T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİMLİ SOĞUTUCU İLE DÖKÜMDE TİTREŞİM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bayram GÜNEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Prof. Dr. Kerem ALTUĞ GÜLER

Temmuz, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EĞİMLİ SOĞUTUCU İLE DÖKÜMDE TİTREŞİM ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Bayram GÜNEŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 23.07.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kerem ALTUĞ GÜLER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Rıdvan GECÜ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Gökhan ÖZER, Üye
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Eğimli Soğutucu ile Dökümde Titreşim Etkisinin İncelenmesi" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Bayram GÜNEŞ

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve bu çalışma sürecinde bilgilerini benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Kerem ALTUĞ GÜLER'e,

Çalışmanın deneysel kısmı boyunca yanımda olan ve tecrübesini benimle paylaşan değerli hocam Ar. Gör. Dr. Serhat ACAR'a,

Araştırma görevlisi olarak çalıştığım ve karakterizasyon çalışmalarını gerçekleştirdiğim Yeditepe Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Nanoteknoloji Mühendisliği'ne,

Maddi ve manevi katkılarıyla bana destek veren değerli dostlarım Samet KARADAĞ, Enes TURAN, Hasan POLAT, Hilal YILDIZ ve Zeynep ÇAYLI'ya,

Son olarak 25 yıldır benimle olan, sevgimi ve saygımı sadece kelimelerle ifade edemeyeceğim sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bayram GÜNEŞ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 5
2 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI 7
2.1 Dövme Alüminyum Alaşımları 7
2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları 8
2.3 A356 10
3 YARI KATI ŞEKİLLENDİRME 12
3.1 Küresel Mikroyapıya Sahip Hammadde Üretimi 12
3.2 Sıvı Faz İşlemleri 14
3.2.1 Manyetohidrodinamik Karıştırma 14
3.2.2 Kimyasal Tane İnceltme 15
3.2.3 Sprey Döküm 16
3.2.4 Ultrasonik İşlemler 17
3.2.5 Düşük Üst Isılı Döküm 18
3.2.6 Yeni Reo-Döküm 19
3.2.7 Sürekli Reo Dönüşüm 20
3.2.8 Yarı Katı Reo Döküm 22
3.2.9 Eğimli Soğutucu ile Döküm 23
3.2.10 Gaz Kaynaklı Yarı Katı İşlemi 23
3.2.11 Döndürülmüş Entalpi Dengeleme Cihazı İşlemi 24

3.2.12 Hızlı Bulamaç Şekillendirme 26

3.3 Katı Faz İşlemleri 27

4 EĞİMLİ SOĞUTUCU İLE DÖKÜM **29**

4.1 Alt Başlık Proses Parametreleri 30

4.1.1 Kalıp Malzemesi 30

4.1.2 Döküm Sıcaklığı 30

4.1.3 Döküm Açısı 31

4.1.4 Soğutucu Uzunluğu 31

4.1.5 Dinamik Etkiler 32

5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR **33**

6 SONUÇLAR ve TARTIŞMA **37**

7 SONUÇ **51**

KAYNAKÇA **52**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **58**

SİMGE LİSTESİ

A	Alan
Al	Alüminyum
D	Bilya Çapı
α	Birincil Faz
HB	Brinell Sertlik Değeri
Ç	Çevre
g	Gram
Hz	Hertz
d	İz Çapı
τ	Kayma Gerilmesi
mm	Milimetre
π	Pi Değeri
°C	Santigrat Derece
Si	Silisyum
R	Tane Çapı
F	Uygulanan Yük
η	Viskozite
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

CRP	Sürekli reo dönüşüm
GISS	Gaz kaynaklı yarı katı işlemi
HIP	İzostatik presleme
MHD	Manyetohidrodinamik karıştırma
MIT	Massachusets Teknoloji Enstitüsü
NRC	Yeni reo-döküm
RAP	Recrystallization and partial melting
RSF	Hızlı bulamaç şekillendirme
SEED	Döndürülmüş entalpi dengeleme cihazı işlemi
SIMA	Strain induced melt activated
SSR	Yarı katı reo döküm prosesi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Al-Si faz diyagramı 10

Şekil 3. 1 a) Dentritik mikroyapı b) küresel mikroyapı 13

Şekil 3. 2 Tiksotropik malzemelerde vizkozite ve kayma gerilmesinin değişimi 13

Şekil 3. 3 a) İlk dentrit oluşumu b) dentritlerin büyümesi c) rozet şekline dönüşüm d) rozetlerin büyümesi e) rozetlerin küreselleşmesi 14

Şekil 3. 4 Manyetohidrodinamik karıştırma'da karıştırma yönleri; (a) yatay (b) dikey (c) helisel 15

Şekil 3. 5 Yeni Reo-Döküm şematik gösterimi 20

Şekil 3. 6 Sürekli Reo Dönüşüm şematik gösterimi 21

Şekil 3. 7 SSR şematik gösterimi 23

Şekil 3. 8 a)SIMA b)RAP proseslerine ait sıcaklık-zaman grafikleri 27

Şekil 4. 1 Eğimli Soğutucu ile Döküm Prosesi Şeması…….. 29

Şekil 5. 1 Deney Düzeneği…….. 35

Şekil 5. 2 Soldan sağa doğru döküm numunenin besleyici kafa kısmı, döküm numune gövdesi, hazırlanan döküm numune, hazırlanan yeniden ısıtılmış numune..... 36

Şekil 6. 1 1 ve 1RH Mikroyapısı…… 37

Şekil 6. 2 2 ve 2RH Mikroyapısı 37

Şekil 6. 3 3 ve 3RH Mikroyapısı 37

Şekil 6. 4 4 ve 4RH Mikroyapısı 38

Şekil 6. 5 5 ve 5RH Mikroyapısı 38

Şekil 6. 6 6 ve 6RH Mikroyapısı 38

Şekil 6. 7 7 ve 7RH Mikroyapısı 39

Şekil 6. 8 8 ve 8RH Mikroyapısı 39

Şekil 6. 9 9 ve 9RH Mikroyapısı 39

Şekil 6. 10 10 ve 10RH Mikroyapısı 40

Şekil 6. 11 11 ve 11RH Mikroyapısı 40

Şekil 6. 12 12 ve 12RH Mikroyapısı 40

Şekil 6. 13 13 ve 13RH Mikroyapısı 41

Şekil 6. 14 14 ve 14RH Mikroyapısı 41

Şekil 6. 15 15 ve 15RH Mikroyapısı 41

Şekil 6. 16 16 ve 16RH Mikroyapısı 42

Şekil 6. 17 Döküm Numunelerinin Tane Boyları 43

Şekil 6. 18 Yeniden Isıtılmış Numunelerin Tane Boyları 43

Şekil 6. 19 Numunelerin Küresellik Değerleri 46
Şekil 6. 20 Döküm Numunelerinin Sertlik Değerleri 48
Şekil 6. 21 Yeniden Isıtılmış Numunelerin Sertlik Değerleri 48

TABLO LİSTESİ

Tablo 5. 1 A356'nın ağırlıkça bileşim yüzde değerleri (%) 33
Tablo 5. 2 Döküm Planlaması 34

ÖZET

Eğimli Soğutucu ile Dökümde Titreşim Etkisinin İncelenmesi

Bayram GÜNEŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

Bu çalışmada dökümler, alüminyum A356 alaşımı kullanılarak; 650, 500 ve 350 mm uzunluğunda ve 50 mm çaplı eğimli bakır boru yardımıyla 60˚,45˚ ve 30˚ döküm açılarıyla, 635 °C, 645 °C ve 655 °C sıcaklıkta farklı seviyelerde titreşim altında çelik bir kalıba yapılmıştır. Mekanik titreşimin döküm sırasında hem bakır boruya hem de çelik kalıba etkimesi sağlanmıştır. Bu yarı-katı şekillendirmeye uygun hammadde üretim tekniği; likidüs eğrisine yakın bir düşük üst sıcaklıktan dökümün ardından ani bir şekilde katılaşma olarak özetlenebilir. Hızlı soğumayla birlikte düşük ısı girdisi çekirdeklenmeyi arttırıp dentritik büyümeyi baskılarken eğimli akıştaki sürüklenmenin neden olduğu kesme kuvveti büyümeye çalışan dentritlerin kırılmasını ve sonuçta küresel mikroyapı oluşmasını sağlar. Bu da ürünü farklı yarı-katı şekillendirme proseslerine uygun hale getirir. Bu teknikle üretilen silindirik parçalardan kesilen numuneler elektrik dirençli bir fırında 60 dakikada 595 ˚C'ye çıkarılıp 50 dakika bu sıcaklıkta yeniden ısıtılmıştır. Yeniden ısıtılmış numuneler fırından çıkar çıkmaz su verilerek soğutulmuştur.

Döküm hali ile yeniden ısıtma ardından deforme edilmeden suda soğutulan numunelerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin belirlenmesi için optik mikroskop incelemeleri ve Brinell sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda yeniden ısıtılmış numunelerin döküm numunelerden yüksek sertlik ve tane boyu değerlerine sahip olduğu gözlenmiştir.

Titreşim etkisi ile yapılan dökümler titreşim etkisinin olmadığı döküm numuneler ile karşılaştırıldığında daha küçük tane boyu değerleri gözlenmiştir. Sertlik ve küresellik değerleri ise artış göstermiştir. Titreşim şiddetinin artması da numunelerin sertliğini ve küresellik değerlerini arttırırken tane boyunu küçültmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yarı-katı şekillendirme, eğimli soğutucu döküm, küresel mikroyapı, A356 alaşımı.

ABSTRACT

Investigation of The Vibration Effect in Cooling Slope Casting

Bayram GÜNEŞ

Department of Metallurgy and Material Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

In this study, the castings were made using aluminum A356 alloy; with the help of 350, 500 and 650 mm long and 50 mm diameter curved copper pipe, with a casting angles of 60˚,45˚ and 30˚, 635 °C, 645 °C and 655 °C temperature under different levels of vibration was made into a steel mold. It has been ensured that mechanical vibration affects both the copper pipe and the steel mold during casting. This raw material production technique suitable for semi-solid shaping can be summarized as sudden solidification after casting from a low upper temperature close to the liquidus curve. While low heat input combined with rapid cooling increases nucleation and suppresses dendritic growth, the shear force caused by the drag in inclined flow causes the dendrites trying to grow to break, resulting in the formation of a spherical microstructure. This makes the product suitable for different semi-solid forming processes. Samples cut from cylindrical parts produced with this technique were heated to 595 ˚C in an electric resistance oven in 60 minutes and reheated at this temperature for 50 minutes. Reheated samples were cooled by dropping them into water as soon as they came out of the oven.

Optical microscope examinations and Brinell hardness measurements were performed to determine the microstructure and hardness properties of the samples that the casting state and were cooled in water without deforming after reheating.

As a result of the study, it was observed that the reheated samples had higher hardness and grain size values than the cast samples.

Smaller grain size values were observed in castings made with vibration effect compared to cast samples without vibration effect. Hardness and sphericity values increased. Increasing the vibration intensity increased the hardness and sphericity values of the samples and reduced the grain size.

Keywords: Semi-solid forming, inclined coolant casting, spherical microstructure, A356 alloy.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Alüminyum yer kabuğunun %8'ini oluşturmaktadır [1]. Metaller arasında bolca bulunmasına karşın, serbest halde bulanamadığı için elde etmesi zor prosesler gerektirir. Hafiflik, ısıl işlem sonrası yüksek mukavemete sahip olma, alaşımlandırma, kolay şekillendirilme, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, korozyona karşı dayanıklılık gibi özellikleriyle endüstride vazgeçilmez metallerden birisidir.

Malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz şekilde etkileyen kontrolsüz dentritik büyümeler geleneksel katılaşma proseslerinde meydana gelir. Bu olumsuz özelliklerden kurtulmak için yarı katı şekillendirme yöntemleri kullanılabilir [2]. Bu yöntemlerde dentritik yapı baskıya uğrar ve iyi mekanik özellikler sergiler, çekinti boşlukları azalır [3].

Gencalp ve arkadaşları [4] A380 alaşımını; 60º eğimle, 630ºC'de 500 mm'lik yolluk vasıtasıyla dökümünü gerçekleştirdiği ingotların, 5.75 Hz frekans ile titreşime maruz bırakılarak mikroyapı değişimlerini incelemiştir. Bu çalışma titreşimin çekirdeklenme miktarını arttırdığını göstermektedir. Eğimli plaka boyunca titreşim daha düzgün soğumaya neden olur ve çekirdeklenme miktarını artırır.

Döküm külçelerin rozet morfolojisi, tekrar ısıtma ve izotermik bekletme sonrasında küresel tanelere dönüşmüştür. Eğimli soğutucu ile döküm sırasındaki titreşim, matris içinde düzgün bir şekilde dağılan daha küresel Al parçacıklarına yol açtı.

Prosenjit Das ve arkadaşları [5] A356 alaşımı kullanarak; 45º ve 60º döküm açılarıyla, 650ºC sıcaklıkta çelik ve soğutma kanalları içeren 500 mm'lik bir yolluk vasıtasıyla döküm gerçekleştirmiştir.

45 ve 60 eğim açısı ile dökülen numunelerin tane boyu ve küresellik değeri karşılaştırıldığında Primer faz morfolojisi 60 eğim açısı durumunda daha küreseldir çünkü azaltılmış yer çekimi sebebiyle eriyik akışı sırasında azaltılmış kesme kuvveti oluşturmuştur. Tane boyu 45 derecede daha fazladır.

Tugiman ve arkadaşları [6] tarafından yapılan çalışmada, ağırlıkça %8,5 Si içeren alüminyum alaşımını, çeşitli soğuma eğimi parametreleri kullanarak alaşımın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için dökmüştür. Kullanılan döküm sıcaklıkları 640, 660 ve 680°C olup, soğutma eğimleri 30°, 45° ve 60° açılara ve soğutma eğimi uzunlukları 200 mm, 300 mm ve 400 mm'ye ayarlanmıştır. Dökümden sonra numuneler 550°C'de 6, 10 ve 14 saat çözelti işlemine tabi tutulmuş ve ardından 180°C'de 4, 8 ve 12 saat yaşlandırma yapılmıştır.

Sonuçlar, çekme mukavemeti ve sertlik dahil olmak üzere optimum mekanik özelliklerin, 660°C'lik bir döküm sıcaklığında, 45°'lik bir soğuma eğimi açısında ve 300 mm'lik bir eğim uzunluğunda elde edildiğini göstermiştir. Bu koşullar, ince birincil α-Al parçacıkları ve iyi dağılmış bir ötektik Si fazı ile karakterize edilen, homojen ve tek biçimli bir mikro yapının oluşumunu kolaylaştırmıştır. 10 saat çözelti işlemi ve ardından 8 saat yaşlandırma, mikro yapının homojenizasyonunu ve güçlendirme fazlarının çökelmesini teşvik ederek mekanik özellikleri daha da geliştirmiştir.

Çalışma, yerçekimi dökümüyle üretilen alaşımın mekanik özelliklerini optimize etmek için döküm sıcaklığının, soğutma eğimi parametrelerinin ve döküm sonrası ısıl işlemin hassas kontrolünün gerekli olduğu sonucuna varmıştır.

Li ve arkadaşları [7] tarafından yapılan çalışmada, yarı katı 7075 alüminyum alaşımının mikro yapısı ve özellikleri, kapalı bir soğutma eğimi kanalı kullanılarak araştırıldı. Alaşım, 20°, 30° ve 40° soğutma eğimi açıları ve 200 mm, 300 mm ve 400 mm soğutma eğimi uzunlukları ile 620, 640 ve 660°C sıcaklıklarda döküldü. Kapalı soğutma eğimi kanalı, soğutma işleminin homojenliğini arttırmayı ve oksidasyonu en aza indirmeyi amaçladı.

Dökümden sonra mikroyapısal özellikler, dentritik olmayan birincil α-Al parçacıklarının oluşumuna odaklanılarak analiz edildi. Çekme mukavemeti, sertlik ve uzama dahil olmak üzere mekanik özellikler de değerlendirildi. İnce ve küresel birincil α-Al parçacıkları sergileyen optimal mikro yapı, 640°C'lik bir döküm sıcaklığında, 30°'lik bir soğutma eğimi açısında ve 300 mm'lik bir eğim uzunluğunda elde edildi. Bu koşullar verimli ısı ekstraksiyonunu kolaylaştırdı ve istenen yarı katı mikro yapıyı destekledi.

Çalışma, kapalı soğutma eğimi kanalının, geleneksel açık soğutma eğimlerine kıyasla mikro yapının homojenliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini buldu. Bahsedilen optimal döküm parametrelerinde en iyi sonuçlar elde edilerek, geliştirilmiş mikro yapı sayesinde mekanik özellikler iyileştirilmiştir.

Saffari ve arkadaşları [8] tarafından yapılan çalışmada, Al-25 Mg_2Si kompozitinin yarı katı döküm işlemi, titreşimli bir soğutma eğimi kullanılarak araştırıldı. Amaç, titreşimin kompozitin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemekti. Kullanılan döküm sıcaklıkları 600, 620 ve 640°C, soğutma eğimi açıları 20°, 30° ve 40° ve titreşim frekansları 0, 20 ve 40 Hz idi.

Sonuçlar, eğimli soğutucu ile döküm sırasında mekanik titreşim uygulamasının kompozitin mikroyapısal özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. İnce ve düzgün şekilde dağılmış Mg_2Si parçacıklarıyla karakterize edilen optimal mikro yapı, 620°C'lik bir döküm sıcaklığında, 30°'lik bir soğuma eğimi açısında ve 20 Hz'lik bir titreşim frekansında elde edildi. Bu koşullar çekirdeklenme hızını arttırdı ve kaba dentritik yapıların büyümesini bozarak homojen bir mikro yapıya yol açtı.

Mekanik özellik değerlendirmeleri, optimal koşullar altındaki kompozit dökümün, titreşim olmadan dökülen numunelere kıyasla üstün çekme mukavemeti ve sertlik sergilediğini gösterdi. Mekanik özelliklerdeki gelişmeler, inceltilmiş mikro yapıya ve Mg_2Si parçacıklarının düzgün dağılımına atfedilmiştir.

Mahdieh ve arkadaşları [9] tarafından yapılan çalışmada, eğimli soğutucu ile döküm ve kalıp titreşiminin A356 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki eş zamanlı etkileri araştırılmıştır. Amaç, bu tekniklerin kombinasyonunun katılaşma sürecini ve alaşımın sonuçta ortaya çıkan özelliklerini nasıl etkilediğini anlamaktı. Deneyler, 650, 670 ve 690°C döküm sıcaklıkları, 25°, 35° ve 45° soğutma eğimi açıları ve 200 mm, 300 mm ve 400 mm soğutma eğimi uzunlukları kullanılarak gerçekleştirildi. Kalıp titreşimleri 0, 30 ve 60 Hz frekanslarında uygulanmıştır.

Sonuçlar, eğimli soğutucu ile döküm ve kalıp titreşimi kombinasyonunun A356 alaşımının mikro yapısını önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. İyi dağılmış birincil α-Al parçacıklarıyla ince ve homojen bir mikro yapı elde etmek için en uygun koşulların, 670°C'lik bir döküm sıcaklığı, 35°'lik bir soğutma eğimi açısı, 300 mm'lik bir soğutma eğimi uzunluğu ve 30 Hz kalıp titreşimi olduğu bulunmuştur.

Bu parametreler etkili çekirdeklenmeyi teşvik etti ve kaba dentritik yapıların büyümesini bozarak daha iyi bir mikro yapıya yol açtı.

Mekanik testler, bu optimal koşullar altında dökülen A356 alaşım numunelerinin, kalıp titreşimi olmadan dökülenlere kıyasla üstün çekme mukavemeti ve sertlik sergilediğini gösterdi. Mekanik özelliklerdeki gelişmeler, eğimli soğutucu ile dökümün soğutulması ve kalıp titreşiminin birleşik etkileri yoluyla elde edilen gelişmiş mikro yapıya atfedilmiştir.

Chen ve arkadaşları [10] tarafından yapılan çalışmada, mekanik titreşimin döküm AZ91D magnezyum alaşımının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırıldı. Araştırma, katılaşma süreci sırasında uygulanan mekanik titreşimlerin alaşımın tane yapısını ve sonuçta ortaya çıkan özelliklerini nasıl etkilediğini anlamayı amaçladı. Deneyler AZ91D alaşımının 0, 30 ve 60 Hz frekanslarda mekanik titreşim uygulanarak dökülmesiyle gerçekleştirildi.

Sonuçlar, mekanik titreşimin AZ91D alaşımının mikro yapısını önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. Katılaşma sırasında titreşimlerin uygulanması, tane yapısında dikkate değer bir iyileşmeye yol açarak, daha ince ve daha düzgün bir şekilde dağılmış α-Mg taneleri ve daha az β-Mg17Al12 metaller arası faz varlığının ortaya çıkmasına neden oldu. Optimum mikroyapısal özellikler, çekirdeklenme sürecini etkili bir şekilde destekleyen ve dentritik büyümeyi bozan 30 Hz'lik bir titreşim frekansıyla elde edildi.

Mekanik testler, optimum titreşim koşulları altında dökülen AZ91D alaşımının, titreşimsiz alaşım dökümüne kıyasla daha iyi çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzama sergilediğini ortaya çıkardı. Geliştirilmiş mekanik özellikler, homojen bir mikro yapıya ve ikincil fazların daha düzgün dağılımına ilişkilendirilmiştir.

Ruirun ve arkadaşları [11] tarafından yapılan çalışmada, ultrasonik titreşimin yüksek alaşımlı titanyum alüminidin (TiAl) mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Amaç, katılaşma işlemi sırasında ultrasonik titreşimlerin uygulanmasının TiAl alaşımlarının mikroyapısal inceliklerini ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemekti. Deneyler, 0 ila 20 kHz arasında değişen frekanslarla çeşitli ultrasonik titreşim koşulları altında yüksek alaşımlı TiAl dökümünü içeriyordu.

Sonuçlar, ultrasonik titreşimin yüksek alaşımlı titanyum alüminidin mikro yapısını önemli ölçüde etkilediğini gösterdi. Katılaşma sırasında ultrasonik titreşimlerin uygulanması tane incelmesini destekleyerek daha ince ve homojen bir mikro yapı elde edilmesini sağladı. Titreşimler çekirdeklenme hızını arttırdı ve kaba dentritik yapıların büyümesini bozarak daha küçük tane boylarına ve daha düzgün bir faz dağılımına yol açtı.

Mekanik testler, ultrasonik titreşimle dökülen TiAl alaşımlarının, titreşimsiz dökülenlere kıyasla gelişmiş mekanik özellikler sergilediğini ortaya çıkardı. Bu mekanik özellikler artan çekme mukavemeti, sertlik ve süneklikti. Daha ince taneler ve daha düzgün bir faz dağılımı ile karakterize edilen homojen mikro yapı, bu gelişmiş mekanik özelliklere katkıda bulunmuştur. Çalışma, ultrasonik titreşimin yüksek alaşımlı titanyum alüminidin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini geliştirmek için etkili bir teknik olduğu ve bu yöntemin yüksek performanslı TiAl bileşenleri üretmek için umut verici bir yöntem olduğu sonucuna varmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada A356 alüminyum alaşımı sırasıyla 635 °C, 645 °C ve 655 °C döküm sıcaklığında eğimli bakır soğutucu yardımıyla çelik kalıp içerisine dökülmüştür. Elde edilen ingotlardan ayrıca yeniden ısıtılmış numuneler elde edilmiştir. Ayrıca döküm ve yeniden ısıtılmış numunelerin sertlikleri ve mikroyapıları incelenmiştir. Bu tez çalışmasında amaç; eğimli soğutucu ile döküm için titreşim etkisinin incelenip optimum döküm açısı, soğutucu uzunluğu, döküm sıcaklığı ve titreşim etkisinin belirlenmesidir.

1.3 Hipotez

Eğimli soğutucu ile dökümde mekanik titreşimin uygulanması, döküm malzemelerinin kalitesini ve özelliklerini iyileştirebilir. Mekanik titreşimlerin, daha düzgün tane incelmesini teşvik ederek ve gözenekliliği azaltarak alaşımın mikro yapısını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği varsayılmaktadır. Titreşimlerin erimiş metalin akışkanlığını arttırması, kalıbın daha iyi doldurulmasına ve daha tutarlı bir katılaşma sürecine yol açacaktır. Bu da daha ince, daha homojen bir tane yapısı, gelişmiş çekme mukavemeti ve döküm bileşenlerinin artan sünekliği ile sonuçlanmalıdır. Ayrıca mekanik titreşimin, büzülme boşlukları

gibi döküm kusurlarının oluşumunu azaltacağı öngörülmektedir. Frekans ve genlik gibi titreşim parametrelerinin optimize edilmesiyle, döküm malzemelerinin genel kalitesinin ve performansının artırılabileceğine inanılmaktadır. Bu hipotez, üstün malzeme özelliklerine ulaşmak ve geleneksel döküm yöntemlerindeki ortak sorunları ele almak için eğimli soğutucu ile döküm sırasındaki mekanik titreşimin nasıl kullanılabileceğinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamayı amaçlamaktadır.

2
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

2.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları, haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi işlemlerle mekanik olarak çeşitli şekillere işlenmiş alaşımlardır. Bu alaşımlar, ana alaşım elementlerine göre kategorilere ayrılır ve her biri dört basamaklı bir sayı ile gösterilen seriler halinde gruplandırılır.

-1000 Serisi (Ticari Olarak Saf Alüminyum):

%99 veya daha fazla alüminyumdan oluşur. Mükemmel korozyon direnci, yüksek elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Kimyasal ekipmanlarda, elektrik uygulamalarında ve gıda işleme endüstrilerinde kullanılır.

-2000 Serisi (Bakır Alaşımları):

Bakır, ana alaşım elementidir. Yüksek mukavemet ve mükemmel işlenebilirliğe sahiptir. Daha düşük korozyon direnci, genellikle koruyucu kaplamalar gerektirir. Havacılık uygulamalarında, kamyon şasilerinde ve diğer yapısal bileşenlerde kullanılır.

-3000 Serisi (Mangan Alaşımları):

Mangan, ana alaşım elementidir. İyi işlenebilirlik ve orta derecede mukavemete sahiptir. Yüksek korozyon direnci, genellikle içecek kutularında, çatı levhalarında ve kimyasal ekipmanlarda kullanılır.

-4000 Serisi (Silisyum Alaşımları):

Silisyum, ana alaşım elementidir. Daha düşük erime noktası, bu alaşımları kaynak teli ve lehimleme için kullanışlı hale getirir. Otomotiv uygulamalarında ve inşaatta kullanılır.

-5000 Serisi (Magnezyum Alaşımları):

Magnezyum, ana alaşım elementidir. Yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci ve mükemmel kaynaklanabilirliğe sahiptir. Genellikle deniz ortamlarında, otomotiv parçalarında ve basınçlı kaplarda kullanılır.

-6000 Serisi (Magnezyum ve Silisyum Alaşımları):

Magnezyum ve silisyum, ana alaşım elementleridir. İyi mekanik özelliklere ve mükemmel korozyon direncine sahiptir. Yapısal uygulamalarda, köprülerde, binalarda ve ulaşımda kullanılır.

-7000 Serisi (Çinko Alaşımları):

Çinko, genellikle magnezyum ve bakırla birlikte ana alaşım elementidir. Yüksek mukavemeti çelikle karşılaştırılabilir, ancak daha düşük yoğunluğa sahiptir. Havacılık uygulamalarında, spor ekipmanlarında ve yüksek performanslı otomotiv parçalarında kullanılır.

-8000 Serisi (Diğer Elementler):

Bunlara alüminyum-lityum ve diğer benzersiz alaşım elementleri dahildir. Belirli uygulamalar için özel olarak tasarlanmış özelliklere sahiptir. Uzay ve ileri teknoloji alanları gibi uzmanlaşmış endüstrilerde kullanılır [12].

Her dövme alüminyum alaşım serisi benzersiz özellikler sunarak geniş bir uygulama yelpazesi için uygun hale getirir. Alaşım seçimi, gerekli mekanik özelliklere, korozyon direncine, şekillendirilebilirliğe ve belirli uygulama gereksinimlerine bağlıdır.

2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alüminyum alaşımları, erimiş metalin bir kalıba döküldüğü ve katılaşmasına izin verildiği döküm işlemleriyle oluşturulmak üzere tasarlanmıştır. Bu alaşımlar genellikle, akışkanlıklarını ve dökülebilirliklerini artıran dövme alaşımlara kıyasla daha yüksek bir silisyum içeriğine sahiptir. Döküm alüminyum alaşımları, genellikle dört basamaklı bir tanımlama kullanılarak Alüminyum Derneği tarafından geliştirilen bir numaralandırma sistemiyle kategorize edilir.

-1xx.x Serisi (Ticari Olarak Saf Alüminyum):

%99 veya daha fazla alüminyumdan oluşur. Sınırlı mekanik özelliklere sahiptir. Elektrik iletkenleri ve kimyasal ekipmanlar gibi mukavemetten daha kritik olan yüksek süneklik ve korozyon direncinin olduğu uygulamalarda kullanılır.

-2xx.x Serisi (Bakır Alaşımları):

Bakır, ana alaşım elementidir. Yüksek mukavemet ve sertliğe sahiptir. Korozyon direnci 1xx.x serisine göre daha düşüktür. Havacılık bileşenlerinde ve iyi mekanik özellikler gerektiren yüksek performanslı uygulamalarda kullanılır.

-3xx.x Serisi (Silisyum ve Magnezyum Alaşımları):

Silisyum, genellikle magnezyumla birleştirilen birincil alaşım elementidir. İyi dökülebilirlik, mükemmel korozyon direnci ve orta düzeyde mukavemete sahiptir. Otomotiv bileşenlerinde, motor parçalarında ve genel amaçlı dökümlerde yaygın olarak kullanılır.

Örnek: A356, mukavemet ve sünekliğin iyi birleşimi nedeniyle kullanılır.

-4xx.x Serisi (Silisyum Alaşımları):

Yüksek silisyum içeriğiyle birlikte (genellikle %5-12) mükemmel akışkanlık, düşük büzülme ve iyi aşınma direncine sahiptir. Genellikle otomotiv parçalarında, pistonlarda ve muhafazalarda kullanılır.

-5xx.x Serisi (Magnezyum Alaşımları):

Magnezyum, ana alaşım elementidir. Özellikle deniz ortamlarında iyi korozyon direncine ve orta düzeyde mukavemete sahiptir. Deniz donanımlarında, mimari uygulamalarda ve basınçlı kaplarda kullanılır.

-6xx.x Serisi :

6xx.x serisi alüminyum alaşımları, magnezyum ve silisyumun başlıca alaşım elementleri olduğu döküm alüminyum alaşım ailesindeki bir gruptur. Bu alaşımlar genellikle mukavemet, korozyon direnci ve işlenebilirlik arasında bir denge gerektiren belirli döküm süreçleri ve uygulamaları için tasarlanmıştır.

6xx.x serisi, 3xx.x veya 5xx.x gibi diğer serilere kıyasla nispeten daha az yaygın ve daha az iyi tanımlanmıştır. Bu seri için belirli örnekler ve ayrıntılı bileşimler, diğer daha yerleşik seriler için olanlar kadar kolay bulunamayabilir.

7xx.x Serisi (Çinko Alaşımları):

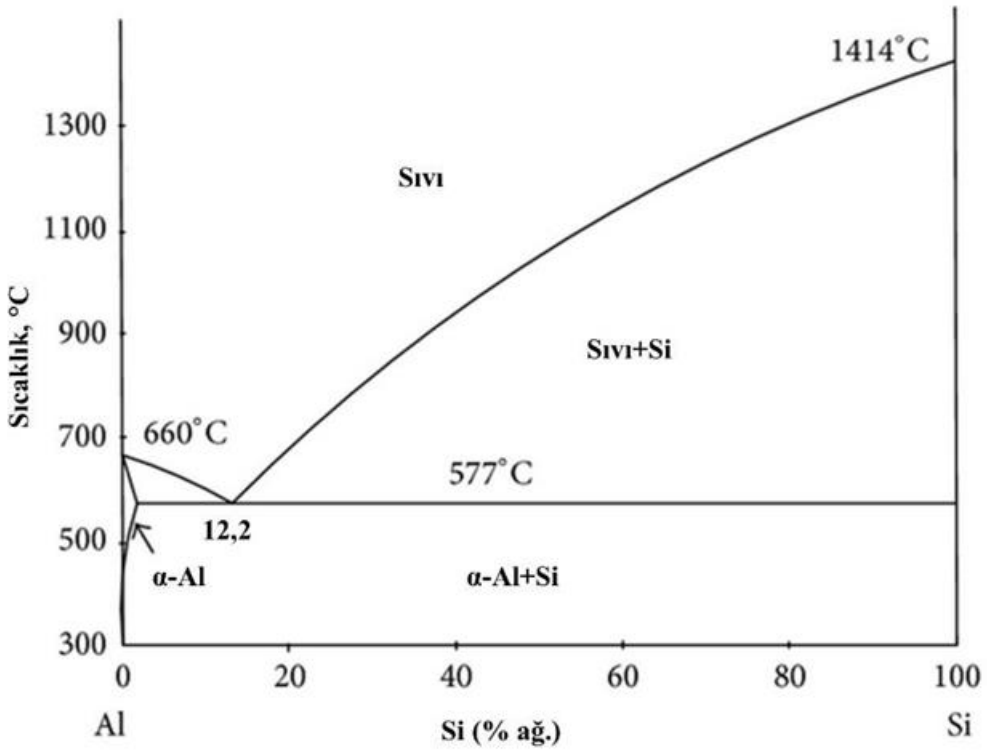
Çinko, genellikle magnezyum ve bakırla birleştirilen ana alaşım elementidir. Yüksek mukavemet ve iyi aşınma direncine sahiptir. Havacılık ve uzay bileşenleri, spor malzemeleri ve askeri uygulamalarda kullanılır.

8xx.x Serisi (Kalay Alaşımları):

Kalay, başlıca alaşım elementidir. İyi korozyon direncine sahiptir. Yatak ve burç uygulamalarında kullanılır [13].

2.3 A356

A356, mükemmel döküm özellikleri ve mekanik özellikleri nedeniyle özellikle döküm endüstrisinde tercih edilen, yaygın olarak kullanılan bir alüminyum alaşımıdır. A356 alaşımının tipik bir bileşimi %6,5-7,5 silisyum, %0,25-0,45 magnezyum, ≤ %0,2 demir, ≤ %0,1 bakır, ≤ %0,1 mangan, ≤ %0,1 çinko, ≤ %0,2 titanyum, %92-94 alüminyum içermektedir. Şekil 2.1'de Al-Si faz diyagramı yer almaktadır.



Şekil 2. 1 Al-Si faz diyagramı [14]

Yoğunluğu yaklaşık 2,68 g/cm³ olup, çekme dayanımı 250-300 MPa civarında (ısıl işleme bağlı olarak), akma dayanımı 150-200 MPa civarında, uzaması %3-6 civarında, sertliği ise 65-85 HB değerindedir.

A356 alaşımı, mekanik özelliklerini geliştirmek için sıklıkla ısıl işleme tabi tutulur:

Çözelti Isıl İşlemi: Bu işlem, alaşımın yüksek bir sıcaklığa (yaklaşık 540°C) ısıtılmasını, belirli bir süre tutulmasını ve ardından suda söndürülmesini içerir. Bu, çözünür elementleri çözer ve mekanik özellikleri arttırır.

Yaşlandırma: Çözelti ısıl işleminden sonra alaşım, istenen özelliklerin elde edilmesi için yaklaşık 155°C'de birkaç saat yaşlandırılır.

Dökülebilirlik, mekanik özellikler ve korozyon direncinin mükemmel kombinasyonu nedeniyle A356, otomotiv endüstrisinde motor blokları, silindir kafaları ve diğer kritik bileşenler, havacılık ve uzay endüstrisinde çeşitli yapısal bileşenler ve parçalar, endüstriyel uygulamalarda pompa gövdeleri, valf gövdeleri ve iyi dayanıklılık ve korozyon direnci gerektiren diğer bileşenler olarak kullanılabilir.

A356 alaşımının mikro yapısı tipik olarak aşağıdakilerden oluşur:

α-Alüminyum Matris: Alaşımın mekanik özelliklerini sağlayan birincil faz.

Ötektik Silisyum Parçacıkları: Matris içinde dağılarak alaşımın gücünü ve sertliğini arttırır.

Metaller arası Bileşikler: Alaşımın mekanik özelliklerine katkıda bulunan Mg_2Si gibi.

A356'nın özellikleri ve performansı, soğutma hızı, tane incelmesi ve modifikasyon işlemleri (örneğin, silisyum morfolojisini değiştirmek için stronsiyum eklenmesi) gibi faktörlerden etkilenebilir.

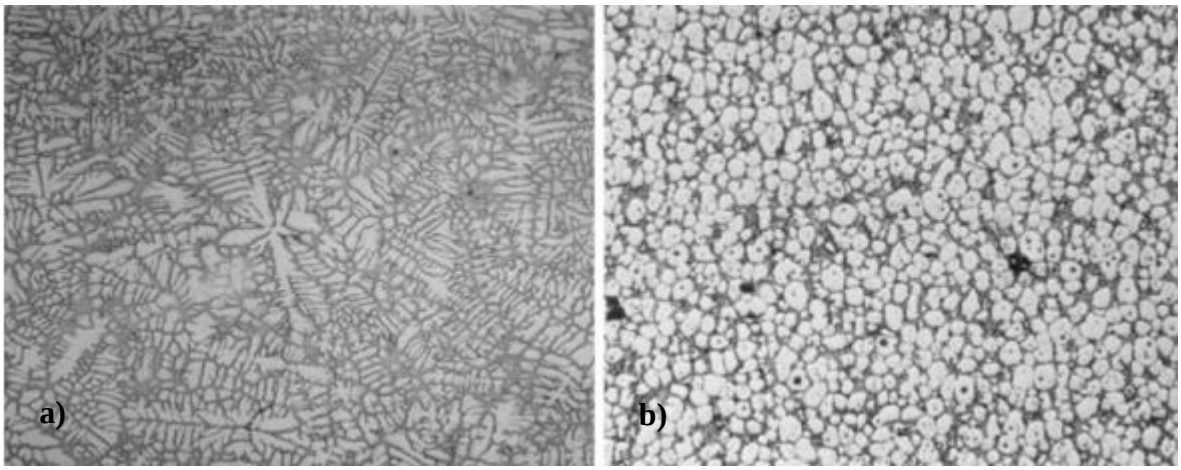
3
YARI KATI ŞEKİLLENDİRME

3.1 Küresel Mikroyapıya Sahip Hammadde Üretimi

Yarı katı şekillendirme döküm ve dövme içeren hibrit bir üretim yöntemidir. 1970'lerde MIT'de yapılan bir deneyde, sıvı haldeki farklı döküm alaşımlarının sıcak yırtılmalarının araştırılması için yarı-katı duruma soğutulurken viskoziteleri ölçülmüştür. Deneyler sonucunda soğuma esnasında düzenli karıştırılan malzemenin küresel mikroyapıya fakat karıştırma yapılmayarak yarı-katı hale soğutulan malzemenin dentritik mikroyapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir [15].

Küresel mikro yapıya sahip hammaddelerin üretimi, geleneksel döküm ve dövme yöntemlerine göre önemli avantajlar sunan bir üretim süreci olan yarı katı şekillendirmenin kritik bir yönüdür. Yarı katı şekillendirme, metal alaşımlarının kısmen katılaşmış halde, tipik olarak sıvılaşma ve katılaşma sıcaklıkları arasında işlenmesini içerir. Burada malzeme, kesme altında bir sıvı gibi akan ve hareketsizken şeklini koruyan tiksotropik davranış sergiler. Bu süreçte küresel bir mikro yapıya ulaşmak çok önemlidir; çünkü bu, mekanik özellikleri geliştirir ve son ürünün genel kalitesini artırır. Küresel parçacıklar daha iyi akış özelliklerini destekler, gözeneklilik ve ayrışma gibi kusurların oluşumunu azaltır. Bu elde edilmek istenen mikro yapıları üretmek için elektromanyetik karıştırma ve eğimli soğutucu ile döküm gibi çeşitli teknikler kullanılır. Küresel tanelerin oluşumunun ardındaki mekanizmaları anlamak ve süreç parametrelerini optimize etmek, yarı katı şekillendirme teknolojilerinin ilerlemesi ve otomotiv, havacılık ve elektronik gibi endüstrilerdeki uygulamalarının genişletilmesi için çok önemlidir [16,17].

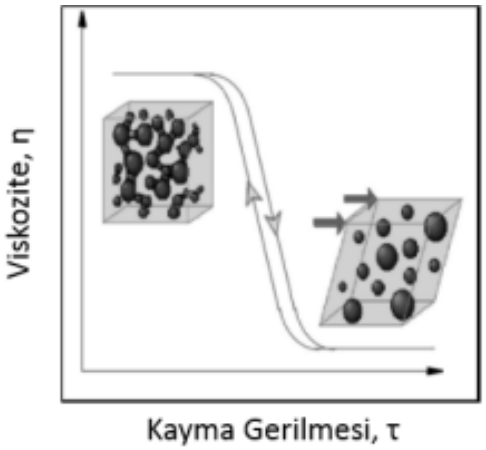
Şekil 3.1'de dentritik ve küresel mikroyapıya sahip alaşımların tipik fotoğrafları yer almaktadır.



Şekil 3. 1 a) Dentritik mikroyapı b) küresel mikroyapı [18]

Çalışmalar sonucunda küresel mikroyapıya sahip alaşım malzemelerinin tiksotropik davranış gösterdiğine ulaşılmıştır [18].

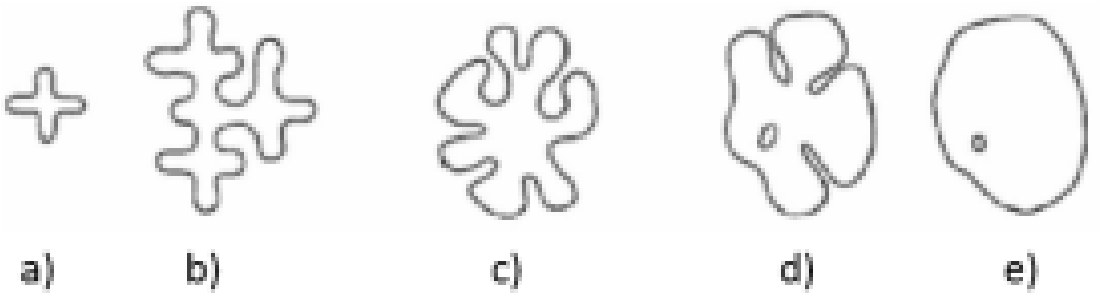
Tiksotropik malzemeler karıştırılmaya başlandığı zaman incelip akarlar. Karıştırma durduğunda ise tekrar sertleşirler. Bunu sebebi kayma hızı ve zamana bağlı olarak tiksotropik malzemelerin vizkozitesinin değişmesidir (Şekil 3.2). Kayma hızı azaldıkça vizkozite artar. Sabit bir kayma hızında ise vizkozite zamanla birlikte azalır [19].



Şekil 3. 2 Tiksotropik malzemelerde vizkozite ve kayma gerilmesinin değişimi [19]

Yarı katı şekil verme yönteminde, proses sırasında dentrit kolları kırılarak küresel mikroyapı elde edilir. Bu mikroyapı geleneksel döküm ile elde edilen dentritik mikroyapıdan farklıdır. Küresel tanelerin elde edilmesi sırasıyla dentrit oluşumu, dentritlerin irileşmesi, dentritlerin kırılıp rozet şekline dönüşmesi, rozetlerin

irileşmesi ve son olarak rozetlerin küreselleşmesi aşamalarıyla meydana gelir (Şekil 3.3). Yapılan çalışmalarda küresel mikroyapının daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir [15].



Şekil 3. 3 a) İlk dentrit oluşumu b) dentritlerin büyümesi c) rozet şekline dönüşüm d) rozetlerin büyümesi e) rozetlerin küreselleşmesi [20]

İşlemin başlangıcında şekillendirilecek malzemenin sıvı veya katı olması durumuna bağlı olarak yarı-katı şekillendirme iki ana gruba ayrılır. Bunlar sıvı faz ve katı faz işlemleridir [21].

3.2 Sıvı Faz İşlemleri

Eğimli soğutucu ile döküm ve manyetohidrodinamik gibi sıvı fazlı işlemler, yarı katı şekillendirmede küresel mikro yapılar elde etmek için gereklidir. Bu teknikler malzeme akışını ve mekanik özellikleri geliştirerek yüksek kaliteli nihai ürünler sağlar.

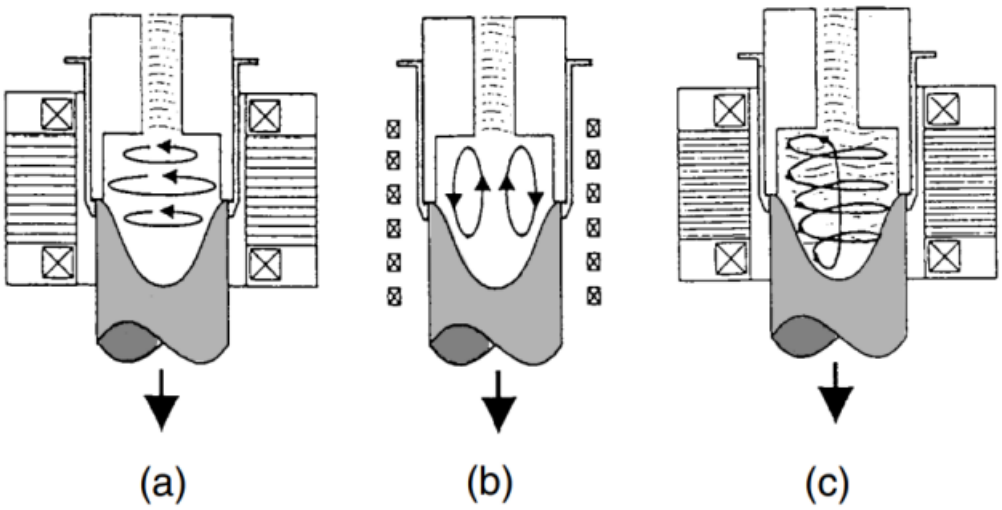
3.2.1 Manyetohidrodinamik Karıştırma

Manyetohidrodinamik (MHD) karıştırma, manyetik alanlar ve elektrik akımları kullanılarak sıvı metallerin veya iletken sıvıların manipülasyonunu içeren bir tekniktir. Bu yöntem, özellikle metal tozları ve diğer ileri malzemelerin üretiminde küresel mikroyapıların elde edilmesinde kullanılabilir [22].

MHD karıştırma, manyetik alanlar ve elektriksel olarak iletken sıvılar arasındaki etkileşime dayanır. Elektrik akımı varlığında iletken bir sıvıya manyetik alan uygulandığında Lorentz kuvvetleri üretilir. Bu kuvvetler sıvı hareketini tetikleyebilir ve sıvı metal içinde gelişmiş karıştırma ve kontrollü akış desenlerine

yol açabilir [23]. Şekil 3.4 MHD karıştırmada farklı karıştırma çeşitlerini göstermektedir.

Kurulum tipik olarak erimiş metal veya iletken sıvıyla doldurulmuş bir kabı içerir. Bu kap manyetik bir alanın içine yerleştirilir ve elektrotlar, sıvıdan elektrik akımı geçirecek şekilde konumlandırılır. Sıvıya manyetik alan uygulanır ve içinden elektrik akımı geçirilir. Manyetik alan ile elektrik akımı arasındaki etkileşim Lorentz kuvvetlerini üretir. Lorentz kuvvetleri, sıvı metal içinde girdaplar ve türbülanslı akışlar yaratarak sıvı hareketini tetikler. Bu hareket, karıştırmayı geliştirir ve daha büyük parçacıkların veya damlacıkların daha küçük parçacıklara bölünmesine yardımcı olabilir. Türbülanslı karıştırma ve kontrollü akış modelleri, küresel parçacıkların oluşumunu teşvik eder. Sürekli hareket, düzensiz şekillerin yuvarlanmasına ve benzer parçacık boylarının elde edilmesine yardımcı olur. Sıvı daha sonra soğutularak küresel parçacıkların katılaşması sağlanır. Hızlı ve düzgün soğutma, parçacıkların küresel şeklinin korunmasına yardımcı olabilir [24].



Şekil 3. 4 Manyetohidrodinamik karıştırma'da karıştırma yönleri; (a) yatay (b) dikey (c) helisel [25]

3.2.2 Kimyasal Tane İnceltme

Kimyasal tane inceltme, daha iyi mekanik özellikler ve bazı durumlarda küresel mikro yapılar ile sonuçlanabilecek daha ince, daha düzgün taneler elde etmek, metallerin ve alaşımların mikro yapısını değiştirmek için kullanılan bir tekniktir. Bu işlem sıklıkla çekirdeklenmeyi teşvik eden ve katılaşma sırasında tane

büyümesini engelleyen, eriyiğe tane inceltici maddelerin veya değiştiricilerin eklenmesini içerir [26].

Kimyasal tane inceltme, erimiş metale özel katkı maddeleri veya alaşım elementleri katarak çalışır. Bu katkı maddeleri çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket eder veya katılaşma sürecini daha küçük ve daha düzgün dağılmış tanelerin oluşmasına yol açacak şekilde değiştirir. İnce taneli yapı, mukavemet, tokluk ve yorulma direnci gibi mekanik özellikleri geliştirebilir [27].

Tane incelticileri, işlenen belirli metal veya alaşım için etkinliklerine göre seçilir. Yaygın tane incelticiler arasında alüminyum alaşımları için titanyum, bor ve zirkonyum, magnezyum alaşımları için ise nadir toprak elementleri bulunur. Tane inceltici, genellikle ana alaşımlar veya bileşikler formunda erimiş metale eklenir. Örneğin, alüminyum için yaygın olarak titanyum-bor (TiB) veya titanyum-karbon (TiC) ana alaşımları kullanılır. Tane inceltici erimiş metal içinde çözünür ve eriyik boyunca eşit şekilde dağılır. Eşit dağılım sağlamak için uygun karıştırma ve sıcaklık kontrolü çok önemlidir. Katılaşma sırasında tane inceltici, alaşımın birincil fazı için çekirdeklenme yerleri sağlar. Bu alanlar birkaç büyük tane yerine çok sayıda küçük tane oluşumunu kolaylaştırır. Tane incelticilerin varlığı aynı zamanda büyüme kinetiğini de değiştirerek daha düzgün ve küresel bir tahıl yapısını destekleyebilir [28].

Soğutma hızı, sıcaklık gradyanı ve diğer katılaşma parametreleri, tane incelmesini optimize etmek ve istenen mikro yapıya ulaşmak için dikkatlice kontrol edilir [29].

3.2.3 Sprey Döküm

Osprey Süreci olarak da bilinen Sprey Döküm işlemi, küresel mikro yapıya sahip malzemeler üretmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, erimiş bir metal akışının, hızla katılaşan ve bir substrat üzerinde toplanan ince damlacıklar halinde atomizasyonunu içerir [30].

Sprey döküm, yüksek hızlı bir gaz jeti kullanılarak erimiş metal akışının küçük damlacıklara bölünmesini içerir. Bu damlacıklar daha sonra bir alt tabaka üzerinde toplanmadan önce kontrollü bir atmosferden geçerken hızla soğur ve katılaşır. Hızlı soğuma oranları ve damlacıkların düzgün dağılımı, ince, küresel bir mikro yapının oluşmasına yol açar [31].

İşlenecek metal veya alaşım, bir indüksiyon ocağı veya başka ısıtma yöntemleri kullanılarak bir potada eritilir. Tutarlı bir erimiş hal durumunu korumak için sıcaklık hassas bir şekilde kontrol edilir. Erimiş metal, bir nozul veya tandiş vasıtasıyla yüksek hızlı bir gaz akışına (tipik olarak nitrojen, argon veya helyum) dökülür. Bu gaz akışı erimiş metali ince damlacıklara ayırır [32].

Damlacıkların boyu, gaz basıncı, nozul tasarımı ve metal akış hızı ayarlanarak kontrol edilebilir. İnce damlacıklar kontrollü atmosferden geçerken hızla soğutulur. Bu hızlı soğutma, kaba mikro yapıların oluşumunu önler ve ince, küresel parçacıkların gelişimini destekler. Damlacıklar, spesifik kuruluma ve istenen son ürüne bağlı olarak havada veya bir alt tabaka ile temas ettiğinde katılaşır. Katılaşan damlacıklar, dönen veya sabit bir yüzey olabilen bir alt tabaka üzerinde toplanır. Substrat, damlacıkları katmanlar halinde toplayarak yoğun, ağa yakın bir ön kalıp oluşturur. Biriktirme işlemi, kütükler, çubuklar ve diğer formlar dahil olmak üzere farklı şekil ve boylarda üretilecek şekilde uyarlanabilir. Toplanan malzeme, istenen son özellikleri ve boyları elde etmek için sıcak izostatik presleme (HIP), dövme veya makineyle işleme gibi ileri işlemlere tabi tutulabilir [33].

3.2.4 Ultrasonik İşlemler

Küresel mikroyapıların elde edilmesine yönelik ultrasonik işlem yöntemi, erimiş bir metali veya alaşımı çalkalamak için yüksek frekanslı ses dalgalarının kullanılmasını içerir. Bu yöntem ince ve eşit şekilde dağılmış küresel parçacıkların oluşumunu teşvik eder. İstenen mikro yapıyı elde etmek için kavitasyon ve akustik akış ilkelerinden yararlanılır [34].

Ultrasonik işlem, sıvı bir ortamda yoğun çalkalama oluşturmak için yüksek frekanslı ses dalgalarının (tipik olarak 20 kHz ila birkaç MHz aralığında) kullanılmasını içerir. Erimiş bir metale uygulandığında, bu ses dalgaları kavitasyon (kabarcıkların oluşumu, büyümesi ve içe doğru patlaması) ve akustik akış (ses dalgalarının neden olduğu sabit sıvı akışı) üretir. Bu olgular düzgün çekirdeklenmeyi teşvik eder ve dentritik yapıların büyümesini engelleyerek küresel mikro yapıların oluşmasına yol açar [35].

İşlenecek metal veya alaşım, bir indüksiyon ocağı veya başka ısıtma yöntemleri kullanılarak bir potada eritilir. Erimiş durumu korumak için sıcaklık dikkatlice kontrol edilir. Erimiş metalin içine bir ultrasonik dönüştürücü yerleştirilir.

Dönüştürücü, eriyik boyunca yayılan yüksek frekanslı ses dalgaları üretir. Ses dalgaları, büyük bir kuvvetle patlayarak lokalize yüksek basınç ve yüksek sıcaklık koşullarına neden olan kavitasyon kabarcıkları oluşturur. Bu, çekirdeklenmeyi artırır ve dentritik yapıları parçalar [36].

Akustik akış, eriyiğin iyice karışmasını sağlar. Eşit sıcaklık ve bileşim dağılımını destekler. Ultrasonik çalkalama, eriyik boyunca düzgün çekirdeklenmeyi teşvik eder, büyük ve düzensiz tanelerin büyümesini engeller. Süreç, dentritik kolların büyümesini engelleyerek ve daha küresel bir yapıyı teşvik ederek küçük, küresel parçacıkların oluşumunu teşvik eder. Ultrasonik işlemden sonra erimiş metalin soğumasına ve katılaşmasına izin verilir. Hızlı ve düzgün soğutma oranları ince, küresel tanelerin oluşumunu daha da artırır. Katılaşmış metal düzgün, küresel tanelere sahip homojen bir mikro yapı sergiler. Katılaşmış malzeme, arzu edilen nihai özellikleri ve boyları elde etmek için makineyle işleme, ısıl işlem veya şekillendirme gibi ileri işlemlere tabi tutulabilir [36].

3.2.5 Düşük Üst Isılı Döküm

Düşük üst ısılı döküm sıcaklık ve katılaşma koşullarını kontrol ederek ince, küresel mikro yapıya sahip malzemeler üretmek için tasarlanmış bir döküm yöntemidir. Bu teknik, metalin sıvılaşma noktasının hemen üzerindeki sıcaklıklarda dökülmesini içerir. Bu, aşırı ısınmayı en aza indirir. Düzgün çekirdeklenmeyi ve tanelerin kontrollü büyümesini destekler [37].

Düşük üst ısılı dökümün arkasındaki prensip, metali sıvılaşma sıcaklığının biraz üzerinde bir sıcaklıkta dökerek eriyikteki aşırı ısı miktarını azaltmaktır. Aşırı ısınmanın en aza indirilmesiyle çekirdeklenme hızı artar ve dentritik yapıların büyümesi bastırılır [38].

Metal veya alaşım bir fırında eritilir. Sıcaklık dikkatlice kontrol edilir ve malzemenin sıvılaşma sıcaklığının hemen üzerinde tutulur. Aşırı ısınmanın (döküm sıcaklığı ile sıvılaşma sıcaklığı arasındaki fark) en aza indirilmesi bu işlem için çok önemlidir. Erimiş metal önceden ısıtılmış bir kalıba dökülür. Kalıp sıcaklığı da katılaşma oranını optimize etmek ve tek biçimli tane yapısını desteklemek için kontrol edilir. Kusurlara ve düzensizliklere yol açabilecek türbülanstan kaçınmak için dökme işlemi düzgün ve kontrollü olmalıdır [39].

Katılaşma süreci yakından izlenir. Metal düşük üst sıcaklıkta döküldüğünden soğuma hızı daha yüksektir. Bu da ince, küresel tanelerin oluşumunu destekler. Kontrollü katılaşma koşulları, ayrışma ve diğer döküm kusurlarının azaltıldığı homojen bir mikro yapının elde edilmesine yardımcı olur. Katılaşmanın ardından döküm parçanın kontrollü bir oranda soğumasına izin verilir. Bu, mikro yapıyı daha da iyileştirir ve malzemenin mekanik özelliklerini geliştirir. Bazı durumlarda daha ince taneler elde etmek için hızlı söndürme gibi ek soğutma teknikleri kullanılabilir. Katılaşmış döküm parçası, istenen son özellikleri ve boyları elde etmek için ısıl işlem, makineyle işleme veya yüzey bitirme gibi ileri işlemlere tabi tutulabilir [40].

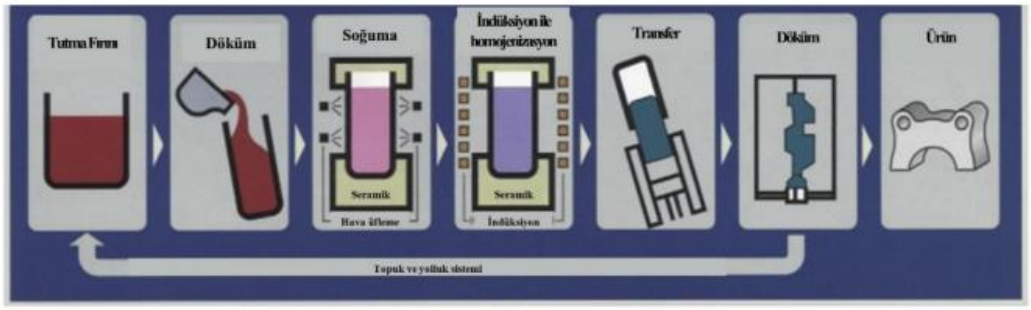
3.2.6 Yeni Reo-Döküm

Yeni Reo-döküm (NRC) metallerde, özellikle alüminyum alaşımlarında küresel mikro yapılar elde etmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Reo-döküm, yüksek katı fraksiyona sahip yarı katı bir bulamacın hazırlanmasını ve bunun daha sonra bir kalıba dökülmesini içerir. Bu işlem hem sıvı hem de katı hal işlemenin avantajlarını birleştirerek mekanik özelliklerin iyileştirilmesine ve kusurların azalmasına yol açar [41]. Şekil 3.5 NRC şematik gösterimine aittir.

Yeni reo-döküm, küresel bir mikro yapıya sahip yarı katı bir metal bulamacının oluşturulmasına dayanmaktadır. Sıvı bir matris içinde süspanse edilmiş katı parçacıklar içeren bu bulamaç daha sonra bir kalıba dökülür. Bu sürecin anahtarı, düzgün ve ince bir mikro yapının elde edilmesine yardımcı olan kontrollü katılaşma ve mekanik karıştırmadır. Metal veya alaşım bir fırında eritilir. Tam erimeyi sağlamak için sıcaklık sıvılaşma sıcaklığının üzerine çıkarılır.

Eriyik daha sonra yarı katı bir hal elde etmek için sıvılaşma ve katılaşma noktaları arasındaki bir sıcaklığa soğutulur. Bu soğutma aşaması sırasında eriyik düzgün katılaşmayı teşvik etmek ve dentritik yapıları parçalamak için sürekli olarak karıştırılır, bu da sıvı matris içinde küresel katı parçacıkların oluşmasına neden olur. Katı parçacıkların düzgün dağılımını sağlamak ve tane yapısını inceltmek için mekanik karıştırıcı veya elektromanyetik karıştırma kullanılır. Yarı katı bulamaç önceden ısıtılmış bir kalıba aktarılır. Kalıp sıcaklığı, katılaşma oranını optimize etmek ve döküm işlemi sırasında bulamacın yarı katı durumunu korumak için kontrol edilir [42].

Yarı katı bulamaç düşük basınç altında kalıp boşluklarını doldurarak gözeneklilik ve ayrışma gibi kusurların olasılığını azaltır. Kalıp ve yarı katı bulamaç, düzgün katılaşmanın sağlanması için kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu, küresel mikro yapının korunmasına ve ince tane boyuna ulaşılmasına yardımcı olur. Kontrollü soğutma ve yarı katı hal, yaygın döküm kusurlarının en aza indirilmesine ve döküm parçasının genel kalitesinin iyileştirilmesine yardımcı olur. Katılaşmış döküm parçası, mekanik özelliklerini geliştirmek için ısıl işleme tabi tutulabilir. İstenilen nihai boylara ve yüzey kalitesine ulaşmak için ileri işleme ve bitirme işlemleri gerçekleştirilir.



Şekil 3. 5 Yeni Reo-Döküm şematik gösterimi [42]

3.2.7 Sürekli Reo Dönüşüm

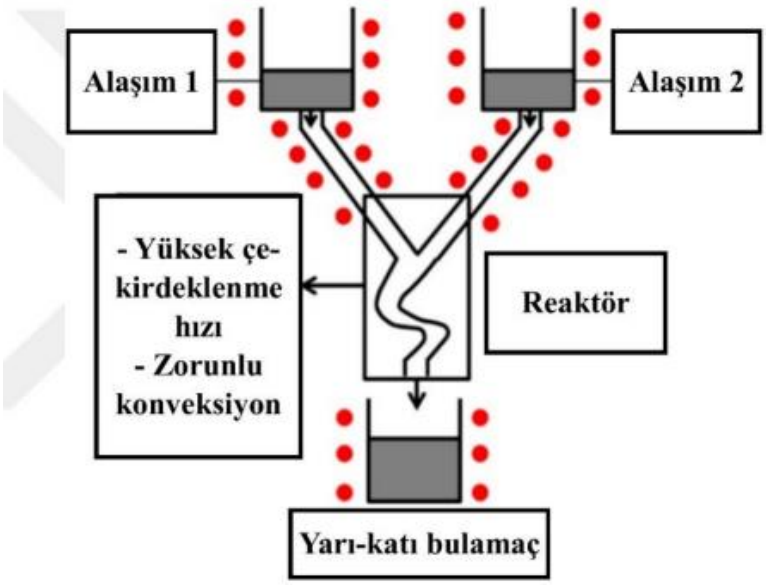
Sürekli reo dönüşüm (CRP), küresel mikro yapıya sahip malzemeler üretmek için yenilikçi bir yöntemdir. Bu işlem özellikle metal alaşımları için kullanılır ve erimiş metalin sürekli olarak yarı katı bir bulamaca dönüştürülmesini ve bunun daha sonra bir kalıba dökülmesini içerir. CRP yöntemi, düzgün çekirdeklenme ve büyümeyi teşvik etmek için kontrollü soğutma ve karıştırmayı kullanır ve bu da ince, küresel bir mikro yapıya yol açar [43]. Şekil 3.6 CRP'ye ait şematik gösterimdir.

Sürekli reo dönüşüm daha sonra doğrudan bir döküm kalıbına beslenebilecek, yüksek katı fraksiyona sahip yarı katı bir bulamacın sürekli üretimini içerir. Bu işlemde, düzgün katılaşmayı sağlamak ve istenen mikro yapıya ulaşmak için kontrollü soğutma ve mekanik veya elektromanyetik karıştırma kullanılır. CRP'nin anahtarı, yüksek kaliteli döküm parçaları üretmek için yarı katı bulamacın istikrarlı ve sürekli akışını sağlamaktır.

Metal veya alaşım bir fırında sıvılaşma noktasının üzerindeki bir sıcaklığa eritilir. Erimiş metal daha sonra sıvı matris içinde katı parçacıklar oluşturmaya başladığı

sıvılaşma ve katılaşma noktaları arasındaki bir sıcaklığa soğutulur. Yarı katı metal, yarı katı işleme için istenen sıcaklık aralığını korumak amacıyla sürekli olarak soğutulur. Bu genellikle bir soğutma ceketi veya diğer kontrollü soğutma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilir. Eşit sıcaklık dağılımını sağlamak, dentritik yapıları parçalamak ve küresel katı parçacıkların oluşumunu teşvik etmek için yarı katı metale mekanik veya elektromanyetik karıştırma uygulanır [44].

Sürekli soğutma ve karıştırma, geri kalan sıvı metal içinde yüksek oranda ince ve küresel katı parçacıkların asılı olduğu yarı katı bir bulamaç üretir. Bulamaç tiksotropik bir yapıya sahiptir, yani kesme altında kolayca akar ancak karıştırılmadığında şeklini korur. Yarı katı bulamaç sürekli olarak bir döküm kalıbına beslenir. Prosesin sürekli doğası, döküm için istikrarlı bir malzeme tedariği sağlar, kesintileri azaltır ve verimliliği artırır. Yarı katı bulamaç kontrollü koşullar altında kalıp boşluklarını doldurarak türbülansı en aza indirir ve kusur olasılığını azaltır. Kalıp ve yarı katı bulamaç, düzgün katılaşmayı sağlamak için kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu, küresel mikro yapının korunmasına ve ince tane boyu elde edilmesine yardımcı olur. Kontrollü soğutma ve yarı katı hal, gözeneklilik, ayrışma ve sıcak yırtılma gibi yaygın döküm kusurlarının en aza indirilmesine yardımcı olur. Katılaşmış döküm parçası, istenen son özellikleri ve boyları elde etmek için ısıl işlem, makineyle işleme gibi ileri işlemlere tabi tutulabilir.



Şekil 3. 6 Sürekli Reo Dönüşüm şematik gösterimi [43]

3.2.8 Yarı Katı Reo Döküm

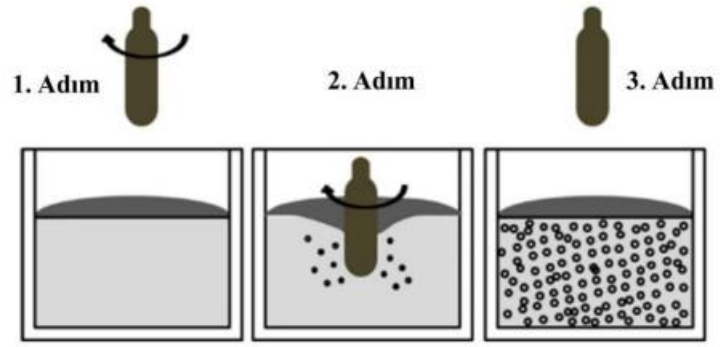
Yarı Katı Reo Döküm Prosesi, ince, küresel mikroyapılara sahip malzemeler üretmek için hem döküm hem de dövme elemanlarını birleştiren gelişmiş bir metal şekillendirme tekniğidir. Bu yöntem, yüksek katı fraksiyona sahip yarı katı bir metal bulamacının oluşturulmasını ve bunun daha sonra bir kalıba dökülmesini içerir. Bu sürecin anahtarı, küresel tanelerin tek tip çekirdeklenmesini ve büyümesini teşvik etmek için sıcaklık ve katılaşma koşullarının kontrol edilmesidir [44]. Şekil 3.7 Yarı katı reo döküm prosesinin şematik gösterimidir.

Yarı katı Reo döküm Prosesi (SSR), bir sıvı matris içinde süspanse edilmiş katı parçacıklar içeren bir yarı katı metal bulamacının hazırlanmasını içerir. Sıcaklığın kontrol edilmesi ve mekanik karıştırmanın kullanılmasıyla işlem, ince, küresel bir mikro yapının oluşmasını sağlar. Bu teknik, geleneksel döküm yöntemlerine kıyasla mekanik özellikleri iyileştirir ve kusurları azaltır.

Metal veya alaşımın bir fırında sıvılaşma noktasının üzerindeki bir sıcaklığa eritilmesiyle tam erime sağlanır. Erimiş metal daha sonra yarı katı bir hal elde etmek için sıvılaşma ve katılaşma noktaları arasındaki bir sıcaklığa soğutulur. Bu sıcaklık aralığı, sıvı içinde katı parçacıkların asılı olduğu bir bulamaç oluşturmak için çok önemlidir. Yarı katı bulamacı çalkalamak, katı parçacıkların eşit dağılımını sağlamak ve dentritik yapıları parçalamak için mekanik bir karıştırıcı kullanılır. Bu karıştırma, sıvı matris içinde küresel katı parçacıkların oluşmasına yardımcı olur. Bazı durumlarda, daha düzgün ve kontrollü bir bulamaç oluşumu elde etmek için elektromanyetik karıştırma kullanılabilir.

Yarı katı bulamaç önceden ısıtılmış bir kalıba aktarılır. Kalıp sıcaklığı, katılaşma oranını optimize etmek ve döküm işlemi sırasında bulamacın yarı katı durumunu korumak için kontrol edilir. Yarı katı bulamaç kontrollü koşullar altında kalıp boşluklarını doldurarak türbülansı en aza indirir ve kusur olasılığını azaltır. Kalıp ve yarı katı bulamaç, düzgün katılaşmanın sağlanması için kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu, küresel mikro yapının korunmasına ve ince tane boyu elde edilmesine yardımcı olur. Kontrollü soğutma ve yarı katı hal, gözeneklilik, ayrışma ve sıcak yırtılma gibi yaygın döküm kusurlarının en aza indirilmesine yardımcı olur. Katılaşmış döküm parçası, mekanik özelliklerini geliştirmek için ısıl işleme

tabi tutulabilir. İstenilen nihai boylara ve yüzey kalitesine ulaşmak için ileri işleme ve bitirme işlemleri gerçekleştirilir.



Şekil 3. 7 SSR şematik gösterimi [44]

3.2.9 Eğimli Soğutucu ile Döküm

Eğimli soğutucu ile döküm, döküm metalde ince, küresel bir mikro yapı elde etmek için tasarlanmış bir yarı katı metal işleme tekniğidir. Bu yöntem, erimiş metalin kalıba girmeden önce eğimli bir soğutma eğiminden aşağıya dökülmesini içerir. Soğutma eğimi, erimiş metalin sıcaklığını azaltarak ince, küresel bir mikro yapıya sahip yarı katı bir bulamaç oluşumunu teşvik eder [45]. Bir sonraki bölümde eğimli soğutucu ile döküm yöntemi detaylı şekilde açıklanmıştır.

3.2.10 Gaz Kaynaklı Yarı Katı İşlemi

Gaz Kaynaklı Yarı Katı (GISS) işlemi, ince, küresel mikro yapılara sahip yarı katı metal bulamaçları üretmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu işlem, çekirdeklenmeyi tetikleyen ve yarı katı bir bulamaç içinde küresel katı parçacıkların oluşumunu teşvik eden, erimiş metale gaz kabarcıklarının verilmesini içerir. GISS prosesi, mikro yapıyı kontrol etme ve nihai döküm bileşenlerinin mekanik özelliklerini iyileştirme yeteneğiyle bilinir [46].

GISS işlemi, kabarcıklar oluşturmak için inert gazın (argon veya nitrojen gibi) erimiş metale dahil edilmesine dayanır. Bu kabarcıklar, çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket ederek, sıvı bir matris içinde asılı duran ince, küresel katı parçacıkların oluşumunu teşvik eder. Kontrollü soğutma ve karıştırma, mikro yapının tek biçimliliğini ve iyileştirilmesini artırır.

Metal veya alaşım, tam erimeyi sağlamak için bir fırında sıvılaşma noktasının üzerindeki bir sıcaklığa eritilir. İnert gaz erimiş metale gözenekli bir tıkaç veya gaz

dağıtım sistemleri yoluyla verilir. Gaz kabarcıkları erimiş metalin içinden geçerek çekirdeklenmeyi teşvik eder. Gaz kabarcıkları yükseldikçe yerel soğumaya neden olur ve katı parçacıklar için çekirdeklenme bölgeleri oluşturur. Gaz kabarcıkları ile erimiş metal arasındaki etkileşim, dentritik yapıların parçalanmasına ve ince, küresel katı parçacıkların oluşumunun desteklenmesine yardımcı olur. Erimiş metalin sıcaklığı, yarı katı aralıkta (likidüs ve katılaşma noktaları arasında) muhafaza edilecek şekilde dikkatlice kontrol edilir [47].

Gaz kabarcıklarının ve katı parçacıkların eşit dağılımını arttırmak için sıklıkla mekanik veya elektromanyetik karıştırma kullanılır. Bu karıştırma eylemi, ince, küresel tanelere sahip homojen yarı katı bir bulamaç elde edilmesine yardımcı olur. Yarı katı bulamaç önceden ısıtılmış bir kalıba aktarılır. Kalıp sıcaklığı, katılaşma oranını optimize etmek ve döküm işlemi sırasında bulamacın yarı katı durumunu korumak için kontrol edilir. Bulamaç kontrollü koşullar altında kalıp boşluklarını doldurarak türbülansı en aza indirir ve kusur olasılığını azaltır. Kalıp ve yarı katı bulamaç, düzgün katılaşmanın sağlanması için kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu, küresel mikro yapının korunmasına ve ince tane boyu elde edilmesine yardımcı olur. Mikro yapıyı daha da iyileştirmek için hızlı söndürme gibi ek soğutma teknikleri kullanılabilir. Katılaşmış döküm parçası, istenen son özellikleri ve boyları elde etmek için ısıl işlem, makineyle işleme veya yüzey bitirme gibi ileri işlemlere tabi tutulabilir.

Gaz Kaynaklı Yarı Katı (GISS) işlemi, ince, küresel mikroyapılara sahip malzemeler üretmek için etkili bir tekniktir. Erimiş metale gaz kabarcıkları vererek ve soğutmayı ve karıştırmayı kontrol ederek bu işlem üstün mekanik özellikler elde eder ve döküm kusurlarını azaltır. Bu yöntem özellikle otomotiv, havacılık, elektronik ve biyomedikal uygulamalar gibi yüksek performanslı malzemelerin gerekli olduğu endüstrilerde değerlidir [48].

3.2.11 Döndürülmüş Entalpi Dengeleme Cihazı İşlemi

Döndürülmüş Entalpi Dengeleme Cihazı (SEED) işlemi, döküm metalde ince, küresel bir mikro yapı üretmek için tasarlanmış yarı katı bir metal işleme tekniğidir. Bu yöntem, düzgün, küresel bir mikro yapıya sahip yarı katı bir hal elde etmek için erimiş metalin hızlı soğutulmasını ve mekanik olarak karıştırılmasını içerir [49].

SEED işlemi, erimiş metali yarı katı bir bulamaca dönüştürmek için hızlı soğutmaya ve kontrollü mekanik karıştırmaya dayanır. Karıştırma eylemi, sıvı bir matris içinde asılı duran ince, küresel katı parçacıkların oluşumunu destekler. Bu işlem katı parçacıkların eşit dağılımını sağlar ve mikro yapıyı iyileştirir. Metal veya alaşım, tam erimeyi sağlamak için bir fırında sıvılaşma noktasının üzerindeki bir sıcaklığa eritilir. Erimiş metal, yarı katı sıcaklık aralığına (sıvılaşma ve katılaşma noktaları arasında) getirmek için hızla soğutulur. Bu hızlı soğutma, sıvı matris içinde katı parçacıkların oluşumunu başlatır.

Tipik olarak girdap veya girdap hareketine sahip mekanik bir karıştırıcı, yarı katı bulamaca eklenir. Karıştırma eylemi, katı parçacıkların küresel kalmasını ve iyi dağılmasını sağlayacak şekilde düzgün ve kontrollü olacak şekilde tasarlanmıştır. Karıştırma yoğunluğu ve hızı, katı parçacıkların boyunu ve şeklini etkileyen kritik parametrelerdir. Hızlı soğutma ve mekanik karıştırma kombinasyonu, ince, küresel katı parçacıklara sahip yarı katı bir bulamaç oluşumunu destekler. Mekanik etki, dentritik yapıların parçalanmasına yardımcı olarak daha rafine ve tek biçimli bir mikro yapıya neden olur.

Yarı katı bulamaç önceden ısıtılmış bir kalıba aktarılır. Kalıp sıcaklığı, katılaşma oranını optimize etmek ve döküm işlemi sırasında bulamacın yarı katı durumunu korumak için kontrol edilir. Bulamaç kontrollü koşullar altında kalıp boşluklarını doldurarak türbülansı en aza indirir ve kusur olasılığını azaltır. Kalıp ve yarı katı bulamaç, düzgün katılaşmanın sağlanması için kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu, küresel mikro yapının korunmasına ve ince tane boyuna ulaşılmasına yardımcı olur. Mikro yapıyı daha da iyileştirmek için hızlı söndürme gibi ek soğutma teknikleri kullanılabilir. Katılaşmış döküm parçası, istenen son özellikleri ve boyları elde etmek için ısıl işlem, makineyle işleme veya yüzey bitirme gibi ileri işlemlere tabi tutulabilir [50].

Döndürülmüş Entalpi Dengeleme Cihazı (SEED) işlemi, ince, küresel mikroyapılara sahip malzemeler üretmek için etkili bir tekniktir. Hızlı soğutmayı kontrollü mekanik karıştırmayla birleştiren bu işlem, üstün mekanik özellikler elde eder ve döküm kusurlarını azaltır. Bu yöntem özellikle otomotiv, havacılık, elektronik ve biyomedikal uygulamalar gibi yüksek performanslı malzemelerin gerekli olduğu endüstrilerde değerlidir.

3.2.12 Hızlı Bulamaç Şekillendirme

Hızlı Bulamaç Şekillendirme (RSF), döküm metalde ince, küresel bir mikro yapı üretmeyi amaçlayan yarı katı bir metal işleme tekniğidir. Bu yöntem, benzer, küresel katı parçacıklara sahip yarı katı bir bulamaç oluşturmak üzere erimiş metalin hızlı bir şekilde soğutulmasını ve kesilmesini içerir. RSF, son döküm bileşenlerinin mikroyapısını iyileştirmede ve mekanik özelliklerini iyileştirmede özellikle etkilidir [51].

RSF işlemi, erimiş metalin hızlı bir şekilde soğutulması ve kesilmesiyle yarı katı bir bulamaca dönüştürülmesine dayanır. Kesme etkisi dentritik yapıları parçalar ve sıvı bir matris içinde asılı duran ince, küresel katı parçacıkların oluşumunu destekler. Bu işlem katı parçacıkların eşit dağılımını sağlar ve mikro yapıyı iyileştirir.

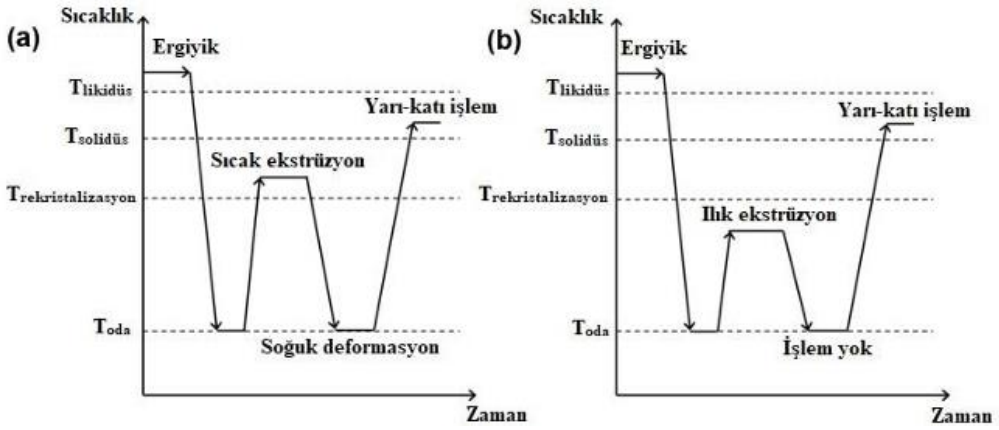
Metal veya alaşım, tam erimeyi sağlamak için bir fırında sıvılaşma noktasının üzerindeki bir sıcaklığa eritilir. Erimiş metal, yarı katı sıcaklık aralığına (sıvılaşma ve katılaşma noktaları arasında) getirmek için hızla soğutulur. Bu hızlı soğutma, sıvı matris içinde katı parçacıkların oluşumunu başlatır. Yarı katı bulamaca mekanik kesme uygulanır. Bu, karıştırma, titreşim veya bir kesme cihazının kullanılması gibi çeşitli yöntemlerle başarılabilir. Kesme etkisi, dentritik yapıların parçalanmasında ve ince, küresel katı parçacıkların oluşumunun desteklenmesinde kritik öneme sahiptir [52].

Hızlı soğutma ve kesmenin kombinasyonu, ince, küresel katı parçacıklara sahip yarı katı bir bulamaç oluşumuyla sonuçlanır. Kesme etkisi, katı parçacıkların homojen ve düzgün bir şekilde dağılmasını sağlar. Yarı katı bulamaç önceden ısıtılmış bir kalıba aktarılır. Kalıp sıcaklığı, katılaşma oranını optimize etmek ve döküm işlemi sırasında bulamacın yarı katı durumunu korumak için kontrol edilir. Bulamaç kontrollü koşullar altında kalıp boşluklarını doldurarak türbülansı en aza indirir ve kusur olasılığını azaltır. Kalıp ve yarı katı bulamaç, düzgün katılaşmanın sağlanması için kontrollü bir şekilde soğutulur. Bu, küresel mikro yapının korunmasına ve ince tane boyuna ulaşılmasına yardımcı olur. Mikro yapıyı daha da iyileştirmek için hızlı söndürme gibi ek soğutma teknikleri kullanılabilir. Katılaşmış döküm parçası, istenen son özellikleri ve boyları elde etmek için ısıl işlem, makineyle işleme veya yüzey bitirme gibi ileri işlemlere tabi tutulabilir.

Hızlı Bulamaç Şekillendirme (RSF), ince, küresel mikroyapılara sahip malzemeler üretmek için etkili bir tekniktir. Hızlı soğutmayı mekanik kesmeyle birleştiren bu işlem, üstün mekanik özellikler elde eder ve döküm kusurlarını azaltır. Bu yöntem özellikle otomotiv, havacılık, elektronik ve biyomedikal uygulamalar gibi yüksek performanslı malzemelerin gerekli olduğu endüstrilerde değerlidir [53].

3.3 Katı Faz İşlemleri

Küresel mikroyapıların elde edilmesine yönelik katı faz işleme yöntemleri, istenen tane yapısını elde etmek için malzemenin katı halinde işlenmesini içerir. Bu yöntemler tipik olarak malzemeyi sıvı faza geçirmeden mikro yapıyı mekanik, termal veya kombine işlemlerle iyileştirmeye odaklanır. Katı faz işlemleri SIMA (strain induced melt activated) ve RAP (recrystallization and partial melting) olarak ikiye ayrılır [43]. Şekil 3.8'de proseslere ait sıcaklık-zaman şemaları yer almaktadır.



Şekil 3. 8 a)SIMA b)RAP proseslerine ait sıcaklık-zaman grafikleri [54]

SIMA işlemi, metallerde ince ve küresel tane yapıları üretmek için kullanılan yarı katı bir metal şekillendirme tekniğidir. Bu yöntem iki ana aşamayı içerir: plastik deformasyon ve kısmi erime. Başlangıçta metal, oda sıcaklığında önemli miktarda plastik deformasyona maruz kalır, bu da malzeme içinde yüksek yoğunlukta dislokasyonlara ve depolanan enerjiye neden olur. Deformasyonun ardından malzeme, tipik olarak katılaşma çizgisinin biraz altındaki sıcaklıklarda kısmi erimeye uğrar. Isıl işlem, malzeme eridikçe deforme olmuş bölgelerin yeniden kristalleşmesine ve küçük, yuvarlak taneler oluşturmasına olanak tanır. Gerilme ve kontrollü ısıtmanın bu kombinasyonu, ince, küresel tanelere sahip yarı katı bir

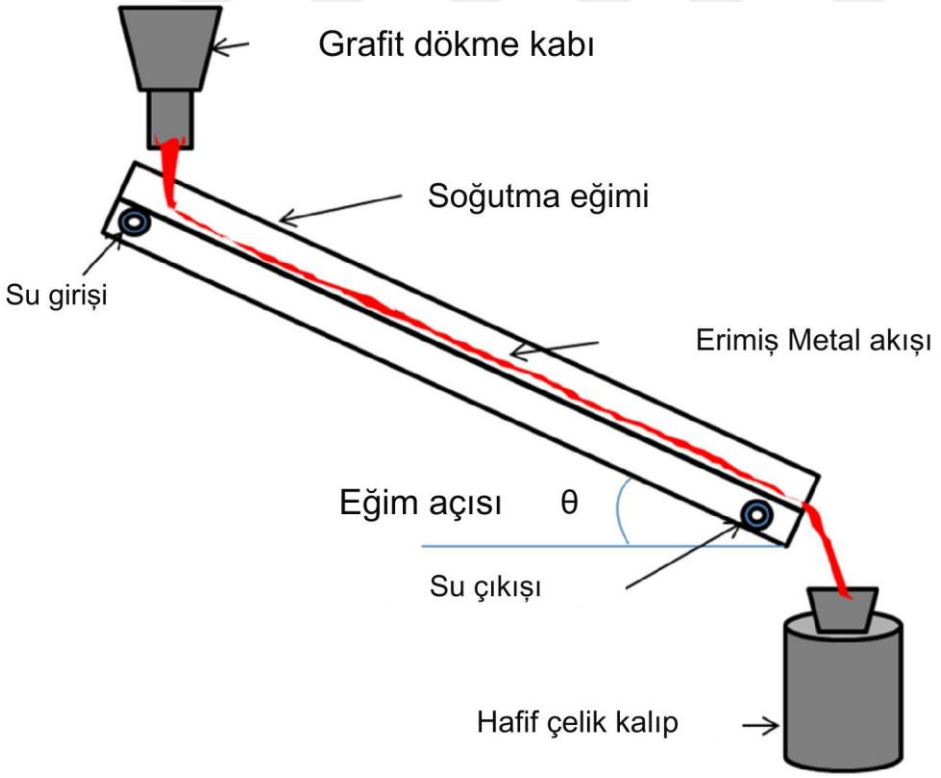
bulamaç oluşumunu teşvik ederek malzemenin mekanik özelliklerini geliştirir ve onu tiksoformlama veya reo döküm gibi işlemler için uygun hale getirir. SIMA işlemi, çeşitli alüminyum alaşımlarındaki döküm bileşenlerin mukavemetini geliştirmek için özellikle faydalıdır [17].

RAP işlemi, homojen bir mikro yapı elde etmek için yarı katı metal şekillendirmede kullanılan başka bir tekniktir. Bu yöntem iki aşamalı bir prosedür içerir: yeniden kristalleştirme ve ardından kısmi erime. İlk adımda metal, yüksek düzeyde dislokasyon yoğunluğu ve gerinim enerjisi sağlamak için soğuk olarak işlenir. Soğuk işlenmiş malzeme daha sonra yeniden kristalleşmeyi başlatmak için kontrollü bir ısıl işleme tabi tutulur, bu da yeni, gerilmesiz tanelerin oluşmasıyla sonuçlanır. Yeniden kristalleşme sağlandıktan sonra malzeme, katılaşma ve sıvılaşma noktaları arasındaki bir sıcaklığa ısıtılarak kısmi erime gerçekleşir. Bu ısıtma, yeniden kristalize edilmiş taneleri ince, küresel bir yapıya sahip yarı katı bir bulamaca dönüştürür. RAP prosesi, gelişmiş akış özelliklerine ve mekanik özelliklere sahip yüksek kaliteli yarı katı bulamaçların üretiminde özellikle etkilidir; bu da onu tikso döküm ve reo döküm gibi gelişmiş döküm teknikleri için uygun hale getirir. Çeşitli uygulamalarda performanslarını arttırmak için alüminyum ve magnezyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılır [55].

4
EĞİMLİ SOĞUTUCU İLE DÖKÜM

Eğimli soğutucu ile döküm yöntemi, metalurji ve malzeme mühendisliği alanında kullanılan önemli bir döküm yöntemidir. Bu yöntemin amacı, döküm işlemi sırasında oluşabilecek hata ve kusurları en aza indirerek, yüksek kaliteli döküm parçalar üretmektir. Bu yöntemde kullanılan eğimli soğutucu, döküm sırasında metalin hızlı ve kontrollü bir şekilde soğutulmasını sağlar [56].

Eğimli soğutucu ile döküm yöntemi, metalin sıvı haldeyken kalıba dökülmesi ve bu sırada eğimli bir soğutucu yüzey üzerinden akıtılması ile karakterize edilen bir döküm yöntemidir. Eğimli yüzey, döküm sırasında metalin hızlı ve dengeli bir şekilde soğumasını sağlayarak, iç yapı ve yüzey kalitesinin artırılmasına yardımcı olur. Bu yöntem, özellikle ince duvarlı ve karmaşık geometrili parçaların üretiminde tercih edilir. Şekil 4.1 eğimli soğutucu ile dökümün şematik gösterimine aittir.



Şekil 4. 1 Eğimli Soğutucu ile Döküm Prosesi Şeması

Eğimli soğutucu ile döküm yöntemi, 20. yüzyılın ortalarında geliştirilmiş ve metal döküm sektöründe hızla benimsenmiştir. Bu yöntemin gelişimi, döküm kalitesini artırma ve üretim süreçlerini iyileştirme gereksinimlerinden kaynaklanmıştır. İlk olarak havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılan bu yöntem, zamanla diğer endüstrilere de yayılmıştır.

Eğimli soğutucu ile döküm yöntemi, çeşitli endüstrilerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Havacılık endüstrisinde yüksek mukavemetli ve hafif metal parçaların üretiminde, otomotiv endüstrisinde motor bileşenleri, şasi ve diğer kritik parçaların dökümünde tercih edilir. Elektronik endüstrisinde ısı dağılımının önemli olduğu elektronik bileşenlerin üretiminde enerji alanında türbin kanatları ve diğer enerji ekipmanlarının dökümünde kullanılır [45].

4.1 Alt Başlık Proses Parametreleri

Eğimli soğutucu ile dökümde ürünün mikroyapıları ve mekanik özellikleri farklı proses parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler kalıp malzemesi, döküm sıcaklığı, döküm açısı, soğutucu uzunluğu ve dinamik etkilerdir.

4.1.1 Kalıp Malzemesi

Eğimli soğutucu ile dökümde kullanılan kalıp malzemesi, katılaşma sürecini ve dolayısıyla döküm bileşenlerinin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Farklı kalıp malzemeleri, soğuma hızını ve birincil α-Al fazının oluşumunu etkileyen farklı termal iletkenliklere, ısı kapasitelerine ve yüzey özelliklerine sahiptir. Örneğin, bakır gibi daha yüksek ısı iletkenliğine sahip kalıplar, hızlı ısı çıkışını kolaylaştırarak daha ince ve daha homojen bir mikro yapıya yol açar. Buna karşılık, seramik veya grafit gibi daha düşük ısı iletkenliğine sahip kalıplar, daha yavaş soğuma hızlarına neden olarak daha büyük dentritik yapıların büyümesini teşvik eder. Ek olarak, kalıp malzemesi ile erimiş metal arasındaki etkileşim, değişen derecelerde ara yüzey reaksiyonlarına ve yüzey pürüzlülüğüne yol açarak döküm ürünün nihai kalitesini etkileyebilir. Bu nedenle uygun kalıp malzemesinin seçilmesi, eğimli soğutucu ile döküm yoluyla üretilen bileşenlerin mekanik özelliklerini ve performansını optimize etmek için çok önemlidir [57].

4.1.2 Döküm Sıcaklığı

Eğimli soğutucu ile dökümde döküm sıcaklığı, nihai döküm ürününün mikro yapısının ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Farklı döküm sıcaklıkları, birincil

α-Al fazının çekirdeklenmesini ve büyümesini etkileyerek mikro yapının genel morfolojisini ve dağılımını etkileyebilir [58]. Daha yüksek döküm sıcaklıklarında, erimiş metalin artan akışkanlığı, kalıbın daha iyi doldurulmasını ve alaşım elementlerinin daha düzgün dağılımını teşvik ederek potansiyel olarak daha ince ve daha düzgün bir mikro yapıya yol açar. Ancak aşırı yüksek sıcaklıklar aynı zamanda oksidasyonun artması ve kalıp üzerinde daha yüksek termal stres gibi sorunlara da neden olabilir. Tersine, daha düşük döküm sıcaklıkları, daha yavaş çekirdeklenme hızları ve daha az etkili akış özellikleri nedeniyle daha kaba bir mikro yapıya neden olabilir, bu da potansiyel olarak kalıbın eksik doldurulmasına ve gözenekliliğin artmasına neden olabilir [59].

Döküm sıcaklığı sıvılaşma sıcaklığına yakın olduğunda, aşırı soğuma derecesi minimumdur, bu da malzeme kalıba ulaşmadan önce sınırlı katılaşma ile sonuçlanır. Bu, istenen yarı katı bulamacı oluşturmak için yetersiz katı parçacıklarla birlikte ağırlıklı olarak sıvı bir duruma yol açabilir.

4.1.3 Döküm Açısı

Döküm açısı, erimiş metalin akış dinamiklerini ve katılaşma davranışını etkileyen, dolayısıyla nihai döküm ürününün mikro yapısını ve mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Farklı döküm açıları, erimiş metalin eğimden aşağı doğru ilerlerken karşılaştığı kesme kuvvetlerini ve soğuma hızlarını değiştirir. Daha dik bir döküm açısı, erimiş metal akışının hızını, türbülansını ve kesme kuvvetlerini arttırır. Daha homojen ve düzgün bir mikro yapının oluşumunu destekler [60]. Bu, gelişmiş tane incelmesine ve birincil α-Al parçacıklarının daha homojen bir dağılımına yol açabilir. Ancak çok dik bir açı sıçramaya ve düzensiz akışa neden olabilir, bu da potansiyel olarak gözeneklilik ve eşit olmayan katılaşma gibi kusurlarla sonuçlanabilir. Öte yandan, daha sığ bir döküm açısı daha yavaş akışa neden olur. Bu da daha düşük kesme kuvvetleri ve soğuma hızları nedeniyle daha büyük, daha dentritik yapılara yol açabilir [61].

4.1.4 Soğutucu Uzunluğu

Soğutucunun uzunluğu, katılaşma sürecini ve sonuçta ortaya çıkan döküm ürününün mikro yapısını önemli ölçüde etkiler. Daha uzun bir soğutma eğimi, erimiş metalin soğutma yüzeyi ile etkileşimi için daha uzun bir süre sağlar, ısı ekstraksiyonunu arttırır ve kademeli bir sıcaklık düşüşünü teşvik eder [62]. Bu uzatılmış soğutma periyodu, birincil α-Al fazının daha kontrollü çekirdeklenmesine ve büyümesine izin vererek daha ince ve daha eşit şekilde

dağıtılmış mikroyapısal özelliklere yol açar. Ek olarak, soğutma eğimiyle artan temas süresi, gözeneklilik ve ayrışma gibi döküm kusurlarının oluşumunun azaltılmasına yardımcı olabilir ve bu da daha homojen ve yapısal olarak sağlam bir dökümle sonuçlanır. Tersine, daha kısa bir soğutma eğimi, yetersiz soğutma süresine neden olabilir, bu da hızlı katılaşmaya ve daha kaba, dentritik yapıların oluşmasına yol açabilir. Bu, döküm bileşenin mukavemeti ve sünekliği gibi mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir [63].

Çok uzun bir soğutucu uzunluğu, erimiş metalin kalıba ulaşmadan önce aşırı soğumasına neden olabilir. Bu, erken katılaşmaya yol açarak kalıbın eksik doldurulmasına ve potansiyel olarak soğuk kapatma veya hatalı çalıştırma gibi kusurların oluşmasına neden olabilir.

4.1.5 Dinamik Etkiler

Mekanik titreşimler ve sıvı akışı türbülansı gibi dinamik etkiler, katılaşma sürecini ve bunun sonucunda ortaya çıkan döküm malzemesinin mikro yapısını etkileyerek eğimli soğutucu ile dökümde önemli bir rol oynar. Mekanik titreşimler, dentritlerin istikrarlı büyümesini bozarak birincil α-Al fazlarının çekirdeklenmesini artırabilir, böylece daha ince ve daha homojen bir mikro yapıya yol açabilir. Tane inceltmesindeki bu gelişme, döküm ürünün mukavemeti ve tokluğu gibi mekanik özelliklerini geliştirir. Ek olarak, mekanik titreşimlerin uygulanması, daha iyi metal akışını teşvik ederek ve büzülme boşluklarının oluşumunu azaltarak, gözeneklilik ve sıcak yırtılma gibi döküm kusurlarının oluşumunu azaltabilir. Erimiş metalin soğutma eğimi boyunca dinamik hareketinin neden olduğu sıvı akışı türbülansı, ısı transfer hızını ve alaşım elementlerinin karışımını arttırır. Bu, daha düzgün bir sıcaklık dağılımı ve daha ince bir mikro yapı ile sonuçlanır. Ancak aşırı türbülans veya titreşim, oksit kalıntılarının oluşması ve yüzey pürüzlülüğünün artması gibi istenmeyen etkilere yol açabilir [64].

Bahsedilen proses parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere nasıl etki ettiğini gösteren çalışma örnekleri bir sonraki bölümdeki gibidir.

5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deney kısmında öncelikle A356 alaşımı temin edilerek her dökümde 500 g olacak şekilde testere ile kesildi. Daha sonra dökümler yapıldı. Döküm numunelerin uzunluğu 250 mm, çapları ise 30 mm'dir.

Tablo 5.1'de A356'nın ağırlıkça bileşim yüzdesi değerleri gösterilmektedir.

Tablo 5. 1 A356'nın ağırlıkça bileşim yüzde değerleri (%)

Element	Ni	Cr	Cu	Ti	Zn	Fe	Mn	Mg	Si	Al
% Ağırlık	0,003	0,003	0,012	0,122	0,01	0,13	0,027	0,34	7,284	Kalan

A356 alaşımının likidüs ve solidüs sıcaklıkları sırasıyla 615 °C ve 555 °C'dir [65].

Tablo 5.2 dökülen 16 örneğin döküm parametrelerini içerir. Her bir döküm sırasında açı, döküm sıcaklığı, soğutucu uzunluğu ve titreşim değerlerinden birisi farklılık göstermektedir.

Tablo 5. 2 Döküm Planlaması

Numune Kodu	**Açı (°)**	**Soğutucu uzunluğu (mm)**	**Sıcaklık (°C)**	**Titreşim (Genlik mm)**
1	30	500	635	1,5
2	30	500	635	-
3	45	500	635	1,5
4	45	500	635	-
5	60	500	635	1,5
6	60	500	635	-
7	45	350	635	1,5

Tablo 5.2 Döküm Planlaması (devamı)

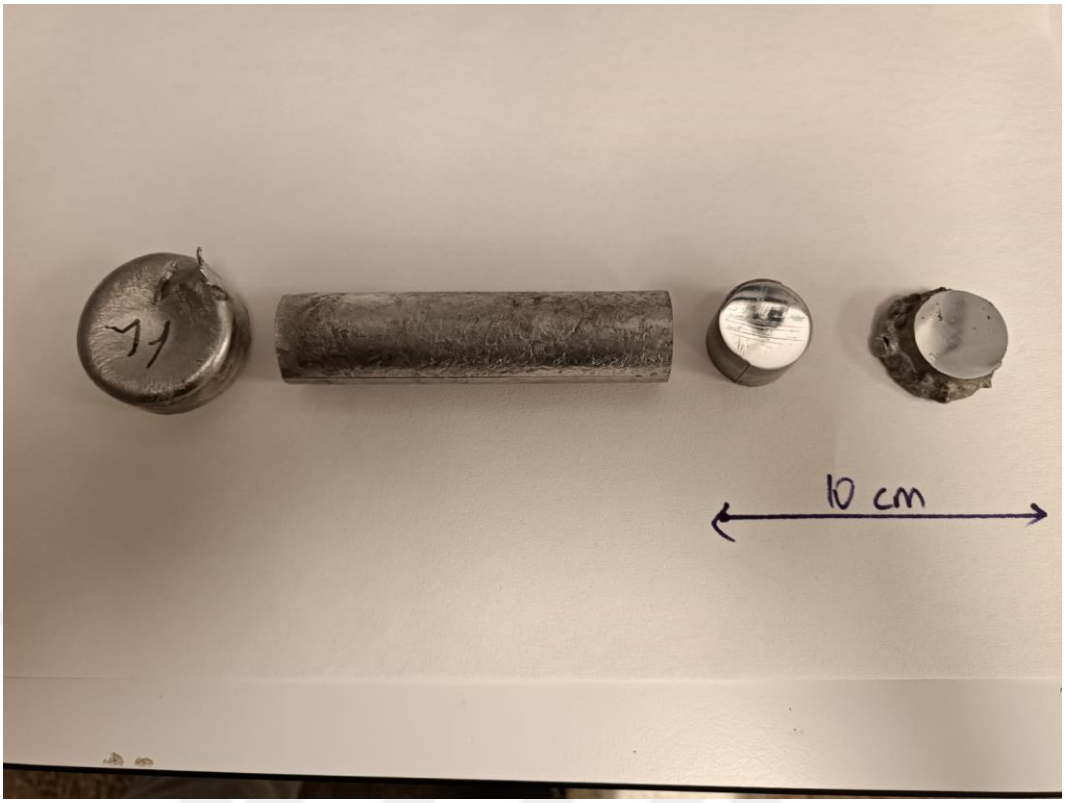
8	45	350	635	-
9	45	650	635	1,5
10	45	650	635	-
11	45	500	645	1,5
12	45	500	645	-
13	45	500	655	1,5
14	45	500	655	-

15	45	500	635	0,9
16	45	500	635	2,4

Şekil 5.1 deney düzeneğini, Şekil 5.2 ise hazırlanan numune örneklerinden birini göstermektedir.



Şekil 5. 1 Deney Düzeneği



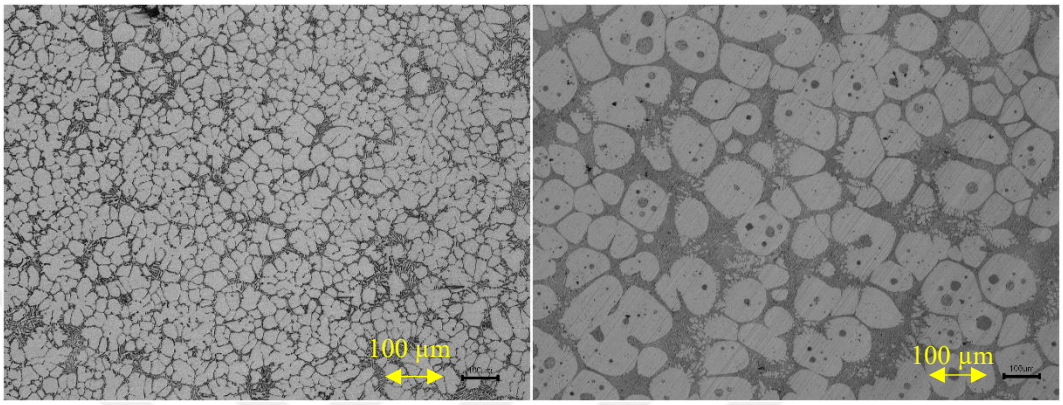
Şekil 5. 2 Soldan sağa doğru döküm numunenin besleyici kafa kısmı, döküm numune gövdesi, hazırlanan döküm numune, hazırlanan yeniden ısıtılmış numune

Her numunenin yeniden ısıtılmış bir versiyonu da hazırlanmıştır. Elektrik dirençli fırında sıcaklık 60 dakikada 595 ˚C'ye kadar çıkartılıp ve bu sıcaklıkta 50 dakika ısıtılmıştır. Yeniden ısıtılan numuneler fırından çıkar çıkmaz suya atılarak soğutulmuştur. Bu numunelere 'RH' kodu verilmiştir.

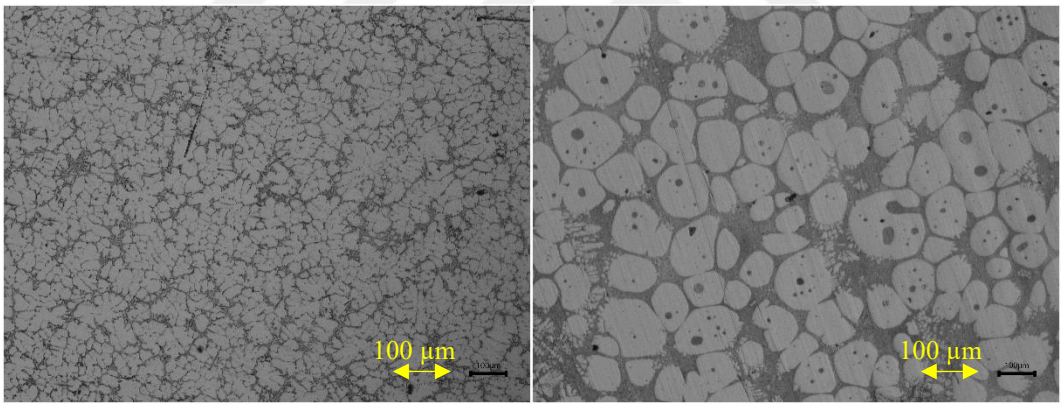
Son olarak tüm numuneler 2500 gride kadar zımparalanmıştır. Numuneler zımparalandıktan sonra 6 ve 1 mikronluk elmas pasta ile parlatılmış, %0,5 HF solüsyonu ile dağlanmış ve Nikon Eclipse MA100 mikroskobu ile incelenmiştir. Bu çalışmaların ardından küresellik değeri, ortalama tane çapı ve mikroyapı belirlenmiştir. Numunelerin sertliği Brinell sertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

6 SONUÇLAR ve TARTIŞMA

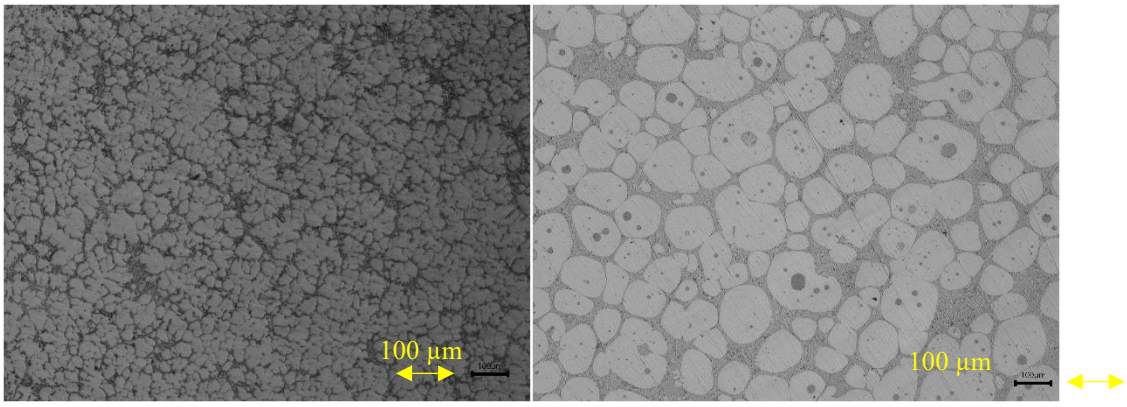
Hazırlanan numunelerin mikro yapıları Şekil 6.1 ve Şekil 6.16 arasındaki gibidir. Solda döküm versiyonlar, sağda ise yeniden ısıtılmış versiyonlar bulunmaktadır.



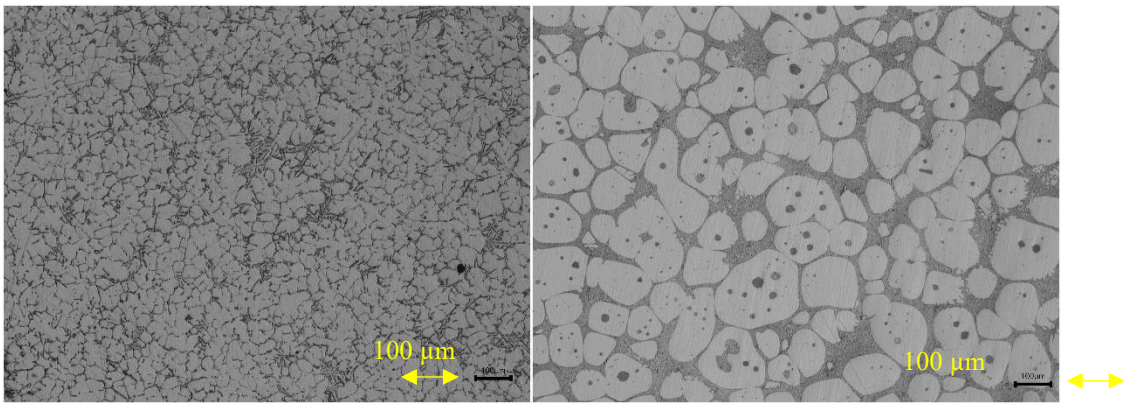
Şekil 6. 1 1 ve 1RH Mikroyapısı



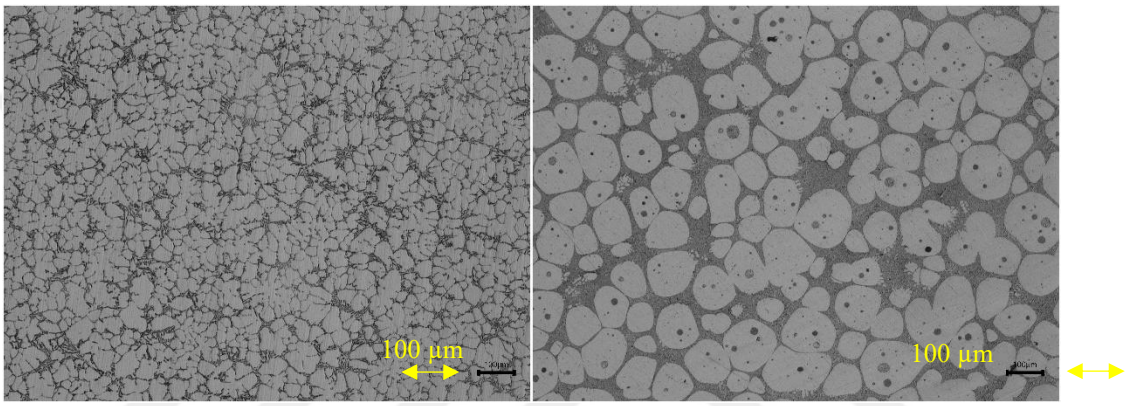
Şekil 6. 2 2 ve 2RH Mikroyapısı



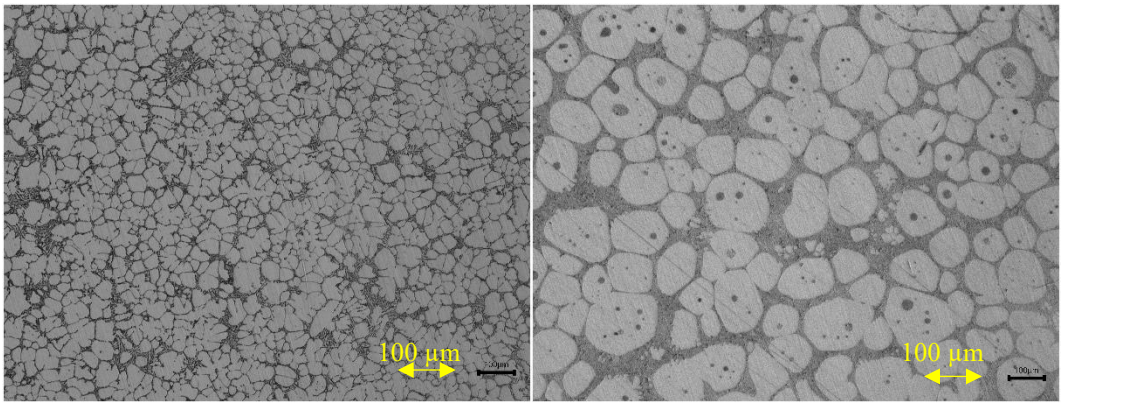
Şekil 6. 3 3 ve 3RH Mikroyapısı



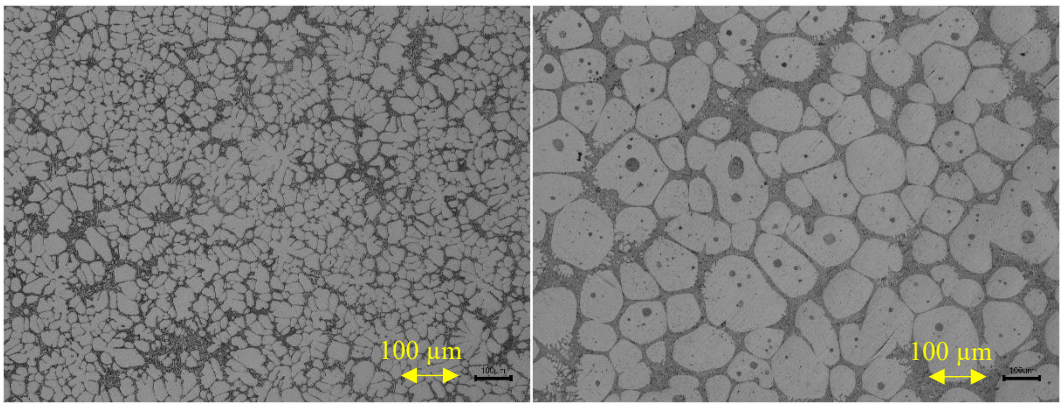
Şekil 6. 4 4 ve 4RH Mikroyapısı



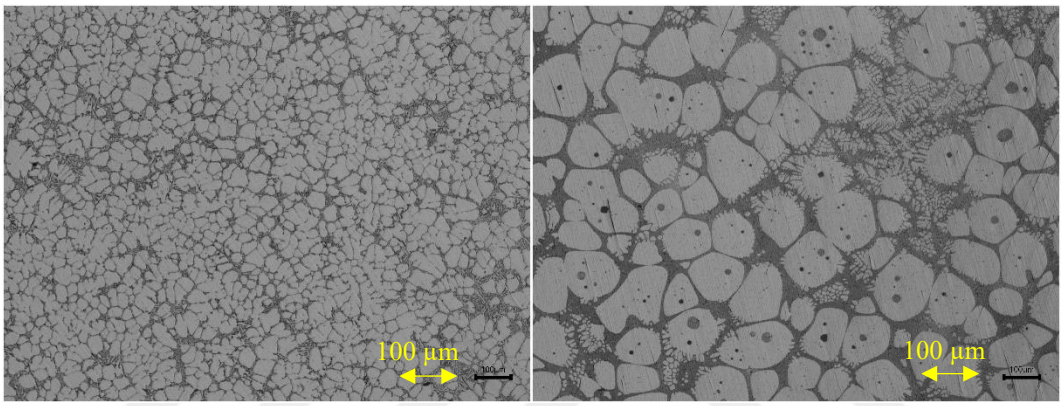
Şekil 6. 5 5 ve 5RH Mikroyapısı



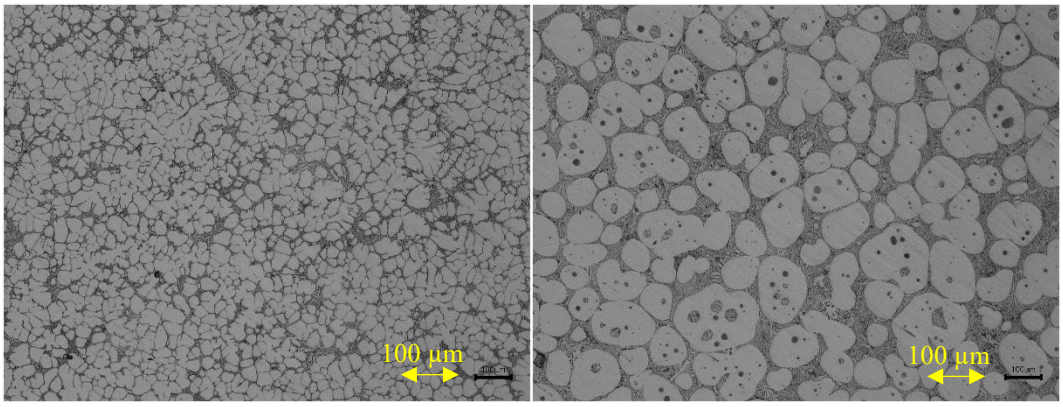
Şekil 6. 6 6 ve 6RH Mikroyapısı



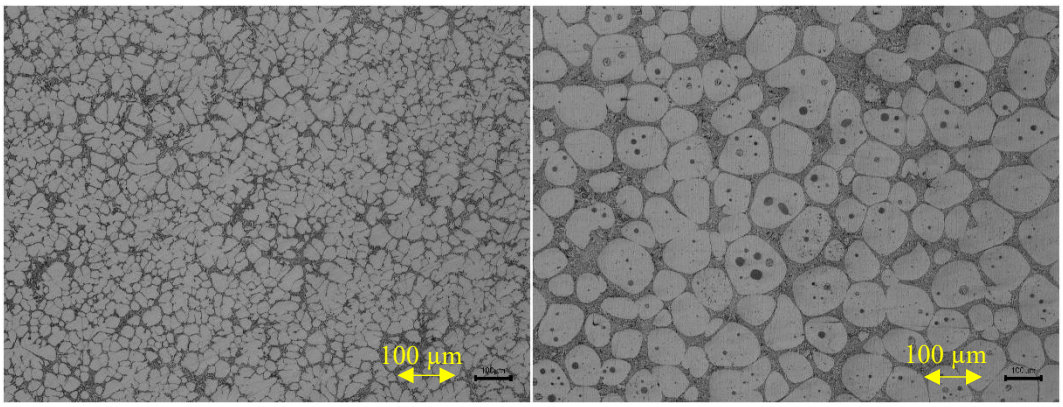
Şekil 6. 7 7 ve 7RH Mikroyapısı



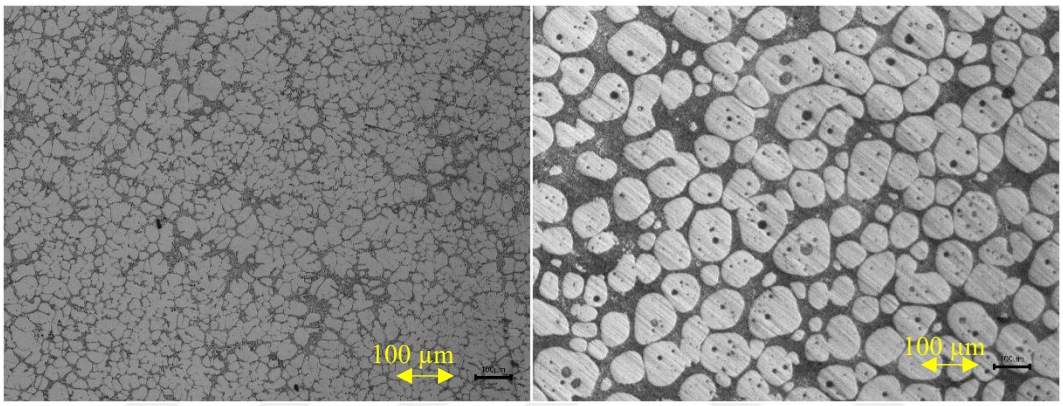
Şekil 6. 8 8 ve 8RH Mikroyapısı



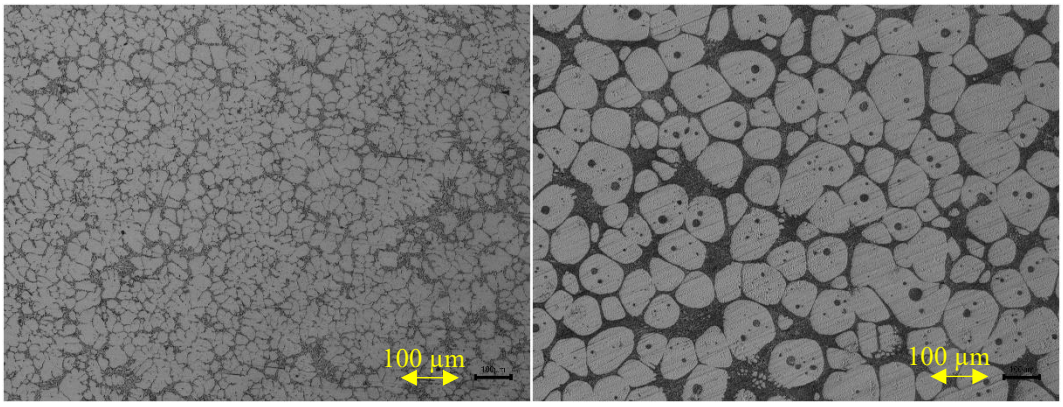
Şekil 6. 9 9 ve 9RH Mikroyapısı



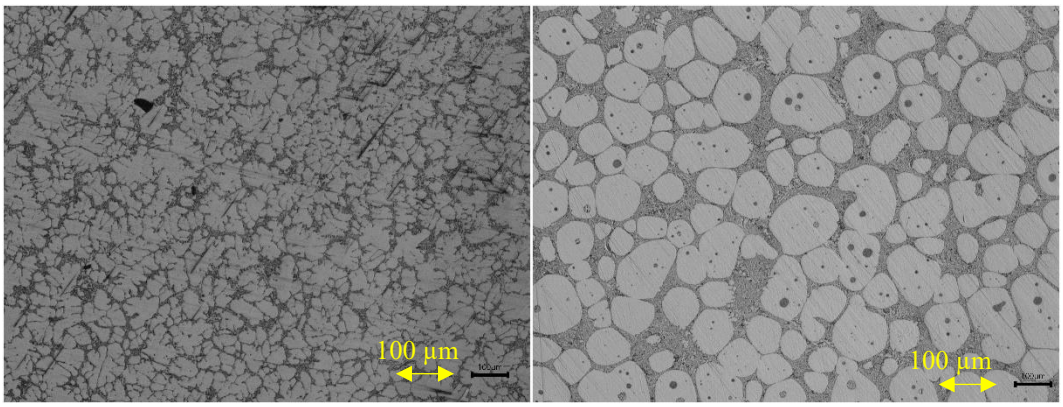
Şekil 6. 10 10 ve 10RH Mikroyapısı



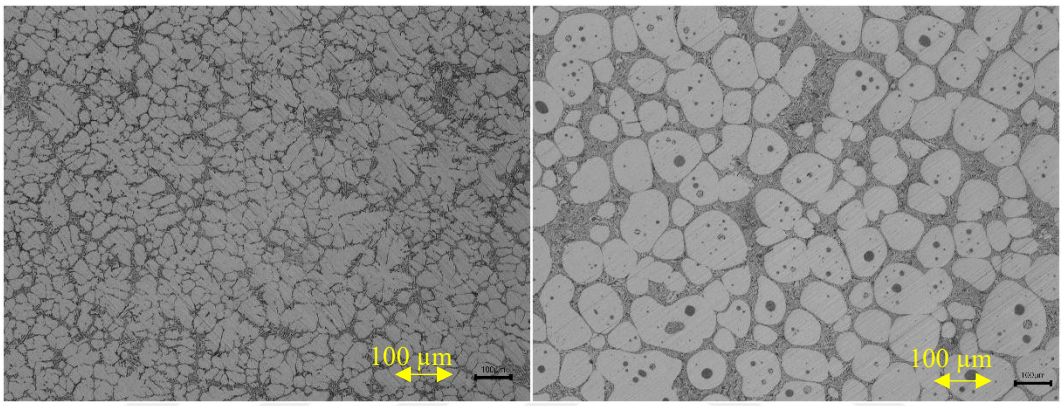
Şekil 6. 11 11 ve 11RH Mikroyapısı



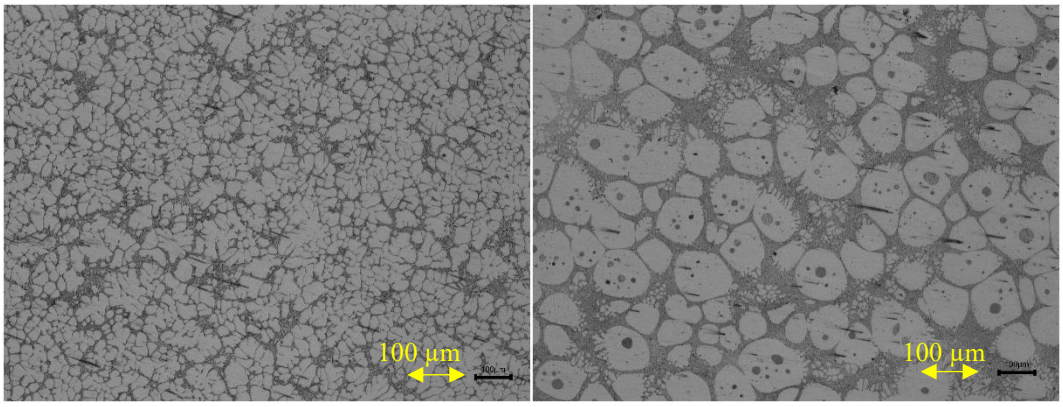
Şekil 6. 12 12 ve 12RH Mikroyapısı



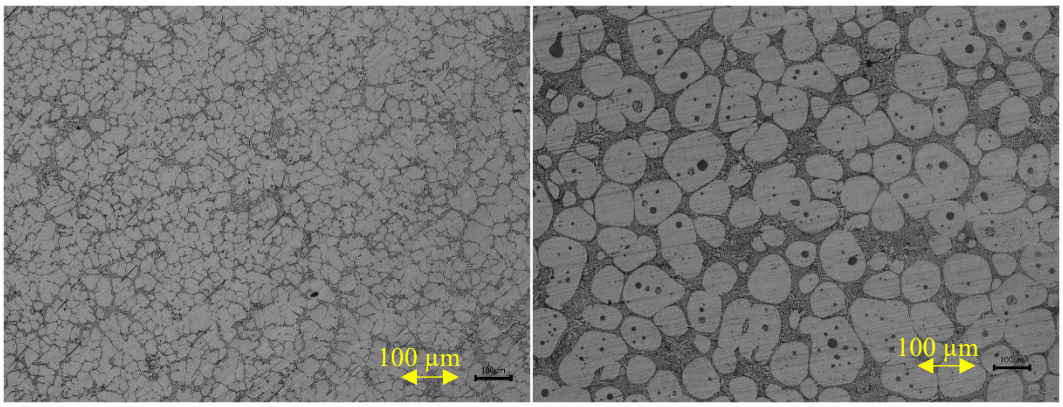
Şekil 6. 13 13 ve 13RH Mikroyapısı



Şekil 6. 14 14 ve 14RH Mikroyapısı



Şekil 6. 15 15 ve 15RH Mikroyapısı



Şekil 6. 16 16 ve 16RH Mikroyapısı

A356 alaşımı, silisyum içeriği nedeniyle ötektik altı bir Al-Si alaşımıdır. Bu durumda mikroyapılardaki açık renkli alanlar α-Al taneleri, aralarındaki gri alanlar ise Al-Si ötektiktir. A356 alaşımının yarı katı hale getirildikten sonra mikro yapısındaki hapsolmuş ötektik yapı, ötektik bileşimin (alüminyum ve silisyum karışımı) birincil katılaşmış alüminyum tanecikleri içinde tutulduğu bölgeleri ifade eder.

A356 alaşımı için eğimli soğutucu ile döküm yöntemiyle dentritik büyümenin baskılandığı ve nispeten yüksek küreselliğe sahip düzgün granüler bir yapının oluştuğu gözlemlendi.

Numunelerden alınan mikro yapı görüntüleri incelendiğinde yeniden ısıtılmış numunelerde tanelerin ortalama çapında önemli bir artış gözlenmektedir. Tane sınırları, tanenin iç kısmına kıyasla atomların düzensiz dizilişinden dolayı daha yüksek enerjiye sahip alanlardır. Isıtma, tane sınırlarının hareket etmesine izin verir, bu da toplam tane sınırı alanında bir azalmaya yol açarak daha büyük tanelerin büyümesini destekler.

Tane büyümesi ve birleşmesi çok belirgindir. Mikroyapı görüntülerinde kaba ve küresel α-Al taneleri arasında gri alanlar göze çarpmaktadır. Bu bölgeler birleşmeleri sırasında tanelerin arasında kalan ötektik bölgelerdir.

Mikroskopla incelenen mikroyapıların tane boyları, küresellik değerleri ölçülüp, ayrıca tüm numunelerin sertlik değerleri analiz edilmiştir.

Küresellik Değeri Hesaplaması: Tanenin çevresi/ π.R

R: Numunenin Çapı

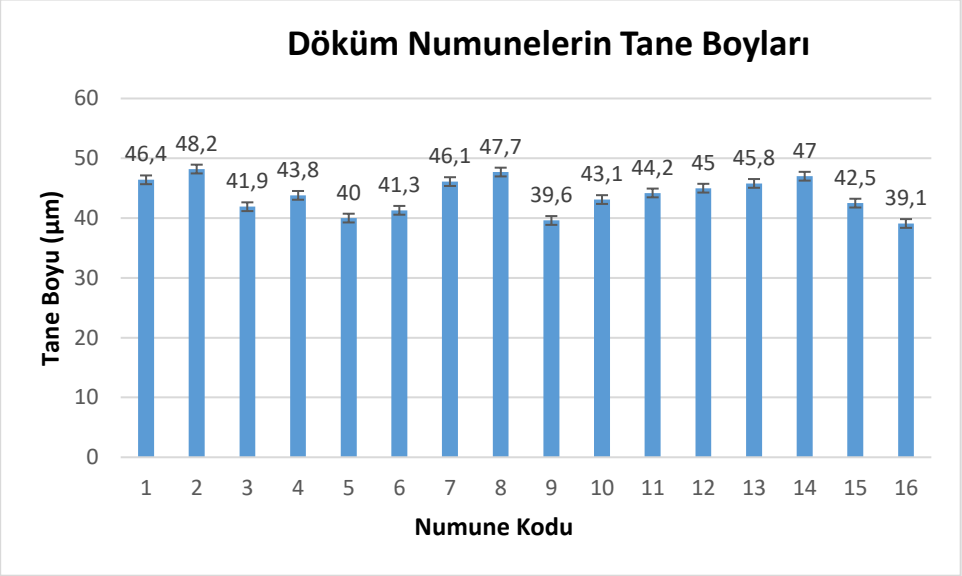
π: 3,14

Tane Büyüklüğü Hesabı: $(4.A/Ç)^{(1/2)}$

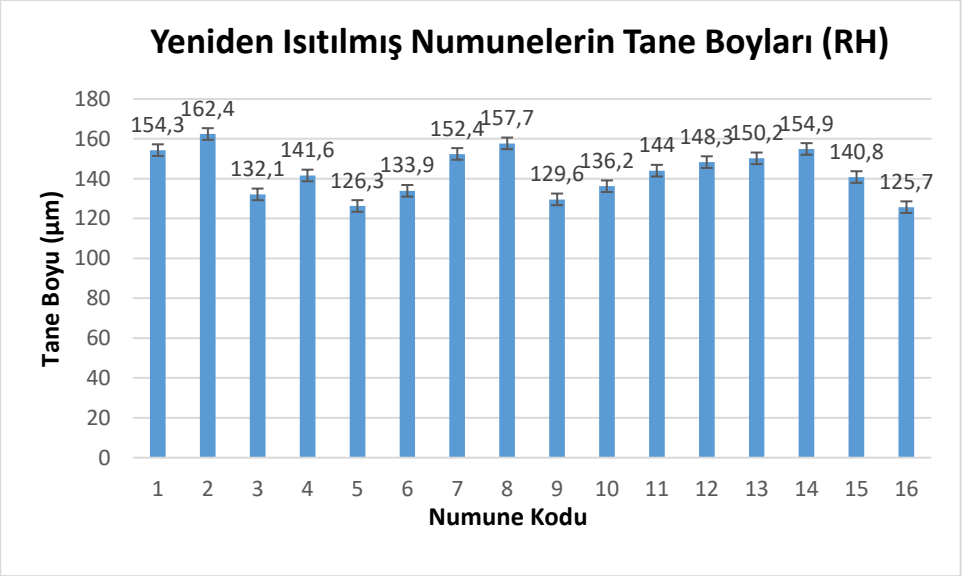
A: Alan

Ç: Çevre

Şekil 6.17, döküm numunelerinin tane boylarını, Şekil 6.18, yeniden ısıtılan numunelerin tane boylarını göstermektedir.



Şekil 6. 17 Döküm Numunelerinin Tane Boyları



Şekil 6. 18 Yeniden Isıtılmış Numunelerin Tane Boyları

Eğimli soğutucu ile döküm yönteminde eş eksenli ince tanelerin oluşumunu sağlayan iki mekanizmadan söz edilebilir. Birincisi, hızlı soğuma etkisinden dolayı çekirdeklenme hızının artması ve katılaşmanın çok sayıda çekirdekle gerçekleşmesidir. İkincisi ise akış eğiminin

sağladığı kesme kuvvetinin, soğutucu ile teması sonucu oluşan çekirdekleri sürüklenirken kırmasıdır.

Döküm sırasındaki titreşim, dentritleri parçalayarak, alaşım elementlerinin düzgün dağılımını teşvik ederek ve gözenekliliği azaltarak katılaşma sürecini etkileyebilir. Uygun titreşim, daha az kusura sahip daha ince mikro yapılar elde etmeye olanak sağlar. Titreşim etkisinin artması da tane boyunun küçülmesine yol açmıştır. 9 ve 10 kodlu numuneler titreşim etkisi dışında kalan proses parametreleri aynı tutularak hazırlanmıştır. 9 kodlu numune titreşim etkisi altında hazırlanırken 10 kodlu numunede titreşim etkisi bulunmamaktadır. 9 ve 10 kodlu döküm numunelerin tane boyları 39,6 ve 43,1 µm iken 9RH ve 10RH yeniden ısıtılmış numunelerin tane boyları 129,6 ve 136,2 µm'dir. Şekil 5.17 ve 5.18'de görüldüğü üzere titreşim etkisi altında dökümü gerçekleştirilen hem döküm hem yeniden ısıtılmış numuneler daha küçük tane boylarına sahiptir. 3,15 ve 16 kodlu numuneleri incelediğimizde titreşim etkisinin artmasıyla tane boyunun küçüldüğü, titreşim etkisinin artmasıyla tane boyunun arttığı gözlenmiştir.

Döküm açısı erimiş malzemenin katılaşma hızını etkiler. Daha dik bir açı akış hızını arttırdığı için kesme kuvvetini arttırır. Açı dikleştikçe kesme kuvveti artar ancak metal daha hızlı aktığı için soğutucuyla temas süresi azalır. 1,3,5 ve 1RH,3RH,5RH kodlu numunelerde döküm açısı farklılık göstermekte olup kalan parametreler aynıdır. 1 ve 1RH 30°, 3 ve 3RH 45°, 5 ve 5RH 60° açılarıyla dökülmüştür. 1,3.5 ve 1RH,3RH,5RH numunelerinin tane çapları sırasıyla 46,4, 41,9, 40,0, 154,3, 132,1, 126,3 µm'dir.

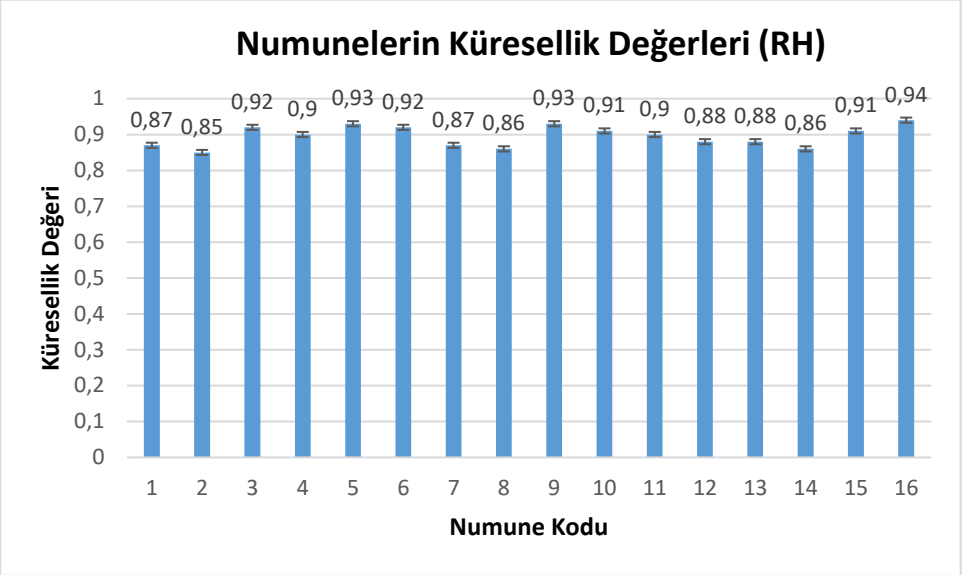
Daha uzun eğimli soğutucular, soğutma ve katılaşma için daha fazla mesafe sağlayabilir, bu da daha iyi tane incelmesi nedeniyle potansiyel olarak daha ince mikro yapılara ve daha yüksek sertliğe neden olur. 3-3RH kodlu numuneler 500 mm, 7-7RH kodlu numuneler 350 mm ve 9-9RH kodlu numuneler 650 mm uzunluğundaki soğutucular kullanılarak dökülmüştür. 7 kodlu numunenin tane boyu 46,1 µm iken 9 kodlu numunenin tane boyu 39,6 µm, 3 kodlu numune tane boyu 41,9 µm'dir. Yeniden ısıtılmış numuneler olan 3RH,7RH,9RH numunelerin tane boyları sırasıyla 132,1, 126,3 ve 129,6 µm'dir. 350,500 ve 650 mm soğutucu uzunluklarıyla yapılan dökümlerde soğutucu uzunluğu kısaldıkça tane boyunun hem döküm numunelerde hem de yeniden ısıtılmış numunelerde arttığı sonucuna varılmıştır.

Döküm sıcaklığı malzemenin katılaşma hızını ve mikro yapısını doğrudan etkiler. Daha yüksek döküm sıcaklıkları genellikle daha kaba mikro yapılara neden olurken, daha düşük sıcaklıklar daha ince mikro yapıları destekleyebilir. Daha yüksek sıcaklıkta dökülen 13 ve

13RH numunelerinin tane boyları 45,8 ve 150,2 µm iken, ortalama sıcaklıkta dökülen 11 ve 11RH numunelerinin tane boyları 44,2 ve 144 µm daha düşük sıcaklıkta dökülen 3 ve 3RH numunelerin tane boyları 41,9 ve 132,1 µm'dir. Yapılan çalışma sonucunda daha yüksek döküm sıcaklıklarına sahip numunelerin tane boylarının da daha büyük olduğu saptanmıştır. Sıvılaşma sıcaklığına yakınlık, erimiş metalin minimum aşırı soğuma ile ağırlıklı olarak sıvı halde kalması anlamına gelir. Dökümler likidüs sıcaklığına yakın derecelerde gerçekleseydi, α-Al fazının çekirdeklenmesi için yeterli itici güç olmayacaktı ve bu da mikro yapıdaki birincil α-Al parçacıklarının daha düşük bir fraksiyonuna yol açacaktı.

Eğimli soğutucu dökümden elde edilen daha ince taneli yapı yeniden ısıtıldığında, tanelerin büyümesi muhtemeldir. Bunun nedeni, Ostwald olgunlaşması ve tane sınırı göçü gibi tane büyüme mekanizmalarından kaynaklanmaktadır ve bunlar, daha ince taneli bir yapıyla başlandığında daha belirgindir. Yeniden ısıtma sırasında, daha küçük taneler birleşme veya daha büyük taneler tarafından emilme eğilimi göstererek tane boyunda genel bir artışa yol açar. Döküm numunelerin ortalama tane boyu 43,8 µm iken yeniden ısıtılmış numunelerin ortalama tane boyu 143,1 µm'dir. Çalışma sonucunda yeniden ısıtılan numunelerin tane boylarının döküm numunelere göre daha büyük olduğu görülmüştür. Taneler sistemin genel serbest enerjisini azaltacak şekilde büyür. Küçük taneler büyük tanelere göre daha yüksek yüzey enerjisine sahiptir. Isıtma, atomların hareket etmesi için gereken enerjiyi sağlayarak daha büyük tanelerin daha küçük taneleri tüketmesine olanak tanır ve böylece toplam yüzey enerjisini azaltır.

Şekil 6.19 numunelerin küresellik değerlerini göstermektedir.



Şekil 6. 19 Numunelerin Küresellik Değerleri

Dikkat çeken bir diğer nokta ise küreselleşmenin hızıdır. Al-Si ötektik altı alaşımlarda, yarı katı yeniden ısıtma işlemi sırasında ötektik faz erir ve katı α-Al tanelerini çevreler. Zamanla birlikte eriyik miktarı da doğal olarak artacaktır. Eriyik ötektik havuzunda kalan katı taneler her yöne doğru büyüyerek küresel bir form alır. Bir ideal kürenin indeksi 1'dir. Pratikte bu değere ulaşmak mümkün olmayacağından, küresellik değeri belirli bir bekleme süresinden sonra tane birleşmesine bağlı olarak ulaşabileceği en yüksek değerin altına düşecektir.

Sıvılaşma noktasına yakın sıcaklıklarda, malzemenin düşük viskozitesi kesme eyleminin etkinliğini azaltır, bu da α-Al yapısının daha az parçalanmasına ve küreselleşmesinin azalmasına neden olur. Bu da daha büyük tanelere ve potansiyel olarak daha az homojen şekillere yol açar. 635 derecede dökümü gerçekleşen 3RH numunesinin küresellik değeri 0,92, 655 derecede dökümü gerçekleşen 13RH numunesinin küresellik değeri 0,88'dir. Şekil 6.19'da görüldüğü üzere daha yüksek sıcaklıklarda yapılan dökümlerde küresellik değeri daha düşüktür.

Titreşim, eş eksenli ve dentritik olmayan çekirdeklenmeyi teşvik ederek ve dentritik yapıları parçalayarak parçacıkların küreselliğini önemli ölçüde artırabilir. Titreşim, erimiş metalin eşit şekilde yeniden dağıtılmasına, yüzey gerilimi etkilerinin azaltılmasına ve küresel şekillerin oluşumunun arttırılmasına yardımcı olur. En yüksek küresellik değerine sahip numune titreşimin en çok uygulandığı numune olan 16RH'dır. Küresellik değeri 0,94'tür. 3RH,4RH ve 15RH numuneleri sırasıyla 1,5, 0 ve 0,9 mm genlik titreşim etkisinde dökülmüştür.

Küresellik değerleri 0,92, 0,9 ve 0,91'dir. Titreşimin artmasıyla küresellik değeri de artış göstermiştir.

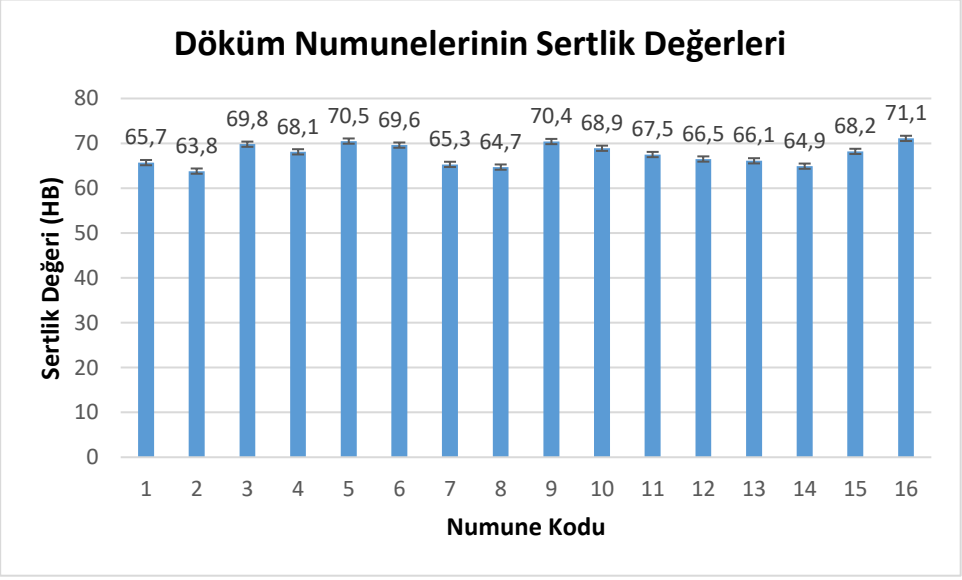
Daha uzun bir soğutma eğimi, erimiş metalin eğimden aşağı akarken katılaşması için daha fazla zaman sağlar. Bu, metalin tamamen katılaşmadan önce eş eksenli bir şekle ulaşması için daha fazla zamana sahip olması nedeniyle küresel parçacıkların oluşumunu arttırabilir. 350 mm soğutucu ile hazırlanan 7RH numunesinin küresellik değeri 0,87 iken 650 mm soğutucu ile hazırlanan 9RH numunesinin küresellik değeri 0,93'tür. Daha uzun soğutucu kullanılarak yapılan dökümlerin küresellik değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür.

Daha dik bir açı, erimiş metalin soğutucu ile temas süresini azaltır. Daha dik açılar daha fazla türbülansa ve daha iyi karışmaya yol açarak kesme kuvvetini arttırır ve daha küresel parçacıkların oluşmasını sağlayabilir. En dik açı ile dökülen 5RH ve 6RH küresellik değerleri 0,93 ve 0,92 iken daha düşük açılarda dökümü gerçekleşen 1RH ve 2RH numunelerinin küresellik değerleri 0,87 ve 0,85'tir. Deneyler sonucunda döküm açısının artması küresellik değerlerinin artmasına yol açmıştır.

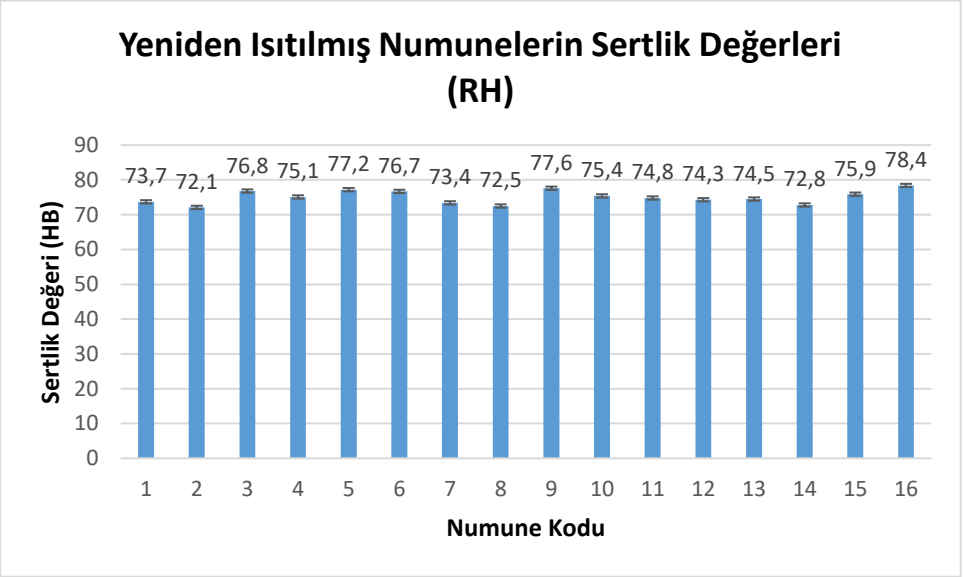
Şekil 6.20, döküm numunelerinin sertlik değerlerini, Şekil 6.21, yeniden ısıtılan numunelerin sertlik değerlerini gösterir.

$$HBW = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{y}} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{(D^2 - d^2)}}$$

HBW: Brinell Sertlik Değeri (HB), F: Uygulanan yük, (kg) D: Bilyanın çapı (mm), d: İzin çapı (mm)



Şekil 6. 20 Döküm Numunelerinin Sertlik Değerleri



Şekil 6. 21 Yeniden Isıtılmış Numunelerin Sertlik Değerleri

Döküm sırasındaki titreşim, eş eksenli çekirdeklenmeyi teşvik ederek ve dentritik büyümeyi bozarak tane yapısını önemli ölçüde etkiler. Daha ince, daha düzgün bir tane yapısı genellikle daha yüksek sertlikle sonuçlanır. Şekil 6.20 ve 6.21'de titreşim etkisi altında yapılan dökümlerin sertliği titreşim etkisinin olmadığı dökümlerden daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu ancak aradaki farkların çok küçük olduğu gözlenebilir. Numune 3,15,16 ve bu numunelerin yeniden ısıtılmış hallerini karşılaştırdığımızda titreşim etkisinin en az olduğu 15 ve 15 RH'ın sertlik değerleri 68,2 ve 75,9 HB iken, titreşim etkisinin en fazla olduğu 16 ve 16 RH'ın sertlik değerlerinin 71,1 ve 78,4 HB olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Daha uzun bir soğutucu uzunluğu, erimiş metalin kademeli olarak soğuması ve katılaşması için daha fazla zaman sağlar. Bu, daha düzgün bir mikro yapıyı ve potansiyel olarak daha ince taneleri destekleyerek sertliği arttırabilir. Diğer parametreler sabit tutulduğunda daha uzun soğutucu ile yapılan dökümlerin daha yüksek sertliğe sahip olduğu saptanmıştır. 350 mm soğutucu ile dökülen numuneler 7 ve 7RH sertlik değerleri 65,3 ve 73,4 HB'dir. 650 mm soğutucu ile dökülen numuneler olan 9 ve 9RH sertlik değerleri ise 70,4 ve 77,6 HB'dir.

Daha yüksek sıcaklıklar genellikle daha yavaş soğuma hızlarına ve daha büyük tane boyuna yol açar. Daha büyük taneler, dislokasyon hareketini engelleyecek daha az tane sınırına sahip oldukları için sertliği azaltabilirler. 635°C sıcaklıkta dökümü yapılan 4 ve 4RH numuneleri 68,1 ve 75,1 HB sertliğe sahip iken, 655°C sıcaklıkta dökümleri yapılan 14 ve 14RH

numunelerinin sertliği 64,9 ve 72,8 HB'dir. Dökümlerde sıcaklıkların artması numunelerin sertliğinin azalmasına yol açmıştır.

Daha dik bir açı, karışımı geliştirebilir ve daha hızlı soğutma oranları nedeniyle daha ince bir mikro yapıyı destekleyebilir. Bu genellikle daha yüksek sertlikle sonuçlanır. 60°'de dökümü yapılan numune 6'nın sertlik değeri 69,6 HB ve 30°'de dökümü yapılan numune 2'nin sertlik değeri 63,8 HB'dir. Daha düşük açı ile yapılan dökümlerde numunelerin sertliğinin de daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Yeniden ısıtılmış numuneler ile döküm numuneler arasında sertlik açısından önemli bir fark vardır. Yeniden ısıtmadaki tane kabalaşmasına rağmen sertlikler yüksek ölçülmüştür. Bu durumun nedeni numunelerin soğuma hızları arasındaki farktır. Yeniden ısıtılan numuneler fırından alınır alınmaz oda sıcaklığındaki suda soğutulmuştur. Döküm numuneler ise işlem sonrasında havada soğumuştur. Yeniden ısıtılan numunelerde yüksek soğuma hızının bir sonucu olarak erimiş ötektik yapı çok ince bir formda katılaşmıştır. Yarı katı haldeki ve havada soğutulan numunelerde yavaş soğutma, ötektiğin nispeten daha iri bir formda oluşmasını sağlamıştır. Sonuç olarak, ince ötektik içeren yeniden ısıtılmış numunelerin sertliği artmıştır.

Gencalp ve arkadaşları [53] A356 alaşımı ile ayrıca A380 alüminyum alaşımının eğimli soğutucu ile döküm prosesinde titreşimin etkilerini araştırmıştır. Bulgularımıza benzer şekilde, çalışma, mekanik titreşimin daha ince bir mikro yapıya ve artan sertliğe yol açtığını, titreşimin mikroyapısal iyileştirme ve mekanik özellikler üzerindeki yararlı etkilerini desteklediğini bildirmiştir.

Prosenjit Das ve arkadaşları [54] A356 alaşımının soğuma eğimi boyunca akışı sırasında mikroyapısal gelişimini araştırmıştır. Çalışma, eğimli soğutucu ile dökümün, özellikle optimize edilmiş soğutma koşulları altında daha ince, daha küresel bir tane yapısının oluşumunu kolaylaştırdığını vurgulamıştır. Bu, artan döküm açısıyla birlikte gelişmiş küresellik ve azaltılmış tane boyu gösteren çalışma sonuçlarımızla benzerlik göstermektedir.

Khosravi ve arkadaşları [55] A356 alaşımının yarı katı dökümü için proses parametrelerinin modellenmesine ve optimize edilmesine odaklanmıştır. Araştırma, döküm parametrelerinin önemini vurgulayarak, yanlış ayarların daha iri taneli yapılara yol açabileceğini belirtmiştir. Döküm sıcaklığı ile tane incelmesi arasında gözlemlediğimiz ters ilişki, yüksek sıcaklıkların

daha kaba taneler ve azalan sertlik ile ilişkilendirildiği Khosravi'nin bulgularında da belirtilmiştir.

Tugiman ve ark. [56] yerçekimi dökümüyle (metal kalıba döküm) üretilen bir alüminyum-silisyum alaşımının mekanik özellikleri üzerinde soğuma eğiminin etkisini incelemiştir. Çalışma, soğutma eğimi açısının ayarlanmasının mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediğini, daha dik açıların daha ince taneler ve daha iyi sertlik sağladığını bildirmiştir. Sonuçlar gözlemlerimize paralel şekildedir.

Li ve diğerleri [57] kapalı bir soğutma eğimi kanalıyla işlenmiş yarı katı 7075 alüminyum alaşımının mikro yapısını ve özelliklerini analiz etmiştir. Çalışma, eğimli soğutucu ile döküm yönteminde parametrelerinin optimize edilmesinin, sonuçlarımızla tutarlı olarak, daha düşük tane boyu ve yüksek sertlik gibi mekanik özelliklerde ve mikro yapıda değişimlere açabileceğini bulmuştur.

Saffari ve Akhlaghi [58] bir Al-Mg_2Si kompoziti için titreşimli bir soğutma eğimi kullanarak yarı katı dökümü araştırmıştır. Titreşimin daha ince ve daha küresel tanelere yol açtığını buldular; bu da yaptığımız çalışmaya benzer şekilde titreşimin etkisi altında gelişmiş küresellik ve azalmış tane boyuna sahip numuneler elde edilebileceğine ilişkin bulgularımızla paraleldir.

Ruirun ve ark. [61] ultrasonik titreşimin yüksek alaşımlı titanyum alüminidin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkilerine odaklanmıştır. Bulgularımıza benzer şekilde, titreşimin uygulanması tane incelmesine ve mekanik özelliklerin iyileşmesine yol açmıştır; bu da titreşimin malzeme özelliklerini iyileştirmedeki genel etkinliğini vurgulamıştır.

7
SONUÇ

Eğimli soğutucu ile döküm yöntemi, döküm işlemi sırasında metalin düzgün ve kontrollü soğumasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem yarı katı şekillendirmeye uygun dentritik olmayan mikro yapıya sahip malzeme üretimi için basit ve çok kullanışlıdır. Endüstriyel olarak da kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında eğimli soğutucu ile döküm yöntemiyle birlikte 30˚,45˚ ve 60˚ açıları, 350,500 ve 650 mm soğutucu uzunlukları, 635°C, 645°C ve 655°C döküm sıcaklıkları ve 0,9, 1,5 ve 2,4 genlik titreşim etkisi döküm parametrelerine sahip numuneler üretilerek optimum döküm parametreleri bulunmaya çalışılmıştır. Tüm parametreler arasında mekanik özellikleri ve mikro yapıları en çok değiştiren parametre titreşim etkisiyken, en az etkileyense döküm sıcaklığı olmuştur.

Sertliği ve küresellik değeri yüksek, tane boyu küçük yapılar elde etmek için dökümlerin daha dik bir açıda, daha uzun soğutucular kullanılarak titreşim etkisi altında alaşımın likidüs sıcaklığının az üzerinde yapılması gerekmektedir. Tane boyu büyük ancak sertliği ve küreselliği düşük yapılarsa daha yüksek sıcaklık altında titreşim etkisi yokken, daha kısa soğutucu uzunluğu ve daha küçük açılarda yapılan dökümlerde elde edilmiştir.

Eğimli soğutucu ile dökümde hedef, yüksek sertlik, yüksek küresellik ve düşük tane boyu elde etmektir; çünkü bu özellikler daha güçlü, daha dayanıklı ve daha güvenilir bir döküm ürününe katkıda bulunur. Bu sebeplerle en optimum koşullarda üretilen döküm ve yeniden ısıtılmış numuneler 16 ve 16RH, optimum koşullara en uzak üretilen döküm ve yeniden ısıtılmış numuneler ise 2 ve 2RH'tır. 2, 16, 2RH ve 16RH numunelerinin tane boyları sırasıyla 48,2, 39,1, 162,4 ve 125,7 μm iken, 2RH küresellik değeri 0,85, 16RH küresellik değeri 0,94'tür. Sertlik değerleri sırasıyla 63,8, 71,1, 72,1 ve 78,4 HB'dir. Doğru döküm parametreleri belirlenerek istenen özelliğe sahip numunelerin üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Özetle, çalışmamız özellikle titreşim, döküm açısı ve soğuma eğimi parametrelerinin sertliğin, küreselliğin iyileştirilmesi ve tane boyunun küçültülmesi üzerindeki etkileri konusundaki çalışma bulgularıyla iyi bir uyum içindedir. Bu çalışmalardaki ortak eğilim, arzu edilen mikroyapısal ve mekanik özelliklerin elde edilmesinde döküm parametrelerinin önemli rolüdür.

KAYNAKÇA

[1] W. F. McDonough and S. -s. Sun, “The composition of the Earth,” Chemical Geology, vol. 120, no. 3, pp. 223–253, Mar. 1995, doi: https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4.

[2] J. Brown, Foseco Ferrous Foundryman’s Handbook. Elsevier, 2000.

[3] M. Li, Y. Li, X. Huang, C. Cao ve Y. Ma, (2017). “China Foundry”, 14: 1-9.

[4] S. Gencalp and N. Saklakoglu, “Semisolid Microstructure Evolution during Cooling Slope Casting under Vibration of A380 Aluminum Alloy,” Materials and Manufacturing Processes, vol. 25, no. 9, pp. 943–947, Aug. 2010, doi: https://doi.org/10.1080/10426911003636944.

[5] P. Das, S. K. Samanta, B. R. K. Venkatpathi, H. Chattopadhyay, and P. Dutta, “Microstructural Evolution of A356 Al Alloy During Flow Along a Cooling Slope,” Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 65, no. 6, pp. 669–672, Oct. 2012, doi: https://doi.org/10.1007/s12666-012-0208-8.

[6] T. Tugiman, A. Thayab, F. Ariani, T. Sitorus, S. Suhandi, and R. Rizki, “The Effect of Cooling Slope on Mechanical Properties of Aluminum-8.5wt.% Si Alloy Produced by Gravity Casting,” Jan. 2019, doi: https://doi.org/10.4108/eai.3-11-2018.2285718.

[7] Z. Li et al., “Microstructure and Properties of Semi-Solid 7075 Aluminum Alloy Processed with an Enclosed Cooling Slope Channel,” Crystals, vol. 13, no. 7, pp. 1102–1102, Jul. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/cryst13071102.

[8] S. Saffari and F. Akhlaghi, “New Semisolid Casting of an Al-25Wt.% Mg2Si Composite Using Vibrating Cooling Slope,” Solid State Phenomena, vol. 217–218, pp. 389–396, Sep. 2014, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.217-218.389.

[9] M. Jahanbakhshi, S. Nourouzi, R. Naseri, and K. Esfandiari, “Investigation of Simultaneous Effects of Cooling Slope Casting and Mold Vibration on Mechanical and Microstructural Properties of A356 Aluminum Alloy,” Metals and materials international/Metals and Materials International, vol. 28, no. 6, pp. 1508–1516, Sep. 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s12540-021-01056-w.

[10] J. Chen, X. Chen, and Z. Luo, “Effect of mechanical vibration on microstructure and properties of cast AZ91D alloy,” Results in Physics, vol. 11, pp. 1022–1027, Dec. 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.10.047.

[11] C. Ruirun et al., “Effects of ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical properties of high alloying TiAl,” Scientific Reports, vol. 7, no. 1, Jan. 2017, doi: https://doi.org/10.1038/srep41463.

[12] “Facts at a Glance -2018,” 2020. Available: https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-11/FactSheet2018.pdf

[13] S. Anık, E. S. Anık and M. Vural ‘‘Malzeme bilgisi ve muayenesi’’. Birsen Yayınevi, 1998, Weissbach, Wolfgang.

[14] M. B. Djurdjević, S. Manasijević, Z. Odanović, and N. Dolić, “Calculation of Liquidus Temperature for Aluminum and Magnesium Alloys Applying Method of Equivalency,” Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2013, pp. 1–8, Jan. 2013, doi: https://doi.org/10.1155/2013/170527.

[15] M. C. Flemings, R. G. Riek, and K. P. Young, “Rheocasting,” Materials Science and Engineering, vol. 25, pp. 103–117, Sep. 1976, doi: https://doi.org/10.1016/0025-5416(76)90057-4.

[16] A. Bolouri, M. Shahmiri, and C. G. Kang, “Coarsening of equiaxed microstructure in the semisolid state of aluminum 7075 alloy through SIMA processing,” Journal of Materials Science, vol. 47, no. 8, pp. 3544–3553, Dec. 2011, doi: https://doi.org/10.1007/s10853-011-6200-6.

[17] J. Jiang, Y. Wang, G. Xiao, and X. Nie, “Comparison of microstructural evolution of 7075 aluminum alloy fabricated by SIMA and RAP,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 238, pp. 361–372, Dec. 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.020.

[18] H. Atkinson, “Current Status of Semi-Solid Processing of Metallic Materials,” pp. 81–98, Oct. 2007, doi: https://doi.org/10.1007/978-2-287-72143-4_6.

[19] G. Hirt and R. Kopp, Thixoforming. John Wiley & Sons, 2009.

[20] H. V. Atkinson and D. Liu, “Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys,” Materials Science and Engineering: A, vol. 496, no. 1–2, pp. 439–446, Nov. 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.06.013.

[21] H. V. Atkinson, “Semisolid processing of metallic materials,” Materials Science and Technology, vol. 26, no. 12, pp. 1401–1413, Dec. 2010, doi: https://doi.org/10.1179/026708310x12815992418012.

[22] K. Young, “Method of producing shaped metal parts,” August 18, 1 [Alumax, Inc.],” US4687042A, Aug. 18, 1987 Accessed: Jan. 20, 2023. [Online]. Available: https://uspto.report/patent/grant/4687042

[23] J. E. Kelly, K. E. Blazek, and K. P. Young, “Method and apparatus for rheocasting,” US5178204A, 1993 Accessed: Jan. 20, 2023. [Online]. Available: https://patents.justia.com/patent/5178204

[24] F. Czerwinski, “The basics of modern semi-solid metal processing,” JOM, vol. 58, no. 6, pp. 17–20, Jun. 2006, doi: https://doi.org/10.1007/s11837-006-0173-y.

[25] Thixoforming. Wiley, 2009. doi: https://doi.org/10.1002/9783527623969.

[26] M. Paes and E.J. Zoqui, “Semi-solid behavior of new Al–Si–Mg alloys for thixoforming,” Materials Science and Engineering A, vol. 406, no. 1–2, pp. 63–73, Oct. 2005, doi: https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.07.018.

[27] S. Nafisi and R. Ghomashchi, “Combined grain refining and modification of

conventional and rheo-cast A356 Al–Si alloy," Materials characterization, vol. 57, no. 4–5, pp. 371–385, Dec. 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.03.016.

[28] M. V. Kishore, D. Hanumantha Rao, and Mohammed Manzoor Hussain, "Experimental Study on the Effect of Mechanical Stirring in Semisolid Processing of Aluminum Alloys at Thixo-Temperatures ", Materials science forum, vol. 830–831, pp. 41–44, Sep. 2015, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.830-831.41.

[29] E.J. Zoqui, J.I. Gracciolli, and L.A. Lourençato, "Thixo-formability of the AA6063 alloy: Conventional production processes versus electromagnetic stirring," Journal of Materials Processing Technology, vol. 198, no. 1–3, pp. 155–161, Mar. 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.089.

[30] E. Salamcı, "Sprey Döküm (Derleme)," Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, no. 2, pp. 155–173, 2004. Available: https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/83222

[31] C. P. Chen and A. Tsao, "Response of spray-deposited, stirred-cast and conventional cast Pb-Sn alloys to deformation in the semi-solid state," Journal of Materials Science, vol. 30, no. 16, pp. 4019–4026, Aug. 1995, doi: https://doi.org/10.1007/bf00360703.

[32] E.D. Manson-Whitton, I. C. Stone, J. R. Jones, P. S. Grant, and B. Cantor, "Isothermal grain coarsening of spray formed alloys in the semi-solid state," Acta Materialia, vol. 50, no. 10, pp. 2517–2535, Jun. 2002, doi: https://doi.org/10.1016/s1359-6454(02)00080-0.

[33] J. L. Wang, Y. H. Su, and C.-Y. .A Tsao, "STRUCTURAL EVOLUTION OF CONVENTIONAL CAST DENDRITIC AND SPRAY-CAST NON-DENDRITIC STRUCTURES DURING ISOTHERMAL HOLDING IN THE SEMI-SOLID STATE," Scripta Materialia, vol. 37, no. 12, pp. 2003–2007, Dec. 1997, doi: https://doi.org/10.1016/s1359-6462(97)00394-1.

[34] G. Eskin, "Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys," vol. 8, no. 3, pp. 319–325, Jul. 2001, doi: https://doi.org/10.1016/s1350-4177(00)00074-2.

[35] L. Zhang, G. H. Wu, S. H. Wang, and W. J. Ding, "Effect of cooling condition on microstructure of semi-solid AZ91 slurry produced via ultrasonic vibration process," Trans Nonferrous Met Soc China, vol. 22, no. 10, pp. 2357–2363, 2012, doi: 10.1016/S1003-6326(11)61471-4.

[36] V. O. Abramov, O. V. Abramov, B. B. Straumal, and W. Gust, "Hypereutectic Al-Si based alloys with a thixotropic microstructure produced by ultrasonic treatment," Materials & Design, vol. 18, no. 4–6, pp. 323–326, Dec. 1997, doi: https://doi.org/10.1016/s0261-3069(97)00072-1.

[37] Y. Birol, "Semi-solid processing of the primary aluminium die casting alloy A365," Journal of Alloys and Compounds, vol. 473, no. 1–2, pp. 133–138, Apr. 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.05.074.

[38] K. A. Guler, R. Gecu, A. Kisasoz, and A. Karaaslan, "Investigation of spherisation in microstructures of aluminium casting alloys for thixoforging

process," Russian Journal of Non-Ferrous Metals, vol. 58, no. 5, pp. 489–494, Sep. 2017, doi: https://doi.org/10.3103/s1067821217050066.

[39] S. WANG, N. ZHOU, W. QI, and K. ZHENG, "Microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy wheels prepared by thixo-forging combined with a low superheat casting process," Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 24, no. 7, pp. 2214–2219, Jul. 2014, doi: https://doi.org/10.1016/s1003-6326(14)63335-5.

[40] T. S. Mahmoud, E. Y. El-Kady, H. M. Zakaria, A. El-Awady, and M. F. El Sherbiny, "Optimization of the low superheat casting process parameters for producing of thixotropic A356 alloy feedstock," Mater Sci Indian J, vol. 14, no. 7, pp. 246–254, 2016, doi: https://doi.org/10.1126/science.8134833.

[41] M. Adachi, H. Sasaki, Y. Harada, T. Sakamoto, S. Sato, and A. Yoshida, "Method and apparatus for shaping semisolid metals," EP0745694B1, May 29, 1996 Accessed: Jan. 20, 2023. Available: https://patents.google.com/patent/EP0745694B1/en?oq=EP0745694B1

[42] "Semisolid Processes," www.sciencedirect.com, pp. 109–134, Jan. 2014, doi: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00516-1.

[43] S. Ji, K. Wang, and X. Dong, "An Overview on the Process Development and the Formation of Non-Dendritic Microstructure in Semi-Solid Processing of Metallic Materials," Crystals, vol. 12, no. 8, p. 1044, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/cryst12081044.

[44] Q. Y. Pan, S. Wiesner, and D. Apelian, "Application of the Continuous Rheoconversion Process (CRP) to Low Temperature HPDC-Part I: Microstructure," Diffusion and defect data, solid state data. Part B, Solid state phenomena/Solid state phenomena, vol. 116–117, pp. 402–405, Oct. 2006, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.116-117.402.

[45] S. D. Kumar, A. Mandal, and M. Chakraborty, "Cooling Slope Casting Process of Semi-solid Aluminum Alloys: A Review," Int J Eng Res Technol, vol. 3, no. 7, pp. 269–283, 2014, doi: 10.17577/IJERTV3IS070312.

[46] J. Wannasin, R. A. Martinez, and M. C. Flemings, "Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification," Scripta materialia, vol. 55, no. 2, pp. 115–118, Jul. 2006, doi: https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.04.003.

[47] J. Wannasin, S. Thanabumrungkul, (2008). "Development of a semi-solid metal processing technique for aluminium casting applications." pp. 215-220 2008

[48] J. Wannasin, R. A. Martinez, and M. C. Flemings, "A Novel Technique to Produce Metal Slurries for Semi-Solid Metal Processing," Solid State Phenomena, vol. 116–117, pp. 366–369, Oct. 2006, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.116-117.366.

[49] A. H. Ahmad, S. Naher, and D. Brabazon, "Direct Thermal Method of Aluminium 7075," Advanced Materials Research, vol. 939, pp. 400–408, May 2014, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.939.400.

[50] A. E. W. Jarfors, "Semisolid Casting of Metallic Parts and Structures,"

Elsevier eBooks, pp. 100–116, Jan. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819726-4.00052-1.

[51] M. Wessen, H. Cao, “A Method of and a Device for Producing a Liquid-Solid Metal Composition,” Europe Patent EP1838885B1, Aug. 2013.

[52] W. Fragner, H. Kaufmann, H. Helmberger, and R. Potzinger, “Magnesium New Rheocasting as an Industrial Process: An Update of Recent Developments,” Magnesium, pp. 688–693, Nov. 2003, doi: https://doi.org/10.1002/3527603565.ch109.

[53] O. Granath, M. Wessén, H. Cao, “Porosity reduction possibilities in commercial Aluminium A380 and Magnesium AM60 alloy components using the RheoMetalTM process.” Mater. Sci. Technol. 2010, 28, 1–10.].

[54] S. Ji, K. Wang, and X. Dong, “An Overview on the Process Development and the Formation of Non-Dendritic Microstructure in Semi-Solid Processing of Metallic Materials,” Crystals, vol. 12, no. 8, p. 1044, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.3390/cryst12081044.

[55] Y. Wang, Y. Guo, and S. Zhao, “Effects of Process Parameters on the Microstructure and Hardness of Semi-Solid AlSi9Mg Aluminum Alloy Prepared by RAP Process,” MATERIALS TRANSACTIONS, vol. 61, no. 9, pp. 1731–1739, Sep. 2020, doi: https://doi.org/10.2320/matertrans.mt-m2020088.

[56] Y. Birol, “Cooling slope casting and thixoforming of hypereutectic A390 alloy,” vol. 207, no. 1–3, pp. 200–203, Oct. 2008, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.071.

[57] E. C. Legoretta, H. V. Atkinson, and H. Jones, “Cooling slope casting to obtain thixotropic feedstock II: observations with A356 alloy,” Journal of materials science, vol. 43, no. 16, pp. 5456–5469, Aug. 2008, doi: https://doi.org/10.1007/s10853-008-2829-1.

[58] R. Ranjan, B. Surekha, and P. Ghose, “Effect of Cooling Slope Process Parameters on Non-dendritic Feedstock Production: A Comprehensive Review,” Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, vol. 102, no. 3, pp. 821–842, Apr. 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s40032-021-00693-9.

[59] M. S. Salleh, M. Z. Omar, J. Syarif, K. S. Alhawari, and M. N. Mohammed, “Microstructure and mechanical properties of thixoformed A319 aluminium alloy,” Materials & Design, vol. 64, pp. 142–152, Dec. 2014, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.014.

[60] F. Taghavi and A. Ghassemi, “Study on the effects of the length and angle of inclined plate on the thixotropic microstructure of A356 aluminum alloy,” Materials & Design (1980-2015), vol. 30, no. 5, pp. 1762–1767, May 2009, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.07.022.

[61] P. Das, S. K. Samanta, B. R. K. Venkatpathi, H. Chattopadhyay, and P. Dutta, “Microstructural Evolution of A356 Al Alloy During Flow Along a Cooling Slope,” Transactions of the Indian Institute of Metals, vol. 65, no. 6, pp. 669–672, Oct. 2012, doi: https://doi.org/10.1007/s12666-012-0208-8.

[62] Y. Birol, “A357 thixoforming feedstock produced by cooling slope casting,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 186, no. 1–3, pp. 94–101, May 2007, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.021.

[63] T. Motegi, F. Tanabe, and E. Sugiura, “Continuous Casting of Semisolid Aluminium Alloys,” Materials Science Forum, vol. 396–402, pp. 203–208, Jul. 2002, doi: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.396-402.203.

[64] S. Gencalp and N. Saklakoglu, “Semisolid Microstructure Evolution during Cooling Slope Casting under Vibration of A380 Aluminum Alloy,” Materials and Manufacturing Processes, vol. 25, no. 9, pp. 943–947, Aug. 2010, doi: https://doi.org/10.1080/10426911003636944.

[65] J. R. Davis, Asm International. Handbook Committee, and E. Al, Properties and selection : nonferrous alloys and special-purpose materials. Metals Park, Oh: Asm International, 2007

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. B. Güneş, K. A. Güler, S. Acar, "Investigation of The Mechanical Vibration Effect in Cooling Slope Casting," Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi, Ankara, pp 335-344.