

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**A356 VE A380 ALAŞIMLARININ EĞİMLİ SOĞUTUCU İLE DÖKÜMÜ VE
YARI KATI DÖVME İŞLEMİ**

NAZIM AÇICI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. KEREM ALTUĞ GÜLER**

İSTANBUL, 2018

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**A356 VE A380 ALAŞIMLARININ EĞİMLİ SOĞUTUCU İLE DÖKÜMÜ VE YARI
KATI DÖVME İŞLEMİ**

Nazım AÇICI tarafından hazırlanan tez çalışması 27.12.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Kerem Altuğ GÜLER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Kerem Altuğ GÜLER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Derya DIŞPINAR
İstanbul Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim ve bu çalışmanın tamamlanması sürecinde değerli bilgilerini ve desteğini benimle paylaşan danışman hocam Sayın Doç.Dr. Kerem Altuğ Güler'e teşekkürlerimi borç bilirim.

Çalışmanın teorik ve pratik bütün süreçlerinde yanımda olan ve tecrübesini, bilgi birikimini her daim paylaşmaktan kaçınmayan değerli Arş. Görevlisi arkadaşım Serhat Acar'a çok teşekkür ederim.

Bugünkü bilgi birikimimin, mühendislik karakterimin oluşmasının mimarı değerli okulum Yıldız Teknik Üniversitesi çalışanlarının hepsine ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmamın düzeneğini tasarlamamda ve üretilmesinde desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Doğan Taş ve Mustafa İblağ'a çalışma hayatımın her alanında yanımda oldukları için teşekkür ederim.

Bugün başardığım herşeyin arkasındaki en büyük paydaş olan değerli aileme, bana kattıkları her şey için şükranlarımı büyük bir sevgiyle sunuyorum.

Aralık, 2018

Nazım AÇICI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT.....	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	4
2.1 Alüminyumun tarihsel gelişimi	4
2.2 Alüminyum alaşım elementlerinin etkileri	6
2.2.1 Bakırın etkisi	6
2.2.2 Silisyumun etkisi	7
2.2.3 Magnezyumun etkisi	7
2.2.4 Mangan etkisi	8
2.2.5 Çinkonun etkisi	8
2.2.6 Titanyumun etkisi	8
2.2.7 Demirin etkisi.....	8
2.3 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	8
2.4 Dövme alüminyum alaşımları	11
2.5 Döküm alüminyum alaşımları	12
2.5.1 A356 ve A380 döküm alaşımı	12

2.5.2	A356 ve A380 Döküm alaşımı kullanım alanları	13
BÖLÜM 3		
YARI-KATI ŞEKİLENDİRME YÖNTEMİ		14
3.1	Metallere Yarı-Katı halde şekil verme tekniği	14
3.2	Yarı-Katı şekillendirme yöntemi	18
	Küresel Tane Yapısının Elde Edilme Yöntemleri;	18
3.2.1	Eğimli Soğutucu ile döküm yöntemi	22
3.3	Yarı-Katı şekillendirme yönteminin avantajları ve dezavantajları	24
BÖLÜM 4		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		25
4.1	Eğimli Soğutucu ile Döküm	25
4.2	Yarı-katı şekillendirme	26
4.3	Karakterizasyon çalışmaları	26
BÖLÜM 5		
DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME		28
5.1	Mikroyapıların incelenmesi	28
5.2	Sertlik değerlerinin incelenmesi	36
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER		40
KAYNAKLAR		42
ÖZGEÇMİŞ		45

SİMGE LİSTESİ

°C	Santigrat derece
mm	milimetre
gr	gram
mol	mol
cm ³	santimetreküp
MPa	Mega paskal
µm	Mikrometre
T	Sıcaklık
η	Viskozite
τ	Kayma Gerilmesi
π	Pi Sayısı
R	Tane Çapı
A	Alan
p	Çevre
kg	kilogram
D	bilya çapı
d	iz çapı

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alüminyum Alaşımı
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ALCAN	ALCAN International Limited
ALCOA	Attributable, Legible, Contemporaneous, Original, Accurate
ASTM	American Society For Testing and Materials
BSG	Brinell Sertlik Değeri
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
EN	Avrupa Standartı
ES	Eğimli Soğutucu
HB	Brinell Sertliği
LSC	Low Superheat Casting
MIT	Massachusetts Institute of Technology
TS	Türk Standartı
SIMA	Strain Induced Melt Activated

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3. 1 (a) Dendritik ve (b) küresel mikroyapı [21]	15
Şekil 3. 2 Yarı-katı malzemelerde kayma gerilmesi ile viskozitenin değişimi [23]	16
Şekil 3. 3 Yarı-katı haldeki alüminyum alaşımının bıçakla kesilmesi [22].....	16
Şekil 3. 4 Nondendritik tane oluşumu;.....	17
Şekil 3. 5 Yarı-katı şekil verme yöntemiyle üretilmiş otomotiv ekipmanları [22]	18
Şekil 3. 6 Endirekt (a) ve direkt (b) yarı-katı şekillendirme prosesleri. [24]	19
Şekil 3. 7 Tiksodöküm proses şeması [24]	20
Şekil 3. 8 Tikso-enjeksiyon kalıplama [24].....	20
Şekil 3. 9 AA356 alaşımında (a) tikso-şekillendirme ve (b) reo-şekillendirme sonrası mikroyapı oluşumu [23].	21
Şekil 3. 10 Eğimli soğutma plakasına döküm; a) ergitme ve b) plakaya döküm.	23
Şekil 4. 1 Deney Düzenegi (Sağdan sola sırasıyla; reel görüntü-CAD görüntüsü)	25
Şekil 4. 2 Soldan sağa sırasıyla yarı-katı dövülmüş numune, kesilmiş parça, ES dökülmüş parça, hidrolik preste preslenen numune.....	26
Şekil 5. 1 A356 Alaşımı için 30° ve 60° döküm halde numunelerini mikroyapı görüntüleri a) 30° b) 60°	28
Şekil 5. 2 A380 Alaşımı için 30° ve 60° döküm halde numunelerini mikroyapı görüntüleri a) 30° b) 60°	29
Şekil 5. 3 30° eğimle dökülmüş A356 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri....	30
Şekil 5. 4 60° eğimle dökülmüş A356 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri....	31
Şekil 5. 5 30° eğimle dökülmüş A380 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri....	32
Şekil 5. 6 60° eğimle dökülmüş A380 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri....	33
Şekil 5. 7 Su ile soğutulmuş numunelerin tane çapı kıyaslamaları (µm).....	35
Şekil 5. 8 Su ile soğutulmuş numunelerin küresellik indeksi kıyaslamaları.....	35
Şekil 5. 9 Su ile soğutulmuş numunelerin sertlik kıyaslamaları (HB)	36
Şekil 5. 10 Yarı-Katı şekillendirilmiş numunelerin sertlik kıyaslamaları (HB).....	37
Şekil 5. 11 60° Açıyla dökülmüş A356 Alaşımı Mikroyapı Görüntüleri (200X büyütme) 39 a) 60dk ön ısıtmanın ardından su ile soğutulmuş b) 60dk ön ısıtmanın ardından yarı katı şekillendirilmiş	39

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Saf Alüminyumun kimyasal ve fiziksel özellikleri [12]	5
Çizelge 3. 1 Yarı-katı şekil verme proseslerinde kullanılan alüminyum alaşımlarının katılaşma aralıkları[20]	14
Çizelge 4. 1 Kullanılan alaşımların ağırlıkça yüzde değerleri (%).....	26
Çizelge 5. 1 Su ile Soğutulmuş numunelerin tane çapı değerleri (μm)	35
Çizelge 5. 2 Su ile Soğutulmuş numunelerin küresellik değerleri	35
Çizelge 5. 3 Su ile Soğutulmuş numunelerin sertlik değerleri (HB)	36
Çizelge 5. 4 Yarı-Katı Şekillendirilmiş numunelerin sertlik değerleri (HB)	37

A356 VE A380 ALAŞIMLARININ EĞİMLİ SOĞUTUCU İLE DÖKÜMÜ VE YARI-KATI DÖVME İŞLEMİ

Nazım AÇICI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Kerem Altuğ Güler

Bu çalışmada, A356 ve A380 alaşımının dökümü; 650mm uzunluğunda ve 50mm çapında eğimli soğutucu bakır boru kullanılarak 60° ve 30° açıyla, A356 alaşımı için 635 °C ve A380 alaşımı için 615 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu üretim tekniği; alaşımın likidüs eğrisine çok yakın bir noktadan dökümünü takiben hızlı katılaşması prosesleriyle özetlenebilir. Düşük ısı girdisi ve hızlı soğumanın kombinasyonu dendritik büyümeyi baskılar ve mikroyapı küresel bir hal alır, bu da daha ileri yarı-katı şekillendirme proseslerine olanak sağlar. Bahsedilen teknikle üretilen biyetler, alaşımın ergime sıcaklığının 20° C altında, A356 Alaşımı için 595 ° C'de A380 Alaşımı için 575 °C'de, 20 – 80 dk arası değişen sürelerde yeniden ısıtılmıştır. Yeniden ısıtılmış numuneler % 50 deformasyon oranında açık kalıpta yarı-katı dövme ile şekillendirilmiştir.

Yarı-katı dövme ile şekillendirilen numuneler; döküm hali ve yeniden ısıtma sonrası deforme edilmeden suda soğutulan numunelerle, mikroyapı ve sertlik özellikleri açısından sırasıyla optik mikroskop incelemeleri ve Brinell sertlik ölçümleri ile kıyaslanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Döküm, yarı-katı, eğimli soğutucu, küresel tane, tiksoforming



**COOLING SLOPE CASTING AND THIXOFORMING OF A356 AND A380
ALLOYS**

Nazım AÇICI

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc.Prof. Dr. Kerem Altuğ GÜLER

In this study, the alloys (A356 & A380) were poured from the inclined copper tube with the angles of 60° & 30°, length of 650mm and diameter of 50mm at a pouring temperatures of 635 °C (A356) & 615 °C (A380). The pouring was carried out on an inclined tube without vibration through cast iron die. Low superheat casting (LSC) technique was used for ingot fabrication in thixoforging process. LSC can be summarized; pouring of molten metal at a temperature very close to liquidus followed by rapid solidification. Low heat input combined with sudden cooling suppresses dendritic growth and conventional casting structure converts into more spherical structure. The billets that were produced by aforementioned procedure, were reheated between 20-80 min at 595 °C (for A356) & 575 °C (for A380) which 20 °C below the melting temperature of the alloy. Reheated samples were formed with semi-solid forging at a rate of 50% deformation in an open die. The specimens formed by semi-solid forging were compared with as-cast and quenched specimens via optical microscope and Brinell hardness measurements in terms of microstructure and hardness properties, respectively.

Keywords: Casting, semisolid, cooling slope, spheroidal grains, thixoforming



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yer kabuğunun yaklaşık %8 ' ini oluşturan alüminyum, metaller içerisinde en bol bulunma özelliğine rağmen, serbest halde bulunmaması sebebiyle elde edilmesi diğer metallere göre zahmetli prosesler gerektirir. Ancak; hafiflik, kolay şekillendirilme, alaşımlandırma, ısı işlem tatbiki suretiyle yüksek mukavemet edinimi, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, çeşitli korozi ortamlara dayanıklılık gibi özellikleriyle kısa sayılabilecek bir süre içerisinde demirden sonra temel endüstrinin vazgeçilmez metali olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Geleneksel katılaşma proseslerinde kontrolsüz dendritik büyümeler meydana gelir. Malzemenin mekanik özelliğini de etkileyen bu büyümeler imalat proseslerinde olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bu oluşumdan doğan olumsuz sonuçlar yarı katı şekillendirme yöntemleri ile elemine edilebilir [1]. Bu üretim yöntemleri ile dendritik oluşum baskılanabilir; daha iyi mekanik özellikler ve çekinti boşluklarının azalması sağlanabilir. Bu yöntemler katı hal ve sıvı hal yöntemleri olarak ayrılabilir. Sıvı hal yöntemleri; mekanik karıştırmalı dökümler, elektromanyetik alan teknikli dökümler, osprey prosesi, yeni reodöküm yöntemi, eğimli soğutucu (ES) ile döküm yöntemi vb. Katı hal Yöntemleri; titreşimli su soğutmalı döküm yöntemi, ultrasonik titreşimli mekanik karıştırma yöntemi vb [2].

Bu çalışma kapsamında alüminyum döküm alaşımlarından olan A356 ve A380 kullanılmıştır. Yarı katı şekillendirmeye uygun hammadde elde yöntemi olarak eğimli soğutucu ile döküm prosesi kullanılmıştır.

Döküm açıları olarak 30° ve 60° belirlenmiştir. Çalışma süresince çeşitli yeniden ısıtma sürelerinin ardından, yarı katı şekillendirmenin mikroyapı ve sertlik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Bir sıvı hal yöntemi olan ‘Eğimli Soğutucu (ES) ile döküm yöntemi’; genel olarak sıvı metalin soğutucu iletken bir metal vasıtasıyla kalıba dökülmesi proses adımlarından oluşur. Ergiyik metal katılaşma sıcaklığına yakın (düşük üst ısı) bir sıcaklıkta soğutucu metale dökülerek, yarı katı form oluşturulur ve sonuç olarak çok çekirdekli bir yapı elde edilir. Bu yöntem ile geleneksel döküm yapısından farklı küresel bir mikroyapı oluşumu sağlanabilir. Daha ileri yarı katı şekillendirme adımlarında (dövme, ekstrüzyon) bu tür küresel mikroyapıya sahip hammaddelerin kullanımı elzemdir [3,4]

Yarı katı şekillendirme başta alüminyum olmak üzere birçok demir dışı metale uygulanan, bir şekillendirme yöntemi haline gelmiştir. Bu sistemle birlikte temel şekillendirme yönteminden ikisi olan dövme ve dökümün avantaj kazandıran özellikleri harmanlanmıştır. Bu proses içerisindeki şekillendirme adımı; malzemenin faz diyagramında bulunan likidüs ve solidüs eğrilerinin arasında belirlenen bir sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Bu işlem; yeterince küresel mikroyapıya sahip malzemenin, yarı katı sıcaklık aralığında tiksotropik özellik kazanmasına dayanmaktadır.

Gencalp ve arkadaşları [5] A380 alaşımını; 60° eğimle, çelik ve soğutma kanalları içeren bir yolluk vasıtasıyla dökümünü gerçekleştirdiği ingotların, titreşim altında mikroyapı değişimlerini incelemiştir. 630°C ve 500mm’lik bir yollukla gerçekleştirdikleri bu döküm işlemi sonrasında yaptıkları incelemelerde; titreşimin non-dendritik partiküllerin oluşmasında ciddi bir rolü olduğunu gözlemlemişlerdir.

Prosenjit Das ve arkadaşları [6] A356 alaşımını; 60° ve 45° eğimle, çelik ve soğutma kanalları içeren bir yolluk vasıtasıyla dökümünü gerçekleştirmiştir. 650°C sıcaklıkta ve 500mm’lik yollukla gerçekleştirdikleri bu dökümde; sıvı metal akışının birincil Al kristallerini ve oluşan morfolojiyi etkilediklerini gözlemlenmiştir.

T. Haga ve arkadaşları [7] A356 Alaşımını 15° ile 60° arasında birçok eğimle, 50mm ile 600mm arasında birçok soğutma uzunluğunda, 620°C’de döküm gerçekleştirmiştir.

T.Haga ve arkadaşlarına göre dökümün oluşmasında eğim ve soğutma uzunluğunun diğer döküm faktörleri gibi etkisi vardır, ancak majör etkiyi döküm eğimi yapar.

Hamed Khosravi ve arkadaşları [8] A356 Alaşımını 30°-60° eğimleri arasında, 100mm-500mm uzunluğu arasındaki soğutma plakaları ile 660, 680 ve 700°C döküm sıcaklıklarında dökümünü gerçekleştirmiştir. Dökümün ardından 590° sıcaklığa tekrar ısıtılan ingotlar 5, 8 ve 12 dk tutulmuştur. Ardından non-dendritik partiküllerin oluşumları incelenmiştir, optimum mikroyapı özelliklerinin 660°C döküm sıcaklığında, 360mm soğutma plakası uzunluğunda, 48° döküm eğimi ve 9 dk tutma zamanında elde edildiğini gözlemlemiştir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada A356 ve A380 Alüminyum alaşımları likidüs sıcaklıklarının 20°C üzerinde (sırasıyla 635 °C ve 615 °C) eğimli bakır boru kullanılarak çelik kalıp içerisine dökülmüştür. Elde edilen ingotlar; çeşitli yeniden ısıtma süreleri sonrasında %50 deformasyon oranında yarı katı şekillendirilmiştir. Ayrıca dökülmüş halde ve hızlı soğutulmuş numunelerin de mikroyapı ve sertlik özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında amaç; bahsi geçen proses için optimum döküm açısı ve yeniden ısıtma süreleri belirlemektir.

1.3 Hipotez

Yarı-katı şekillendirme yönteminin en önemli adımı küresel mikroyapılı hammadde eldesidir. ES ile döküm yöntemi oldukça pratik bir yarı katı hammadde üretim yöntemi olmakla beraber, mikroyapı özellikleri proses parametrelerine yüksek bağımlılık göstermektedir. Yeterince küresel ve ince taneli mikroyapı elde etmek bu proses için elzemdir. Soğutucu açısı ve yeniden ısıtma süresi gibi proses parametrelerinin üretilen hammadde ve şekillendirme sonrası elde edilen nihai üzerinde önemli etkileri olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada A356 ve A380 alaşımları için proses parametrelerinin elde edilen ürünlerin üzerindeki etkileri incelenmiştir.

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1 Alüminyumun tarihsel gelişimi

Medeniyetin gelişmesinde metaller önemli bir rol oynamıştır. Dünyanın en çok kullanılan ikinci metalik elementi olan alüminyum, bu tarihsel gelişme çok önemli bir noktada yer almıştır. Alüminyum ticari üretimi 19. yüzyılın ikinci yarısından sonra başlamıştır ve endüstriye bu derece geç girmesine rağmen mevcut önemini kazanmayı başarmıştır. Endüstriyel uygulamalarda alüminyum kullanımının geç başlamasının nedeni; alüminyumun cevherden kazanılmasının güç olmasıdır. Cevher halinde oksijenle çok sağlam bileşikler oluşturan alüminyum; demir elementi gibi karbon yardımıyla indirgenme reaksiyonu ile elde edilemez [9].

Alüminyum, diğer çok kullanılan metaller olan demir, kurşun ve kalay gibi doğada bileşikler halinde bulunur. Alüminyum oksit halindeki bileşiğinden ilk ayıran ve elde eden kişi, 1807 yılında, Sir Humphrey Davy olmuştur.

Labaratuar ortamında ilk alüminyum üretimi 1825 'te Danimarka' da Örsted ve kısa bir süre sonra Almanya' da Woehler tarafından yapılmıştır.

Ticari amaçlı alüminyum üretimi ilk defa bir kimyasal teknik kullanılarak, 1855'te Fransa' da Sainte-Claire Deville tarafından gerçekleştirilmiştir [10].

1886' da iki kişi, Amerikalı Charles Martin Hall ve Fransız Paul L.T. Heroult, hemen hemen aynı zamanda, birbirinden bağımsız çalışarak ergimiş tuz banyosundan

elektroliz yolu ile ekonomik alüminyum üretme yöntemi bulunmuştur. Bu, hala alüminyumun en temel üretim yöntemidir [9].

Alüminyum uygulama alanı oldukça geniş bir mühendislik malzemesidir. Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi, saf alüminyumun yoğunluğu, yaklaşık olarak çeliğin üçte biri kadardır. Magnezyumdan sonra, en hafif metaldir. Ayrıca mukavemeti 700 MPa’ a kadar ulaşabilen alüminyum alaşımları, düşük karbonlu çeliklerle rekabet edebilecek düzeydedir. Alüminyum, yüksek dayanım özelliğinin yanında, iyi elektrik ve ısı iletkenliğine de sahiptir.

Alüminyumun dayanım/yoğunluk oranının yüksek olması, ayrıca, alüminyum alaşımlarının yapı çeliklerinden daha iyi ısı işlem kabiliyetine sahip olması, alüminyumu önemli bir endüstriyel malzeme haline getirmiştir. Günümüzde, alüminyum alaşımları marina, uzay, havacılık, otomotiv ve savunma sanayi alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır [11].

Çizelge 2. 1 Saf Alüminyumun kimyasal ve fiziksel özellikleri [12]

Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal Yapı	Yüzey Merkezli Kübik (ymk)
Yoğunluk	2,7 gr/cm ³
Ergime Noktası	660°C
Yeniden Kristalleştirme Sıcaklığı	150-300 °C
Buharlaştırma Noktası	2450 °C
Özgül Isı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite Modülü	72x10 ³ MPa
Poisson Oranı	0,33
Kaynama Modülü	27x10 ³ MPa
Çekme Mukavemeti	40-90 MPa
Akma Mukavemeti	10-30 MPa
Kopma Uzaması	%30-40

Alüminyum birçok özelliğe sahiptir. Bu özellikler;

Alüminyum hafiftir; yoğunluğu, çeliğin sadece üçte biri kadardır.

Alüminyum havaya, yiyecek maddelerine ve günlük yaşamda kullanılan birçok sıvı ve gaza dayanıklıdır.

Yüksek yansıtma özelliğine sahiptir. Gümüşümsü yüzeyiyle birlikte bu özellik alüminyuma iç ve dış mimari uygulamalarına uygun dekoratif özellikler sağlar.

Alüminyum yüzeyindeki parıltı plastiklerle, laklara veya uygun anodik işlemlerle korunabilir. Birçok halde doğal olarak oluşan temiz oksit tabakası yüzeyi korumak için yeterlidir.

Alüminyum alaşımları, normal yapı çeliklerinin mukavemetine eşit veya daha fazla dayanıma sahip olabilir.

Alüminyum, yüke maruz kaldığı bazı konstrüksiyonlarda değerlendirilirken, yüksek elastik özelliğe sahiptir. Dayanıklılığı, birçok ticari çeliklerde olduğu gibi, düşük sıcaklıklarda belirgin olarak azalmaz.

Alüminyum kolay olarak işlenebilir ve şekillendirilebilir. Örneğin; 1/1000 mm kalınlığından daha ince folyo haline getirilebilir.

Alüminyum elektriği ve ısıyı çok verimli bir şekilde iletir.

2.2 Alüminyum alaşım elementlerinin etkileri

Bu bölümde sık kullanılan alaşım elementlerinin alaşıma etkileri açıklanmaktadır.

2.2.1 Bakırın etkisi

Alüminyumla alaşım elementi olarak kullanılan ilk element bakırdır. Bakır, alaşıma sertlik kazandıran başlıca elementtir [13,14]. Döküm alaşımlarında ise en fazla % 12 oranında kullanılır ve bu orana kadar mukavemeti arttırır. % 12'den fazlası yapıda gevreklik meydana getirir. Dövme alaşımlarında % 3 ila % 5 oranında kullanılır. % 5'ten fazla kullanılırsa mekanik işleme güçlüğüne arttırır. Ayrıca elektrik iletkenliği ve korozyon direncini düşürür [15]. Bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak artar. Bu nedenle bakır içeren alüminyum alaşımlarını ısıl işlemle çökeltme

sertleşmesi ile sertleştirmek mümkündür. Çökelme için gerekli zaman, alaşımın bileşimi ve sıcaklık ile ilişkilidir. Çökelmenin mekanik özelliklere yapacağı etki, çökelen faz miktarına, boyutlarına ve dağılımına bağlıdır [13].

2.2.2 Silisyumun etkisi

Alüminyuma ilave edilen elementler içerisinde Cu'dan sonra en önemli element silisyumdur. Alüminyum içerisinde en fazla % 13 oranında bulunmalıdır. % 13'den fazla silisyum içeren alüminyum alaşımlarının işlenmesi çok zor olmaktadır. Özellikle bakır, nikel ve magnezyum ile birlikte ilave edilirse ısıtılma işlemi görebilen alaşım elde edilir. Fakat bu alaşımların çekme mukavemetleri çok yüksek değildir ve mukavemet artışı silisyum artışı ile orantılıdır [14].

Silisyum ilavesi ile akışkanlık, korozyon direnci, kaynak kabiliyeti artar. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilirlik özelliği sağlanır. Ayrıca sıvı alüminyumun akışkanlığını artırır ve sıcak çatlama eğilimini azaltır. Mekanik özellikler alaşımın bileşiminden çok silisyum içeren fazın şekil ve dağılımına bağlıdır. Küçük ve primer faz yüksek mukavemet verir. İğne şeklindeki silisyumlu faz çekme mukavemetini arttırmakla beraber süneklik, darbe ve yorulma mukavemetini düşürür [13].

2.2.3 Magnezyumun etkisi

Önemli alaşım elementlerinden birisidir. Magnezyum, Al-Mg alaşımına yüksek mukavemet ve süneklik, mükemmel korozyon direnci kazandırır. % 8'den fazla Mg içeren Al-Mg alaşımları ısıtılma işlemi tabi tutulabilir ve mekanik özellikleri bu şekilde geliştirilebilir.

Dövme alaşımlarda % 1 ila % 6 Mg ise şekil verme kolaylığı sağlamak için kullanılır. Genel olarak Mg ilavesi mukavemeti, haddelenebilme kabiliyetini ve işlenebilirliği artırır [13,14,15].

2.2.4 Mangan etkisi

Alaşım içinde dökülebilirliği arttırmak için demirle birlikte kullanılır. Aynı zamanda metaller arası bileşiklerin özelliklerini değiştirir. Alaşımların süneklik ve tokluk özelliklerini arttırır ve işlenebilirliği olumlu yönde etkiler [14].

2.2.5 Çinkonun etkisi

Çinko, alüminyuma ilave edilmesiyle yüksek mukavemete sahip Al-Zn alaşımları meydana getirir. Alüminyum alaşımlarının kopma mukavemeti bu şekilde artar ve haddelenebilme kabiliyeti artar. AA 7075 ve AA 7078 alaşımlarının temel alaşım elementleridir [13,14,15]. Çinko, sıcak yırtılmaya sebep olmasına rağmen diğer alaşım elementlerinden olan bakırın ilave edilmesiyle yetersiz olan bazı özellikler giderilmiş olur [13]. Genellikle magnezyumla birlikte karıştırılarak ilave edildiğinde haddeleme kabiliyetini arttırdığı gibi yüksek çekme ve darbe mukavemeti de kazandırır. Al-Zn alaşımlarında ise % 20'e kadar çinko bulunabilmektedir. Bu alaşımlar genelde uçak sanayinde kullanılan Al-Mg-Zn alaşımları olup Zn ve Mg oranı % 1'den fazladır [13,14,15].

2.2.6 Titanyumun etkisi

Titanyumun tane küçültücü etkisi vardır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesini ve artmasını sağlar. Alüminyuma ilave edilme miktarı en fazla % 20'dir. En iyi etkisi bor ile kullanıldığı zaman görülür. Titanyum, çekme mukavemetini ve sünekliliği arttırır ve ısı iletkenliği düşürür [13].

2.2.7 Demirin etkisi

Demir, alüminyum cevheri içerisinde doğal olarak bulunur. Bazı alaşımların sertlik ve dayanımlarını az miktarda arttırmaktadır. Döküm alaşımların sıcak çatlama eğilimini azaltıcı yönde etki etmektedir [14].

2.3 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Diğer metal ve alaşımların sınıflandırılmasında olduğu gibi alüminyum alaşımlarını da sınıflara ayıran standartlar vardır.

Bu standartlar içinde en fazla kullanılan alüminyum birliğinin standartlarıdır. Bunun yanı sıra: ALCOA, ASTM, DIN 1713, ALCAN standartları kullanılmaktadır.

Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları; dövme (işlem) ve döküm alüminyum alaşımları olarak üretilmektedirler ve alüminyum alaşımlarının ısıtma işlemi uygulanamayan (soğuk şekil değiştirme sertleştirmeli) ve ısıtma işlemi uygulanabilen (çökelme sertleştirmeli) birçok türü taşıt yapımı endüstrisinde (otomobil, raylı taşıt, zırhlı taşıt vb.), uçak ve uzay araçları yapımı ve gemi yapımı endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada, dünyada ve ülkemizde endüstriyel uygulamaları hızla artan alüminyum ve alüminyum alaşımlarının tanıtımı yapıldıktan sonra, endüstride en çok kullanılan döküm ve dövme alüminyum alaşımlarının Avrupa Standartlarına (EN) göre sınıflandırılmaları ve gösterimleri ele alınmaktadır.

Alüminyumun ergime sıcaklığı düşük, buna karşın kendini çekmesi çok fazladır, bu bakımdan döküm yolu ile şekillendirme için saf alüminyum yerine, alüminyum alaşımları tercih edilir. Alüminyum saflık derecesine göre sınıflandırılır.

Mekanik özellikleri, içeriğindeki Si, Fe, Ti, Cu ve Zn gibi elementlerin etkisi ile yükselmesine karşın kimyasal maddelere karşı olan direnci azalır; mekanik özellikler alüminyuma uygulanan şekil verme işlemine bağlı olarak da büyük ölçüde değişir [16]

Alüminyum % 99.0- 99.5- 99.8- 99.99 saflıkta üretilir; % 99.99 saflıktaki alüminyum yüksek nitelikte saf alüminyum olarak tanımlanır ve burada fiziksel ve mekanik özellikler belirli bir şekilde kendini gösterir. Bu alüminyum yumuşaktır ve kolay işlenebilir, ısı ve elektriği iyi iletir, ışığı iyi yansıtır ve korozyona karşı oldukça dirençlidir [16].

- Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikroyapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur.
- Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler.

Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıt işlemler uygulanabilmektedir.

- Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört basamakla sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir:

- 1XXX: Saf alüminyum. Genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır.

- 2XXX: Al-Cu alaşımları. Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

- 3XXX: Al-Mn alaşımları. Esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.

- 4XXX: Al-Si alaşımları. Esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.

- 5XXX: Al-Mg alaşımları. Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır.

- 6XXX: Al-Mg-Si alaşımları. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır.

- 7XXX: Al-Zn alaşımlar. Bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır.

- 8XXX: Al-Li alaşımları: Esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentiside yapılabilir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir.

Alaşımlar belirtildiği gibi uluslararası olarak kabul edilen şekilde, 9 seride tanımlanmış ve sınıflandırılmış olup 200'ün üzerinde kompozisyonu kapsamaktadır [17]. Kapsamın geniş olması bireysel ihtiyaçlardan doğmaktadır; bazen harf konularak çeşitlendirme arttırılmaktadır (örneğin 356.0 ve A356.0 gibi).

Alüminyumda ısıtıl işlem uygulanmıyorsa alaşım numarasını sonuna F harfi konularak belirtilir. Isıtıl işlem tanımlamaları 0, T4, T5, T6 gibi sınıflandırmalar yapılmaktadır.

2.4 Dövme alüminyum alaşımları

Bu türe giren alaşımlar Zn, Cu, Mg, Mn, Si ve Ni gibi elementler içerirler; çoğu kez önce sürekli döküm yöntemi ile blok biçiminde elde edildikten sonra, homojenleştirme tavı uygulanır, haddeleme veya ekstrüzyon ile biçimlendirilirler. Döküm yapısındaiken tane sınırlarında oluşan sürekli gevrek fazlar, şekillendirme sırasında parçalanır ve ana kütleyle dağılır ve böylece alaşım soğuk şekillendirmeye uygun duruma geçer.

Değişik serilerdeki alüminyum alaşımlarının karakteristiklerinde dikkate alınacak farklılıklar bulunmaktadır ve bunlar alaşımların uygulama alanlarında farklılıklar yaratmaktadır.

EN 573'e göre standart gösterimleri verilen alüminyum ve alüminyum alaşımları içinde en çok kullanılan alaşımlar 1xxx, 2xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alaşımlardır. 1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıtıl işlem uygulanamayan türlerdir ve bunlar yalnızca şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısıtıl işleme tabi tutulabilirler. 4xxx serisi hem ısıtıl işleme tabi tutulabilir hem de ısıtıl işleme tabi tutulamaz alaşımlar içerir [18].

Isıtıl işleme tabi tutulabilir alaşımlar, en yüksek mekanik özelliklerini en genel olarak çözeltiye alma ısıtıl işlemi ile kazanırlar. Çözeltiye alma ısıtıl işleminde alaşım, çözelti içine alaşım elementleri veya bileşik katmak için yaklaşık 530°C'ye kadar ısıtılır, arkasından hızlı soğutma gelir, bu işlem; oda sıcaklığında aşırı doymuş çözelti sağlamak için genelde su içinde yapılır. Genellikle bunu, yaşlandırma ısıtıl işlemi takip eder. Yaşlandırma; istenen akma özellikleri için, aşırı doymuş çözeltiden bir miktar element veya bileşiğin çökertilmesidir.

Burada, çökelme sonucunda tanelerin içinde, ışık mikroskobu ile seçilemeyen çok ufak zerrelere oluşur. Bu mikroskobik zerreler kafeste kaymayı önler böylece alaşım sertleşir ve akma ve çekme mukavemeti yükselir [19].

Isıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar en yüksek mekanik özelliklerini, soğuk şekillendirme yoluyla sertlik ve mukavemeti artırma yöntemi olan şekil değiştirme sertleştirilmesi ile kazanırlar.

2.5 Döküm alüminyum alaşımları

Bu tür alaşımların büyük çoğunluğu yüksek oranda silisyum içerir; %12,6 Si içeren alaşım ötektik bileşimde olduğundan çok üstün döküm özelliklerine sahiptir. Bu alaşımın korozyona direnci ve kaynak kabiliyeti de oldukça iyidir. Döküm alüminyum alaşımlarına bir miktar bakır katılması, talaş kaldırma özelliklerini geliştirir, buna karşın, korozyon direncinde azalmaya neden olur. Döküm alüminyum alaşımlarına silisyumdan başka magnezyum katılarak çökelme yolu ile sertleştirilebilen ve deniz suyunun koroziv etkilerine dirençli alaşımlar elde edilir.

Alüminyum Birliği'nin standardizasyonuna göre alaşımları ülkemizde de TS 410/Nisan 1975'de yayımlanmış "Alüminyum Alaşımlarından Yapılan Dökümlerin Bileşimi" adlı standartta tanımlanmışlardır. Günümüzde bu tür alaşımlar için hazırlanmış olan EN 1706 ve EN 1780 serisi standartlar geçerlidir.

2.5.1 A356 ve A380 döküm alaşımı

Döküm alaşımları sınıflandırılmasında 4xx.x koduyla, ya da içinde magnezyum veya bakır da varsa 3xx.x sayı koduyla (A356.0 gibi) belirtilen bu alaşımlar, döküm yoluyla üretilen tüm alüminyum alaşımları içinde %90'a varan bir oranı teşkil ediyorlar. Silisyumun sağladığı yüksek akışkanlık sayesinde karmaşık ve ince kesitlere sahip parçaların döküm yoluyla üretimini mümkün kılabilen bu alaşımlar ötektik modifikasyon gibi işlemlere de uygun oldukları için, mekanik özelliklerin geniş bir yelpazede değiştirilip ayarlanabilmesine olanak tanıyorlar. Mukavemetin çok yüksek olmasına gerek olmayan ama iyi bir korozyon direnci istenen durumlarda bakır içermeyen alaşımlar tercih edilirken, yüksek mukavemet değerlerinin gerektiği ama

korozyon direncinin çok önemli olmadığı durumlarda ise %5'e kadar bakır içeren alaşımlar kullanılabilir. Silisyum sıvı metale bir yandan akışkanlık sağlarken, diğer yandan dökülen parçada çekinti oluşma eğilimini de azaltıyor [17].

2.5.2 A356 ve A380 Döküm alaşımı kullanım alanları

A356 ve A380 Alüminyum alaşımları; basınçlı döküm ürünlerinde, insansız hava araçlarında motor bloğu olarak, otomobil mekanik parçaları gibi birçok alanda kullanılır.



YARI-KATI ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMİ**3.1 Metallere Yarı-Katı halde şekil verme tekniği**

Metallere yarı-katı halde şekil verme, temelleri 30-40 yıl öncesine dayanmakta olduğu halde halen geliştirilmeye devam eden bir yöntemdir. Yarı-katı şekillendirme prosesleri alüminyum, magnezyum, çinko, titanyum, bakır ve çeşitli demir alaşımları gibi birçok metal sistemine uygulanmıştır ancak ticari amaçlı yarı-katı şekil verme proseslerinin ise neredeyse tamamında alüminyum alaşımları ve magnezyum alaşımları kullanılmaktadır. Bu alaşımlar geniş katılma aralıkları nedeniyle yarı-katı şekillendirme için idealdir.

Çizelge 3. 1 Yarı-katı şekil verme proseslerinde kullanılan alüminyum alaşımlarının katılma aralıkları [20]

Alüminyum alaşımı	Yaklaşık katılma aralığı (°C)
AA319	604-516
AA356	615-555
AA357	613-557
AA380	595-540
AA390	649-507

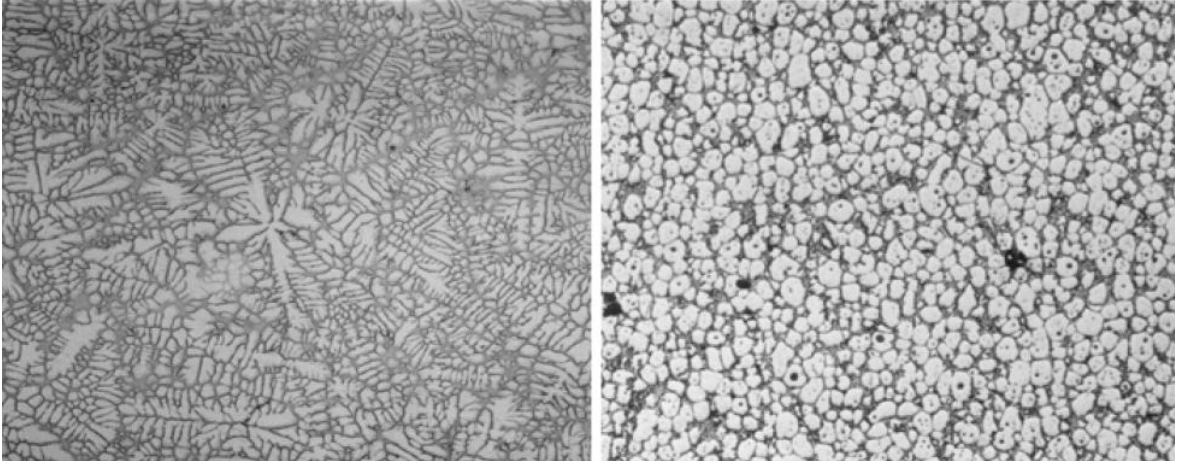
Daha yüksek dayanıma sahip dövme alüminyum alaşımlarının ve bakır alaşımları, dökme demir ve çelik gibi malzemelerin yarı-katı şekillendirilmesine karşı büyük ilgi gösterilmektedir.

Şimdilik yüksek dayanıma sahip alüminyum alaşımlarının ticari üretimi yapılmamaktadır, fakat AA390 gibi bazı ileri düzey alaşımlar kullanılmaktadır [21].

1970'lerin başlarında ABD'deki MIT'de çalışmakta olan Flemings, sıvı haldeki çeşitli döküm alaşımlarını yarı-katı hale soğuturken viskozitesini ölçerek alaşımın sıcak yırtılmasını araştırmıştır.

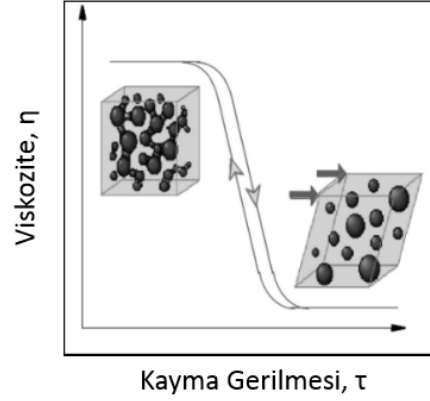
Flemings deneylerinde, soğurken sürekli olarak karıştırılan malzemenin mikroyapısının küresel olduğunu fakat karıştırılmadan yarı-katı hale soğutulan malzemenin dendritik mikroyapıya sahip olduğunu tespit etmiştir [22]. Şekil 3.1'de tipik dendritik ve küresel mikroyapı fotoğrafları yer almaktadır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, küresel mikroyapıya sahip alüminyum ve magnezyum alaşımı malzemelerin tiksotropik davranış gösterdiği görülmüştür [21].



Şekil 3. 1 (a) Dendritik ve (b) küresel mikroyapı [21]

Tiksotropik malzemeler karıştırıldığında incelerek akar, karıştırmayı bıraktınca tekrar sertleşir; bunun nedeni tiksotropik malzemelerin viskozitesinin zaman ve kayma hızına göre değişmesidir. Kayma hızı arttıkça viskozite azalır, sabit kayma hızında ise viskozite zamanla azalır (Şekil 3.2). Bu davranış iki faza sahip emülsiyonlar için bilinir olsa da, normal şartlar altında dendritik yapıya sahip olan metalik sistemler için yeni bir buluştur [23].



Şekil 3. 2 Yarı-katı malzemelerde kayma gerilmesi ile viskozitenin değişimi [23]

Yarı-katı sıcaklığına ısıtılan küresel mikro yapıya sahip bir alüminyum alaşımı malzeme kolayca şekillendirilebilir ya da kesilebilir. Bu özellikten yarı-katı şekil verme proseslerinde düşük basınçlar kullanılarak malzemenin kalıbı tamamen doldurmasında yararlanılır.

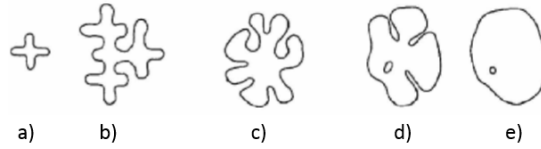
Şekil 3.3’de yarı-katı haldeki bir alüminyum alaşımının bıçakla kolayca kesildiği görülmektedir. Herhangi bir kesme gerilmesi uygulanmadığı takdirde yarı-katı malzeme şeklini korur. Bu, üretim aşamasında nihai şekli vermeden önce malzemenin taşınması esnasında kolaylık sağlar.

Yarı-katı malzemenin yaklaşık %30-%60’lık kısmı katıdır; bu oran malzemeyi şekillendirirken kullanılacak olan yöntemle göre belirlenir.



Şekil 3. 3 Yarı-katı haldeki alüminyum alaşımının bıçakla kesilmesi [22]

Yarı-katı şekil verme yöntemleriyle üretilmiş ürünlerde, proses esnasında dendrit kolları kırılarak geleneksel döküm ile üretilen ürünlerdeki dendritik mikroyapıdan farklı olarak küresel mikroyapı oluşur. Küresel tanelerin elde edilmesi dendritlerin kırılarak rozet şeklini alması, irileşmesi ve sonrasında küreselleştirilmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 3.4’de küresel tanelerin oluşum mekanizması şematik olarak gösterilmiştir [22].



Şekil 3. 4 Nondendritik tane oluşumu;

a) ilk dendrit oluşumu, b) dendritlerin irileşmesi, c) dendritlerin rozet şekline dönüşmesi, d) rozetlerin irileşmesi, e) rozetlerin küreselleşmesi [23,29].

Birçok çalışmada küresel mikroyapının dendritik mikroyapıya göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu bildirilmiştir. Çoğu zaman yarı-katı şekillendirme ile üretilen ürünlerin dayanımları dövme ile üretilen ürünlerinkine yakın olmaktadır [22].

Yarı-katı şekillendirme endüstriyel olarak ilk defa Alumax ve ITT-TEVES firmaları tarafından şasi bileşenleri, fren silindirler, jantlar ve benzeri otomotiv parçalarının üretiminde uygulanmıştır. 1980’lerin sonlarında Avrupa’da da bu konuda gelişmeler başlamıştır. Pechiney (Fransa), Ormet (ABD) ve SAG (Avusturya) tarafından alternatif elektromanyetik karıştırma yöntemlerinin bulunmasıyla yarı-katı şekil vermede kullanılan ön malzemeler çeşitli boyut ve kalitelerde elde edilebilir hale gelmiştir [23].

Günümüzde yarı-katı şekil verme yöntemi; otomotiv sektöründe şasi bileşenleri, fren silindirleri, yarış motosikletlerinin arka teker kolları, fren kolları gibi otomobil ve motosiklet parçalarının üretiminde (Şekil 3.5); makine imalatı yapan sektörlerde pistonlar, kompresör yuvaları, çeşitli yataklar gibi makine elemanlarının üretiminde; elektrik-elektronik sektöründe elektriksel birleştiriciler, bilgisayarlarda kullanılan ısı dağıtıcıları, sabit disklerin motor taban plakaları gibi elektronik cihaz parçalarının üretiminde kullanılmaktadır [22,23].



Şekil 3. 5 Yarı-katı şekil verme yöntemiyle üretilmiş otomotiv ekipmanları [22]

3.2 Yarı-Katı şekillendirme yöntemi

Küresel Tane Yapısının Elde Edilme Yöntemleri;

İkili sistemlerin katılaşması sırasında, mikrosegregasyon nedeniyle dendritler arasında, ilk oluşan bileşime göre kısmen daha düşük ergime sıcaklığına sahip bileşimler ve alaşım bileşimine bağlı olarak değişik oranlarda ötektik fazlar oluşur. Bu kısmen düşük ergime sıcaklığına sahip bölgeler içeren yapının, likidüs-solidüs eğrileri arasında uygun bir sıcaklıkta kısmen ergitilip dökülebileceği veya şekillendirilebileceği görülmüştür. Ancak, dendritik yapının akışkanlığa karşı büyük bir direnç göstermesinden dolayı yapının küresel yani non-dendritik olması gerekmektedir [24].

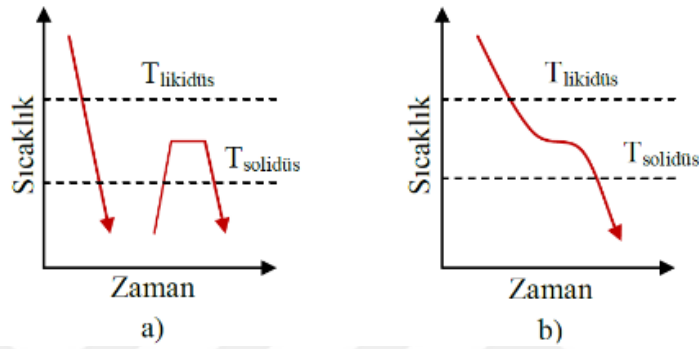
Küresel tane yapısı; alaşım sıvı halden yarı-katı hale soğutulurken mekanik, manyetik, ultrasonik ve benzeri karıştırma yöntemleri ile ya da düşük sıcaklıktan döküm, plastik deformasyon sonrası yarı-katı sıcaklığa tekrar ısıtma (SIMA prosesi) gibi yöntemler ile elde edilebilir.

Şekillendirme Yöntemleri;

Alüminyum alaşımlarının yarı-katı halde şekillendirilmesi için birçok yöntem geliştirilmiştir fakat tüm bu yöntemler işlemin kesintili ya da kesintisiz şekilde gerçekleştirilmesine göre indirekt prosesler ve direkt prosesler olarak;

Yarı-katı şekillendirilecek malzemenin, işlem başlangıcında sıvı ya da katı halde olmasına göre reo-şekillendirme (reoforming) ve tikso-şekillendirme (tiksoforming) olarak iki ana gruba ayrılabilir.

Adından da anlaşılacağı üzere endirekt yarı-katı şekillendirme proseslerinde ürün tek aşamada üretilmez. İlk aşamada küresel mikro yapıya sahip hammadde üretilir. İkinci aşamada bu hammadde yarı-katı sıcaklığa kadar tekrar ısıtılarak şekillendirilir. Direkt yarı-katı şekillendirme proseslerinde ise sıvı metal alaşım karıştırma işleminden sonra yarı-katı hale soğutularak katılaştırılmadan, direkt olarak şekillendirilir (Şekil 3.6). Bu şekilde üretim süresi büyük ölçüde kısaltılmaktadır.

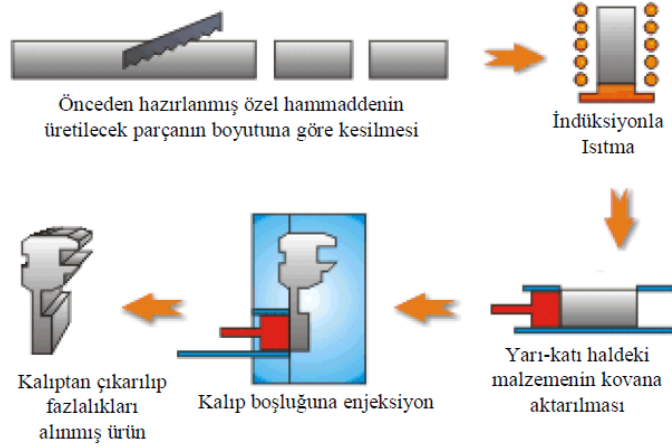


Şekil 3. 6 Endirekt (a) ve direkt (b) yarı-katı şekillendirme prosesleri. [24]

Tikso-şekillendirme proseslerinde, işlem başlangıcında tamamen katı haldeki metal yarı-katı sıcaklığa kadar ısıtılarak dökülür ya da şekillendirilir. Reo-şekillendirme proseslerinde ise işlem başlangıcında tamamen sıvı haldeki metal yarı-katı sıcaklığa kadar soğutularak dökülür ya da şekillendirilir.

Tikso-şekillendirme, literatürde tikso-döküm, tikso-dövme, tikso-enjeksiyon kalıplama gibi prosesleri kapsayan bir terim olarak kullanılmaktadır.

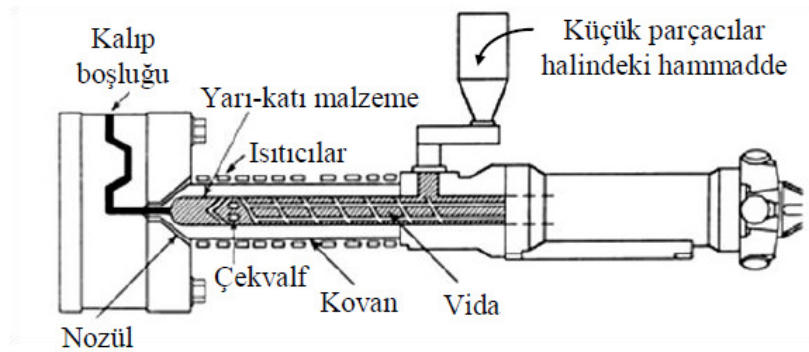
Tikso-döküm yönteminde, önceden hazırlanmış küresel mikroyapıya sahip biyetler ısıtılarak basınçlı döküm makinesi ile kalıba basılır (Şekil 3.7). Tikso-dövme yönteminde ise önceden hazırlanan biyetler iki kalıp arasına koyulup preslenerek şekil verilir.



Şekil 3. 7 Tikso-döküm proses şeması [24]

Tikso-enjeksiyon kalıplama prosesi ise uygulama açısından plastik enjeksiyon kalıplama yöntemine benzemektedir (Şekil 3.8).

Küçük parçacıklar halindeki hammadde, oksitlenmeyi önlemek amacıyla argon gazı içeren ısıtılmış bir kovana aktarılır. Kovan çevresinde bulunan rezistanslarla malzeme yarı-katı sıcaklığa kadar ısıtılır. Kovanın içinde dönen bir vidaanın yarattığı kesme gerilmeleri malzemenin içindeki dendrit kollarının kırılmasını sağlar ve küresel tanelere sahip tiksotropik malzeme elde edilir. Yeterli miktarda tiksotropik malzeme elde edildikten sonra vida ilerletilerek malzeme kalıp boşluğuna itilir.



Şekil 3. 8 Tikso-enjeksiyon kalıplama [24]

Reo-şekillendirme literatürde alüminyum alaşımlarına yarı-katı şekil verilmesinde kullanılan reo-döküm (reocasting) ve reo-enjeksiyon kalıplama gibi prosesleri kapsamaktadır. Tikso-molding magnezyum alaşımları için ekseriyetle kullanılır.

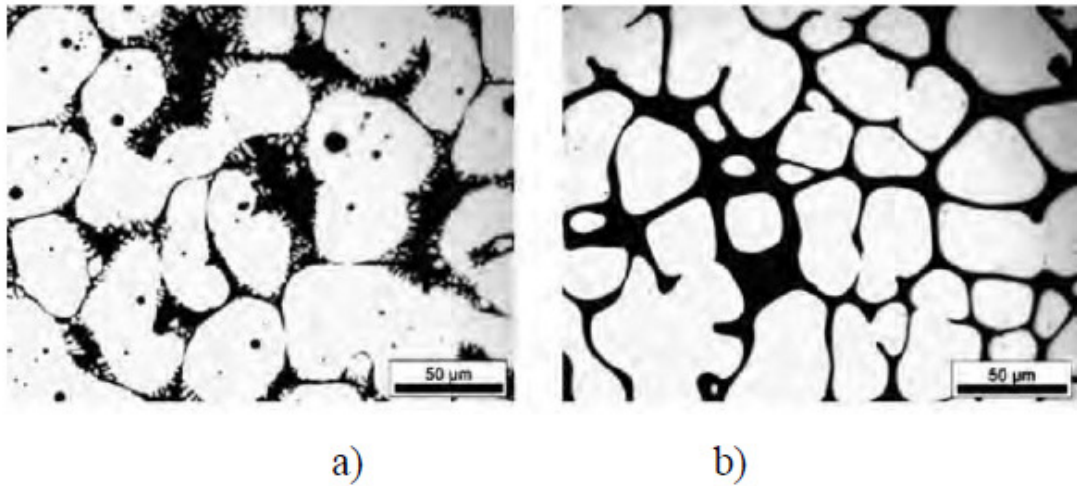
Reo-döküm prosesinde; malzeme sıvı halden yarı-katı hale soğutulurken mekanik ya da elektromanyetik karıştırma yöntemleri uygulanarak tiksotropik özellik elde edilir ve malzeme yarı-katı sıcaklığında basınçlı döküme benzer şekilde kalıp boşluğuna basılır.

Reo-enjeksiyon kalıplama ise tikso-enjeksiyon kalıplamaya benzer bir yöntemdir. Farkı hammadde olarak kullanılan metalin tamamen sıvı halde iken vida yardımıyla mekanik olarak karıştırılarak yarı-katı hale soğutulmasıdır. Daha sonra elde edilen yarı-katı haldeki tiksotropik malzeme, kalıp boşluğuna enjekte edilir [21].

Şekil 3.1’da reo-şekillendirme ve tikso-şekillendirme uygulanmış A356 alaşımının mikroyapı fotoğrafları yer almaktadır. Şekil 3.9 a’da görülen beyaz yuvarlak objeler malzemenin katı kısmını oluşturan alüminyum küreleridir.

Onları çevreleyen koyu renkli matris ise ince alüminyum dendritleri ile ötektik fazlardan oluşmaktadır ve malzemenin üretim esnasındaki sıvı kısmını oluşturmaktadır. Endirekt yarı-katı şekillendirme sırasında sıvı metal, katı kürelerin içinde hapsolabilir.

Şekil 3.9 b’de bu hapsolmuş sıvı siyah noktacıklar şeklinde kürelerin içinde görülmektedir [24, 23].



Şekil 3. 9 AA356 alaşımında (a) tikso-şekillendirme ve (b) reo-şekillendirme sonrası mikroyapı oluşumu [23].

Shang ve arkadaşları (2010) çalışmalarında AA6061 alaşımının yarı-katı şekillendirilmesi sırasında deformasyon mekanizmasını ve tikso-şekillendirme özelliklerini incelemişlerdir.

Likidüse yakın sıcaklıkta yapılan döküm yöntemiyle elde edilen malzeme, yarı-katı halde %70 deformasyon oranında preslenmiştir. Sonuçlar likidüse yakın sıcaklıkta döküm yöntemiyle üretilen malzemenin yarı-katı sıcaklığa ısıtılmasıyla, tikso şekillendirmeye uygun (ötektik sıvı fazla çevrili dendritik olmayan küresel tanelerden oluşan) mikroyapı elde edilebildiğini göstermiştir [25].

Deformasyon hızının artırılması ve sıcaklığın düşürülmesiyle maksimum gerilmenin arttığı görülmüştür. Yarı-katı şekillendirmenin sıvı kısmın akması, sıvı içeren katı taneciklerin akması, katı taneciklerin bir biri üzerinden kayması ve kısmen katı taneciklerin plastik deformasyonu mekanizmalarıyla gerçekleştiği görülmüştür.

Neag ve arkadaşları. (2012) AA7075 alaşımının tikso geri ekstrüzyonu sırasındaki mikroyapı ve akış davranışlarını incelemişlerdir.

Çelik kalıbın ve alüminyum biyetin indüksiyon fırınıyla aynı anda ısıtılmasıyla ısı kayıpları ve aşırı tane büyümesi önlenerek tikso şekillendirmeye uygun, oldukça homojen bir mikroyapı elde edilebilmiştir. Yüksek katı oranına rağmen ($>0,75$) tikso ekstrüzyon sırasında malzemenin iç yapısındaki katı kürelerin plastik deformasyona uğramadan birbiri üzerinden kaydığı görülmüştür.

Ekstrüzyon sıcaklığı 609°C 'nin üzerine çıkarıldığında makro segregasyonun arttığı, sonuç olarak ürünün şekil ve yüzey kalitesin bozulduğu görülmüştür [26].

Rokni ve diğ. (2012) gerçekleştirdikleri benzer çalışmada AA7075 alaşımının $550-600^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında, farklı hız ve çaplarda tikso geri ekstrüzyonu sırasındaki mikroyapı ve mekanik özelliklerin değişimini incelemiştir. Düşük sıcaklıklarda daha ince küresel tanelerin oluştuğu; malzemenin oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin ekstrüzyon sıcaklığı, hızı ve kalıp çapına bağlı olarak önemli ölçüde etkilendiği görülmüştür. Ekstrüzyon sıcaklığının artırılmasıyla dayanımın düştüğü ve sünekliğin arttığı; ekstrüzyon hızının artırılmasıyla dayanım ve sünekliğin arttığı görülmüştür [27].

3.2.1 Eğimli Soğutucu ile döküm yöntemi

ES döküm yöntemi tiksotropik malzeme üretim yöntemlerinden biridir. Yöntem çok az teçhizat ve düşük işletme maliyeti ile kurulabilir [28].

Yarı-Katı Şekillendirme için ön malzeme üretim yöntemleri arasında eğimli soğutma plakasına döküm yöntemi pratik ve ekonomik olması yönünden cazip bir yöntemdir [30].

Son yıllarda, hammadde materyalinin daha uygun maliyetli bir şekilde üretilmesine imkân tanıyan, hammadde metotlarının geliştirilmesine yönelik araştırmalar hızlanarak devam etmektedir. Küresel yapı oluşturma sürecin yüksek maliyetlerine neden olan en önemli faktörlerden biri, dendritik olmayan veya küremsi mikro yapılara sahip olan yapıların elde edilmesidir. Bu metotta, bir döküm sıcaklığında eritilen alaşım eğimli bir plakadan dökülür. Plakadan akış sırasında eriyiğin eğimli plaka ile teması, yer çekimi ve sıvı akışından dolayı kesme gerilmesine maruz kalmasının bir sonucu olarak katı çekirdekler şekillenir [32].

23

azaltılır; alaşım daha hızlı akar ve bu da dendritin daha az kırılmasına neden olur. Deneysel çalışmalarda 30 ve 60 derecelik iki farklı eğimde sonuçlar incelenmiştir.

3.3 Yarı-Katı şekillendirme yönteminin avantajları ve dezavantajları

Yarı-katı şekillendirmenin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir [22, 23, 24, 27]

1. Otomasyonu ve kontrolü kolay olan, enerji tasarruflu bir yöntemdir.
2. Üretim hızı dövme ve döküm yöntemlerinininkine benzerdir.
3. Yarı-katı malzeme ince kesitlere sahip kalıp boşluklarını daha iyi doldurur ve karmaşık geometriye sahip ürünler dövme yöntemine göre daha az yükte şekillendirilebilir.
4. Daha düşük işlem sıcaklığı kalıpta oluşan termal şoku azaltır, kalıp ömrünü artırır, maliyeti azaltır ve yüksek ergime sıcaklığına sahip alaşımların şekillendirilebilmesine olanak sağlar.
5. Yarı-katı haldeki malzemenin kalıp boşluğuna düzgün akışı nedeniyle daha az gaz sıkışması ve katılaşma sırasında daha az katı-sıvı büzülmesi porozite oluşumunu azaltır.
6. Ürünün net şekle yakın olması, iyi yüzey kalitesi ve yolluk-çıkıcı gibi gereksinimlerin olmaması, sonraki işlem aşamalarını azaltır ve malzemedan tasarruf sağlar.
7. İnce ve homojen mikroyapı parça özelliklerini iyileştirir. Parça boyutlarının optimize edilmesiyle ağırlıktan tasarruf edilebilir.

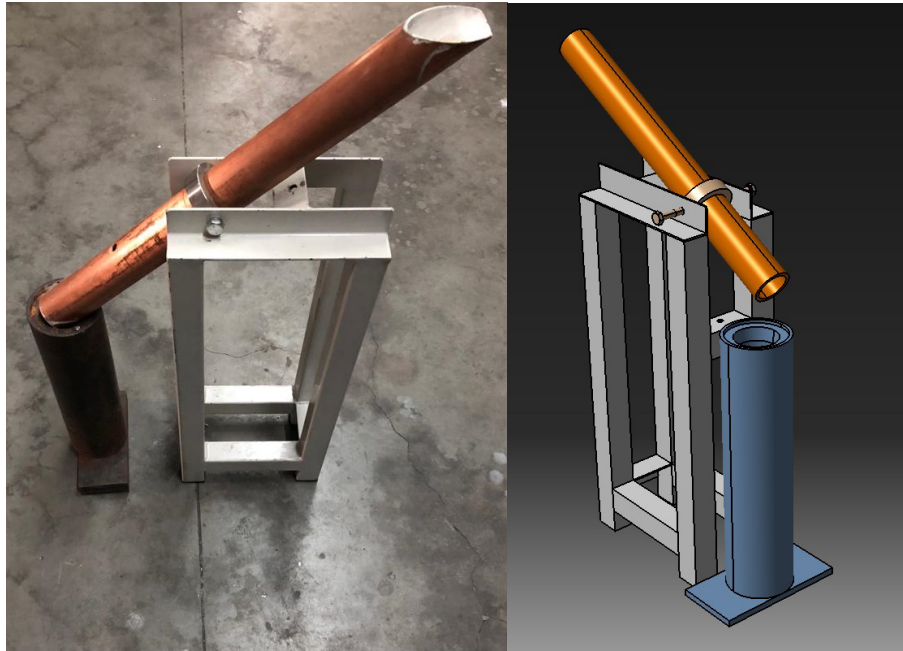
Yarı-katı şekillendirmenin dezavantajları ya da kısıtlamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir; [22, 23, 24, 27].

1. Küresel mikroyapıya sahip hammaddenin üretimi maliyetlidir ve üretici sayısı azdır.
2. Konu hakkındaki sınırlı bilgi birikimi nedeniyle uygun bir üretim süreci oluşturmak için gereken araştırma çaba ve masrafı yüksektir.
3. Konvansiyonel üretim yöntemlerinden farklı cihaz ve ekipmanlar gerektirmesi kurulum maliyetini artırır.
4. Konvansiyonel üretim yöntemlerine göre daha iyi eğitilmiş personele ihtiyaç duyulur.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Eğimli Soğutucu ile Döküm

Ticari bir işletmeden tedarik edilmiş A356 ve A380 alüminyum ile sırasıyla 635 °C ve 615 °C sıcaklıkta ve 30° - 60° eğimle kokil kalıba döküm işlemi yapılmıştır. Her döküm için 1 kg'lık metal ergitilmiştir. Döküm yolunda eğimli soğutucu olarak 50 mm çapında 650 mm boyunda bakır bir boru kullanılarak sıvı metal 40 mm çapında çelik bir kalıba akıtılmıştır. Döküm öncesinde bakır boru iç yüzeyine hekzagonal bor-nitrür spreyi ile kaplama yapılmıştır.



Şekil 4. 1 Deney Düzeneği (Sağdan sola sırasıyla; gerçek görüntü-CAD görüntüsü)

4.2 Yarı-katı şekillendirme

Dökülen ingotlardan üst kısmındaki merkezi çekme boşluğu bölgesinin altında kalacak şekilde 40 mm yüksekliğinde numuneler kesilmiştir. Elde edilen numuneler 20,40,60 ve 80 dakikalık yeniden ısıtma sürelerini takiben deformasyon oranı % 50 olacak şekilde hidrolik pres vasıtasıyla açık olarak yarı katı şekillendirilmiştir. Ayrıca her yeniden ısıtma süresinde bir numune de suda soğutulmuştur. Yeniden ısıtma sıcaklıkları A356 alaşımı için 595 °C ve A380 alaşımı için 575 °C'tır. Yeniden ısıtma işlemi direnç tipi bir kül fırınında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4. 1 Kullanılan alaşımların ağırlıkça yüzde değerleri (%)

*	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Ph	Al
A356	7,288	0,14	0,011	0,028	0,35	0,01	0,003	0,003	0,123	0,0117	Kalan
A380	8,22	0,69	3,586	0,189	0,22	0,95	0,018	0,124	0,037	0,0806	Kalan



Şekil 4. 2 Soldan sağa sırasıyla yarı-katı dövülmüş numune, kesilmiş parça, ES dökülmüş parça, hidrolik preste preslenen numune

4.3 Karakterizasyon çalışmaları

jum, W. Tongminceleme için tüm numuneler 1200'lük zımpara derecesine kadar zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından 1 mikronluk elmas pasta ile parlatılan ve %0,5'lik HF çözeltisiyle dağlanan numuneler Nikon Eclipse MA100 mikroskopunda incelenmiştir.

Bu incelemeler sonrasında mikro yapı ile birlikte küresellik indeksi ve ortalama tane çapı belirlenmiştir.

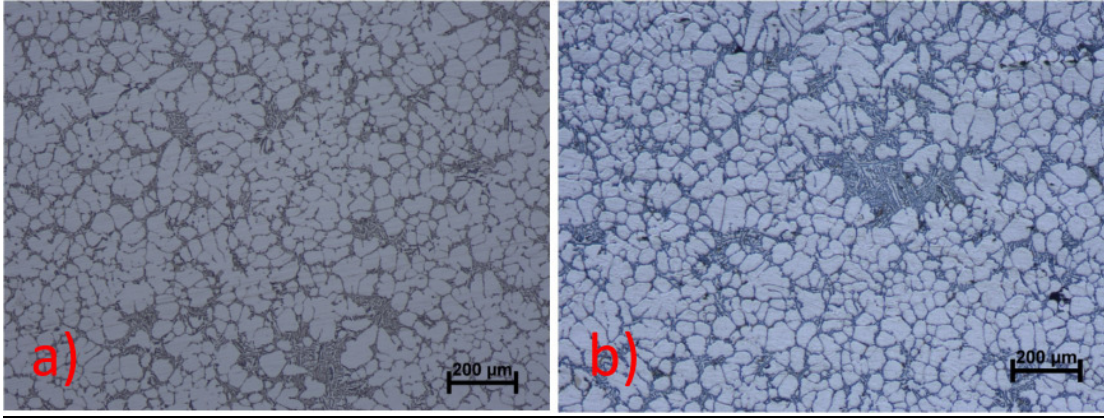
Son olarak numunelerin sertliği 62,5 kgF yük ve 2,5 mm'lik çelik bilya kullanılarak Brinell sertlik cihazı vasıtasıyla ölçülmüştür.



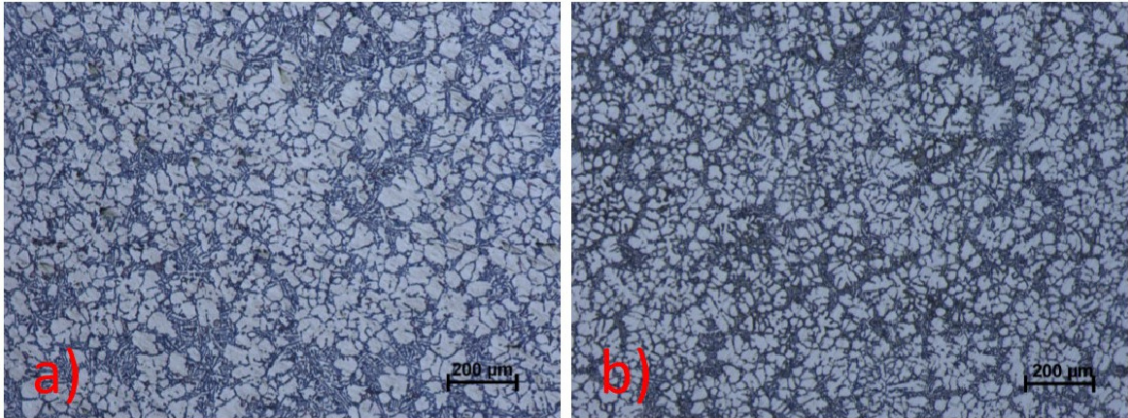
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1 Mikroyapıların incelenmesi

30° ve 60° eğimle dökülmüş A356/A380 alaşımlarının döküm hal görüntüleri Şekil 5.1 ve 5.2'de verilmiştir;



Şekil 5. 1 A356 Alaşımı için 30° ve 60° döküm halde numunelerini mikroyapı görüntüleri
a) 30° b) 60°

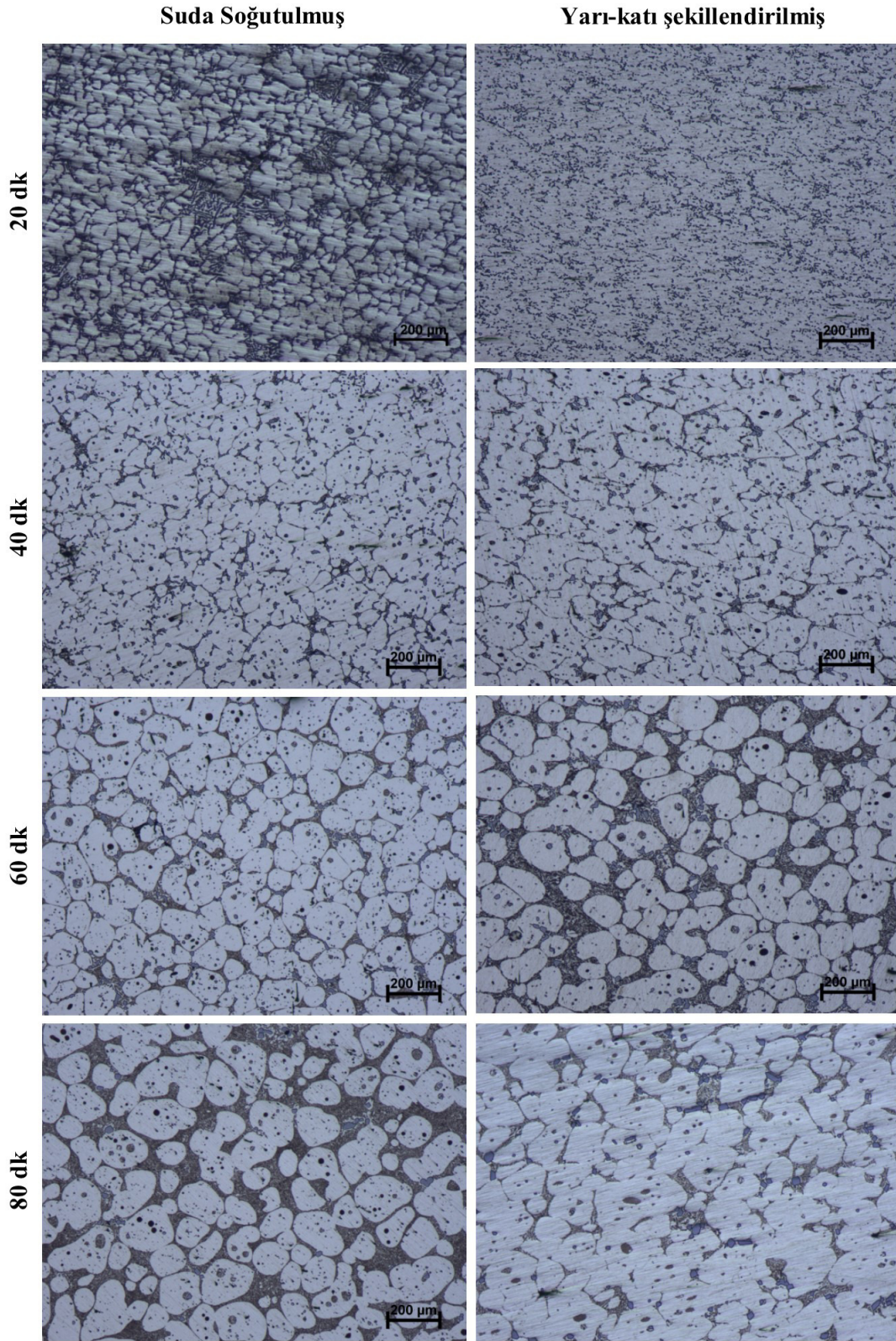


Şekil 5. 2 A380 Alaşımı için 30° ve 60° döküm halde numunelerini mikroyapı görüntüleri
a) 30° b) 60°

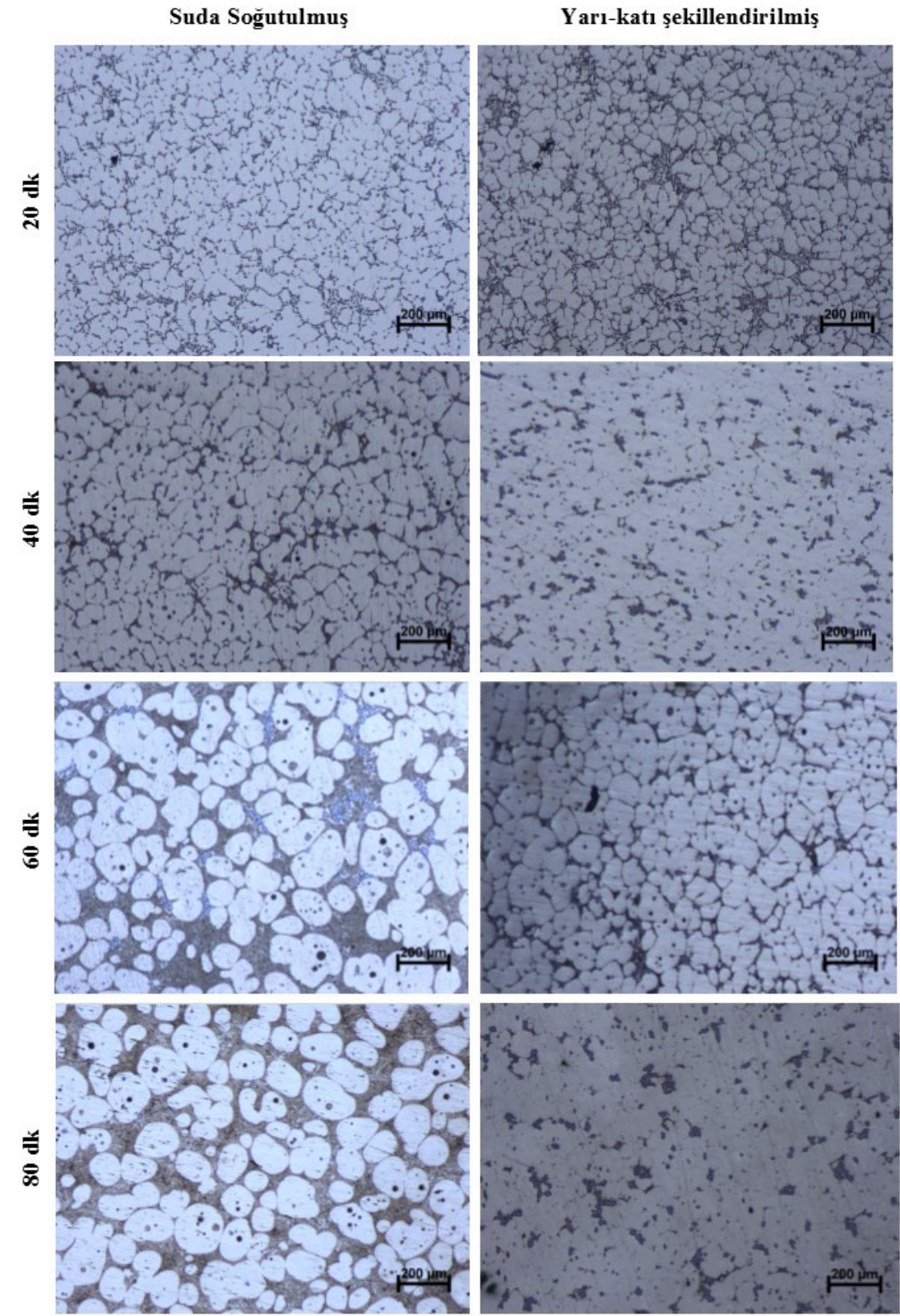
A356 ve A380 alaşımları içerdikleri silisyum oranlarına bağlı olarak ötektik altı Al-Si alaşımlarıdır. Bu durumda mikro yapılarda açık renk olarak görülen bölgeler α -Al taneleridir, bunların aralarındaki gri rengin hakim olduğu bölgeler ise Al-Si ötektiğidir.

Eğimli soğutucu (ES) döküm yöntemiyle dentirik büyümenin bastırıldığı, görece küreselliği yüksek eş eksenli tane yapısının oluştuğu her iki alaşım için de gözlemlenmiştir. Dendritik olmayan mikro yapıları ile dökülen ingotlar sonraki yarı-katı şekillendirme işlemleri için uygundur.

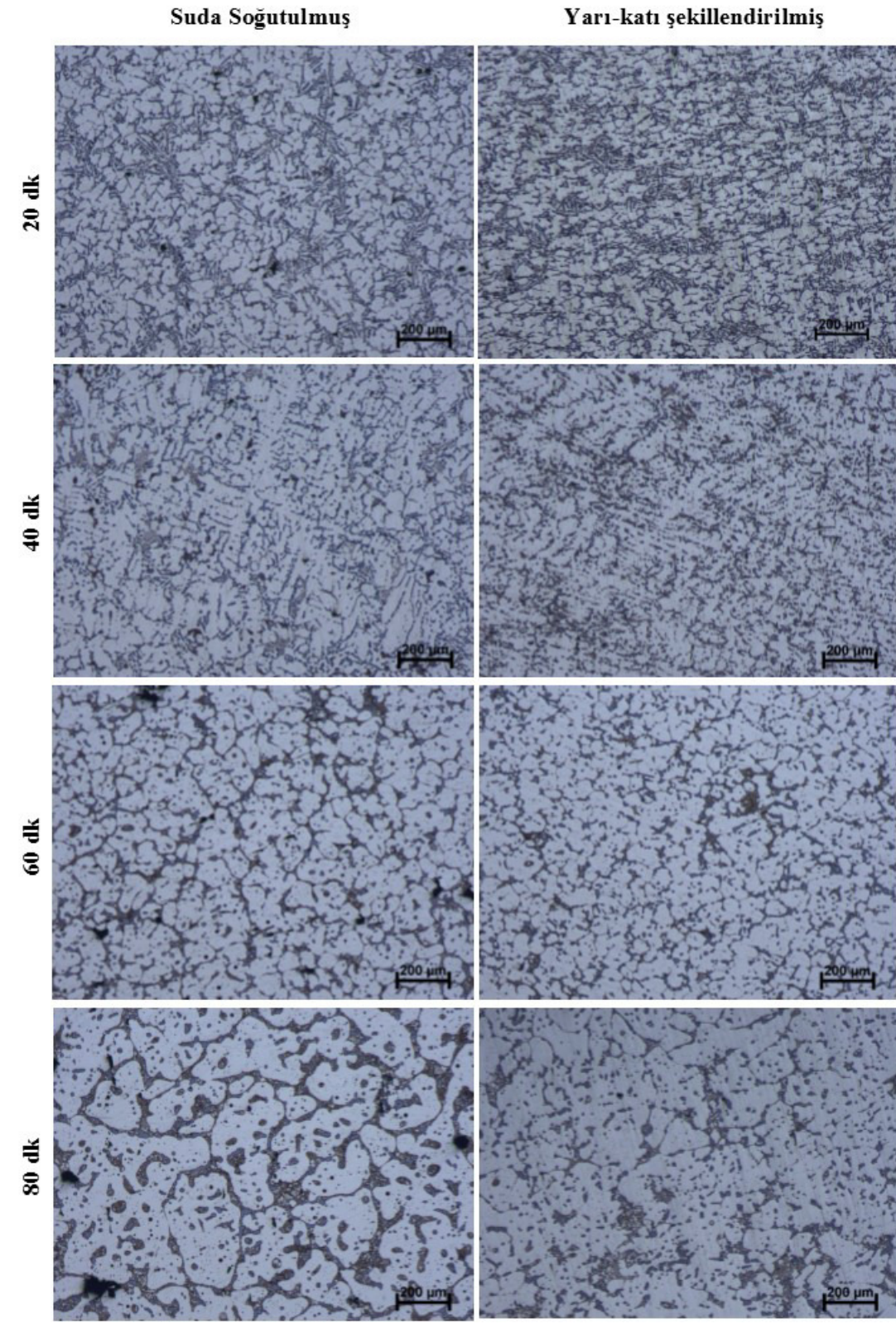
30° eğimle dökülmüş A356 alaşımı numunelerinin tüm yeniden ısıtma süreleri için suda soğutulmuş ve yarı-katı şekillendirilmiş numunelerin mikroyapıları Şekil 5.3'te, 60° eğimle dökülmüş A356 alaşımı numunelerinin tüm yeniden ısıtma süreli için suda soğutulmuş ve yarı-katı şekillendirilmiş numunelerin mikroyapıları Şekil 5.4'te, 30° eğimle dökülmüş A380 alaşımı numunelerinin tüm yeniden ısıtma süreleri için suda soğutulmuş ve yarı-katı şekillendirilmiş numunelerin mikroyapıları Şekil 5.5'te, 60° eğimle dökülmüş A380 alaşımı numunelerinin tüm yeniden ısıtma süreleri için suda soğutulmuş ve yarı-katı şekillendirilmiş numunelerin mikroyapıları Şekil 5.6'da verilmiştir.



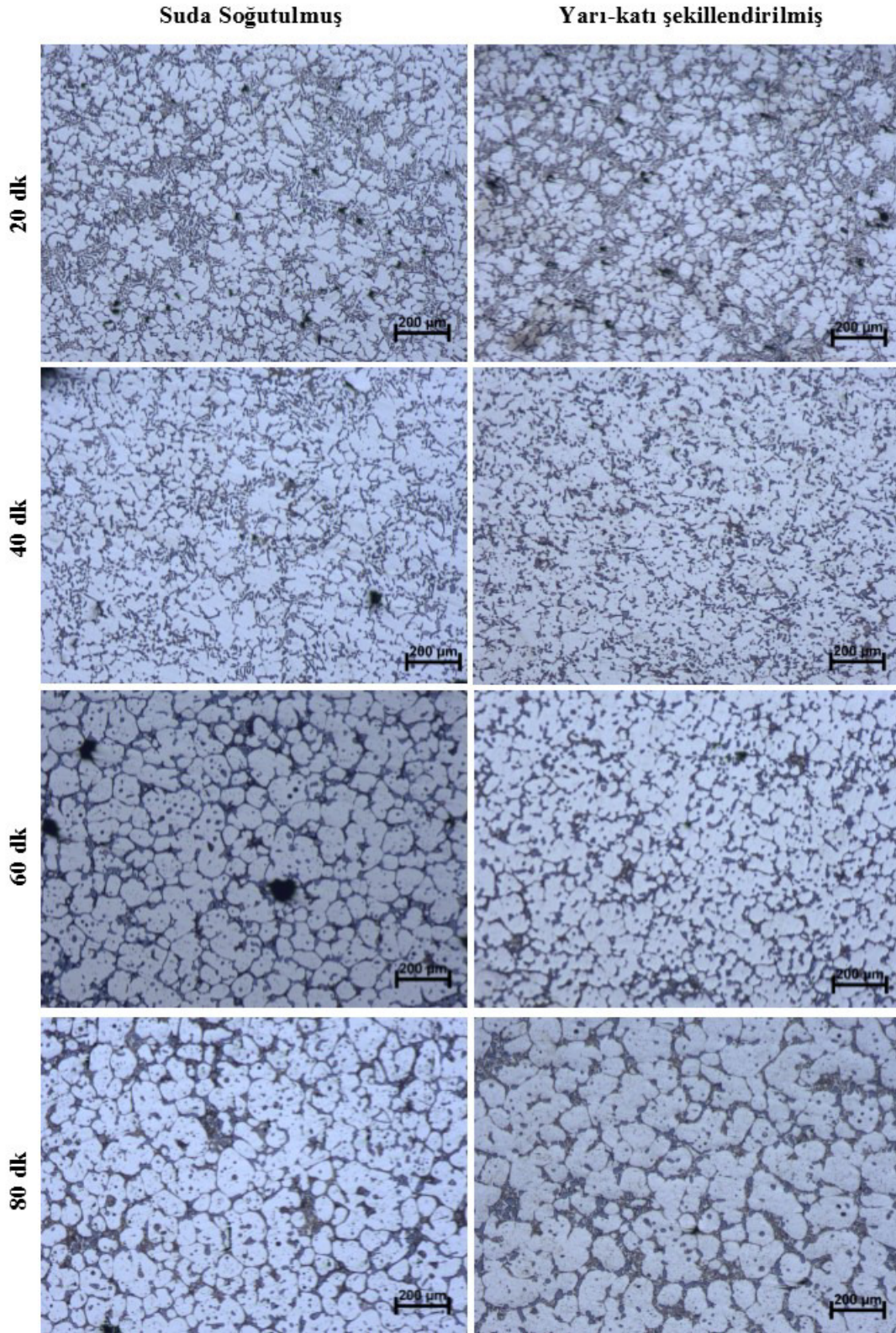
Şekil 5. 3 30° eğimle dökülmüş A356 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri



Şekil 5. 4 60° eğimle dökülmüş A356 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri



Şekil 5. 5 30° eğimle dökülmüş A380 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri



Şekil 5. 6 60° eğimle dökülmüş A380 alaşımı numunelerini mikroyapı görüntüleri

Numunelerden alınan mikroyapı görüntüleri incelendiğinde artan yeniden ısıtma süresiyle birlikte tipik olarak ortalama tane çaplarında belirgin bir artış görülmektedir.

Özellikle 60 ve 80 dk. 'lık ısıtma sürelerinde, tanelerin büyümesi ve birleşmesi çok belirgindir. Bu sürelerle ait mikro yapı görüntülerinde irileşmiş ve küreselleşmiş α -Al tanelerinin içinde gri bölgeler göze çarpmaktadır. Bu bölgeler taneler birleşirken aralarında hapsolan ötektik bölgeleridir.

Mikroskop altında incelenen mikro yapılar üzerinden küresellik indeksi ve ortalama tane çapı ölçümleri yapılmış ayrıca tüm numunelerin sertlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 5,7'de tane çapları, Şekil 5,8'de küresellik indeksi, Şekil 5,9'da suda soğutulmuş numunelerin sertlik değerleri ve Şekil 5,10'da ise yarı-katı şekillendirilmiş numunelerin sertlik verileri görülmektedir. Küreselliğin yeniden ısıtma süresi ile birlikte suda soğutulan numunelerde arttığı gözlenmiştir. Küresellikte ki bu artışı ortalama tane çapında da artış takip etmiştir.

Küresellik indeksi hesaplama: $\text{Tane Çevresi} / \pi.R$

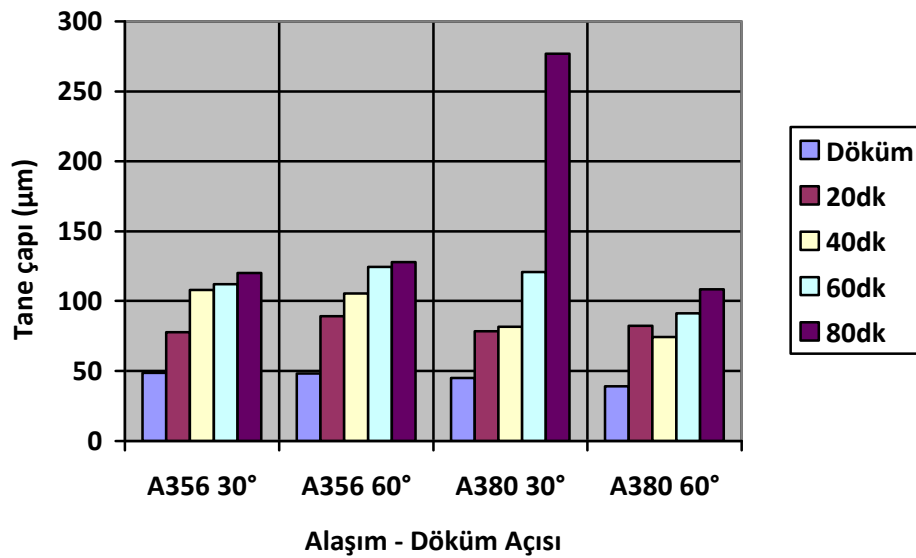
π : 3,14

R: Tane Çapı

Tane Boyutu hesaplama: $(4.A/p)^{(1/2)}$

A: Alan

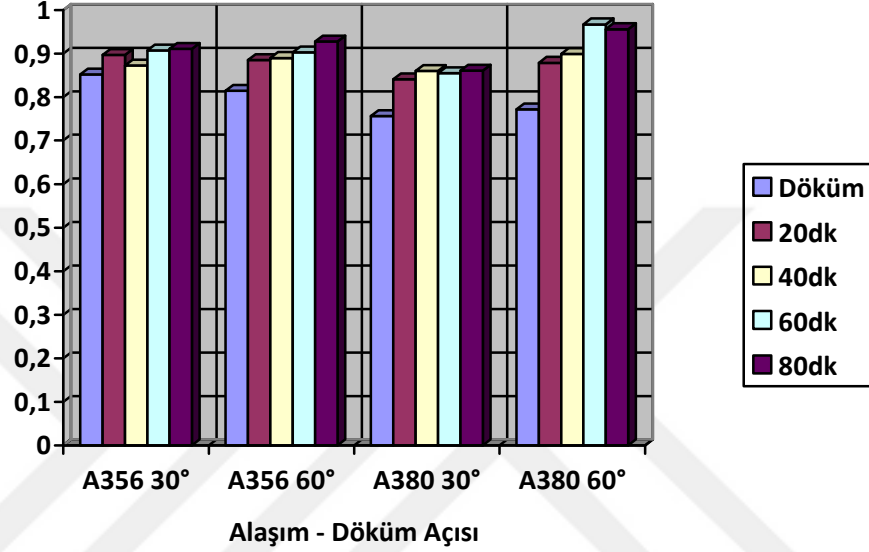
p: Çevre



Şekil 5. 7 Su ile soğutulmuş numunelerin tane çapı kıyaslamaları (µm)

Çizelge 5. 1 Su ile soğutulmuş numunelerin tane çapı değerleri (µm)

*	Döküm	20dk	40dk	60dk	80dk
A356 30°	48,7	77,6	108,1	112,2	120,1
A356 60°	48,1	89,1	105,4	124,6	127,9
A380 30°	45,1	78,3	81,7	120,8	276,9
A380 60°	39,1	82,3	74,3	91,2	108,5



Şekil 5. 8 Su ile soğutulmuş numunelerin küresellik indeksi kıyaslamaları

Çizelge 5. 2 Su ile soğutulmuş numunelerin küresellik değerleri

*	Döküm	20dk	40dk	60dk	80dk
A356 30°	0,852	0,897	0,873	0,907	0,911
A356 60°	0,815	0,885	0,89	0,903	0,928
A380 30°	0,757	0,841	0,86	0,855	0,861
A380 60°	0,772	0,879	0,899	0,967	0,956

Yarı-katı şekillendirilmiş numunelerde özellikle deformasyonun belirgin olarak etkilendiği ve deformasyon tekstürü oluşan mikro yapılarda sağlıklı tane çapı ve küresellik indeksi ölçümleri yapılamamıştır. Elde edilebilecek ölçüm sonuçlarının yanıltıcı olma ihtimali göz önüne alınarak bu veriler değerlendirme kapsamına alınmamıştır. Yarı-katı şekillendirilmeden özdeş numunelerin suda hızlıca soğutulması o anın adeta bir fotoğrafını çekerek mikro yapılarda tutarlı ve güvenilir ölçümler alınmasına olanak sağlamıştır.

5.2 Sertlik değerlerinin incelenmesi

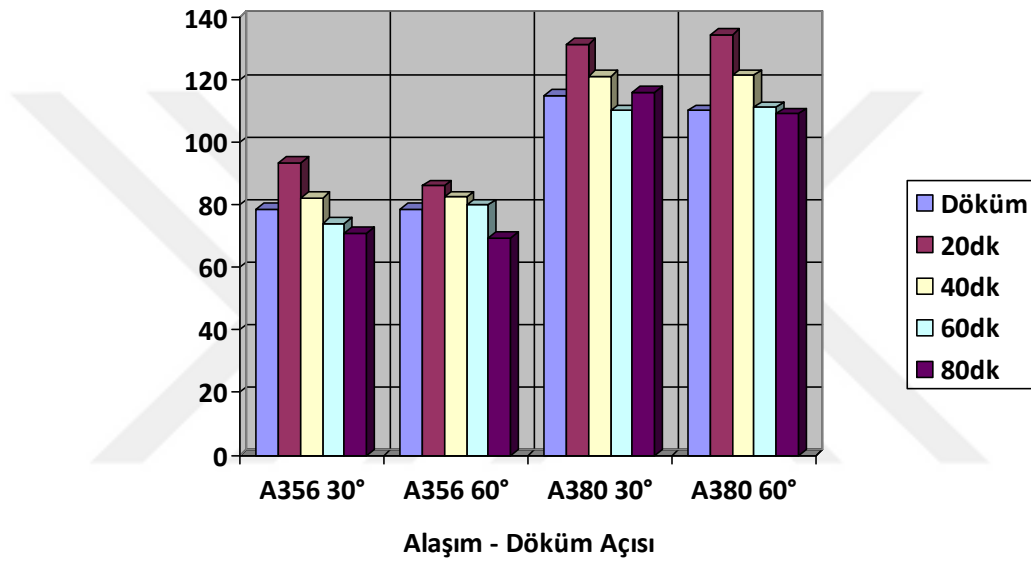
Aşağıdaki şekil ve tablolarda numunelerin sertlik değerleri incelenmiştir.

Brinell Sertlik Hesaplama:

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

BSD: Brinell Sertlik Değeri (HB), F: Uygulanan yük, (kg)

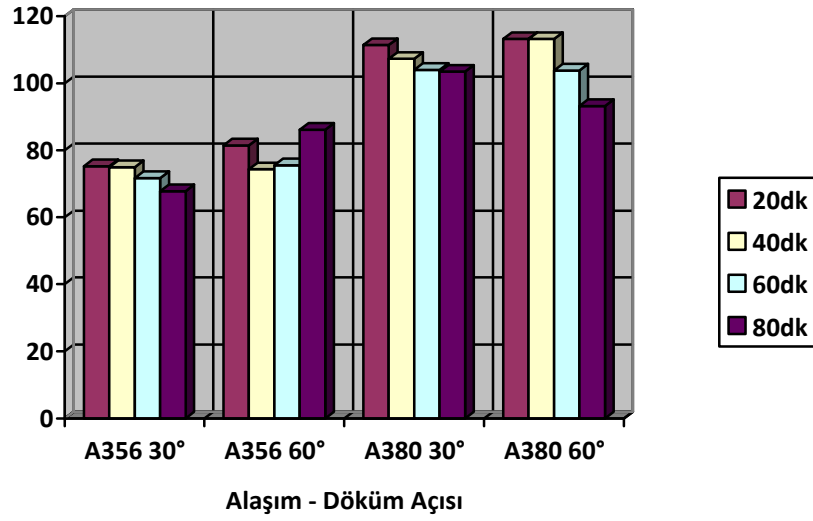
D: Bilya çapı (mm), d: İz çapı(mm)



Şekil 5. 9 Su ile soğutulmuş numunelerin sertlik kıyaslamaları (HB)

Çizelge 5. 3 Su ile soğutulmuş numunelerin sertlik değerleri (HB)

*	Döküm	20dk	40dk	60dk	80dk
A356 30°	78,7	93,5	82,2	74,2	71,1
A356 60°	78,6	86,1	82,6	80	69,6
A380 30°	115	131,5	121,3	110,1	116
A380 60°	110,2	134,5	121,5	111,3	109,1



Şekil 5. 10 Yarı-Katı şekillendirilmiş numunelerin sertlik kıyaslamaları (HB)

Çizelge 5. 4 Yarı-Katı şekillendirilmiş numunelerin sertlik değerleri (HB)

*	20dk	40dk	60dk	80dk
A356 30°	75,2	74,9	71,1	67,8
A356 60°	81,4	74,3	75,5	86,1
A380 30°	111,4	107,3	104	103,5
A380 60°	113,2	113,2	103,8	93,22

ES yöntemiyle dökümde eş eksenli ince tane oluşumunu sağlayan iki mekanizmadan söz edilebilir. Birincisi hızlı soğuma etkisiyle çekirdeklenme oranının yükselmesi ve katılaşmanın çok kısa sürede meydana gelmesidir. İkincisi akış eğiminin sağladığı kesme kuvvetinin soğutucuya temas ile oluşan çekirdekleri sürüklenirken kırmasıdır. A380 alaşımıyla 60° açıda yapılan dökümde tane boyu 30°'de yapılan dökümden belirgin olarak daha küçüktür. A356 alaşımı ile her iki açıda da yapılan dökümlerde ise tane boyları hemen hemen aynı değerdedir. A380 alaşımında yüksek eğimle yapılan dökümün daha ince tane oluşturmada bu alaşım için kesme kuvveti mekanizmasının daha baskın olduğunu göstermektedir. A356 alaşımında da her iki mekanizma için bir denge hali olduğu söylenebilir.

A380 alaşımının daha yüksek silisyum içeriği nedeniyle akışkanlığının A356 alaşımına göre bir miktar daha iyi olacağı göz önüne alındığında 60°'de yapılan dökümde yüksek akış hızı kesme kuvvetini arttırmış olmalıdır. A356 alaşımında ise görece düşük akışkanlık 30°'de yapılan dökümde metalin soğutucuyla olan temas süresini ve

dolayısıyla hızlı soğuma etkisini arttırmış ve sonuçta 60°'de ki döküme denk bir tane boyu oluşmuştur.

Döküm sıcaklıkları her iki alaşımın da likidüs noktasının yaklaşık 20 °C üzerinde olacak şekilde belirlenmiştir. Daha düşük üst ısılgı ergitme denemelerinde metalin potadan bütünüyle başarılı bir şekilde akıtılamayacağı görülmüştür.

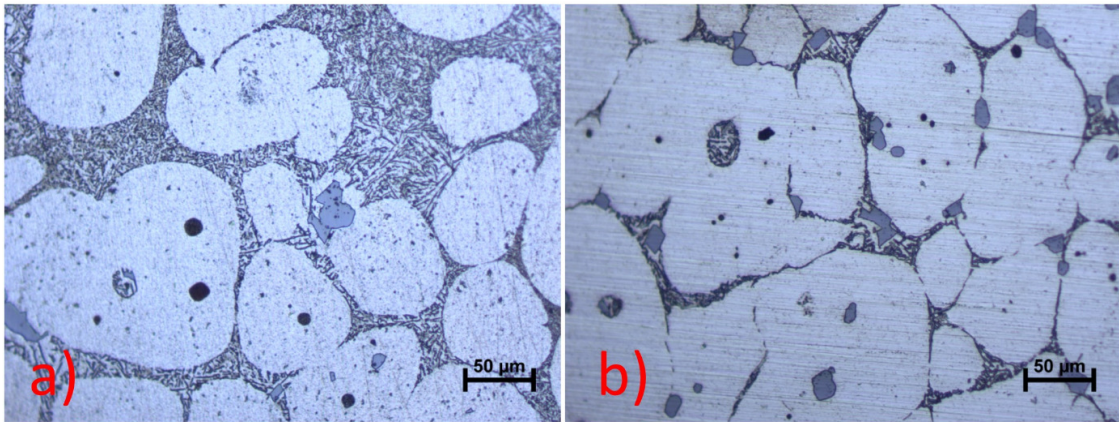
İngot döküm numunelerinin mikro yapı görüntüleri ve tane çapı ölçümleri göz önüne alındığında A380 alaşımının A356 alaşımına göre biraz daha ince taneli olduğu görülmektedir. Küresellik açısından karşılaştırıldığında ise A356 alaşımının çıkış mikro yapısının küresellik indeksi A380 alaşımına göre daha yüksektir.

A356 alaşımının 30° ve 60°'de dökülmüş numunelerinin yeniden ısıtma işleminde gelişim süreçleri birbirine benzer bir seyir izlemiştir. Ortalama tane çapları ve ortalama küresellik indeksleri aynı süreler için paralellik göstermiştir.

A380 alaşımında ise böyle yakın bir seyirden bahsetmek pek mümkün değildir. Bu alaşımın 30° açıldaki dökümünden gelen numunelerinin yeniden ısıtma işleminde 60 dk. tutma süresine kadar tutarlı bir tane büyümesi varken 80 dk.'da diğer numunelerde rastlanmayan sıra dışı bir tane büyümesi gerçekleşmiştir. Ayrıca küresellik indeksleri açısından değerlendirildiğinde bu numune grubunda hiçbir değer 0,9 değerinin üzerine çıkmamıştır. Aynı alaşımın 60° açıda dökümünden gelen numunelerde ise görece en düşük tane çapları ve en yüksek küresellik indeksleri ölçülmüştür.

Dikkat çeken bir başka husus ise küreselleşme hızı ve oranıdır. Bir miktar daha düşük çıkış küresellik indeksi ile yarı-katı ısıtma sürecine başlayan A380 alaşımı A356 ile arasındaki farkı 40 dk sürede kapatmış ve 60° numunelerinde yüksek küresellik göstermiştir. Al-Si ötektik altı alaşımlarında yarı-katı yeniden ısıtma işleminde ötektik fazı ergiyerek katı α -Al tanelerini çevreler. Ergiyik miktarı doğal olarak artan süreye bağlı olarak fazlalaşacaktır. Ergiyik ötektik havuzu içinde kalan katı taneler her yöne doğru büyüyerek küresel bir form almaktadır. İdeal kürenin indeksi olan 1 değerine ulaşmak pratikte elbette mümkün olmayacağı için küresellik indeksi tane birleşmelerine de bağlı olarak belirli bir bekleme süresi sonunda ulaşabileceği en yüksek değerin altına inecektir. 80dk bekleme sürelerinde bu durum tüm numune gruplarında olmasa da görülebilir.

Sertlik ölçümleri mekanik özellikleri mümkün olduğunca temsil etmesi amacıyla yapılmıştır. Açık olarak yapılan basma işlemi sonrasında diğer mekanik testlere uygun numune alınacak son şekil oluşmamaktadır. Sertlik sonuçları irdelendiği zaman göze çarpan iki önemli değişim vardır. Bunlardan birincisi doğal olarak beklendiği gibi yarı-katı yeniden ısıtma tutma süresinin artmasıyla tane irileşmesine bağlı olarak sertlik düşüştür. İkincisi ise suda soğutulan numuneler ile yarı-katı şekillendirilen numuneler arasındaki belirgin sertlik farkıdır. Suda soğutulan numunelerin sertlik değerleri daha yüksek ölçülmüştür. Bu durumun oluşumundaki neden numunelerin soğuma hızları arasındaki farktır. Suda soğutulan numuneler fırından alınır alınmaz oda sıcaklığındaki suyun içine atılmıştır. Yarı-katı şekillendirilen numuneler ise işlem sonrasında havada soğutulmuştur. Suda soğutulan numunelerde yüksek soğuma hızı sonucunda ergimiş olan ötektik yapı oldukça ince bir formda katılaşmıştır. Yarı-katı şekillendirilip havada soğutulan numunelerde ise yavaş soğuma ötektiğin görece daha kaba bir formda oluşmasını sağlamıştır. Sonuç olarak ince ötektiğe sahip olan suda soğutulmuş numunelerin sertliği yükselmiştir. Şekil 5.9'da bu fark belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 5. 11 60° Açıyla dökülmüş A356 Alaşımı Mikroyapı Görüntüleri (200X büyütme)

a) 60dk ön ısıtmanın ardından su ile soğutulmuş b) 60dk ön ısıtmanın ardından yarı katı şekillendirilmiş

SONUÇ VE ÖNERİLER

Uygulaması basit ve düşük maliyetli bir yöntem olan eğimli soğutucu ile döküm yarı-katı şekillendirmeye uygun yarı-mamul üretmek için son derece etkili bir yöntemdir. Literatüre girmiş önceki çalışmalarda rastlanan yaygın eğimli soğutucular su soğutmalı çelik plakalardan üretilmiş olanlardır. Yaptığımız bu çalışmada örneğine daha az rastlanan su soğutmasız bakır boru kullanılmıştır ve tatmin edici sonuçlar alınmıştır. Eğimde bakır gibi ısıl iletkenliği en yüksek metallerden birini kullanmak su soğutmaya gerekliliğini ortadan kaldırabilir ve tasarımı basitleştirebilir. Elbette soğutma olmadan bakır borunun da uzun süre veya arka arkaya kullanılması etkinliğini azaltacaktır.

Üzerinde çalıştığımız alaşımlar açısından bir değerlendirme yapmak gerekirse A356 alaşımından yarı-katı şekillenmeye ingot dökümü için eğim açısı olarak 30° veya 60°'den birisi seçilebilir. Bu alaşım için açıların birbirlerine belirgin bir üstünlüğü görülmemiştir. Ancak bir de toplam döküm verimi açısından düşünmek gerekirse, yüksek eğimdeki hızlı akış soğutucu üzerinde daha az kabuk veya artık bırakacaktır. Bu durumda 60° açıda döküm yapmayı seçmek daha mantıklı olacaktır. A380 alaşımı için ise her yönden 60° açı tercih edilmelidir.

Yarı-katı şekillendirme için yeniden ısıtma tutma süreleri değerlendirildiğinde yüksek küresellik için tane kabalaşmasından kaçınmanın mümkün olmadığını göstermektedir. Uygulanan bekleme sürelerinin en yüksek olan 80 dk'da oluşan aşırı büyük taneler yüzünden tercih edilebilir değildir. Küresellik, tane boyu ve sertlik için olası en uygun bekleme süresinin her iki alaşım için de 40 dk. olduğu söylenebilir. Bu sürenin altındaki bekleme zamanlarında yeterli sıvı metal oluşmadığından şekillendirmede sorun çıkma

olasılığı vardır, ancak daha yüksek mekanik özellikler için tercih edilebilir. 40 dk. üzerinde daha fazla sıvı oranı oluşacaktır ve daha yüksek küresellik elde edilebilmesi olasıdır ancak tane kabalaşmasına bağlı olarak sertlik düşecektir.

Dikkatten kaçmaması gereken husus deneysel çalışmalarda yeniden ısıtma işlemlerinin direnç tipi bir fırında 40x40 mm çap ve yükseklikteki numuneler ile yapıldığıdır. Malzeme çapı ve fırın iç hacmine göre bu süreler farklılık gösterecektir. İndüksiyon ile yapılan ısıtmalar da ise sözü edilen süreler oldukça kısılacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Brown, J.R., (1999). "FosecoNon-Ferrous foundryman's handbook", Butterworth-Heinemann, Oxford, 11: 340.
- [2] M. Li, Y. Li, X. Huang, C. Cao ve Y. Ma, (2017). "China Foundry", 14: 1-9.
- [3] Z. Xiaoli, L. Xiangjun, W. Tongmin, ve L. Tingju, (2014). "China Foundry", 11: 423-427.
- [4] M.Nili-Ahmadabadi, F. Pahlevani ve P. Babaghorbani, Tsing Hua, (2008). "Science & Technology", 13: 147-151.
- [5] S.Gencalp, (2010). "Semisolid Microstructure Evolution during Cooling Slope Casting under Vibration of A380 Aluminum Alloy", 943-946.
- [6] Prosenjit Das, (2012). "Microstructural Evolution of A356 Al Alloy During Flow Along a Cooling Slope", 669-672.
- [7] T.Haga, (2010), "Effects of casting factors of cooling slope on semisolid condition", 969-971.
- [8] Hamed Khosravi, (2013), "Modeling and optimization of cooling slope process parameters for semi-solid casting of A356 Al alloy", 962-967.
- [9] Roth, J.P., (1966). "Diagnosis of Automata Failures: A Calculus and a Method", IBM Journal of Research and Development, 10: 278-291.
- [10] A.O.Coşkun, (2001). 5000 Serisi Alüminyum Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Termomekaniksel Prosesleri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [11] Ch., Gras, M., Meredith, J.D., Hunt, (2004). "Microdefects Formation During the Twin-Roll Casting of Al-Mn-Mg Aluminum Alloys", Oxford University, 62-72.
- [12] Wessel, J.K. (2004). "Handbook of Advanced Materials"; Wiley-Interscience Publication, USA, 656.
- [13] Sun,Y., (1998). Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [14] Aydın, B., (2002). AA2014 Alaşımında yaşlandırma ısı işleminin işlenebilirlik üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- [15] Doğan, M., (1989). Alüminyumların Isıl işlemi; Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] Erdoğan, M., (2001). Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Demir Dışı Alaşımlar, Nobel Yayınları, Ankara, 2:342-347.
- [17] The Aluminium Association, Aluminium Statistical Review, (2008), Arlington, Virginia, USA.
- [18] Anık,S., (1993). Vural, M., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi Birsen Yayınevi, İstanbul, 264.
- [19] E.A., Simielli, R.L., Plaut, A. F., Padilha, (1987). "Influence of Heating Time on Teh Recrystallization of Two Alumium Alloys", Z.Metalkunde, 770-776.
- [20] Vinarcik, E. J., (2002). "High Integrity Die Casting Processes". John Wiley & Sons, USA, 1: 67-87.
- [21] Atkinson, H., (2007). Current status of semi-solid processing of metallic materials, In Advances in Material Forming: Esaform 10 Years on. Springer, France, 2: 81-98.
- [22] Flemings, M. C., Riek, R. G. And Young, K. P., (1976). Rheocasting, Materials Science and Engineering, 25: 103-117.
- [23] Hirt, G. and Kopp, R., (2009). Thixoforming: Semi-solid Metal Processing. Wiley-WCH, Mörlenbach, Germany.
- [24] Türkeli, A., (1991). Yarı katı halde döküm ve şekil verme, 4. Denizli Malzeme Sempozyumu, 1-10.
- [25] Shang Shuzhen, (2010). "Study on the Semi-Solid Thixo-diecasting Process of Aluminum Alloys and Die Design". 192-193:460-465
- [26] Adriana Neag, (2008) " Study on Thixo-extrusion of Semi-Solid Aluminum". 141-143:659-664
- [27] Rokni, M. R., Zarei-Hanzaki, A., Abedi, H. R. and Haghdadi, N., (2012). Microstructure evolution and mechanical properties of backward thixoextruded 7075 aluminum alloy, Materials & Design, 36: 557-563.
- [28] Haga, T. and Suzuki, S., (2001). —Casting of aluminium alloy ingots for thixoforming using a cooling slope , Journal of Materials Processing Technology, 118 (1-3): 169-172
- [29] Atkinson, (2008). H.V. and Liu, D., —Microstructural coarsening of semi-solid aluminium alloys , Materials Science and Engineering A, 496 (1-2):439-446
- [30] Bozkurt, U., Birol, Y., Önsel, M., Çakır, O. ve Altıntaş, S., (2005). —Alüminyum alaşımlarında eğimli soğutma plakasında döküm yöntemiyle tiksotropik yapı elde edilmesi , 12. Uluslararası Metalurji Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, Türkiye, 2036-2043
- [31] Taghavi, F., Ghassemi, A., (2009). —Study on the effects of the length and angle of inclined plate on the thixotropic microstructure of A356 aluminum alloy, Materials and Design 30: 1762–1767.

- [32] Atkinson, H. V., Burke, K. and Vaneetveld, G., (2008). Recrystallisation in the semi-solid state in 7075 aluminium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 490 (1-2): 266-276.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Nazım AÇICI
Doğum Tarihi ve Yeri : 21.08.1990 / Bakırköy
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : nazim.acici@yahoo.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzem Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Sayısal	Avcılar Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2017- ...	Mercedes-Benz Türk A.Ş.	Kıdemli Mühendis
2014-2017	Ford Otomotiv A.Ş.	Metod Mühendisi
2013-2014	ASAŞ Alüminyum A.Ş.	Üretim Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Açıcı N., Acar S., Güler K.A., (2017) "A356 Alaşımının Eğimli Soğutucu İle Dökümü ve Yarı-Katı Dövme İşlemi", 8. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul. 294-298,

