygulamalarında tane inceltme, arttırılmış yoğunluk, sertlik, çekme dayanımı, uzama yüzdesi, gaz alma, düşük büzülme, ikinci fazın dağılımı, şekli ve boyutu gibi çok sayıda önemli etkiye sahip olduğu ortaya koyulmaktadır. Metal bilimi alanlarında pekçok işlemde titreşim enerjisi uygulanmıştır (Sayuti *et al.* 2016).

Yapılan çalışmalar titreşim işlemiyle üretilen dökümlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi ile ilgilidir. Temel titreşim etkileri, çekirdeklenmenin desteklenmesini ve böylece tane büyüklüğünün azaltılmasını, gelişmiş metal beslemesi nedeniyle büzülme gözeneklerinin azaltılması ve daha türdeş bir metal yapı üretimi ile ilgilidir. Sabit genlikte ve farklı frekanslarda bir Al-Si ötektik-üstü alaşımına mekanik kalıp titreşimi uygulanmıştır. Farklı frekans seviyelerinden üretilen farklı titreşim oranları ile elde edilen numuneler üzerinde çekme testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, mekanik özelliklerin uygulanan frekans seviyesinden etkilendiğini göstermektedir. Düşük titreşim frekansları ile çekme mukavemeti arttırılmıştır. Ancak titreşimsiz yerçekimi dökümlerine kıyasla yüksek frekanslar için de azalmıştır. Önceki davranıştan sorumlu mekanizmayı anlamak için bir katılaşma davranışı çalışması ile birlikte bir içyapı analizi yapılmıştır. İvmeye bağımlı olan bir ısı transfer mekanizması, titreşim etkisine tepki olarak mekanik özelliklerin değişmesinden sorumlu gibi görünmektedir (Chirita *et al.* 2009).

Ultrasonik titreşim (UST) üretim yönteminde sıcaklık ve çıkış gücünün, katılaşma sırasında alüminyum alaşımının, içyapı ve mekanik özelliklerine etkisi optik mikroskobu, sertlik deneyi, çekme deneyi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Ulaşılan sonuçlar UST ile üretilen numunelerin UST ile üretilmeyen numunelerin özelliklerinden çok daha iyi olduğunu göstermiştir. UST altında üretilen numunelerin tane büyüklüğü 80µm yaklaşmakta, ve dendritler yok edilmektedir. UST olmayan numunenin sertliği ~130 HV iken UST etkisi ile üretilen numunenin sertliği ~154 HV'ye yükselmiş çekme dayanımında ise yaklaşık 225MPa daha yüksek çıkmıştır (Hua *et al.* 2019).

2.4. Tane İnceltme Yöntemlerine Etki Eden Parametreler

2.4.1. Alaşım elementi etkisi

Döküm için belirlenmiş tane incelticinin etkisi; element ilave oranına, yapıya geçen element miktarına, inceltilecek ötektik altı alaşıma, döküm şartlarına, sıcaklığa bağlıdır .

Yapılan bu çalışmada alüminyum–silisyum alaşımlarında iki farklı çekirdekleşme mekanizmasının bulunduğu bildirilmiştir. Bu mekanizmalardan ilki, sıvının türbülans ve konveksiyonla taşınmış olan kristallerin kalıp çeperinde çekirdeklenmesi, ikincisi ise sıvı içerisindeki yapısal soğuma ile alt katmanların aktivasyonudur. Saf alüminyuma Si ve Ti elementlerinin ilavesi, yapısal aşırı soğumaya ek olarak sıvı/katı ara yüzeyinde büyümenin sınırlandırılması ile tane inceltir (Ibarra 1999).

Farklı ön alaşımlar için temel gözlemlerle Al’de tane inceltmesinin mekanizması Çizelge 2.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Alüminyumda tane inceltme etkileri (Ibarra 1999)

Master Alaşımları		Al-Ti	Al-Ti-B Ti/B >2,2	Al-B	Al-Ti-B Ti/B < 2,2
Al-Si Döküm Alaşımları	Verimlilik	Zayıf	Makul	Mükemmel	İyi
	Mekanizma	Likidüs altında $Ti_xSi_yAl_{1-(x+y)}$ Peritektik dönüşümü	TiB_2 üzerinde oluşan $Ti_xSi_yAl_{1-(x+y)}$	$\alpha(Al)$ ’de ötektik oluşumu	TiB_2 yüzeyinde $\alpha-Al$ ’nin ötektik oluşumu

2.4.2. Döküm sıcaklığının etkisi

Döküm yapılacak alaşımın tane boyutu sıcaklık arttıkça artar. Sıvı halde bulunan metal, kalıba döküldüğü sırada katılaşmanın ilk aşamasında oluşan kristaller sıvı akışı ve ısıl konveksiyon ile dış çeperlerden döküm içine doğru yayılır ve katılaşan kristallerin bazıları tekrar ergir. Döküm sıcaklığı kullanılır ise katılaşmanın ilk aşamasında kristal kopmaları olur. Sonuç olarak kopan kristallerin yeniden ergimelerini önlemek için döküm işleminin mümkün olduğunca düşük sıcaklıklarda yapılması gereklidir (Baypınar 2005).

2.4.3. Döküm yapılan kalıp sıcaklığının etkisi

Tane inceltme mekanizmalarının yanı sıra döküm yapılan kalıbın sıcaklığı tane boyutunu etkileyen parametrelerden biridir. Şöyle ki kalıp sıcaklığındaki artış taneleri kabalaştırdığı yapılan çalışmalarda ortaya koyulmuştur. Sıvı metal ergime sıcaklığında soğuk kalıba döküm yapılır ise sıvının sıcaklığı katılma sıcaklığına düşünceye kadar soğuk kalıbın sıcaklığı hızlı bir şekilde artacaktır. Sonuç olarak katılma esnasında kalıp ile eriğin arasındaki sıcaklık farkı, soğuma oranı tane yapısına etki etmektedir. Bu etki, kalıp ile sıvı metal arasındaki sıcaklık farkından dolayı yüksek alt soğuma sağlayarak, katılma sırasında meydana gelen ilk çekirdeklerin kararlı hale geçmesine sebep olur. Bu kararlı çekirdekler tane incelticileri çözerek suni çekirdeklilik etkilerini kaybetmelerini önlerler. Ayrıca alt soğuma etkisi ile doğal çekirdekler oluşturarak daha fazla çekirdek sayısı elde edilmiştir (Demir ve Açıkalmaz 2003).

2.4.4. Dökümün soğuma hızının etkisi

Döküm ürünün içyapısında değişikliklere neden olan bir diğer etken ise soğuma hızıdır. Soğuma hızlarının dıştan içe doğru yavaş olan kalın kesitli parçalarda yeterince iyi bir tane inceltme sağlanabilmesi için nispeten daha etkin tane düzenleyiciler seçilmelidir.

Eriyik halde bulunan sıvı metal katı hale yavaş yavaş geçmesi durumunda tanelerin oluşması için gerekli çekirdeklerin sayısında azalma gözlemlenmiştir. Çünkü yavaş soğuma sırasında taneler bütün sıvı metal katılma sıcaklığına kadar kolayca büyüme olanağı bulurlar ve sonucunda büyük taneler oluştururlar. Hızlı soğuma ortamında ise sıvı halden katı hale geçiş esnasında taneler yeterince büyüme zamanı bulamazlar ve kristalizasyon dökümün birçok noktasında hızlı bir şekilde başlar ve ince taneli bir yapı oluşur (Lieserberg *et al.* 2001).

2.4.5. Element ilavesini ve uygulanan yöntem süresinin etkisi

Element ilavesinden döküm işleminin sonuna kadar geçecek sürenin iyi bir şekilde belirlenmesi tane inceltme sağlanmasında oldukça önemlidir. Tane incelticilerin sıvı metal içerisinde türdeş olarak dağıtılabilmesi ve tane küçültmeyi sağlamak için uygun bir zaman gerekliliği araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir.

Alaşım sistemlerine eklenen çeşitli tane incelticiler aynı olmakla birlikte uygulama sürelerinin farklı olması ile alaşım sistemlerine etkisi incelenmiş fakat sayısal olarak bir değeri belirlenememiştir.

2.4.6. Katılaşma yöntemlerinin etkisi

2.4.6.a. Mekanik titreşim

Katılaşan iç yapıyı inceltmek için mekanik bir titreşim tekniğinin kullanıldığı bildirilmiştir. Döküm esnasında titreşim ivmesi ve nihai ürünün kütle oranının içyapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar; var olan mekanik titreşimin, ergimiş alaşımın iç kısmından ısı çekerek lokalize soğutma sağlayabildiğini ve soğutma oranının, üretilen malzeme üzerindeki titreşimin hızlanmasına büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir. Katılaşmanın ilk aşamasında mekanik titreşim uygulanarak önemli ölçüde inceltilmiş içyapı elde edilmiştir. Ayrıca, diğer tane inceltme mekanizmaları tartışılmıştır (Hong-min *et al.* 2014).

Mekanik titreşim ve çeper kalınlığının, harcanabilen kalıp kabuk dökümü ile üretilen A356 alüminyum alaşımının içyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki bileşik etkileri adlı çalışmalarında, çeper kalınlığının artması ile α -Al birincil fazının morfolojilerinin ve geleneksel olarak dökümden elde edilen numunelerin ötektik silisyum fazının ince dendritten kaba dendritik yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Mekanik titreşim uygulandıktan sonra iri taneli dendritler ince eş eksenli tanelere dönüştürülmüş ve α -Al birincil fazının, ötektik silisyum partikülleri ve ayrıca SDAS'ın büyüklüğü, morfolojisi

ve dağılımı önemli ölçüde geliştirilmiştir. Böylece A356 alüminyum alaşımının yoğunluğu artmış ve mekanik özellikleri, çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertliği de artmıştır. Mekanik titreşimin içyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etki derecesi çeper kalınlığı arttıkça artmıştır (Jiang *et al.* 2014).

A356 alüminyum alaşımında tiksotropik içyapılı yarı-katı bulamaç üretmek için mekanik titreşimin tesiri incelenmiştir. Titreşim genliğinin ve zamanın α -Al fazının boyutu, morfolojisi ve tane inceltme aşaması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mekanik titreşim uygulayarak Al alaşımında tiksotropik içyapı elde edilebileceği gözlenmiştir. Ayrıca, α -Al fazının boyutunun ve morfolojisinin, titreşim genliği ve zamanından güçlü bir şekilde etkilendiği bulunmuştur (Taghavi *et al.* 2009).

2.4.6.b. Ultrasonik titreşim

Yapılan çalışmada, 5052 alüminyum alaşımın içyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu alaşımın yarı-katı bulamacı, ultrasonik titreşim (UST) işlemi ile hazırlanmış ve daha sonra yerçekimi dökümü (GC) ve yüksek basınçlı döküm (HPDC) ile şekillendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, ince ve küresel birincil α -Al fazlarının, reo-döküm numunelerinde homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir. Reo-GC numunesinin çekme dayanımı ve uzaması sırasıyla 191 MPa ve %7,5 olur iken, bu değerler ile geleneksel Reo-GC örnekleriyle karşılaştırıldığında, sırasıyla %22,4 ve %82,9 oranında artış göstermektedir. Reo-HPDC numunelerinin gerilme mukavemeti ve uzaması sırasıyla 225 MPa ve %8,6'ya ulaşmaktadır. Bu değerler de geleneksel HPDC numunelerine göre sırasıyla %14,8 ve %75,5 daha yüksektir. Ayrıca, sünek kırılma modunun reo-döküm numunelerinde baskın olduğu bulunmuştur (Lü *et al.* 2010).

Bu çalışmada, ultrasonik destekli karıştırmanın, ortalama 40 nm boyutunda nano Al_2O_3 parçacıkları ile güçlendirilmiş 6061 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri ve ağırlık yüzdeleri 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 üzerindeki etkisi incelenmiştir. İçyapısal incelemeler, nano Al_2O_3 partiküllerinin Al matrisindeki homojen dağılımını, birkaç

takviye partikülü kümesiyle gösterdi. Mekanik özelliklerde sertlik, gerilme mukavemeti basma mukavemetinde etkili bir artışla sonuçlanmıştır. Al matrisindeki nano takviye edici parçacıkların 20 kHz'de ultrasonik frekans titreşimleriyle homojen dağılımına atfedilerek nano kümelerini parçalamıştır. Sonuç olarak ultrasonik dalgalar, nano parçacıkların kümelerini parçalayarak nano parçacıkların eşit dağılımına neden olur ve bu nedenle mekanik özelliklerin geliştirilmesini sağlar. Bununla birlikte, nano alümina parçacıklarının ağırlıkça %3,5'inden fazlasına ulaştığında; tane sınırlarında nano partiküllerin topaklaşması gevreklemeye, gözenekliliğe, daha az arayüzey yapışmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerde azalmaya neden olduğu tespit edilmiştir (Kumar *et al.* 2015).

2.4.6.c. Elektromanyetik titreşim

Elektromanyetik titreşimin, yöne bağlı katılaştırmada tane inceltme etkileri incelenmiştir. Ergiyikte uygulanan elektromanyetik titreşimin, yalnızca taneleri belirgin şekilde inceltilebildiği aynı zamanda Al-6Si alaşımının hem çekme dayanımı hem de süneklilik değerlerini artırabildiği bulunmuştur. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) grafikleri kaba dendrit yapısının biraz küresel bir yapıya dönüştüğünü göstermiştir. Ayrıca ötektik silisyumun morfolojisinin elektromanyetik titreşim işlemiyle lifli yapıdan ince dilim haline dönüştüğünü göstermektedir (Jianbo *et al.* 2009).

Katılma sırasında ortaya çıkan elektromanyetik titreşimlerin, sırasıyla dar ve geniş bir katılma aralığı ile karakterize edilen 1085 ve 2214 alüminyum alaşımlarındaki tane inceltme etkisi incelenmiştir. Titreşimler, sürekli döküm külçelerin haznesinde sabit bir manyetik alan B_0 ve 50 Hz'lik değişken bir manyetik alan B 'nin eşzamanlı uygulamasıyla üretilmiştir. Artan mıknatıslanma kuvveti olan her iki alaşımda da geniş çapta tane inceltme gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, bu titreşim tekniği ile elde edilen ortalama tane büyüklüğünün yakın zamanda geliştirilen CREM (taşlama, rafinaj, elektromanyetik) işlemiyle üretilenlerden daima daha küçük olduğunu göstermektedir (Vivés *et al.* 1993).

2.4.6.d. Çalkantı ve dinamik metotlar

Döküm işlemine hazır alaşım sisteminde, sıvı metale sabit yönlü değişken frekansla çalkantı uygulandığında özellikle, sıvı metalin serbest yüzeyinin kalıp duvarı ile kesiştiği bölgeler ve sıvı metalin kalıp duvarı ile temas eden taneleri kolayca kopabilir. Bu kopan taneler yeni taneler için çekirdek olarak davranırlar. Yapılan çalışmalarda çalkantı şiddeti, döküm yapılacak malzeme miktarının artması ve döküm sıcaklığı düştükçe, sütunsal tanelerin boyunun kısaldığı tespit edilmiştir (Şenel 2004).

Sıvı metalin tane yapısı, katılaşma esnasında dışarıdan bir etki ile sıvı akışını değiştirerek kontrol etmek mümkündür. Katılaşma esnasında dışarıdan enerji uygulanarak büyüyen dendritlerin dinamik olarak koparılması ve eriyiğin iç bölgelerine taşınarak eşeksenli tanelerin büyümesinin sağlanmasına dinamik tane küçültme yöntemleri denir. Bu yöntemler titreşim, çalkantı, gaz üfleyerek karıştırma, kalıp boyanması gibi yöntemlerdir. Yöntemlerin tamamının amacı dendritlerin kırılması ve sıvı metal içerisinde ısısal farklar sebebiyle kırılan dendritlerin tekrar ergimeden sıvı içerisinde yeni tanelerin oluşması için çekirdek merkezi olarak davranmalarını sağlamaktır (Baypınar 2005).

2.4.6.e. Döndürme ve üfleme ile karıştırma

Dinamik yöntemlerden olan döndürme ve üfleme ile karıştırma yöntemi, kalıba eşeksenli döndürme uygulandığında, sıvı metalin soğuma hızındaki farklardan dolayı merkezde iri taneli yapı, kalıp çevresinde ise ince taneli yapı elde edilmiştir. Bu iki bölge arasındaki fark arttıkça iri ve ince taneli yapıların bölgeleri de artmaktadır. Ayrıca kalıp sıcaklığının giderilmesi döndürme hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir (Baypınar 2005).

Döküm için hazırlanmış sıvı metal içerisine Ar, N₂, He gibi inert olan gazlar göndererek sıvı metalin karıştırılması sağlanır ve sütunsal büyüme engellenerek eşeksenli tanelerin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan bir çalışmada da sıvı metal içerisine daldırılmış

alüminüme tüp ile 200cc/dk hızla 10s N₂ gazı geçirilerek yapının değişimi incelenmiştir. Yapı içerisinde incelemeler yapılırken gaz üfleme ile tane küçültme sağlanmış ve gaz üfleme ile gazın soğutma etkisinden dolayı yine ince taneli yapılar elde edilmiştir (Baypınar 2005).

2.4.6.f. Isıl yöntem ve kalıp boyası kullanma

Döküm ürününün içyapı değişikliklerine neden olan diğer yöntemlerden olan ısı ve kalıp boyaması yönteminde, kalıp çeperinde soğuma arttıkça çekirdeklenme hızı arttığından ince taneli yapılar elde edilmiştir. Sıvı metalin merkezine doğru irileşen tanelerin yapısı da sıcaklık gradyanına bağlıdır. Aşırı soğuması sağlanan tanelere komşu taneler de hızla ısınıp kaybettikleri için dıştan içe doğru taneler inceden iri taneye doğru gidecektir. Bu yapı döküm sıvısının aşırı soğuma oranına bağlıdır. Isısal tane inceltme yöntemleri kısaca, çok hızlı soğutma (splat cooling), dökümde çil uygulaması, düşük döküm sıcaklığında döküm olarak sıralanabilir (Baypınar 2005).

Tane boyutunu inceltmek için kalıp boyaları kullanımı, son yıllarda çokça araştırılmış ve uygulamaları artmıştır. Ancak kalıp boyası kullanılarak tane inceltme etkisi tam olarak bilinmemektedir. Kalıp boyası sisteminin etkinliği ısıya bağlı olmasına karşın katılaşma süresinin etkisinin olmadığı görülmüştür (Şenel 2004).

2.4.6.g. Manyetik ve elektromanyetik karıştırma

Manyetik ve elektromanyetik karıştırma kullanarak, doğal sıvı akışı bastırılıp sütünsal tanelerin oluşumu artırılır veya doğal akış hareketi şiddetlendirilmesi ile dendritlerin koparak iç bölgelere taşınıp eşeksenli tanelerin oluşturulması sağlanır.

Elektromanyetik etki ile karıştırma, çekirdeklenme üzerine yapılan incelemelerde manyetik alan şiddetinin (H) çekirdeğin oluştuğu aşırı soğumayı etkilemediği, fakat birim hacimdeki çekirdek sayısı (n) manyetik alan ile artmaktadır. Manyetik alan şiddetinin düşük olması ile tane küçültme sağlanamadığı tespit edilmiştir. Manyetik alan

şiddetinin çok yüksek olması ile de sıvı metal yüksek hızda karışacak ve eriğin merkezine doğru gözeneklilik artacaktır (Baypınar 2005).

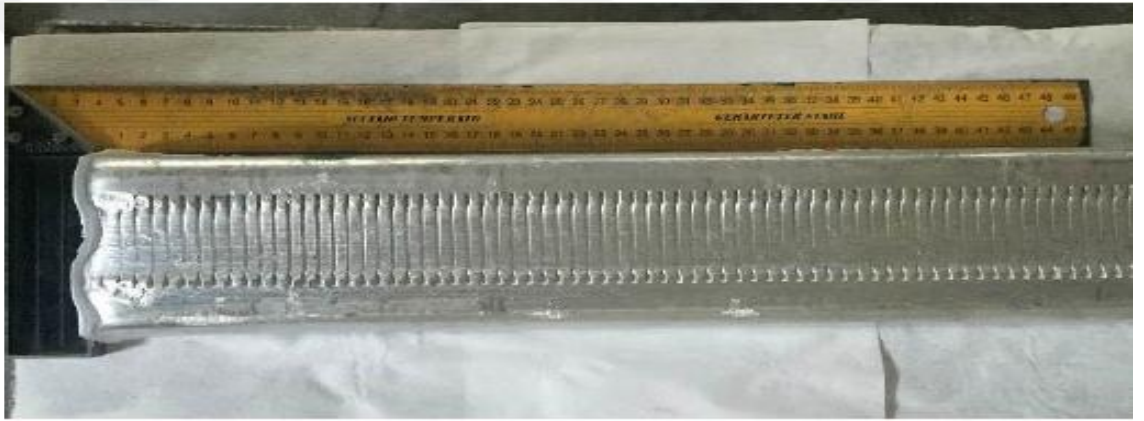
Manyetik alan altında tane inceltme mekanizmasını araştırmak için çeşitli teoriler önerilmiştir. Bu teoriler, aglomerasyon mekanizması; kritik boyutun altındaki çekirdeklerin topaklaşmasıyla tane çekirdeğini oluşturması, basınçlı dalga mekanizması; dalga geçişi sırasında noktasal ve bölgesel basınç artışı ile çekirdek oluşumundaki artışa bağlı olarak tane inceltilmesi sağlanmıştır (Şenel 2004).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deneysel Malzemeler

Şarj malzemesi olarak her bir dökümde Al7Si0,3Mg birincil alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alüminyum külçeleri Şekil 3.1’de mevcut olup bu alaşımın kimyasal kompozisyonu da Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Ergitmede kullanılan alüminyum külçesi

Çizelge 3.1. Alüminyum külçenin kimyasal bileşimi

Si	Mg	Ti	Mn	Fe	Zn	Al
7,20	0,392	0,12	0,001	0,18	0,005	Geri Kalan

Ayrıca tane inceltme ajanı olarak ağırlıkça %0,1, %0,2 ve %0,3 Al5Ti1B ön alaşımları kullanılmıştır. Bu alaşımlar da Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Al5Ti1B ön alaşımı

3.1.1. Dirençli fırın



Şekil 3.3. Dirençli fırın

Alaşımın ergitilmesinde Şekil 3.3’de verilmiş döküm işlemi için özel olarak tasarlanmış elektrik dirençli fırın kullanılmıştır.

3.1.2. Titreşim cihaz ve döküm kalıbı

Şekil 3.4 (a-b)'de döküm işlemi için kullanılan kalıp ve titreşim cihazı gösterilmektedir. Bu metal kalıp üç basamaklı ve üç farklı kesit kalınlığına sahiptir. Kalıp basamakları kare prizma şeklinde olup yüzey alanları her basamağın eşittir ve boyutu (40x40mm)'dir. Basamakların kalınlığı ise yukarıdan aşağıya 20, 10 ve 5 mm'dir. Döküm yapılan kalıp 400°C'ye kadar ön ısıtmaya tabi tutulup katılaşma süresinin bir miktar arttırılması amaçlanmıştır. Daha sonra fırından alınan ön ısıtılmış kalıp Şekil 3.4'de gösterilen 60 Hz sabit frekansta ve 3 mm genlikte titreşim üreten Octagon 200 marka elek analiz cihazının üzerine yerleştirilmiştir. Kalıbın içerisindeki metal 90 saniye boyunca cihaz üzerinde titreşime tabi tutularak katılaşması sağlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.4. (a) Titreşim cihazı (b) Döküm kalıbı

3.2. İçyapı Karakterizasyon Çalışmaları

3.2.1. Metalografik ölçümler

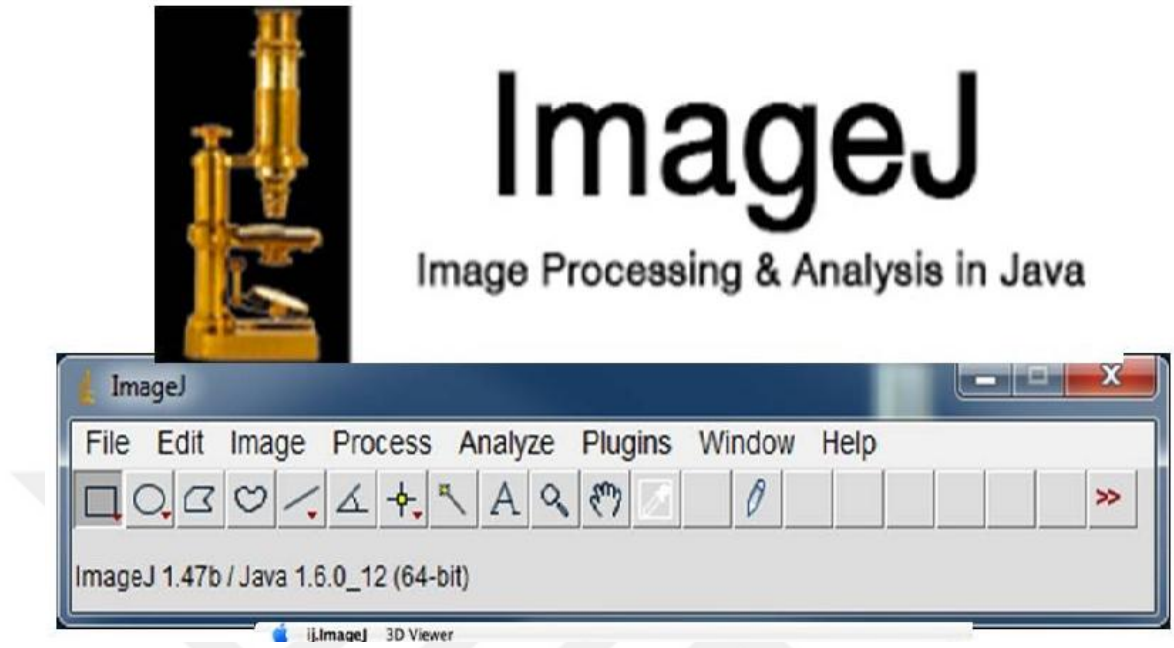
Metalografik ölçümler Şekil 3.5'de Nikon Eclipse marka LV150 model optik mikroskobundan alınan görüntüler üzerinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Optik mikroskop

3.2.2. Faz, DAS, SDAS, DAL, SDAL analizi

Şekil 3.6’da görülen ImageJ görüntü analiz yazılımı kullanılarak optik mikroskobundan alınmış görüntülerden birincil faz (α -dendrit) ile ötektik fazların oranları, birincil dendrit kolları uzunluğu (DAL), birincil dendrit kolları arası mesafe (DAS), ikincil dendrit kolları uzunluğu (SDAL), ikincil dendrit kolları arası mesafe (SDAS), ölçümleri ASTM E112-13 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Ayrıca % gözenek oranı da tayin edilmiştir.



Şekil 3.6. ImageJ programı

3.2.3. Elektriksel iletkenlik ölçümleri

Elektrik iletkenlik ölçümleri ASTM E 1004-17 standardına göre ASSAN Alüminyum firmasındaki Sıgmascope SMP350 taşınabilir elektrik iletkenlik cihazı ile uluslararası tavllanmış bakır standardına (% IACS) göre yapılmıştır.



Şekil 3.7. Elektrik iletkenlik ölçüm cihazı

3.2.4. Sertlik ölçümleri

Numunelerin sertlik değerleri ASTM E 92-17 standardına göre Şekil 3,8’de Bulut Makine marka BMS 200 RB model sertlik cihazı ile 2,5mm bilya çapına sahip uç yardımıyla 62.5 g yük uygulanarak sertlik (HB) değerleri ölçülmüştür. Ortalama brinell sertlik değerleri 10 ölçümün ortalaması alınarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.8. Brinell sertlik ölçüm cihazı

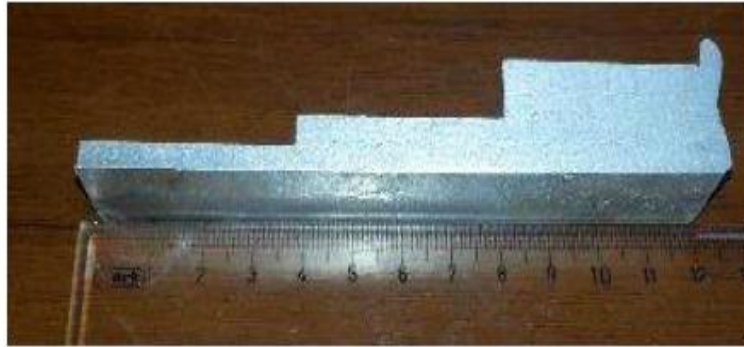
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

Titreşimli döküm yöntemi kullanılarak farklı oranlarda (ağ.%0,1, 0,2 ve 0,3) AlTiB ön alaşımı ilave edildiği dökümlerin deneysel sonuçları, bulguları ve tartışmaları aşağıdaki alt başlıklarda birer birer irdelenmiştir.

4.2. İçyapı Karakterizasyon Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.1a'da döküm ürünün içyapısındaki değişimleri incelemek için döküm parçalarının ortadan kesilerek metalografik olarak 240, 400, 600, 800, 1200 meş (mesh) boyutundaki zımparalarla zımparalandıktan sonra 1µm'lik elmas pasta ile parlatma işlemi yapılmıştır. Şekil 4.1b'de her bir kesit kalınlığı için optik mikroskop altında incelenen alanların konumları görüntülenmiştir. Görüntüler kalın kesit (20mm), orta kesit (10mm) ve ince kesit (5mm) şeklinde alınmıştır.



Şekil 4.1. Döküm parçası

Döküm parçalarının spektroskopik analizlerinde içerik bilgileri Çizelde 4.1'de verilmiştir. Al 1-0, 2-0, 3-0 adlandırılması ilk rakamlar Ti içeriğini sırasıyla ağ. %0,1, %0,2 ve %0,3 gösterirken diğer rakam (0) ise titreşimsiz olduğunu ifade etmektedir.

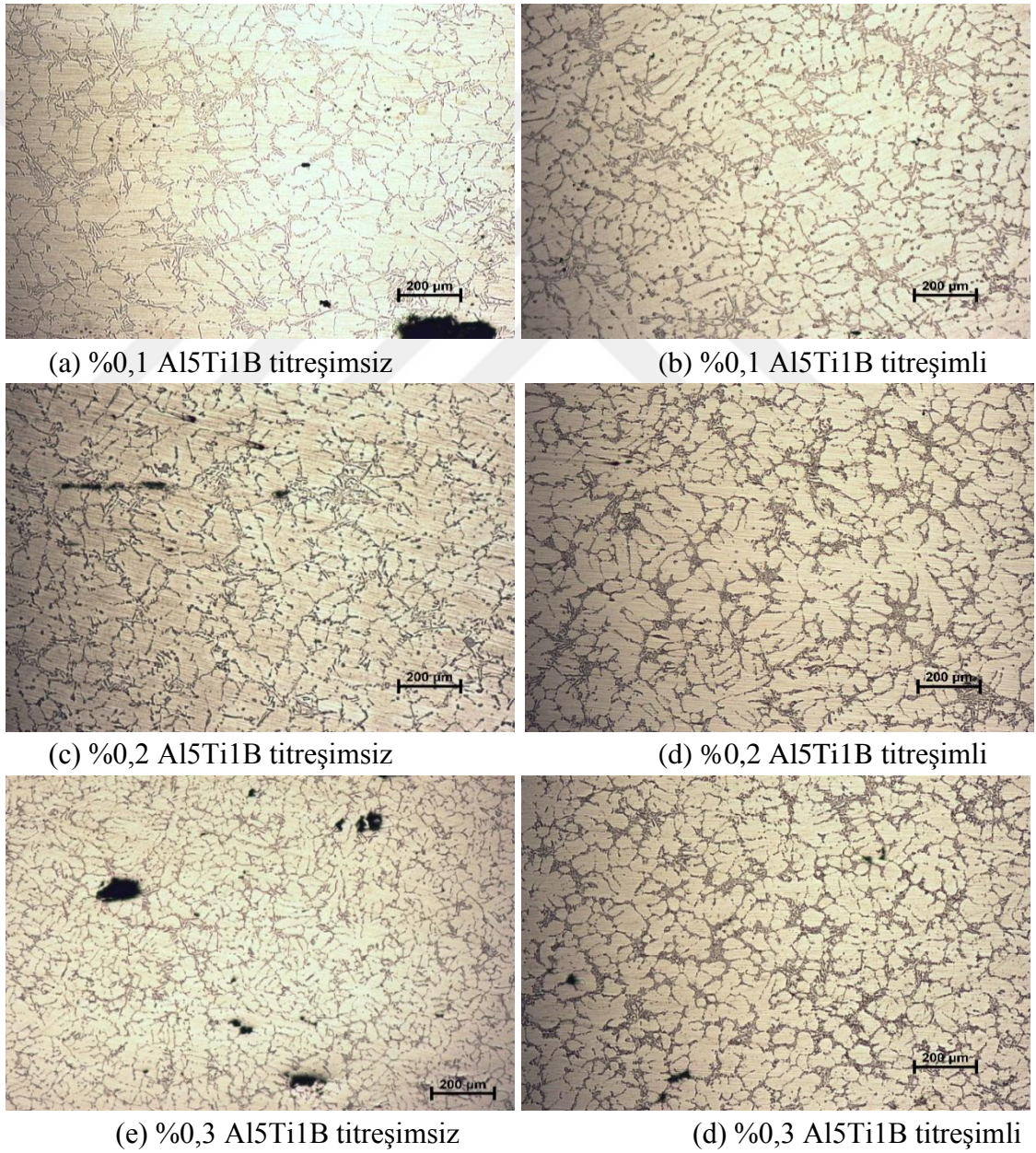
Benzer şekilde Al 1-1, 2-1, 3-1 Ti içeriğini verirken son rakam (1) titreşimli olduğunu ifade eder.

Çizelge 4.1. Üretilen numunelerin kimyasal kompozisyonları

Element Numune	Al 1-0	Al 2-0	Al 3-0	Al 1-1	Al 2-1	Al 3-1
Si	7,08	6,83	6,73	7,04	7,03	6,85
Fe	0,0717	0,0292	0,0507	0,0359	0,0339	0,0287
Cu	0,00384	0,00244	0,00311	0,00330	0,00259	0,00273
Mn	0,00582	0,00581	0,00595	0,00571	0,00568	0,00593
Mg	0,0936	0,191	0,188	0,155	0,203	0,209
Zn	<0	<0	<0	<0	<0	<0
Ni	0,0170	0,0174	0,0191	0,0168	0,0169	0,0171
Cr	0,00375	0,00582	0,00560	0,00366	0,00302	0,00434
Pb	0,0129	0,0135	0,0123	0,0120	0,0122	0,0144
Sn	0,0238	0,0285	0,0268	0,0240	0,0252	0,0335
Ti	0,170	0,287	0,307	0,177	0,239	0,360
Na	<0	<0	<0	<0	<0	<0
Sr	0,00016	0,00024	0,00062	0,00013	0,00033	0,00086
V	0,0194	0,0232	0,0224	0,0196	0,0209	0,0273
Zr	0,00148	0,00171	0,00128	0,00150	0,00141	0,00185
Al	92,49	92,56	92,63	92,51	92,41	92,44

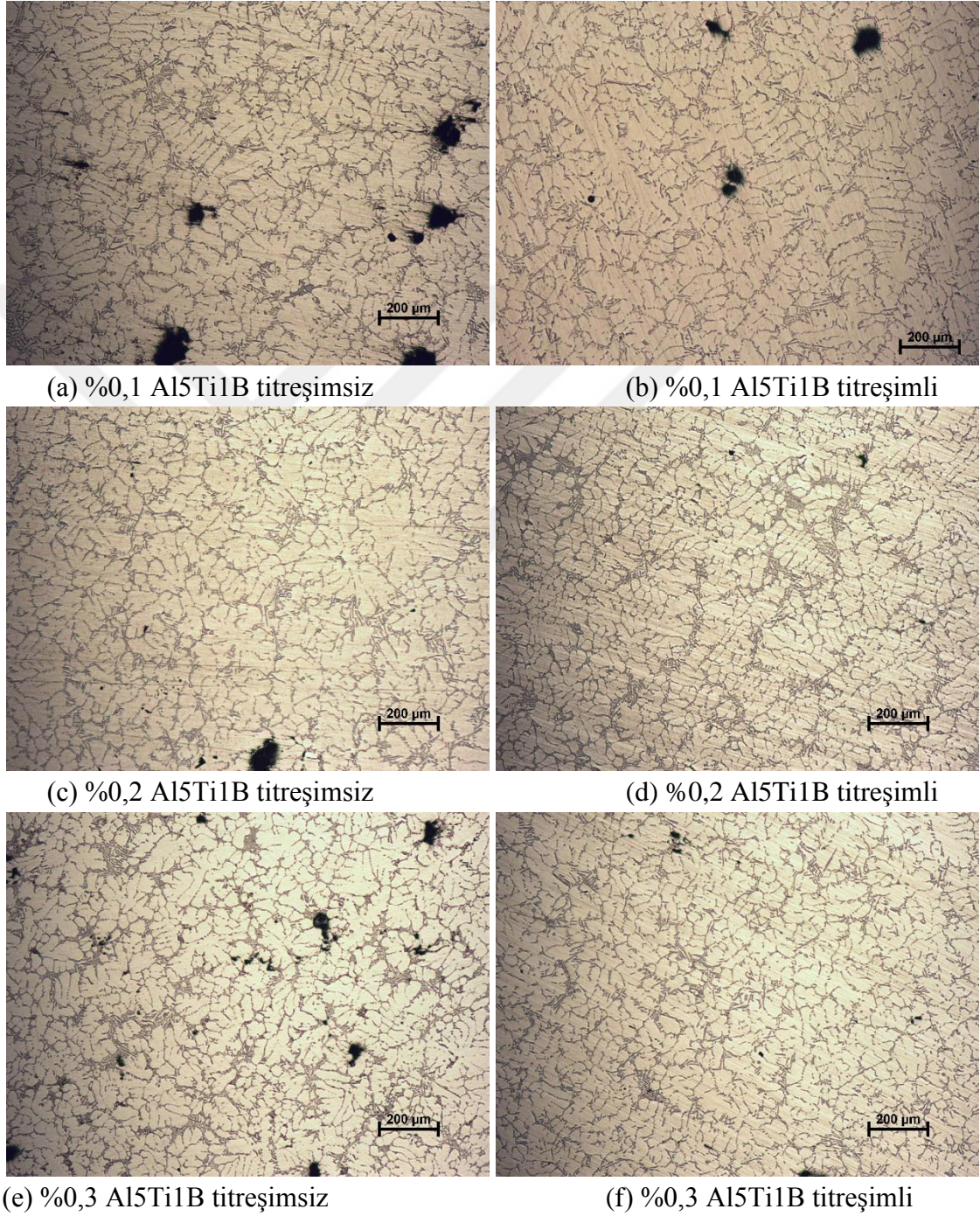
4.3. Birincil ve Ötektik Fazlar ile SDAS ve SDAL Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Kesit kalınlıklarına bağlı olarak ilave edilen tane inceltisinin etkisi ile oluşan tane boyutu ve morfolojisi ile oranları tespit edilmiştir. Şekil 4.2’de kalın kesite (20 mm) titreşimli dökümle birlikte ağ. %0,1, 0,2 ve 0,3 tane inceltici eklenmiş numunelere ait değişim gösterilmektedir.



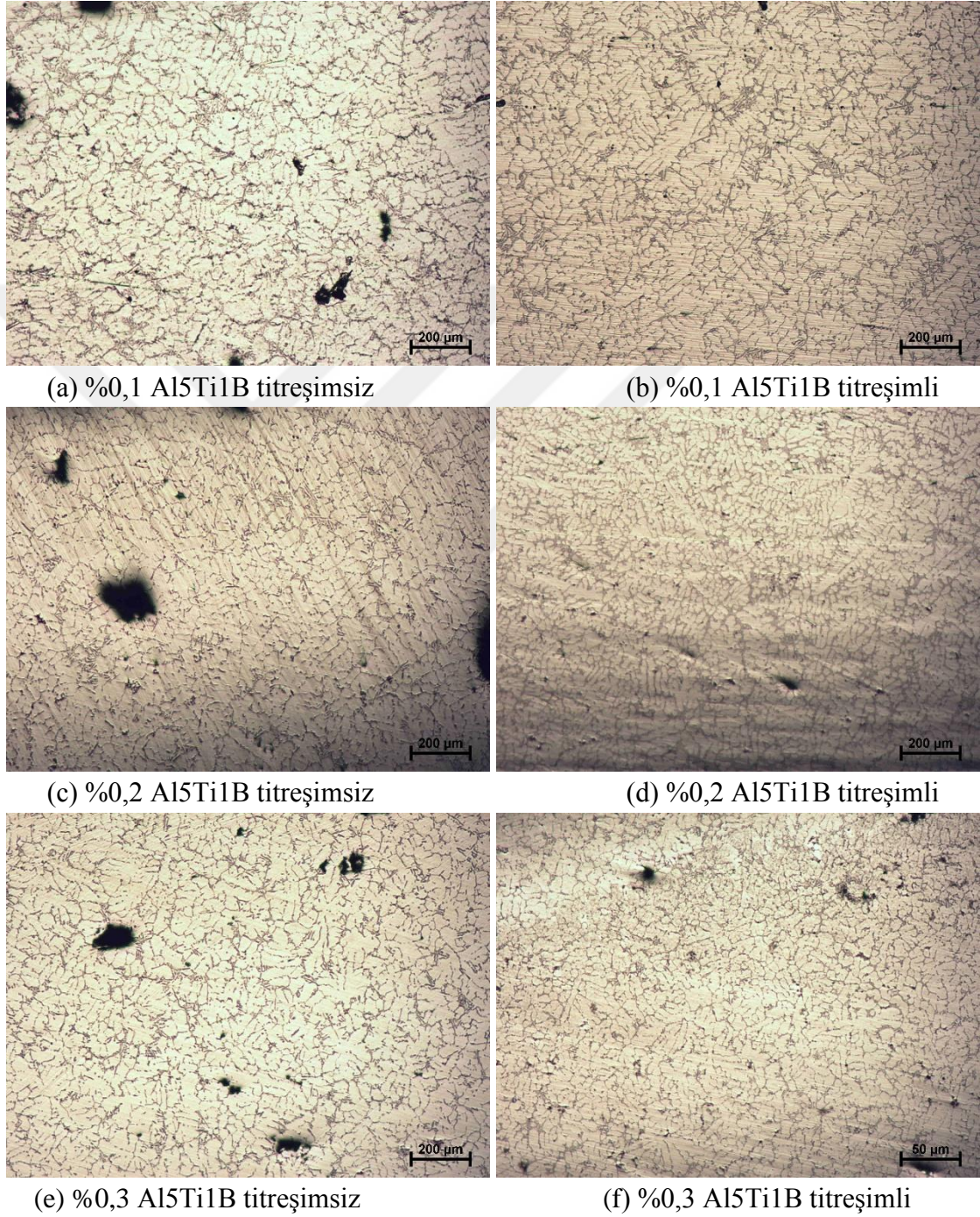
Şekil 4.2. Kalın kesit (20 mm) için ağ.%0,1, 0,2 ve 0,3 titreşimli ve titreşimsiz dökümlerin içyapı görüntüleri

Şekil 4.3’de orta kesite (10 mm) titreşimli dökümle birlikte ağ.%0,1, 0,2 ve 0,3 tane inceltici eklenmiş numunelere ait değişim gösterilmektedir.



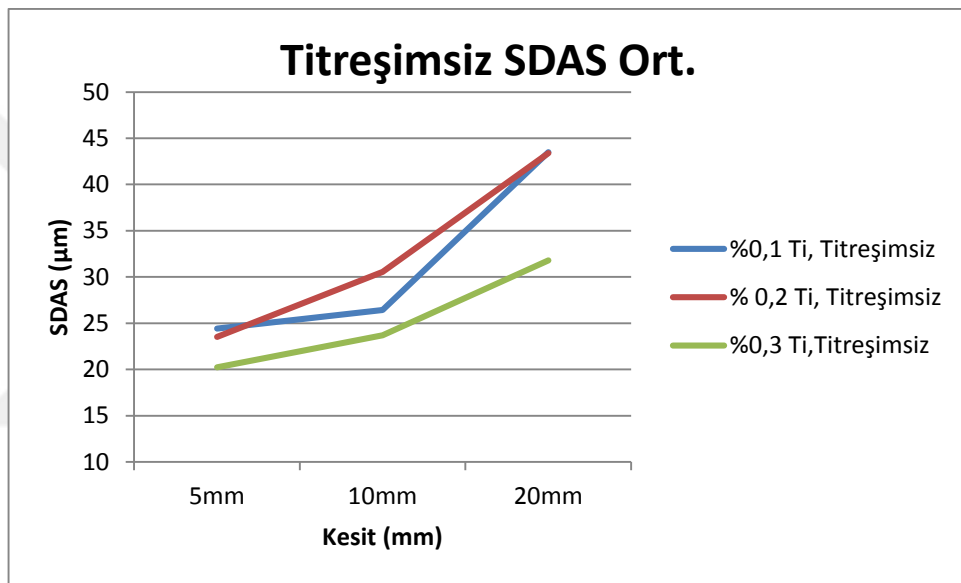
Şekil 4.3. Orta kesit (10 mm) için ağ. %0,1, 0,2 ve 0,3 titreşimli ve titreşimsiz dökümlerin içyapı görüntüleri

Şekil 4.4'de ince kesite (5 mm) titreşimli dökümle birlikte ağırlık %0,1, 0,2 ve 0,3 tane inceltici eklenmiş numunelere ait değişim gösterilmektedir.

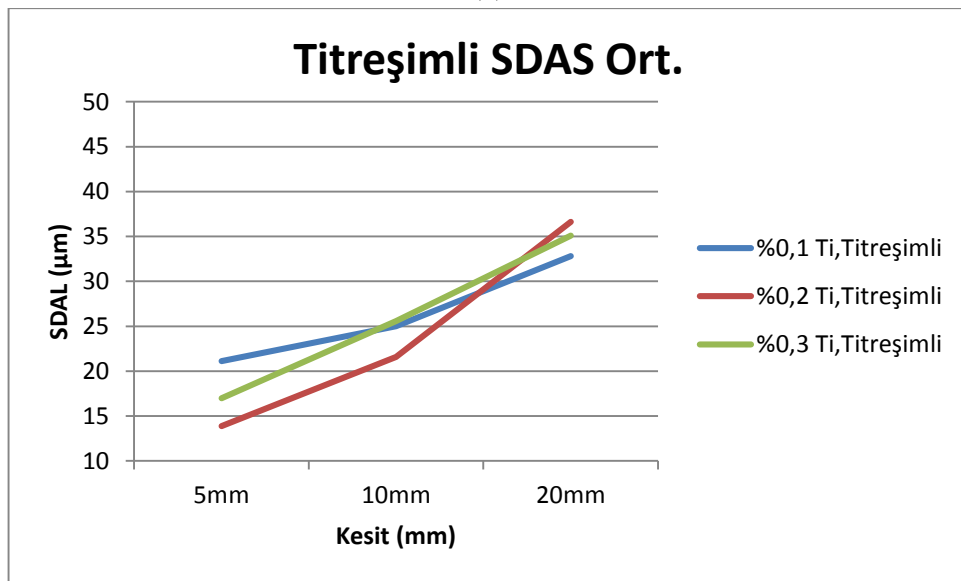


Şekil 4.4. İnce kesit (5 mm) için ağırlık %0,1, 0,2 ve 0,3 titreşimli ve titreşimsiz dökümlerin içyapı görüntüleri

Şekil 4,5’de görüldüğü üzere, genel eğilim Ti oranının SDAS ve SDAL üzerinde etkin bir değişikliğe neden olmamıştır. SDAS değerleri için titreşim etkisi çok fazla olmamakla birlikte kayda değer bir azalışa neden olmaktadır. Fakat SDAL için aynı durum görülmemekte yani titreşimli ve titreşimsiz numunelerin SDAL değerleri yaklaşık aynıdır. Asıl etki eden parametre olan döküm ürünün et kalınlığı (5-20mm) arttıkça SDAS ve SDAL değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak kalınlaşan kesitin soğuma hızındaki düşüşün olduğu düşünülmektedir.

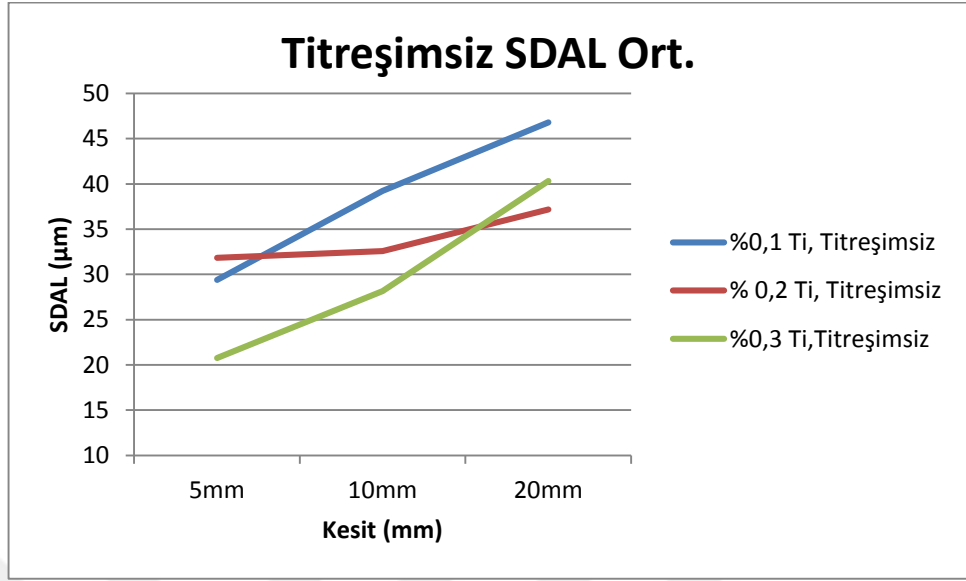


(a)

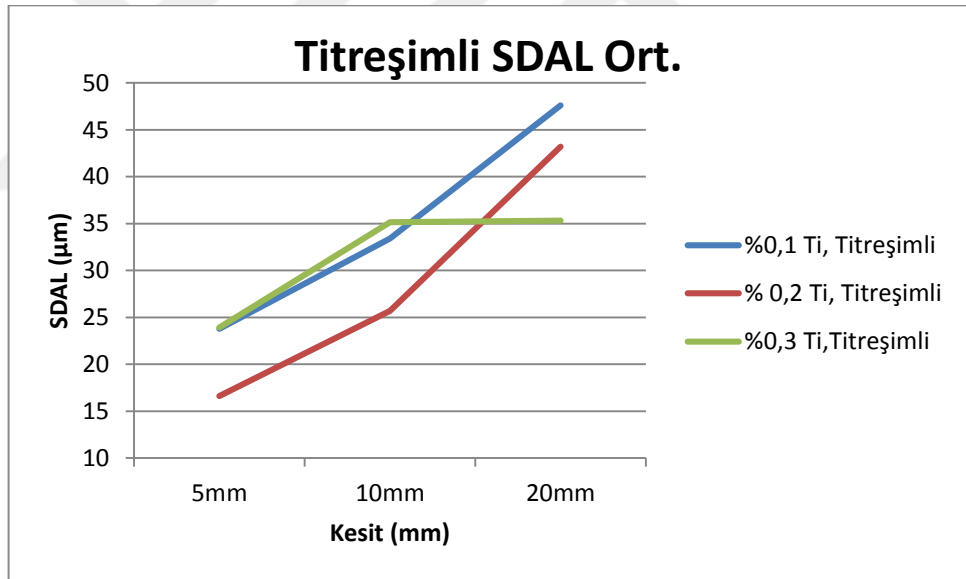


(b)

Şekil 4.5. (devam)



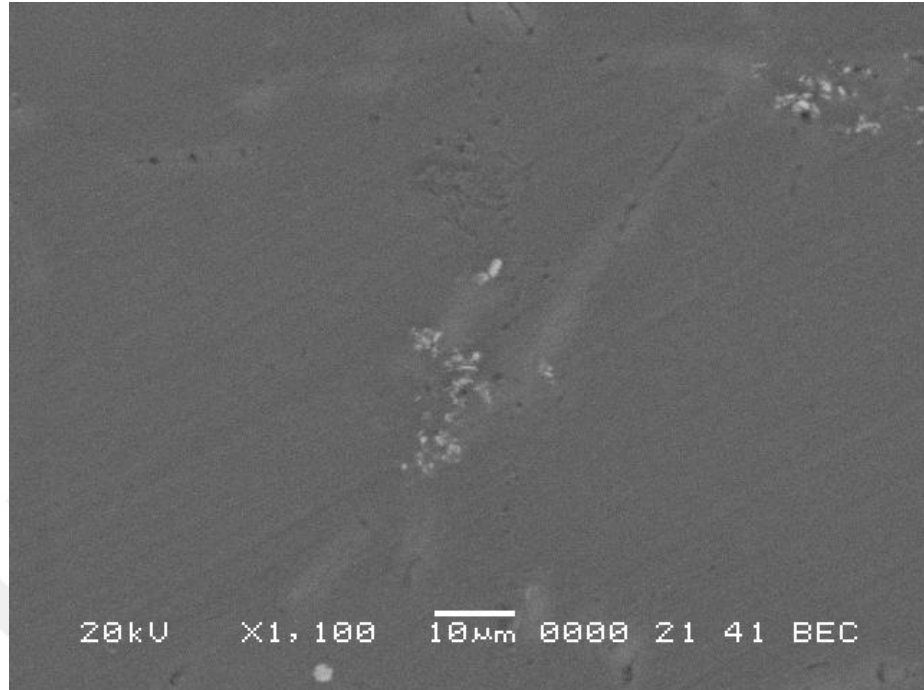
(c)



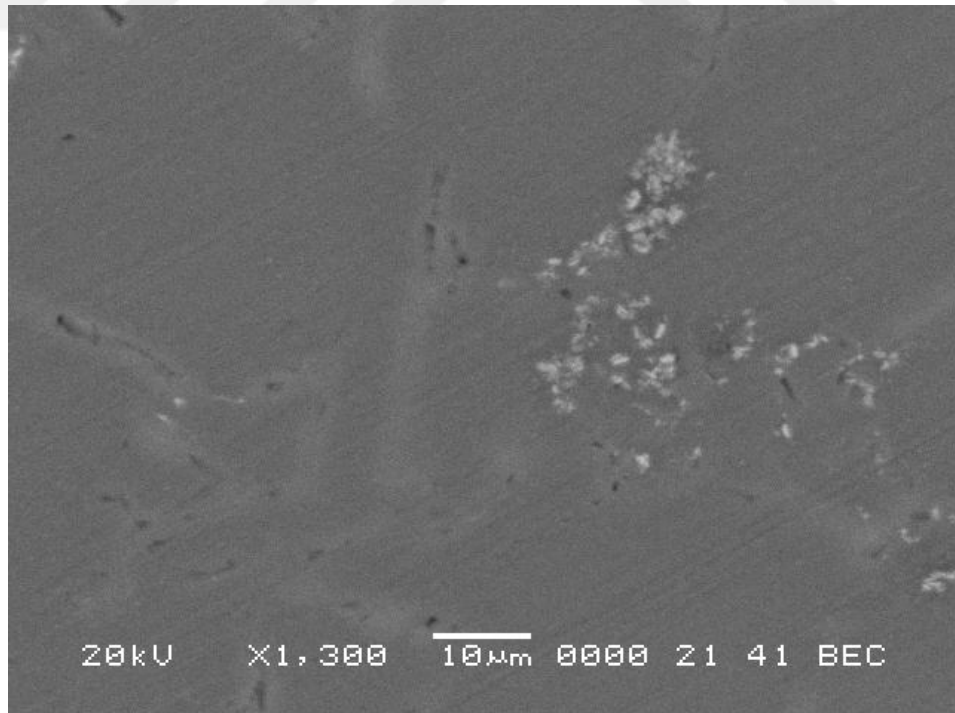
(d)

Şekil 4.5. (a) Titreşimsiz numuneler (b) Titreşimli numuneler için SDAS ölçümleri (c) Titreşimsiz numuneler (d) Titreşimli numuneler için SDAL ölçümleri

Şekil 4.5-4.6'da taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Bütün numunelerin tamamı incelenmiş olup en belirgin farklılıkları %0,2 ve 0,3 Ti içeren döküm numunelerinde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. SEM görüntüsü %0,2 Ti içeriği



Şekil 4.7. SEM görüntüsü %0,3 Ti içeriği

Şekil 4.5’de %0,2 Ti içeren numunelerde öbeksiz Ti elementince zengin bölgelerin Şekil 4.6’da %0,3 Ti içeren numunelerde bu öbeksiz bölgelerin arttığını görülmektedir. Bu durumun açıklaması alaşım içerisindeki Ti miktarının artmasıdır.

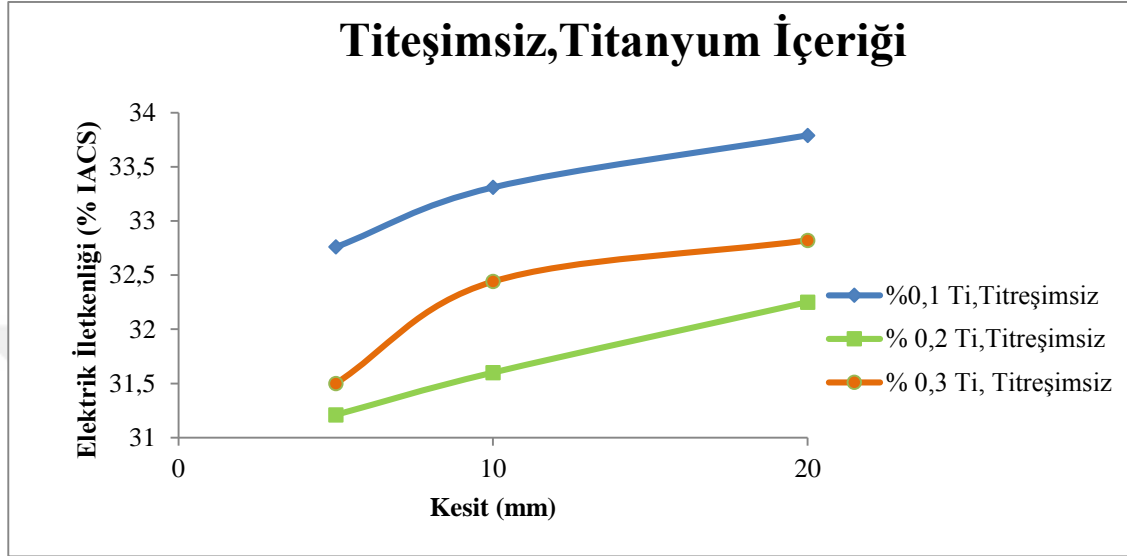
4.4. Elektriksel İletkenlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Döküm için üretilen numunelerin elektrik iletkenliği üzerine yapılan analizlerde Şekil 4.7’de ve Şekil 4.8’de titreşimsiz ve titreşimli döküm yöntemindeki farklı Ti içeriğinin kesit kalınlığına göre etkisi gösterilir iken Şekil 4.9’da ise ortalama elektrik iletkenlik değerleri gösterilmektedir.

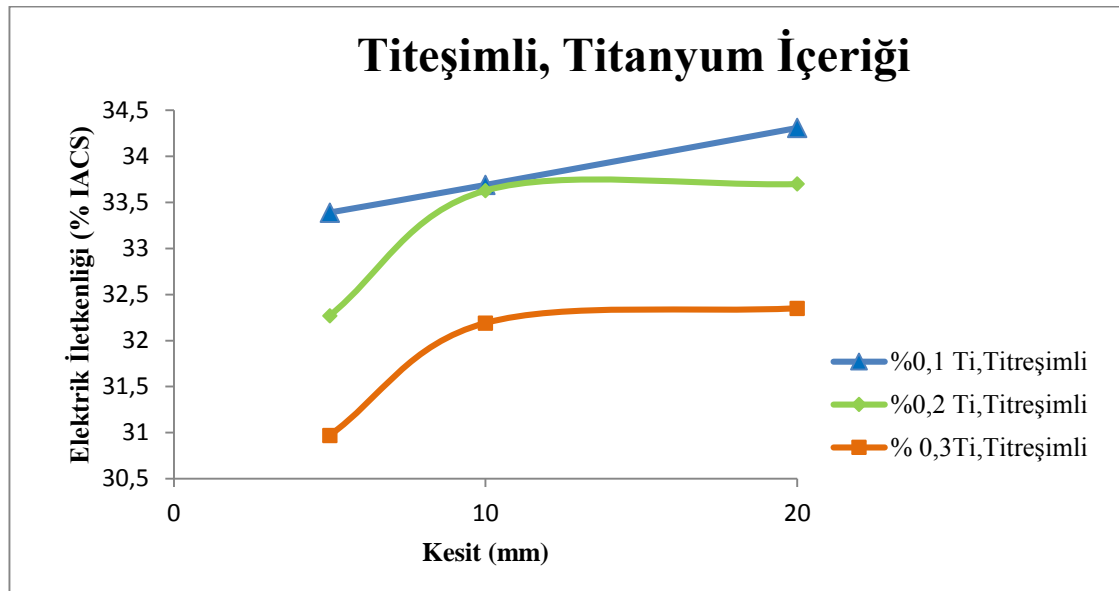
Titanyum çözeltinin içerisinde $2,88 \mu\Omega\cdot\text{cm}/\%\text{ağ.}$ ve çözeltinin dışında $0,12 \mu\Omega\cdot\text{cm}/\%\text{ağ.}$ alüminyum alaşımlarının öz direncini artırıcı önemli elementlerden birisidir [Aluminum Properties and Physical Metallurgy - John E. Hatch - ASM International]. Bu çalışmada da tane incelticisi olarak kullanılan Al5Ti1B ön alaşımının ağ. %0,1’den 0,3’e kadar eklendiği göz önüne alındığında ağ. %0,1 Ti içeren dökümlerden sonraki tüm dökümlerin numunelerinin en düşük elektrik iletkenlik değerlerini vermesi döküm deneylerinden önce de beklenilmektedir. Nitekim deneylerden elde edilen sonuçların neticesinde de bu beklentinin gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil xx’de %IACS elektrik iletkenliklerinin ortalama değerlerinin gösterildiği grafikten de açık bir şekilde %0,1Ti’den %0,3Ti’ye yükseldiği durumda yani artan Ti miktarı ile elektrik iletkenliğinin %33 IACS değerlerinden %31 IACS mertebesine düştüğü görülmektedir. Dökümlerin mekanik titreşim desteği ile gerçekleştirilmesinin de elektriksel iletkenlik açısından çok da bir değişiklik göstermediği tespit edilmiştir. Dolayısıyla döküm yönteminin farklılaştırılması elektriksel iletkenlik açısından önem arz etmemektedir. Bu düşüşlerin sebebi Şekil xx’deki taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsünden açık bir şekilde görüldüğü öbek öbek Ti fazları mevcuttur. Bu fazların incelenen numunelerin bütününde farklı bölgelerde biriktiği görülmüştür. Bu

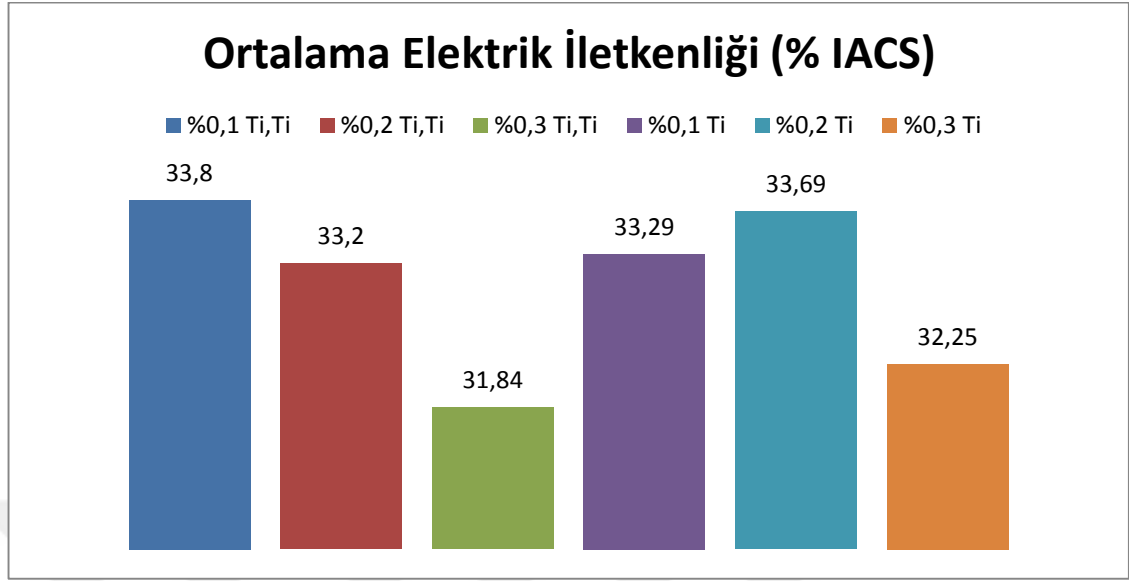
tarz segregasyon olmuş bölgelerin elektriğin iletiminde bariyer görevi görmesi düşüşün arkasındaki asıl nedendir.



Şekil 4.8. Titanyum içeriğine göre titreşimsiz numunelerin iletkenlik değerleri



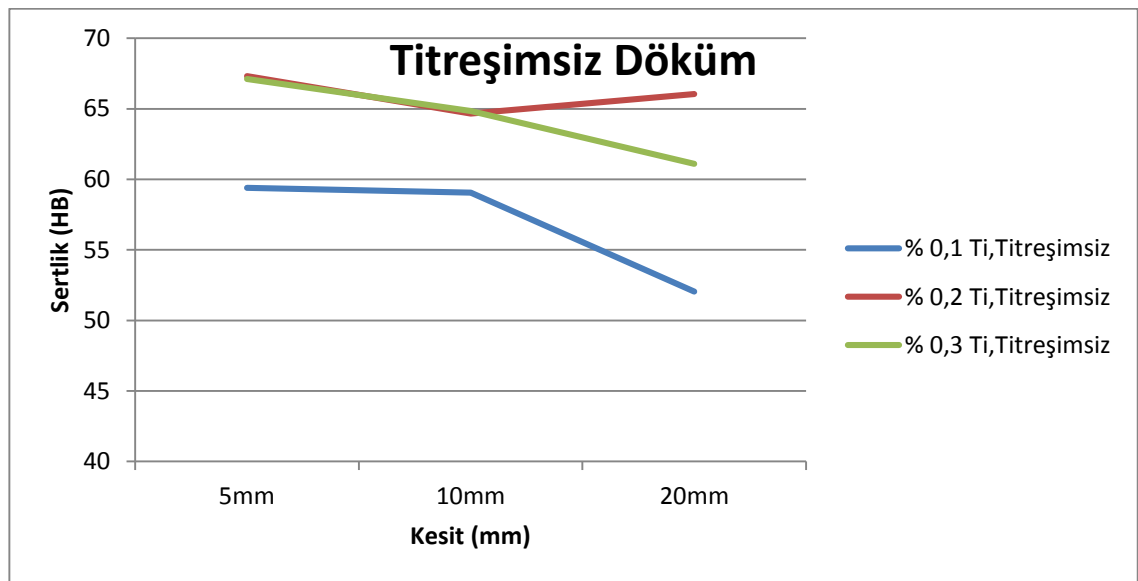
Şekil 4.9. Titanyum içeriğine göre titreşimli numunelerin iletkenlik değerleri



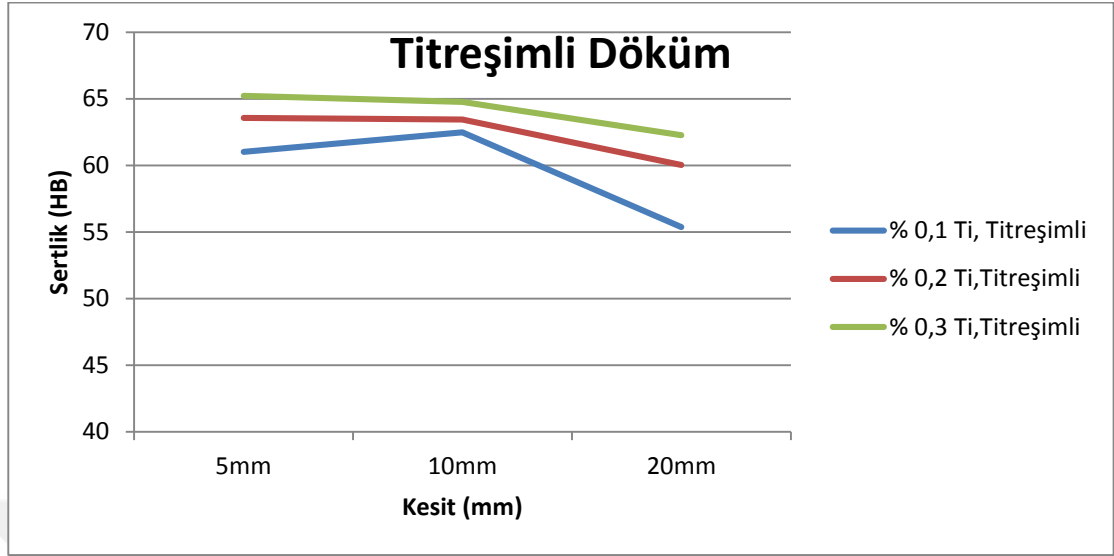
Şekil 4.10. Al₇Si_{0,3}Mg alaşımının titreşimli ve titreşimsiz döküm ürünlerinin ortalama iletkenlik değerleri

4.5. Sertlik Ölçüm Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.10 ve 11’de titreşimsiz ve titreşimli dökümlere ait farklı tane incelticisi Al₅Ti₁B ilaveleri ile kesit kalınlığına bağlı olarak sertlik değerleri gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Ti oranlarına göre titreşimsiz numunelerin sertlik ölçümleri



Şekil 4.12. Ti oranlarına göre titreşimli numunelerin sertlik ölçümleri

Artan titanyum miktarı ile sertliğin arttığı her iki döküm koşullarında da görülmektedir. Ancak kesit kalınlığının artması ile sertlik değerlerinin de düştüğü kesit kalınlığına bağlı soğuma hızı ile ilişkilendirilerek düşmesi beklenilmektedir. Burada Ti değerinin artması ile oluşan etkinin döküm koşulları ne olursa olsun kesit kalınlığının etkisinden daha az olduğu görülmektedir. Döküm koşullarının titreşimli ya da titreşimsiz olması sertlik değerleri açısından belirgin bir etki yapmadığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇ

- Titanyumun alüminyum ve alaşımlarında tane inceltme yeteneği bir kere daha gözlemlenmiştir.
- Yapılan (Braynt *et al.* 1990; Iberra 1999) çalışmalarda Ti içeriğinin artması ile tane inceltici etkisinin arttığı saptanmıştır. Bu çalışmada da benzer şekilde artan Ti miktarı ile tane inceltme oranı artmıştır.
- Titreşimle tane inceltme yöntemleri üzerine çalışan araştırmacılar (Chirita *et al.* 2009; Sayuti *et al.* 2016) bildirilerinde titreşim mekanizmasının sıvı metal katılaşmaya kadar mikroyapıda etkili rol oynadığı ve tane inceltme sağladığı tespit edilmiştir. Mekanik titreşim yöntemiyle üretilen malzeme için de bu tezde benzer etki ile tane inceltme etkisi gözlemlenmiştir.
- Titreşimsiz yapılan dökümlere nispetle titreşimli dökümlerin tane inceltme oranı %10 civarındadır.
- İçyapısal değişimler açısından titanyum oranının artması ile birincil fazların morfolojisinde daha fibroz bir yapı söz konusudur.
- Elektriksel iletkenlik değerleri %Ti miktarı ile doğrudan ilişkilidir.
- Artan %Ti ile elektriksel iletkenlik değerleri düşmüştür.
- %2'ye kadar Ti ilavesi elektriksel iletkenlik değerlerinde artış sağlarken bu değerden sonraki ilavelerin iletkenlik üzerinde zararlı ve bozucu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Çalışmalarda tane inceltmenin mekanik özellikler üzerinde etkisinden bahsederken (Edwards 2004; Gütsoy vd 2015; Uludağ 2016) mekanik özelliklerden sertlik değerinin önemli ölçüde etkilendiği bildirilmiştir. Benzer etki verilen sonuçlarda görülmüştür yani sertlik değerleri tane inceltme oranı ile doğrudan ilişkilidir. İnce tane oranı arttıkça sertlik artmıştır.
- İç yapıdaki sünek faz olan birincil Al dendritlerinin küresel forma kavuşturulması ile %3 civarında bir sertlik artışı sağlanabilmiştir.
- (Lieserberg *et al.* 2001; Peres *et al.* 2004; Tunçay 2012) gibi araştırmacıların çalışmalarında, SDAS ve SDAL değerleri soğuma hızına bağlı olarak azalış

göstermiştir. Çalışmaların ışığında yapılan bu çalışmada literatür bilgileriyle örtüşen sonuçlar bulunmuş olup SDAS için %Ti içeriğine göre ortalama 23 μ m-41 μ m kadar kesit kalınlığı arttıkça artmıştır. SDAL için ise yine % Ti içeriğine göre yaklaşık 30 μ m-45 μ m arasında kesit kalınlığı arttıkça artmıştır.



KAYNAKLAR

- Başer T.A., 2012, Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, Mühendis ve Makine, 53, 51-58.
- Baypınar, F., 2005, Alüminyum Döküm Alaşımlarına Al₅Ti₁B ile Tane İnceltme İşlemi Uygulanması, Gazi üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Birol, Y., 2006, Grain refining efficiency of Al-Ti-C alloys, Journal of Alloys and Compounds, 422, 128-131.
- Braynt, M., Pearson, J., 1990, Tane inceltme ve Alaşımlandırma, Alüminyum Dergisi, 7, 15-18.
- Çam, G., 2001, Al-Alaşımları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri. TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 267-277.
- Campbell, J. II., 2015, Complete Casting Handbook, Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.
- Campbell, J., 2006, Entrainment Defects, Materials Science and Technology, 22-2, 127-145.
- Chen, C.J., 2014, Optimization of mechanical properties in A356 via simulation and permanent mold test-bars. Doktora Tezi. Department of Materials Science and Engineering- Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio.
- Chirita, G., Stefanescu, I., Soares, D., Silva, F.S., 2009, Influence of vibration on the solidification behavior and tensile properties of an Al-18 wt %Si alloy, Materials and Design, 30, 1575-1580.
- Çolak, M., Balcı, M., 2016, Study on effect of the mechanical vibration on solidification in process of A356 aluminium alloy casting, international conference on engineering and natural sciences.
- Çolak, M., Kayıkcı, R., 2009, Alüminyum dökümlerinde tane inceltme, SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi, 13, 11-17.
- Demir, A., Açıkalmaz, M., 2003, CaAl₄ İntermetaliklerinin Alüminyum Alaşımlarında Tane inceltilmesine Etkisi, 11. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 1448-1496
- Dong, X., Zhang, Y., Shouxun, J., 2017, Enhancement of mechanical properties in high silicon gravity cast AlSi9Mg alloy refined by Al₃Ti₃B master alloy, 700, 291-300.
- Edwards, K.L., 2004, Strategic substitution of new materials for old: Applications in automotive product development, Materials and Design, 25, 529-533.
- Fan, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Qoin, T., Zhou X., Thompson G.E., Pennycook, T., Hashimoto, T., 2015, Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system, Acta Materialia, 84, 292-304.
- Gürsoy, Ö., Erz, E., Dışpınar, D., Yüksel, Ç., 2015, A356 Alüminyum Döküm Alaşımına Al-5Ti-1B Tane İnceltici İlavesinin Süreye Bağlı Etkisi, 7. Alüminyum Sempozyumu.

- Hong, Y., Wang, N., Guan R., Tie, D., Li, Z., An, Y., Zhang, Y., 2018, Evolution of secondary phase particles during deformation of Al-5Ti-1B master alloy and their effect on α -Al grain refinement, 34, 2297- 2306.
- Hong-min, G., Zhang, A., Yang, X., Yan, M., 2014, Grain refinement of Al-5%Cu aluminum alloy under mechanical vibration using meltable vibrating probe, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 24, 2489-2496.
- Hua, Z., Fengming, Q., Chen, H., 2019, Effect of ultrasonic temperature and output power on microstructure and mechanical properties of as-cast 6063 aluminum alloy, Journal of Alloys and Compounds, 777, 1025-1029.
- Ibarra, D.G., 1999, A thesis submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy, Department of Mining and Metallurgical Engineering McGill University, Montreal, Canada.
- Jianbo, Y., Ren, Z., Ren, W., Deng, K., Zhong, Y., 2009, Effects of electromagnetic vibration on the structure and mechanical properties of Al-6%Si alloy during directional solidification, Acta Metall, 22, 35-39.
- Jiang, W., Fan, Z., Cheen, X., Wang, B., Wu, H., 2014, Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting, Materials Science & Engineering A, 228-237.
- Koşatepe, A. 2016, Toz Metalurjisi Yöntemiyle Karbon Nanotüp Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Mikroyapı, Mekanik, Korozyon Özelliklerinin Araştırılması, Atatürk üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Kumar, D.K., Geeta, A., Rajesh, P., 2015, Influence of Ultrasonic Assisted Stir Casting on Mechanical Properties of Al6061-nano Al₂O₃ Composites, 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, Materials Today: Proceedings , 2, 3017 – 3026.
- Kurban, F., Çukur, A., Dönmez A., Kaba, M., 1997, Tane inceltme işlemlerinin iyileştirilmesi ve alçak basınçlı döküm sistemleriyle AlSi5Mg0,3 alaşımlı jant üretimi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.
- Lee, Y.C., Dahle A.K., Stjhon, D., Hutt J.E.C., 1999, The effect of grain refinement and silicon content on grain formation in hypoeutectic Al-Si alloys, Materials Science and Engineering A, 259, 43–52.
- Lieserberg, O., Drossel, G., 2001, Casting Aluminium Hand Book 2, Aluminium Verlag GMBH, Düsseldorf, 386-388-406.
- Lili. Z., Qiuju, Z., Jiang, H., Zhao, J., 2019, Interfacial energy between Al melt and TiB₂ particles and efficiency of TiB₂ particles to nucleate α -Al, Scripta Materialia, 160, 25–28.
- Lü, S., Wu, S., Zhu, Z., An, P., Mao, Y., 2010, Effect of semi-solid processing on microstructure and mechanical properties of 5052 aluminum alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 20, 758-762.
- Maxwell, I., Hellawell, A., 1974, A Simple Model for Grain Refinement during Solidification, Acta Metallurgica, 23.
- McDowell, D.L., Gall, K., Horstemeyer., Fan, J., 2003, Microstructure-Based Fatigue Modeling of Cast A356-T6 Alloy, Engineering Fracture Mechanics, 70, 49–80.

- Moon, K., Kyung, S.L., 1999, A study of the microstructure of nanocrystalline Al–Ti alloys synthesized by ball milling in a hydrogen atmosphere and hot extrusion, *Journal of Alloys and Compounds*, 291, 312–321.
- Palazzo, F., 1988, *The Economics of Aluminium*, Third Ed., p.353, Roskill Information Services Ltd. London.
- Peres, M.D., Siqueira, C.A., Garcia, A., 2004, Macrostructural and Microstructural Development in Al-Si Alloys Directionally Solidified Under Unsteady-State Conditions, *Journal of Alloys and Compounds*, 381, 168-181.
- Pongen, R., Kumar, A.B., Parthiban, P., 2019, Study of microstructure and mechanical properties of A713 aluminium alloy having an addition of grain refiners Al-3.5 Ti-1.5C and Al-3Cobalt, *Results in Physics*, 13, 102105.
- Puga, H., Costa, S., Ribeiro, S., Prokic, M., 2011, Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 1729– 1735.
- Sayuti, M., 2016, *Metal Matrix Composite Products by Vibration Casting Method*, Universiti Putra Malaysia, Serdang, Selangor, Malaysia.
- Taghavi, F., Saghafian, H., Khrrazi, Y.H.K., 2009, Study on the effect of prolonged mechanical vibration on the grain refinement and density of A356 aluminum alloy, *Materials and Design*, 30, 1604–1611.
- Tunçay, T., 2012, A356 Alüminyum Döküm Alaşımlarında Sıvı Metal Hareketinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi Doktora Tezi, Ankara.
- Uludağ, M., 2016, Yönlendirilerek Dökülmüş Al-Si Alaşımlarında Tane İncelticilerin Porozite Oluşumu Üzerindeki Rolü, Published in 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Alanya/Antalya – Turkey.
- Vives, Ch., 1993, Effects of electromagnetic vibrations on the microstructure of continuously cast aluminium alloys, *Materials Science and Engineering*, A173, 169-172.
- Wang, T., Chen, Z., Fu, H., Li, T., 2012, Grain refinement mechanism of pure aluminum by inoculation with Al–B master Alloys, *Materials Science and Engineering A*, 549, 136– 143.
- Wang, Y., Fang, C.M., Zhou, L., Hashimoto, T., Zhou, X., Ramasse, Q.M., Fan, Z., 2019, Mechanism for Zr poisoning of Al-Ti-B based grain refiners, *Acta Materialia*, 164, 428-439.
- Yüksel, Ç., 2016, Alüminyum ve alaşımlarının sıvı metal kalitesinin artırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, İstanbul.
- Yüksel, Ç., 2018, Titreşimli Katılaştırmanın Birincil ve İkincil Al7Si0,3Mg Alüminyum Alaşımlarının İy yapısına Etkisi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayı 2, 986-992.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzurum’da doğmuştur. Lise eğitimini Erzurum Şükrüpaşa Lisesi’nde, lisans eğitimlerini ise sırasıyla 2011 yılında Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü’nde ve 2015 yılında Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği’nde tamamlamıştır. Eğitim hayatına devam ederek 2016 yılında Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanomalzeme A.B.D.’de Yüksek Lisans eğitimini tamamlamıştır. Ayrıca halihazırda 2016 yılında başladığı Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği lisans programına devam etmektedir.

Yüksek Mühendis ve Fizikçi Koşatepe, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos Meslek Yüksekokulu, Optisyenlik Programı’nda Bölüm Başkanı olarak Öğretim Görevlisi unvanı ile görev yapmaktadır.