

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

A 356 ALÜMİNYUM DÖKÜM
ALAŞIMINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİN
GELİŞTİRİLMESİ

Cenk EKEN

Mart, 2016

İZMİR

**A 356 ALÜMİNYUM DÖKÜM
ALAŞIMINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİN
GELİŞTİRİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Programı**

Cenk EKEN

**Mart, 2016
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

CENK EKEN tarafından **PROF. DR. KAZIM ÖNEL** yönetiminde hazırlanan
“**A356 ALÜMİNYUM DÖKÜMALAŞIMINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİN
GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği
açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Kazım ÖNEL

Yönetici



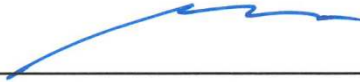
Prof. Dr. İsmail ÖZDEMİR

Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. ESRA DOKUACI

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Yapılan bu çalışmada deneyimlerini paylaşarak çalışmanın tamamlanmasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Kazım ÖNEL'e, fikirleriyle destek olan Yrd. Doç. Dr. Esra DOKUMACI'ya teşekkür ederim.

Tez konusu kapsamında 0170.STZ.2013-1 kodlu san-tez projesinde göstermiş olduğu desteklerden ötürü T.C. Sanayi Bakanlığına, CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş.'ye, Dökümhane bölüm müdürüm Ali DÜNDAR başta olmak üzere deney çalışması kapsamında numunelerin üretilmesinden analizlerin tamamlanmasına kadarki süreç içinde yardımlarını eksik etmeyen mesai arkadaşlarım Uğur AYBARÇ ve Caner KALENDER ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak gerek literatür gerekse deneysel çalışmalarımı kaleme aldığım süre boyunca desteklerini benden esirgemeyen aileme ve sevgili eşim Gülçin EKEN'e sonsuz teşekkür ederim.

Cenk EKEN

A 356 ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMINDA MEKANİK ÖZELLİKLERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Alüminyum alaşımları, havacılık ve otomobil endüstrisinde özellikle enerji tasarrufu sağlamak amacıyla ağırlık ve buna bağlı olarak egzoz gazları salınımının azaltılması açısından önemli bir fayda sağlamaktadır. Bu amaçları sağlamak için alüminyum alaşımları içinden özellikle A356 (Al-7Si-0.3Mg) alaşımı döküm parçaların üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Mekanik yeterlilikleri, hafif oluşu, ısı iletim katsayısı, korozyon direnci gibi özellikleri nedeni ile de çelik malzemelere tercih edilmektedirler. Kullanıldıkları alana göre, seçilen alüminyum döküm alaşımları ile üretilen parçaların yeterli mekanik ve fiziksel özellikleri göstermesi olmazsa olmazdır. Bu nedenle alüminyum döküm alaşımlarında mukavimleşme mekanizmaları son derece önemlidir ve endüstride çeşitli uygulamaları mevcuttur. Gaz giderme işlemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bunun nedeni ise sıvı metal içerisinde kalan hidrojen gazı kabarcıklarının katılaşma ile beraber çökmesi ve yapı içerisinde süreksizlikler oluşturarak malzemenin mukavemetini olumsuz yönde etkilemesidir. Bu sebeple alüminyum içerisinde oluşan gaz porozitesinin giderilmesine yönelik çeşitli uygulamalar mevcuttur. Ultrasonik yöntemle gaz giderme işlemi de bunlardan biridir. Tez kapsamında bu yöntem incelenmiş olup 0170.STZ.2013-1 kodlu san-tez projesi kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ait bulgular paylaşılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda üretilen numunelere ait mekanik test sonuçlarında geleneksel yöntemler ile gaz giderme işlemine göre ortalama %5 iyileşme sağlandığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, gaz giderme, ultrasonik, porozite.

IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM CASTING ALLOY A 356

ABSTRACT

Aluminum alloy provide great advantage on reducing energy requirements and gas emissions due to weight reduction in aviation and automotive industry. Among aluminum alloy types, especially the alloy A356 (Al-7Si-0.3Mg) is commonly used for obtaining these benefits. Its mechanical sufficiency, lightness, thermal conductivity and corrosion resistance makes it desirable compared to steel materials. Due to their area of use, the aluminum alloys must provide sufficient mechanical and physical properties. For this reason, resistance mechanisms on aluminum alloys are very important and there are many applications of them in industry. Degassing is one of the most common methods because of its use in the removal of the negative effects of remaining hydrogen gas bubbles in liquid metal during solidification, that are discontinuity and degradation of resistance. There are many applications for removing gas porosity in aluminum alloys. Ultrasound method is one of these applications which is analyzed in this thesis. The experimental results of the 0170.STZ.2013-1 san-tez project about this method are also provided. The mechanical test results of the experiments show that the degassing with ultrasonic equipment has better results than traditional methods about %5.

Keywords: Aluminium, degassing, ultrasound, porosity

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

BÖLÜM İKİ - ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARI 3

2.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	3
2.1.1 3xx Alaşımları	5
2.2 3xx Alaşımlarında İç Yapının Mekanik Özelliklere Etkisi	6
2.2.1 Tane Boyutunun Etkisi	6
2.2.2 Mikro Yapısal Modifikasyon.....	7
2.2.3 A356 Alaşımlarına Isıl İşlem Etkisi	8
2.2.4 3xx Alaşımlarında Mekanik Özelliklere Etki Eden Faktörler	9
2.2.4.1 A356 Alaşımlarında Porozitenin Mekanik Özelliklere Etkisi	9
2.2.4.2 Çekinti Boşlukları (Porozitesi)	9
2.2.4.3 Ergiyik Alüminyum Alaşımlarında Hidrojen Çözünürlüğü	10
2.2.4.4 Asal Gaz Yardımı ile Gaz Giderme	12
2.2.4.5 Flaks Yardımı ile Oksit Giderme	13
2.2.4.6 Ultrasonik Vibrasyon Yöntemi İle Gaz Giderme	14
2.3 Hidrojen Çözünürlüğü Tespiti.....	18

BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 20

3.1 Deney Tasarımı	20
3.2 Deney Düzenegi	23

3.2.1 Gaz Giderme Ekipmanı	23
3.2.2 Etüv	24
3.2.3 RPT Ekipmanı	25
3.2.4 Çekme Test Cihazı.....	25
3.2.5 Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı	27
3.2.6 Charpy Darbe Test Cihazı	28
3.3 Yapılan Çalışmalar ve Amaçları	28
3.3.1 Bifilm İncelemesi.....	28
3.3.2 Mekanik Testler	29
3.3.3 Makro ve Mikro Yapı İncelemesi.....	29
BÖLÜM DÖRT - DENEY SONUÇLARI.....	30
4.1 Bifilm İncelemesi	30
4.2 Mekanik Testler.....	35
4.3 Charpy Darbe Testi	42
4.4 Sertlik Ölçümü	45
4.5 Makro - Mikro Yapı Analizleri	46
BÖLÜM BEŞ - SONUÇ VE ÖNERİLER.....	51
5.1 Bifilm.....	51
5.2 Mekanik Testler.....	52
5.2.1 Kopma Dayanımı.....	52
5.2.2 Charpy Darbe Testi.....	52
5.2.3 Mekanik Özellikler ile Bifilm İlişkisi.....	53
5.3 Makro Yapı Analizleri.....	53
5.4 Mikro Yapı Analizleri	54
5.5 Öneriler.....	54
KAYNAKLAR	55

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Al-Si faz diyagramı.....	6
Şekil 2.2 Hall – Petch bağıntısına göre malzeme mekanik özelliklerinin tane büyüklüğüne bağlı olarak değişimi	7
Şekil 2.3 Ergimiş alüminyum alaşımından farklı gaz giderme teknikleri ile hidrojen uzaklaştırılması.....	12
Şekil 2.4 Asal gaz ve flaks ile gaz ve oksit giderme işlemi	14
Şekil 2.5 Farklı ultrasonik vibrasyon uygulama uçları	15
Şekil 2.6 Ultrasonik yöntem uygulanması esnasında titreşim sonucu sıvı metal içerisinde gerçekleşen gaz difüzyonunun teorik olarak gösterimi	16
Şekil 2.7 Tane boyutu ve intermetalikler üzerinde titreşim genliği etkisi	16
Şekil 2.8 19.8KHz frekansta farklı sıcaklık ve elektrik gücüne karşılık tane boyutunda meydana gelen değişim	17
Şekil 2.9 19.8 KHz frekansta ötektik Si partikülleri alanı ve AlSi9Cu3 numunelerin % gerilmesi.....	17
Şekil 2.10 İndirgenmiş basınç testi aparatının şematik görünüşü	18
Şekil 2.11 İndirgenmiş basınç testi sonrası, farklı hidrojen çözünürlüklerine sahip numunelerde oluşan poroziteler	19
Şekil 3.1 Deneysel çalışma adımları	20
Şekil 3.2 5 kollu feder numune kalıbı	22
Şekil 3.3 Bifilm incelemeleri için kullanılan RPT numune kalıbı	23
Şekil 3.4 Gaz giderme ekipmanı	24
Şekil 3.5 Etüv	24
Şekil 3.6 RPT ekipmanı	25
Şekil 3.7 Çekme test numunesi ve boyutları (a) ile Çekme test cihazı (b)	26
Şekil 3.8 Brinell sertlik ölçüm cihazı	27
Şekil 3.9 Charpy darbe test cihazı.....	28
Şekil 4.1 Metal miktarına bağlı farklı sıcaklıklarda elde edilen bifilm uzunluk değerleri.....	30

Şekil 4.2 Metal miktarına bağlı farklı sıcaklıklarda elde edilen bifilm alan değerleri	31
Şekil 4.3 4 kg sıvı metal miktarında farklı sıcaklıklarda ultrasonik işlemin seri üretim gaz giderme işlemi öncesi ve sonrası uygulama sonrası toplam alan değerleri.....	34
Şekil 4.4 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı akma dayanımı değişimleri.....	35
Şekil 4.5 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı kopma dayanımı değişimleri.....	36
Şekil 4.6 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı % uzama değişimleri	37
Şekil 4.7 Farklı sıcaklıklarda kopma dayanımı - bifilm karşılaştırması	40
Şekil 4.8 Charpy darbe testi numuneleri	42
Şekil 4.9 Charpy darbe testi sonuçları.....	43
Şekil 4.10 4 Kg lık seri üretim ve laboratuvar denemelerine ait charpy darbe testi sonuçları	44
Şekil 4.11 Sertlik ölçümü test sonuçları.....	45
Şekil 4.12 Soldan sağa 0, 60, 180, 300 sn lik denemelerin makro yapı numuneleri .	47
Şekil 4.13 Deneme numunelere ait mikro yapı görüntüleri	49

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	5
Tablo 2.2 A356 alaşımının kimyasal kompozisyonu	5
Tablo 2.3 Farklı gaz giderme uygulamaları sonucu elde edilen malzeme özellikleri	12
Tablo 3.1 Sıcaklık – Zaman – Sıvı metal miktarı değişkenlerine göre deney tasarım adımları.....	21

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, havacılık ve otomobil endüstrisinde özellikle enerji tasarrufu sağlamak amacıyla ağırlık ve buna bağlı olarak egzoz gazları salınımının azaltılması açısından önemli bir fayda sağlamaktadır. Bu amaçları sağlamak için alüminyum alaşımları arasında özellikle A356 (Al-7Si-0.3Mg) alaşımı döküm parçaların üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çünkü bu Al-Si alaşımı düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek akışkanlık-düşük çekme payı, yüksek korozyon dayanımı, kaynak edilebilirlik, düşük termal genleşme katsayısı ve yeniden işlenebilirlik özellikleri ile oldukça dikkat çeken bir alaşımdır (Han, 2002). Ancak bu alaşım kullanılarak yapılan dökümler dövülerek elde edilen ürünlerle karşılaştırıldığında önemli miktarda yapısal bozukluklar (porozite vb.) içerebileceğinden dolayı değişken mekanik özellikler göstermektedir (Colley, 2011; Tiryakioğlu ve diğer, 2004).

Porozite alüminyum alaşımlarının dökümünde en önemli hatalardan biri olarak kabul edilmektedir. Yapı içerisinde porozitenin yer alması dökümün mekanik özelliklerini ve korozyon dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Dökümde porozite, katılaşma sırasında gazın çözeltide çökmesinden yada katılaşma sırasında hacimsel çekintileri telafi etmek için sıvı metalin taneler arası bölgeleri beslemesindeki yetersizlikleri nedeniyle meydana gelmektedir (Xu, 2004). Alüminyum dökümlerinde gaz porozitesinin ana kaynağı ise ergimiş alüminyumda oldukça yüksek çözünürlüğe sahip tek gaz olan hidrojenidir. Hidrojenin sıvı metale giriş yollarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz (Demircioğlu, 2002);

- Fırın etrafındaki atmosferde bulunan nem,
- Fırın atmosferinde bulunan su buharı,
- Refrakterin içerisinde bulunan nem,
- Alaşım elementleri ya da hammaddelerde bulunan nem,
- Ergitme işlemleri sırasında kullanılan aletler/donanımdaki nem,
- Kullanılan flakslardan gelebilecek nem,

- Alaşım elementleri yada hammaddelerin içyapısından gelen hidrojen,
- Hidrokarbon içeren bileşiklerin yanması, yağlı yada boyalı hurdalar ile.

Hidrojen gazının sıvı alüminyum içerisinde uzaklaştırılmaması sonucu mekanik özellikler yapı içerisinde oluşan süreksizlikler nedeni ile olumsuz etkilenecektir. Bu nedenle alüminyum döküm alaşımlarında döküm öncesi sıvı metalin temizlenmesi amacı ile çeşitli yöntemler ile gaz giderme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında A356 alaşımının mekanik özelliklerinin geliştirilmesine yönelik; 0170.STZ.2013-1 kodlu san-tez projesi kapsamında yapılan ultrasonik yöntemle gaz giderme işlemi çalışması ve sonuçları irdelenmektedir.

BÖLÜM İKİ

ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum doğada bolca bulunan bir hafif metaldir ve mühendislik uygulamalarında çeliklere göre tercih edilme oranı gün geçtikçe artmaktadır. Bunun nedeni çelikten 3 kat daha hafif oluşu ve istenilen mekanik özellikleri alaşımları sayesinde karşılayabilmesidir. Alüminyum düşük özgül ağırlığa ($2,7g/cm^3$) sahip hafif metaller grubuna giren bir metaldir. Düşük özgül ağırlığı, elektrik ve ısı iletkenlik özelliği, korozyon direnci ve kolay işlenebilme özellikleri nedeni ile başta otomotiv ve havacılık sektörü olmak üzere birçok sektörde tercih edilmektedir (Çolak ve Kayıkcı, 2009).

Alüminyum tek başına yukarıda saydığımız özellikleri gösteremez. Bu nedenle diğer metaller ile oluşturduğu alaşımları ihtiyaca göre belirlenir ve kullanılır.

2.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikro yapısına 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 alaşımları genellikle kütük halinde dökülür ve daha sonra plastik deformasyona maruz bırakılarak istenilen nihai şekli verilir. Döküm alaşımları ise ergitme işlemi sonrası üretilecek parça şekline sahip kalıba dökülür ve katılaştırılır (Chen, 2014).

Dövme yöntemi ile üretilen ürünlerde döküm yöntemi ile üretilenlere nazaran daha kararlı bir içyapı mevcuttur. Çünkü plastik deformasyon sonucu içyapıda bulunan süreksizlikler giderilmektedir. Döküm yöntemi ile yapılan üretimlerde ise içyapıda bulunan süreksizlikleri gidermek ve istenilen yapının elde edilmesi amacı

ile bazı önlemler ve işlemler gereklidir, mekanik özellikleri iyileştirme amacıyla döküm alaşımlarının bazıları ısıtılma prosesine tabi tutulur (Colley, 2011).

Alüminyum alaşımlarının dökülebilir olup olmadığı;

- Akışkanlık,
- Sıcak yırtılma eğilimi,
- Hacimsel çekme özelliklerinin değerlendirilebildiği özel numune kalıpları kullanılarak belirlenmektedir.

Döküm alaşımlarının mekanik özellikleri;

- Ergitme ve döküm pratiklerinin sıkı kontrolü,
- Empürite seviyesinin kontrolü,
- Tane boyutu kontrolü –tane inceltme,
- Ötektik modifikasyon ile çok daha iyi karakterize edilmektedir.

Kullanım alanı olarak bakıldığında ise genel kullanım amacıyla üretilen alüminyum döküm parçalarında alaşım seçimi;

- İşlenebilirlik,
- Korozyon direnci,
- Sertlik,
- Mekanik özellikler gibi karakteristiklere göre yapılmaktadır.

Tablo 2.1de alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması mevcuttur (Eker, 2008).

Tablo 2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Eker, 2008)

	Dövme Alüminyum Alaşımları	Döküm Alüminyum Alaşımları
1xx.x	Saf	Saf
2xx.x	Cu	Cu
3xx.x	Mn	Si-Cu-Mg
4xx.x	Si	Si
5xx.x	Mg	Mg
6xx.x	Mg-Si	-
7xx.x	Zn	Zn
8xx.x	Li	Sn

2.1.1 3xx Alaşımları

A356 alaşımları 3xx alaşımları sınıfında yer alan bir alüminyum döküm alaşımıdır. Ana alaşım elementi silisyumdur ve alaşımın akışkanlığı ile mukavemetini artırır. Alaşım içerisinde silisyumun yanında ağırlıkça %0,3 oranında magnezyum bulunur. Alaşım içerisindeki magnezyum silisyum ile Mg_2Si çökeltisi oluşturur ve ısıtıl işlem sonrası mukavimleşme mekanizmasında rol oynar. Alaşımın kimyasal kompozisyonu Tablo 2.2 de görülmektedir (Chen, 2014).

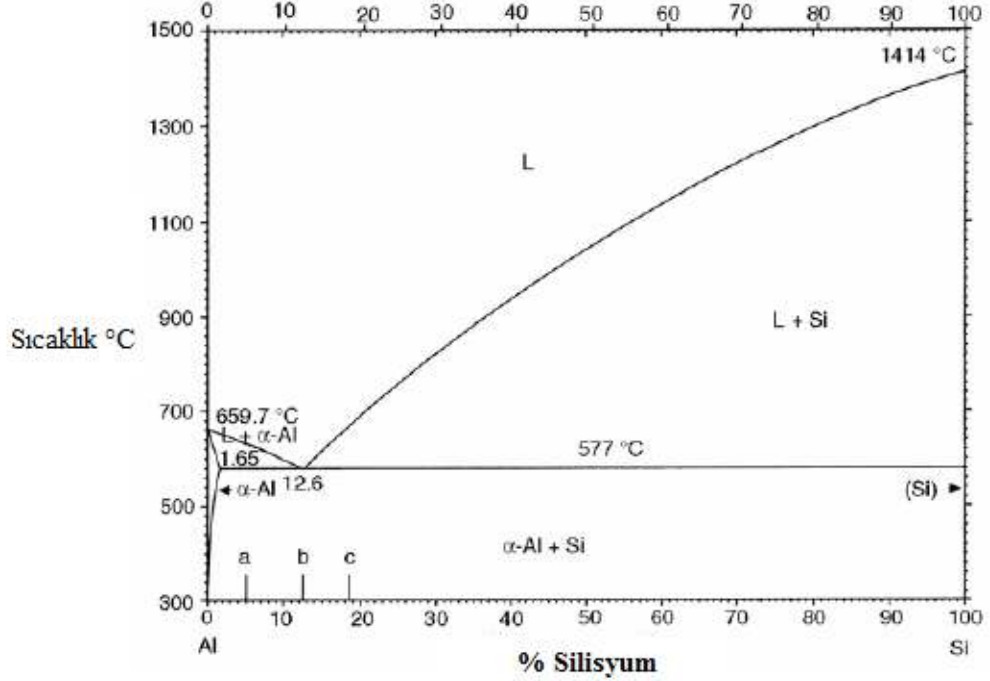
Tablo 2.2 A356 alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chen, 2014).

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Geri kalan	Al
A356	6,5 - 7,5	0,2	0,2	0,1	0,25 - 0,45	0,1	0,2	0,2	Geri kalan

A356 alaşımı karmaşık şekle sahip parçaların kolay bir şekilde dökülmesini sağlayacak akışkanlık özelliklerine ve katılaşma mekanizmasına sahiptir.

Şekil 2.1 de alüminyum – silisyum faz diyagramı mevcuttur. Genellikle birincil silisyum fazlarının oluşumunu önlemek için silisyum oranı ötektik noktayı (%12,6)

geçmemektedir. Nedeni ise birincil silisyum fazının oldukça sert oluşu ve buna bağlı olarak alüminyum alaşımının işlenebilirliğini azaltmasıdır.



Şekil 2.1 Al-Si faz diyagramı (Chen, 2014)

2.2 3xx Alaşımlarında İç Yapının Mekanik Özelliklere Etkisi

2.2.1 Tane Boyutunun Etkisi

Hall – Petch bağıntısına göre genellikle malzemenin mukavemeti tane boyutu ile bağıntılıdır.

$$\sigma_a = \sigma_0 + kd^{-1/2} \text{ burada;}$$

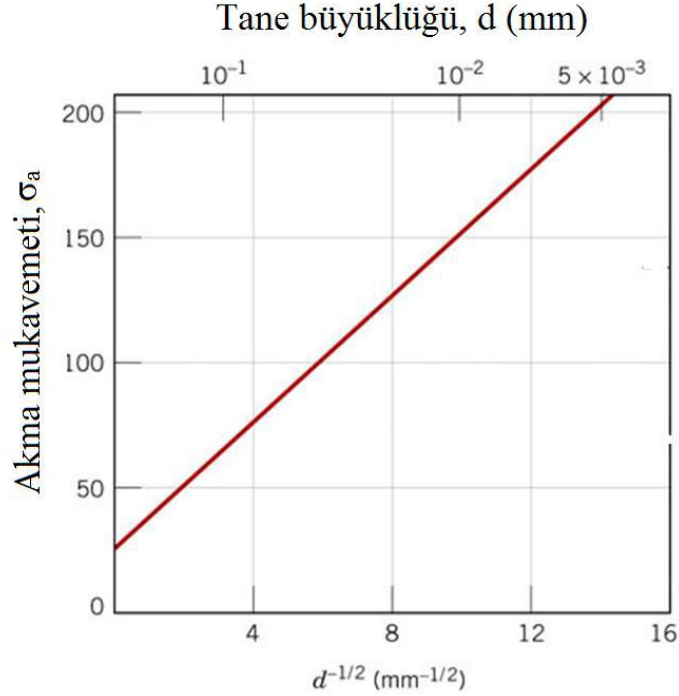
σ_a = akma mukavemeti,

σ_0 = iç sürtünme gerilmesi

k = malzeme sabiti

d = ortalama tane büyüklüğüdür (Chen, 2014).

Hall - Petch bağıntısından elde edilen çıkarımlar Şekil 2.2 de belirtilmiş olup tane boyutunun küçülmesine bağlı olarak akma mukavemetindeki artışı göstermektedir.



Şekil 2.2 Hall – Petch bağıntısına göre malzeme mekanik özelliklerinin tane büyüklüğüne bağlı olarak değişimi

Tane inceltme mekanizmaları heterojen bir katı faz oluşturur. Aşırı soğuma bölgeleri genellikle katılaşma mekanizması boyunca oluşur. Genel olarak büyük aşırı soğuma bölgeleri büyük tane yapısı oluşmasına neden olur. Tane inceltici katkı elementleri eklemek aşırı soğuma bölgelerini ortadan kaldırarak tane incelmeye bu şekilde yardımcı olur. Bunun sonucunda da mekanik özelliklerin gelişmesi sağlanır (Chen, 2014).

2.2.2 Mikro yapısal Modifikasyon

Modifikasyon işlemi genellikle alüminyum döküm alaşımlarında mekanik özellikleri iyileştirmek için gerçekleştirilir. Modifikasyon prosesi iğnesel yapıdaki silisyum fazının küresel hale dönüştürülmesidir. A356 alaşımlarında sodyum

(~ %0,01) veya stronsiyum (~ %0,02) mekanik özellikleri arttırıcı modifikasyon elementleri olarak kullanılmaktadır (Donthamsety, 2010).

2.2.3 A356 Alaşımlarına Isıl İşlem Etkisi

Alüminyum alaşımları için en kullanışlı proses çökelme sertleştirme ısıdır. Alüminyum döküm alaşımlarından 2xx, 3xx ve 7xx serileri ile dövme alaşımlarından 2xxx, 6xxx, 7xxx serisi alaşımlar bu metot ile sertleştirilebilmektedir. En çok kullanılan ısı işlem çeşidi ise T6 ısıdır. T6 ısı işlemi 3 temel adımdan oluşmaktadır (Büyükuncu, 2010).

Solüsyona alma prosesi (1. Aşama) çökelme sertleştirmesini sağlayacak alaşım elemanlarının alüminyum ana faz içine alınması aşamasıdır. Alaşım solvüs sıcaklığı üzerine ısıtılır ve homojen bir katı eriyik oluşana kadar bu sıcaklıkta tutulur. Çökelti ve segregasyonların ana faz içerisinde tamamen çözünmesi sağlanır.

Su verme prosesinde (2. Aşama) elde edilen içyapının aynen muhafaza edilmesi için malzeme hızlı bir şekilde soğutulur. Burada amaç Solüsyona alma adımında yüksek sıcaklığa bağlı difüzyon sonucu alüminyum ana faz içinde çözünen intermetalik bileşiklerin geri difüzyon ile çökelmesini engellemek amacıyla sıcaklığın aniden düşürülmesi ve difüzyonun engellenmesidir.

Yaşlandırma prosesinde (3. Aşama) ise alaşım aşırı doymuş ana faz içinde intermetalik çökelti oluşturularak malzemenin mukavimleşmesi sağlanır. Bu son aşamada malzeme kritik bir sıcaklıkta (~ 160°C) birkaç saat tutulur. Burada aşırı doymuş çökeltiden kasıt solüsyona alma prosesi esnasında gerçekleşen difüzyon sayesinde elde edilen Al-Si-Mg bileşikleridir (Colley, 2011; Chen, 2014)

2.2.4 3xx Alaşımlarında Mekanik Özelliklere Etki eden faktörler

2.2.4.1 A356 Alaşımlarında Porozitenin Mekanik Özelliklere Etkisi

Dökümde metal temizliği performansa etki eden en önemli faktördür. Döküm prosesi boyunca porozite ve inklüzyonların azaltılması dökülmüş ürünün mekanik özelliklerinin artmasını sağlayacaktır (Savaş, 2005).

Gaz porozitesi ve çekinti porozitesi dökümde en çok karşılaşılan hatalardır. Gaz porozitesi gaz kabarcıkları sıvı metal içerisinde hapsediği zaman ortaya çıkar ve şekli genellikle daireseldir. Uygun gaz giderme metodu, uygun yolluk dizaynı ve iyi bir döküm tecrübesi ile minimize edilebilir. Çekinti porozitesi katılaşma esnasında alüminyum alaşımı içerisinde oluşan büzülme sonucu meydana gelir ve düzensiz bir şekle sahiptir. Çekinti porozitesi; uygun soğuma şartlarının sağlanması, uygun besleyici tasarımı ile küçültülebilir ve homojen dağılması sağlanabilir. Bu önlemler döküm parçanın yorulma özelliklerini geliştirici etkiye sahiptir. (Tavitas ve diğer, 2008)

2.2.4.2 Çekinti Boşlukları (Porozitesi)

Çekinti boşlukları genellikle yolluk, besleyici bölgeleri ile merkez noktalarda görülür. Sebebi de katılaşan bölgenin etrafının tamamen katılaşmış olması ve bu nedenle katılaşma esnasında oluşan çekintiyi besleyecek sıvı metal geçişi olmamasıdır. Bu nedenle alüminyum dökümlerinde katılaşmayı beslemeyi kesmeyecek şekilde oluşturmak gerekir. Çünkü katılaşma gerçekleştikten sonra oluşan çekintileri besleyerek doldurmak imkânsızdır.

Çekinti boşlukları aynı zamanda aşırı kalın ve ince bölgelerde de sıklıkla görülebilen bir döküm hatasıdır.

2.2.4.3 Ergiyik Alüminyum Alaşımlarında Hidrojen Çözünürlüğü

Ergimiş alüminyum içerisinde önemli ölçüde hidrojen çözünebilir ve çözünürlük oranı sıcaklığa bağlıdır. Ergimiş metal içinde çözünmüş hidrojen (atomik H), alüminyum alaşımlarında gaz porozitesinin ana kaynağı olarak görülmektedir.

Hidrojen, havada çözünmüş su buharından gelmektedir ve bu nedenle hidrojen kaynaklı gaz problemleri sıcak ve nemli iklimlerde daha yoğun gözlenmektedir. Katılaşma boyunca metal soğurken alüminyum içerisindeki hidrojen çözünürlüğü sıcaklığın azalmasına bağlı olarak azalır ve çözünmüş olan hidrojen atomlarının çökmesi ile porozite oluşumu başlar. Bu tip poroziteye gaz porozitesi denir.

Katılaşma süresince hidrojen çökmesi 4 aşamada meydana gelmektedir. Bu aşamalar şu şekildedir;

- 1) Ergimiş metal içinde hidrojen atomlarının difüzyonu,
- 2) Zamanın ve soğumanın bir fonksiyonu olarak kritik alt tanelerin oluşumu,
- 3) Sürekli büyüme için gerekli kritik boyutu aşan kararlı çökeltilerin rastgele oluşumu,
- 4) Serbest halde kalan çözünmüş hidrojen atomlarının çökelmiş gaz kabarcıklarına doğru difüze olduğu süre boyunca büyümenin devam etmesidir. (Kaufman ve Rooy, 2004; Xu ve diğer, 2004)

Gaz porozitesinin mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisi literatürde kanıtlanmıştır (Eskin, 2001).

Ergimiş alüminyum içindeki çözünmüş hidrojen seviyesinin kontrolü, yüksek kaliteli bir üretim yapabilmek için büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla hidrojen kaynaklı gaz porozitesini azaltıcı en etkili teknik, gaz giderme işlemidir. Gaz giderme işlemi çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Bunlar;

- 1) Gaz giderici tablet kullanımı,
- 2) Vakum yöntemi ile gaz giderme işlemi,
- 3) Asal gaz ve flaks (cüruflaştırıcı) kullanımı,
- 4) Ultrasonik vibrasyon ile gaz giderme işlemi.

Bunlardan gaz giderici tablet kullanımı kimyasal reaksiyonlar sonrası açığa çıkan kanserojen gazlar nedeni ile günümüzde yaygın bir yöntem değildir.

Vakum tekniği de gaz giderme uygulaması için kullanılabilir olmasına rağmen yüksek teknik donanım gereksinimleri ve maliyetli olması nedeniyle endüstride nadir olarak uygulanmaktadır.

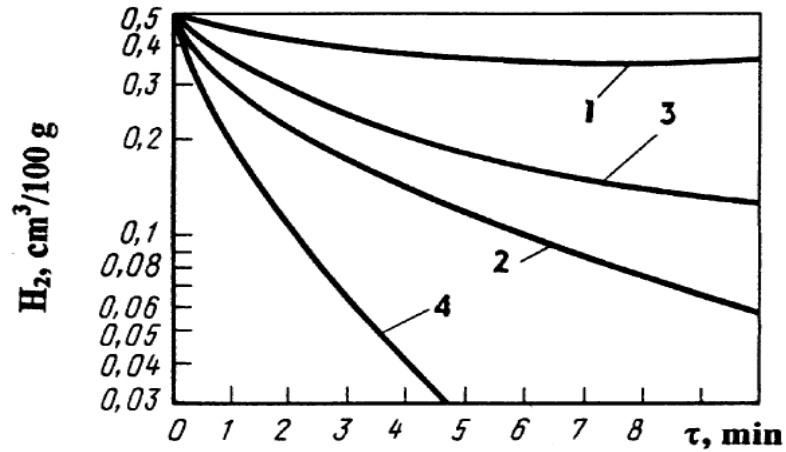
Asal gaz ve flaks kullanımı endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan yöntemdir.

Ultrasonik vibrasyon yöntemi ile gaz giderme prosesi ile diğer metotlara göre daha homojen bir inklüzyon dağılımına sahip sıvı metal elde edilir. Çünkü; ultrasonik karıştırma esnasında oluşan kavitasyon balonları sayesinde sıvı metal içerisinde bulunan hidrojen gazları uzaklaştırılırken sıvı metal içerisinde bulunan oksit filmleri de kırılarak homojen bir şekilde dağılır.

Eskin, 2001 yılında yapmış olduğu çalışmada farklı teknikler uygulayarak gaz giderme işleminin etkinliğini incelemiş ve Tablo 2.3 ile Şekil 2.3 te bulunan verileri elde etmiştir. Bu verilerden de görüldüğü üzere ultrasonik yöntem ile gaz giderme işlemi sonucu elde edilen veriler diğer metotlara göre daha avantajlıdır.

Tablo 2.3 Farklı gaz giderme uygulamaları sonucu elde edilen malzeme özellikleri (Eskin, 2001)

Metot	$H_2(\text{cm}^3/100 \text{ gr})$	Yoğunluk (gr/cm^3)	% Porozite Sayısı	Çekme Dayanımı (Mpa)	% Uzama
Uygulama yapılmamış sıvı Al.	0,35	2,660	4	200	3,8
Ultrasonik Uygulama	0,17	2,706	1 – 2	245	5,1
Vakum	0,20	2,681	1 – 2	228	4,2
Asal gaz	0,26	2,667	2 – 3	233	4,0
C_2Cl_6 Tablet	0,30	2,665	2 – 3	212	4,5
Flaks	0,26	2,663	3 – 4	225	4,0



Şekil 2.3 Ergimiş Alüminyum Alaşımından Farklı Gaz Giderme Teknikleri ile Hidrojen Uzaklaştırılması;1) Flaks ile, 2) Ultrasonik Uygulama, 3) Vakum Uygulaması, 4) Vakum Altında Ultrasonik Uygulama (Eskin, 2001).

2.2.4.4 Asal Gaz Yardımı İle Gaz Giderme

Sıvı alüminyumda çözünmüş olan hidrojeni gidererek yüksek kaliteli döküm yapabilmek için yaygın olarak kullanılan en temel adımlardan biridir.

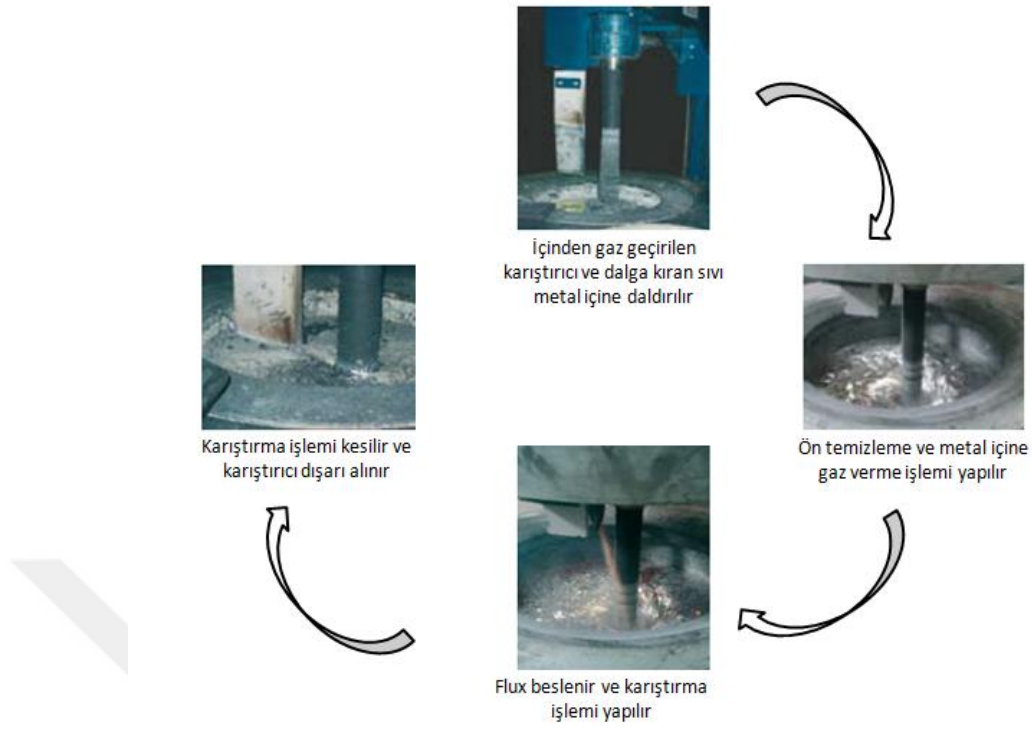
Gaz gidermede yöntem sıvı metal içerisine asal bir gaz (Azot veya Argon) verilmesi şeklindedir. Asal gaz sıvı metal içerisine enjekte edildikten sonra hidrojen

yukarı çıkan gaz kabarcıklarının içerisinde difüze olur. Sıvı metal içerisinde gaz verme yöntemlerinde en iyi sonuçlar döner rotor yardımı ile gaz giderme yönteminde ortaya çıkmaktadır. Çünkü döner rotor yardımı ile gaz kabarcıkları sıvı metal içerisinde girdikleri anda eşit oranda dağılır ve yukarı çıkarken sıvı metalin tamamını süpürerek hidrojen gazını beraberinde dışarı atar.

2.2.4.5 Flaks yardımı ile Oksit Giderme

Metal temizliği uygun miktarda flaks kullanımı ile arttırılabilir. Sıvı metal içerisinde alüminyum oksit (Al_2O_3) partikülleri ve yüzeyde oksit film tabakası bulunur ve flaks bu oksitlerin giderilmesi için kullanılır. Oksitlerin yoğunluğu sıvı alüminyumdan yüksek olmasına rağmen yüzey gerilimi ve absorblanmış gazlardan dolayı yüzeye yakın yerlerde birikirler. Egzotermik reaksiyon gösteren flakslar oksijeni serbest bırakırlar ve cüruf içerisindeki metalik alüminyumun bir kısmını yakarak ısı açığa çıkarırlar.

Geleneksel flakslama metodu sıvı metal yüzeyine serpmeye yapılarak manuel olarak karıştırmadır. Ancak bu şekilde yapılan işlemde tam verim alınamaz. Bu nedenle modern flakslama metodu olan enjeksiyonla sıvı metal içerisine flakslama işlemi geliştirilmiştir. Tipik bir enjeksiyon ekipmanı; toz halindeki flaksı inert bir gaz ile karıştırarak üfleme borusundan sıvı metal içerisine geçmesini sağlayan bir flaks toz besleyicisi içerir. Bu nedenle flaks enjeksiyon yönteminde sadece oksitler giderilmez aynı zamanda gaz giderme işlemi de uygulanmış olur. Şekil 2.4 te geleneksel flakslama ve asal gaz ile gaz giderme işlem adımları verilmiştir.

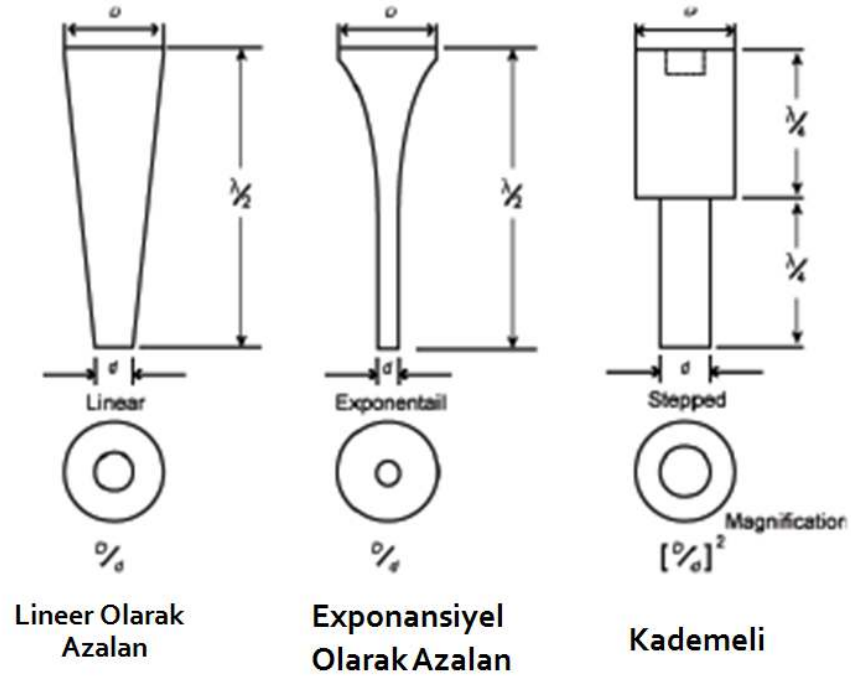


Şekil 2.4 Asal gaz ve flaks ile gaz ve oksit giderme işlemi.

2.2.4.6 Ultrasonik Vibrasyon Yöntemi İle Gaz Giderme

Bu yöntemde sıvı metal içerisine daldırılan bir prob (sonotrod) yardımı ile sıvı metale ultrasonik titreşim uygulanır, sıvı içinde hidrojen çökmesi sağlanır, çökelen hidrojenin kabarcıklar oluşturarak sıvı metal yüzeyine çıkması, yukarı doğru yükselirken oksit parçacıklarını da yüzeye sürüklemeleri gerçekleştirilir (Puga ve diğer, 2011).

Ultrasonik yöntemde sıvı metal içerisine daldırılan problemler farklı fiziksel şekillere sahiptir. Problemler arasındaki şekil farklılığı ile sabit frekans, elektrik gücü ve işlem uygulama süresinde, sıvı metal üzerinde farklı ultrasonik işlem sonuçları elde etmemizi sağlar. Bunun açıklaması prob alt - üst çapları arasındaki ilişkidir ve bu ilişki Şekil 2.5 te verilmiştir.

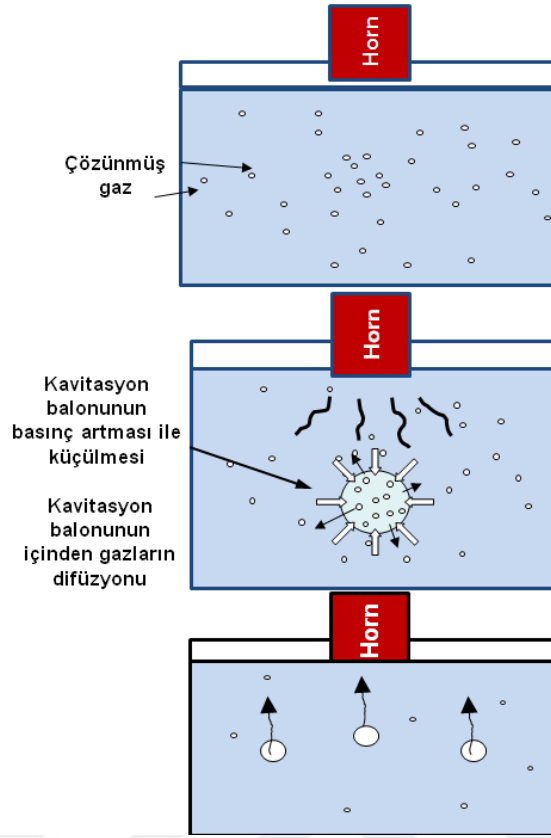


Şekil 2.5 Farklı ultrasonik vibrasyon uygulama uçları (Perkins, 1988)

Ultrasonik yöntemle gaz giderme işlemi; yapı içindeki hidrojen gazı ve oksitlerin giderilmesinin yanı sıra nihai ürünün tane boyutunu azaltma, eş eksenli tanelerin oluşumu, malzeme homojenliğini artırma, segregasyon kontrolü ve ikincil fazların ve inklüzyonların uniform olarak dağılımını da sağlamaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

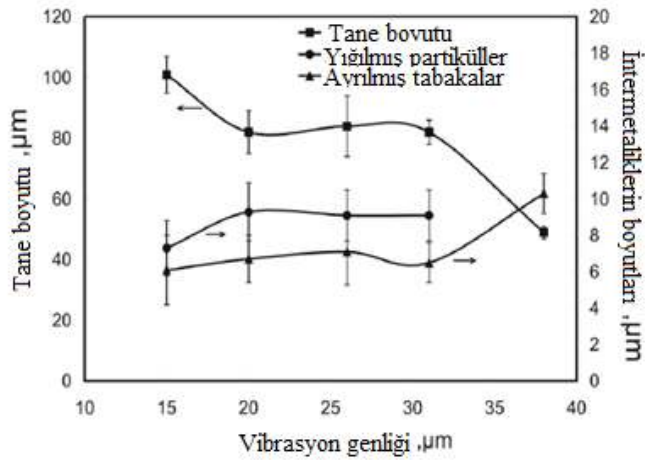
Ultrasonik yöntemde sıvı içinde frekanslar halinde basıncın uygulanması ve kaldırılması işlemi esas alınmaktadır. Bu amaçla hidrojenin sıvı metal içinde oluşan ve büyüyen balonların (bubbles) içine doğru difüzyonunu hızlandıran ve çok sayıda boşluk oluşmasına yol açan değişken bir basınç meydana gelmektedir (Kaufman ve Rooy, 2004).

Şekil 2.6 da ultrasonik işlem uygulanması sonucu oluşan kavitasyon balonunun büyümesi, hidrojen gazlarının kavitasyon balonu içerisine difüze olması ve sıvı metal yüzeyine çıkması temsil edilmiştir.



Şekil 2.6 Ultrasonik yöntem uygulanması esnasında titreşim sonucu sıvı metal içerisinde gerçekleşen gaz difüzyonunun teorik olarak gösterimi (Perkins, 1988)

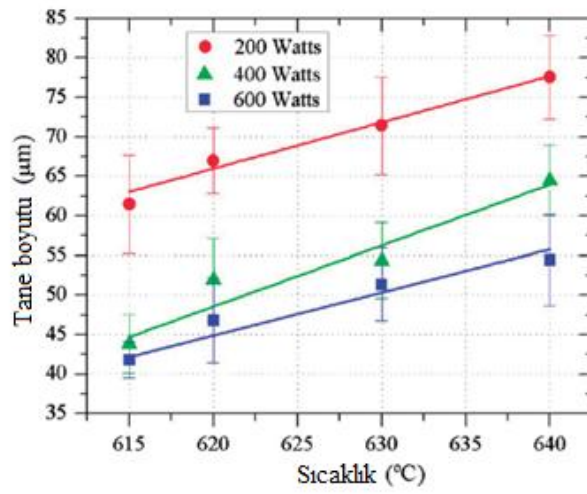
Eskin, 2001 yılında yapmış olduğu bir çalışmada farklı genliklerde uygulanan ultrasonik yöntemin malzemenin tane boyutu ve intermetaliklerin boyutlarının belirlenmesini incelemiş ve Şekil 2.7 de görülen sonuçları elde etmiştir.



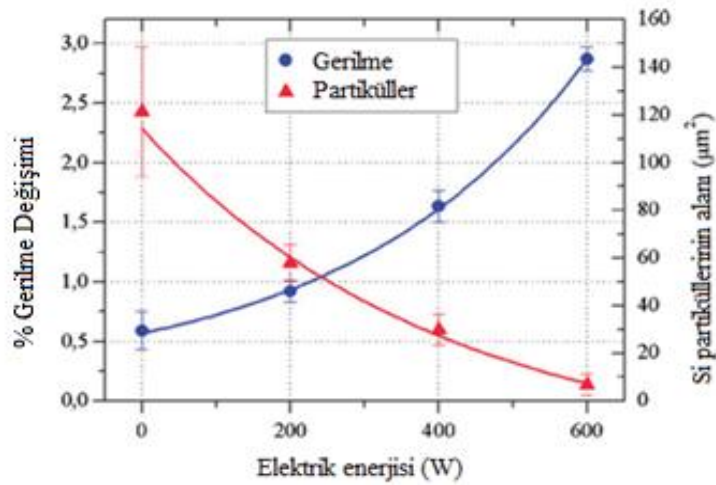
Şekil 2.7 Tane boyutu ve intermetalikler üzerinde titreşim genliği etkisi (Eskin, 2001)

Buradan görüldüğü üzere vibrasyonun genliği arttıkça tane boyutunda bir azalma meydana gelmektedir.

Puga ve diğerleri, 2011 yılında AlSi9Cu3 alaşımı üzerinde yapmış oldukları çalışmalarında ise mikro yapı morfolojisinin ve alaşımın mekanik özelliklerinin ultrasonik uygulamada kullanılan titreşim yoğunluğuna, ergiyeğin sıcaklığına ve bunların optimum değerlerde uygulanmasına bağlı olarak ultrasonik uygulamanın sağlayacağı avantajları inceleyerek Şekil 2.8 ve 2.9 da verilen sonuçları elde etmişlerdir.



Şekil 2.8 19.8 kHz frekansta farklı sıcaklık ve elektrik gücüne karşılık tane boyutunda meydana gelen değişim (Puga ve diğerleri, 2011)



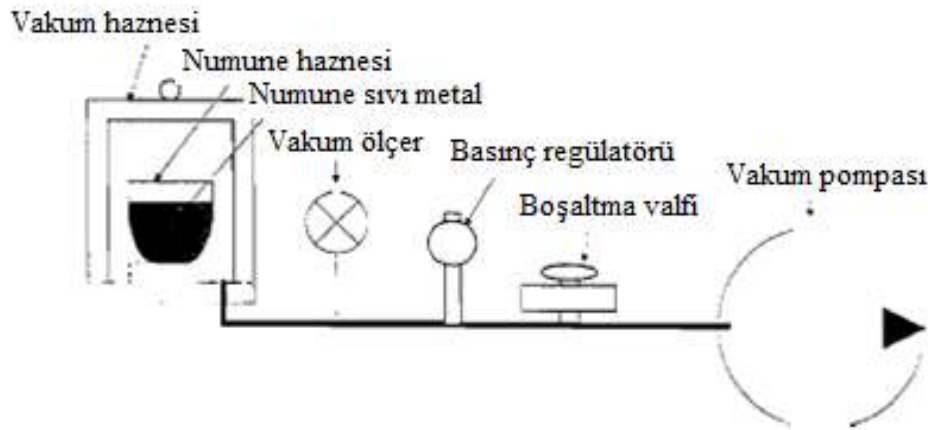
Şekil 2.9 19.8 KHz frekansta ötektik Si partikülleri alanı ve AlSi9Cu3 numunelerin % gerilme değişimi (Puga ve diğerleri, 2011)

Buradan da anlaşılacağı üzere ultrasonik yöntemin sıvı alüminyum alaşımına uygulanması sonucu nihai ürün üzerinde olumlu etkileri olmaktadır. Ancak uygulamanın birden fazla değişkeni vardır ve bunların yapılacak uygulama için optimum olanlarının belirlenmesi gerekmektedir.

2.3 Hidrojen Çözünürlüğü Tespiti

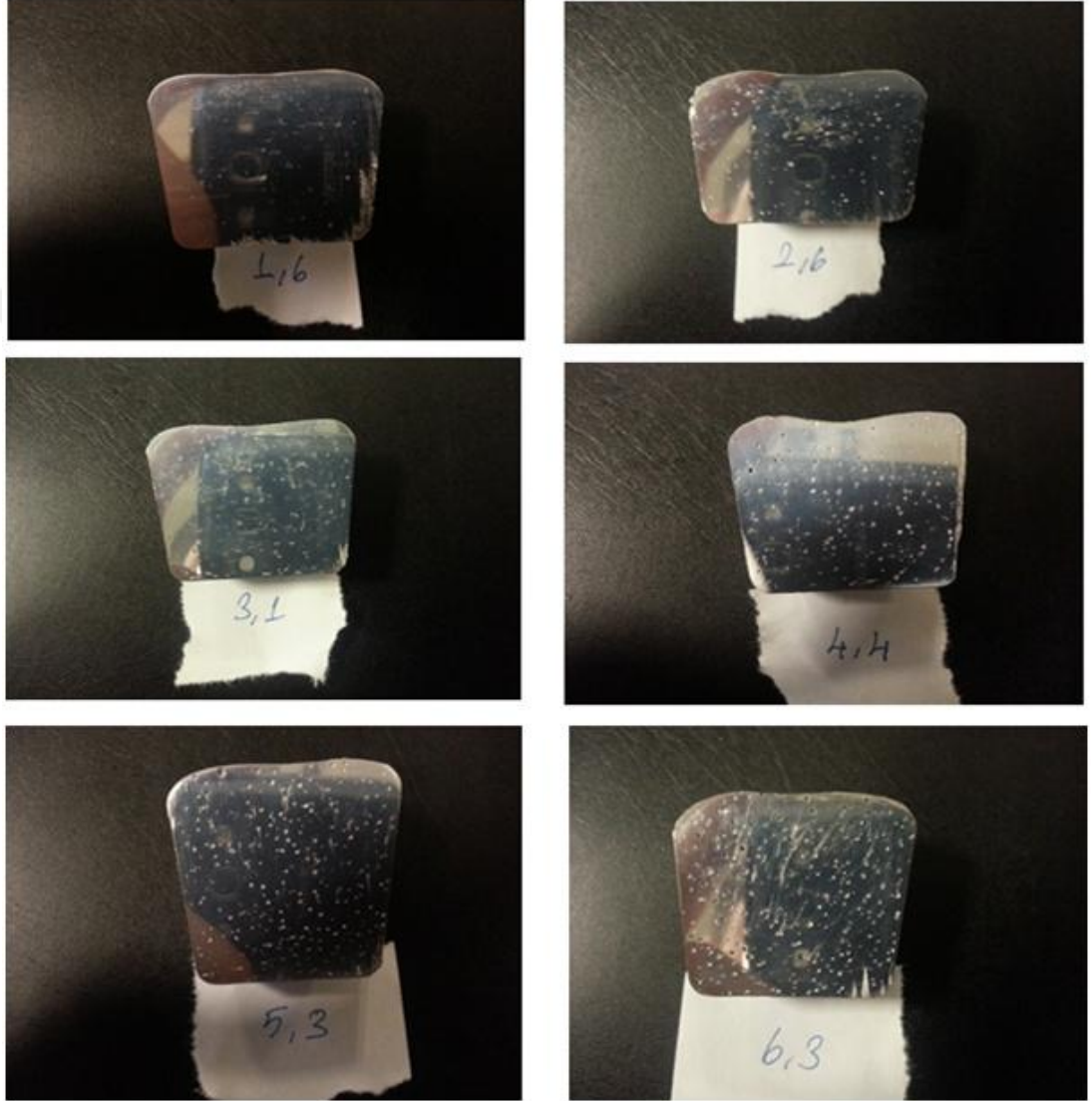
Sıvı alüminyum alaşımları içerisinde çözünmüş olan hidrojenin yüzdesel olarak değerini belirlemek için kullanılan en yaygın yöntem indirgenmiş basınç testi (RPT) yöntemidir. Aynı zamanda vakum yoğunluk testi (VDT) olarak ta bilinir. Test yapılırken sıvı alüminyum içerisinden 100 – 200 gr lık bir numune alınır ve seramik veya metal bir potada vakum altında soğumaya bırakılır. Soğuma esnasında vakum etkisi nedeni ile alüminyum içerisinde çözünen hidrojen kabarcıkları çekirdeklenir.

Vakum uygulama süresince meydana gelen porozite boşluklarının büyüklükleri aynı gaz çözünürlüğünde atmosfer basıncı altında katılaşan bir numune içerisinde oluşan porozite boşluklarından daha iri tanelidir. Bunun nedeni ise vakum altında sıvı alüminyum alaşımı içerisinde bulunan hidrojen kabarcıklarının metal dışına hızlı bir şekilde çıkmak için yönlendirilmesi, bir araya gelmesi ve bu esnada katılaşma sırasında oluşturdukları gaz boşluklarıdır. Bu yöntemle büyük tonajlı bir ergiyik içerisinden küçük bir numune alarak hidrojen çözünürlük oranı belirlenebilir. Şekil 2.10 da klasik bir indirgenmiş basınç test aparatı temsil edilmiştir (Chen, 2014).



Şekil 2.10 İndirgenmiş basınç testi aparatının şematik görünüşü (Chen, 2014).

İndirgenmiş basınç testi uygulanan sıvı metal içerisinde çözünmüş olan hidrojen gazı ne kadar fazla ise numune içerisinde çekirdeklenme o derece fazla olacak ve numuneden kesit alındığında bunlar açık bir şekilde görülecektir. Şekil 2.11 de farklı hidrojen gazı çözünürlüğüne sahip numunelerden alınmış kesitler verilmiştir.

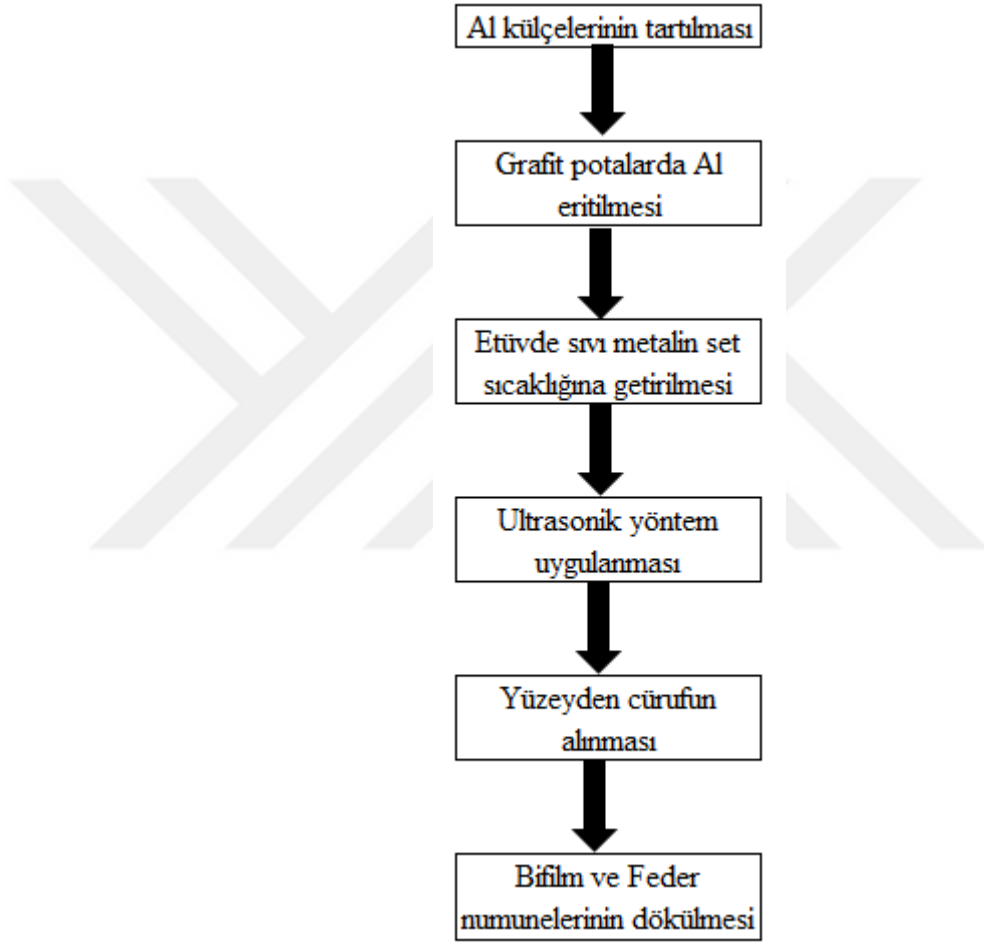


Şekil 2.11 İndirgenmiş basınç testi sonrası, farklı hidrojen çözünürlüklerine sahip numunelerde oluşan poroziteler (Numunelerin altında bulunan değerler numune ölçüm sonucu elde edilen % H içeriğidir.).

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez kapsamında ultrasonik yöntemle gaz giderme işlemi için çeşitli varyasyonlar denenmiş ve yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 3.1’de deneysel çalışmalarda izlenen adımlar gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Deneysel çalışma adımları

3.1 Deney Tasarımı

Yapılan laboratuvar çalışmalarında 3 farklı parametre göz önüne alınmış ve varyasyonlar bunlara bağlı olarak değiştirilmiştir. Bu parametreler;

- Sıvı metal miktarı,
- Sıvı metal sıcaklığı,
- Ultrasonik uygulamanın süresi dir.

Deneysel çalışmalarda kullanılan ultrasonik ekipmanın frekans ve elektriksel güç üzerinde değişiklik yapmaya elverişli olmaması nedeni ile bu iki parametre sabit olarak alınmıştır. Cihaz frekansı 20 KHz, elektriksel gücü ise 3 Kw dır.

Yapılan her uygulamada parametrelerden ikisi sabit tutulmak kaydıyla bir parametre değiştirilmiş ve çalışmalar buna göre uygulanmıştır.

Tablo 3.1 Sıcaklık – Zaman – Sıvı metal miktarı değişkenlerine göre deney tasarım adımları

SICAKLIK / UYGULAMA ZAMANI(sn)	0	60	180	300
700 °C	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg
720 °C	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg
740 °C	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg	1 – 2 – 4 kg
SERİ ÜRETİM	4 kg	4 kg	4 kg	4 kg

1 ve 2 kg lık sıvı metal ağırlıkları için 12 şer, 4 kg lık sıvı metal ağırlığı için ise seri üretimde geleneksel gaz giderme işlemi sonrası ultrasonik işleme tabi tutulmuş numuneler ile beraber 16, toplamda 40 adet deney varyasyonu yapılarak alınan numunelere uygulanan testlerden elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda incelenen özellikler;

- Bifilm incelemesi (uzunluğu (mm), alanı (mm^2))
- Çekme testi (Akma, Kopma dayanımları,% uzama)
- Charpy darbe testi
- Sertlik ölçümü
- Makro ve Mikro yapı incelemeleridir.

Bu testlerin yapılabilmesi için her denemeden bir adet bifilm incelemesi amacı ile RPT numunesi, bir adet 5 kollu feder kalıbına döküm yapılmıştır. Sadece 1 kg lık denemelerde yalnızca Bifilm incelemesi için numune alınmış 5 kollu feder numunesi dökülmemiştir. Bunun nedeni 5 kollu feder kalıbının 1,6 kg sıvı metal alması ve sıvı metalin numune dökümü için yetersiz olmasıdır.

Dökülen 5 kollu feder numuneleri seri üretimde jantların geçtiği ısıtılma işlem ve boya fırınlarından geçirilmiştir. Böylece elde edilen sonuçlar seri üretimde jantlardan alınan numunelerin sonuçları ile karşılaştırılabilmiş ve mekanik özelliklerde elde edilen gelişmeler hakkında yorum yapmamıza olanak sağlamıştır.



Şekil 3.2 5 kollu feder numune kalıbı



Şekil 3.3 Bifilm incelemeleri için kullanılan RPT numune kalıbı

3.2 Deney Düzenegi

Çalışma kapsamında UHF Necat Makine firmasından tedarik edilen Roop Telsonic Ultrasonix Ltd. marka 20Kw lık ultrasonik gaz giderme ekipmanı ile çalışılmıştır. Orijinal A356 alaşımı külçeler Protherm marka HLF400 model etüvde deney tasarımında belirlenen sıcaklıklar set edilerek eritilmiştir. Alınan Bifilm numuneleri IDECO marka RPT cihazında vakum altında 8 dk tutulmuş ve 5 kollu feder test kalıbına alınan numunelerden çıkarılan test parçaları ZWICK marka Z100 Model çekme cihazında ve proje kapsamında alınan brinell sertlik ölçüm cihazında deneylere tabi tutulmuştur.

3.2.1 Gaz giderme Ekipmanı

Proje kapsamında alınan ultrasonik gaz giderme ekipmanı CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş. bünyesinde bulunan Ar-Ge laboratuvarına kurulmuş ve deneysel çalışmalar burada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4 Gaz giderme ekipmanı

3.2.2 Etüv

CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş. Ar-Ge laboratuvarında bulunan Protherm marka HLF400 model etüv proje boyunca kullanılmıştır. Etüv; grafit potalarda bulunan ve deney seti için kullanılan alüminyum külçelerinin eritilerek deney set sıcaklıklarında sabit tutulmasını sağlamıştır.



Şekil 3.5 Etüv

3.2.3 RPT Ekipmanı

CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş. Çiğli tesisleri dökümhane birimi bünyesinde bulunan IDECO marka RPT cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.6 RPT Ekipmanı

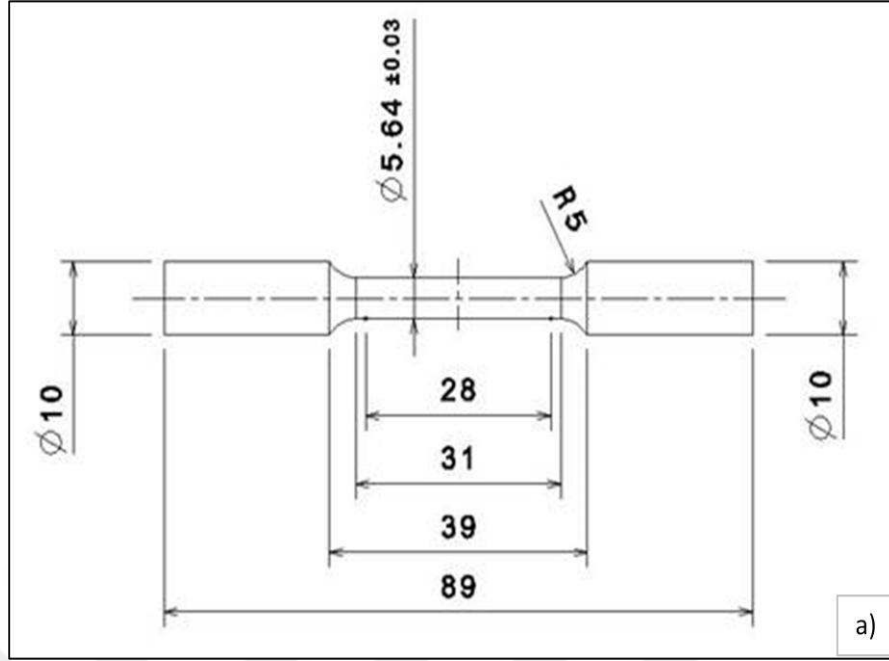
3.2.4 Çekme Test Cihazı

CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş. Çiğli tesisleri laboratuvar birimi bünyesinde bulunan ZWICK marka Z100 Model çekme cihazı kullanılmıştır.

Çekme test numuneleri DIN EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler;

- Akma noktasına kadar 0,465 mm/dk,
- Akma noktasından sonra 3,72 mm/dk

hızlar uygulanarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çekme test hızları DIN EN ISO 6892-1 standardından referans alınmıştır.



Şekil 3.7 a) Çekme test numunesi ve boyutları, b) Çekme test cihazı

3.2.5 Brinell Sertlik Ölçüm Cihazı

San-Tez proje kapsamında alınan ve Dokuz Eylül Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Mekanik laboratuvarına kurulan InfoTek TIME TH-600 Brinell Sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır.

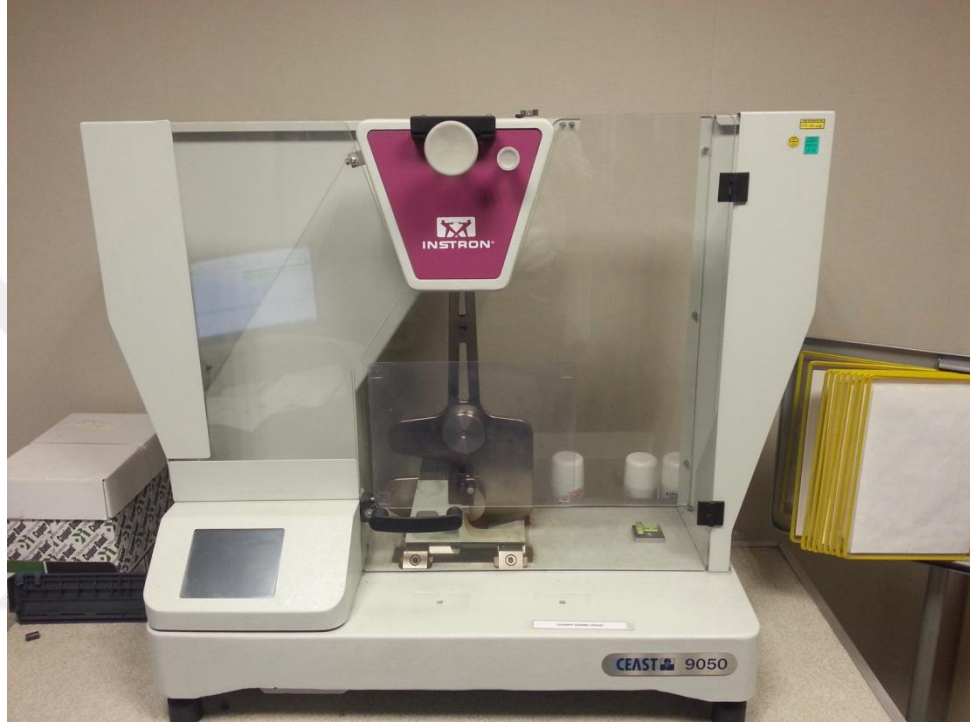
Sertlik test şartları DIN EN ISO 6506-1 standardı kapsamında belirlenmiş olup uygulama şartları 5 mm çaplı uç ile 250 kg yük (5/250) şeklindedir.



Şekil 3.8 Brinell sertlik ölçüm cihazı

3.2.6 Charpy Darbe Test Cihazı

CMS Jant ve Makina Sanayi A.Ş. Çiğli tesisleri laboratuvar birimi bünyesinde bulunan INSTRON marka CEAST 9050 Model charpy darbe test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.9 Charpy darbe test cihazı

3.3 Yapılan Çalışmalar ve Amaçları

Proje kapsamında yapılan çalışmalar temel olarak bifilm incelemesi, mekanik testler ve makro-mikro yapı incelemeleri olarak ayrılabilir.

3.3.1 Bifilm İncelemesi

Çalışmanın amacı ultrasonik işlem sonucu sıvı alüminyum içerisinde bulunan oksit filmlerinin, uygulanan ultrasonik dalgalar sonucu ne denli kırıldığı ve minimize edildiğini tayin edebilmektir.

Çalışmayı gerçekleştirebilmek amacı ile yaklaşık 400 gr sıvı metal alabilen ve özel olarak yaptırılan bir RPT kalıbı kullanılır. Kalıp içerisine ultrasonik işlem süresinin tamamlanması akabinde sıvı alüminyum koyularak toplamda 8 dk 80 mbar basınç altında vakuma tabi tutulmaktadır.

Vakum uygulama süresi sonunda alınan numuneler yarıya kesilir ve elde edilen parçalardan bir tanesi inceleme amacı ile parlatılır. Parlatılan numune kesiti yüzeyinde bulunan ve açılmış oksit filmlerinin fotoğrafı çekilir.

Çekilen fotoğraf bilgisayarda Clemex Vision Lite Programı kullanılarak analiz edilir ve yüzey alanında bulunan oksit film uzunlukları (μm) ile oksit filmlerinin oluşturduğu gözeneklerin kapladığı alan (μm^2) hesaplanır.

Deney ve hesaplamalar sonucu elde edilen uzunluk ve alan değerleri ne kadar az ise sıvı metale uygulanan işlemin o denli başarılı olduğu ve mekanik özellikler üzerine etkisinin o denli yüksek olduğu söylenebilir.

3.3.2 Mekanik Testler

Çekme testi, charpy darbe testi ve sertlik ölçümü uygulanan mekanik testlerdir. Uygulamaların amacı ultrasonik uygulama setleri sonucu alınan numuneler aracılığı ile mekanik özellikler üzerinde elde edilen gelişmeler hakkında yorum yapabilmek ve fikir sahibi olabilmektir.

3.3.3 Makro ve Mikro Yapı İncelemesi

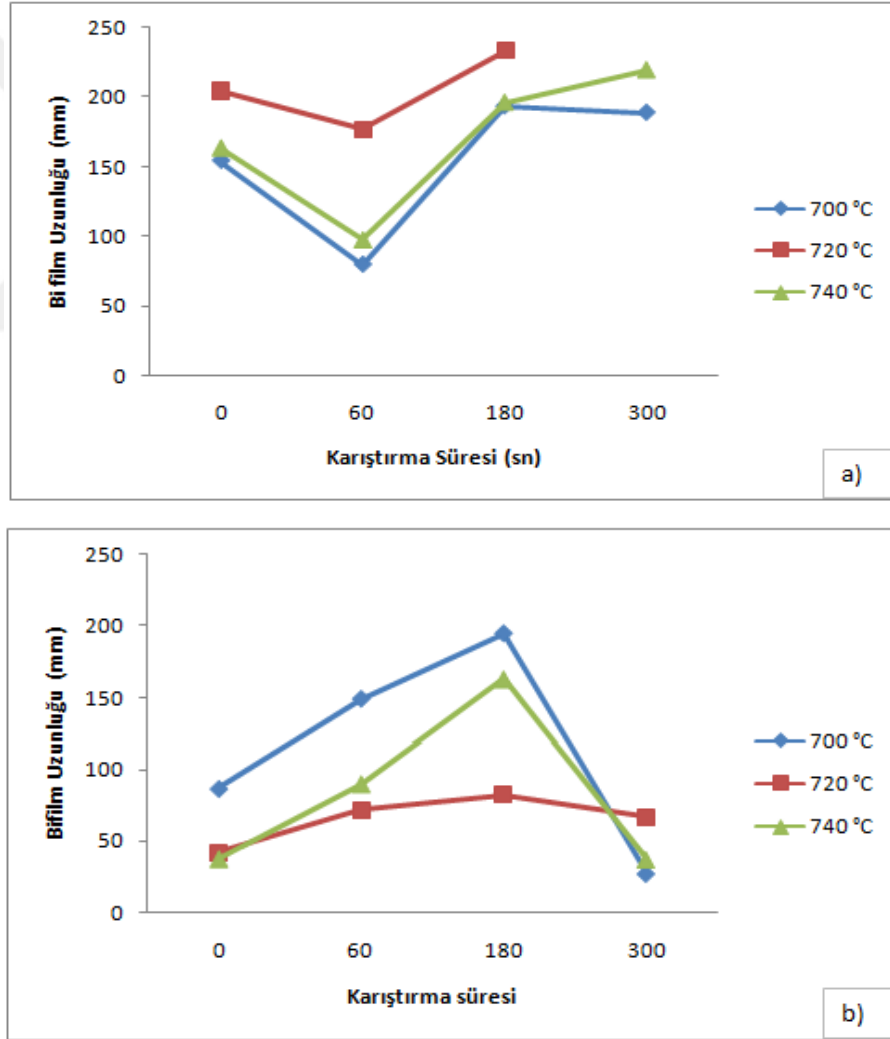
Yapılan bütün çalışmaların yanında mikro ve makro yapılar da kontrol edilmiştir. Bunun amacı elde edilen sonuçların tane boyutu ve varsa mikro yapıdaki süreksizlikler ile ilişkilendirilmesidir.

BÖLÜM DÖRT

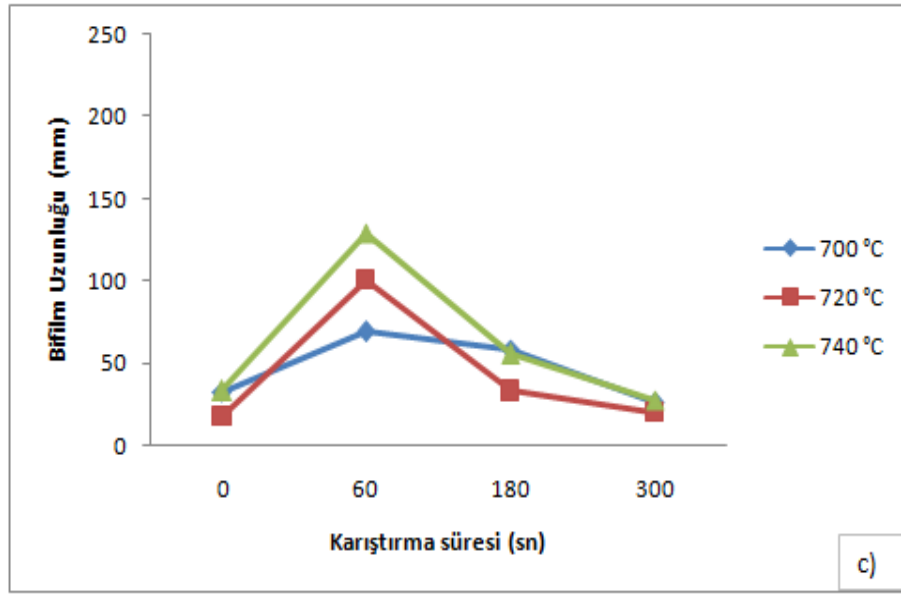
DENEY SONUÇLARI

4.1 Bifilm İncelemesi

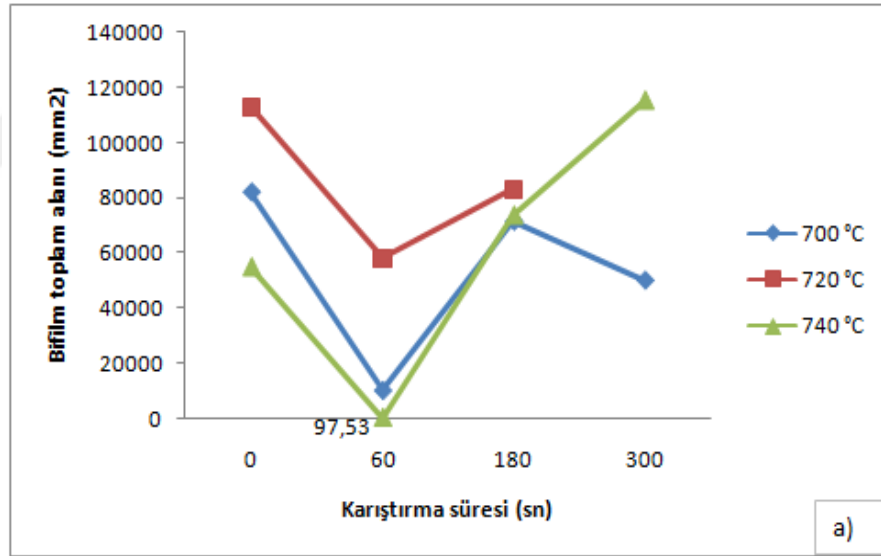
Deneyler esnasında alınan numunelere ait bifilm verilerini önce sıcaklığı sabit tutarak metal miktarları arasında, daha sonra metal miktarını sabit tutarak aynı metal miktarında farklı sıcaklıklar arasında elde ettiğimiz verileri karşılaştırdık. Karşılaştırılan veri sınıfları için 5'er adet deney tekrarlandı ve veriler bunların ortalamasını içermektedir.



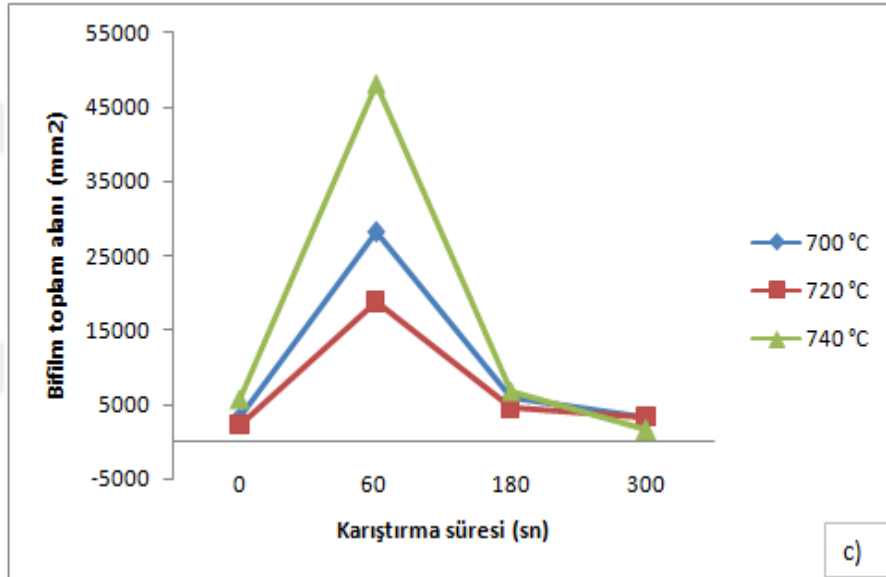
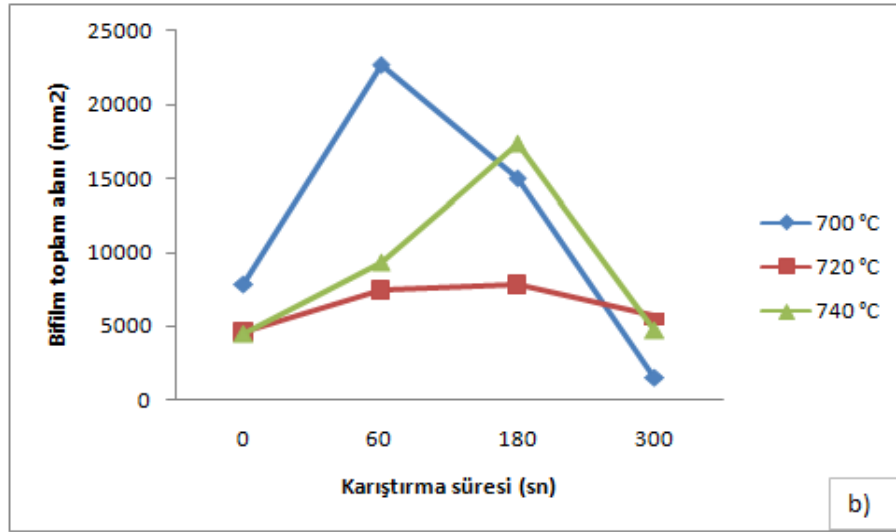
Şekil 4.1 Metal miktarına bağlı farklı sıcaklıklarda elde edilen bifilm uzunluk değerleri a) 1 kg, b) 2 kg, c) 4 kg



Şekil 4.1 Metal miktarına bağlı farklı sıcaklıklarda elde edilen bifilm uzunluk değerleri a) 1 kg, b) 2 kg, c) 4 kg (devamı)



Şekil 4.2 Metal miktarına bağlı farklı sıcaklıklarda elde edilen bifilm alan değerleri a) 1 kg, b) 2 kg, c) 4 kg

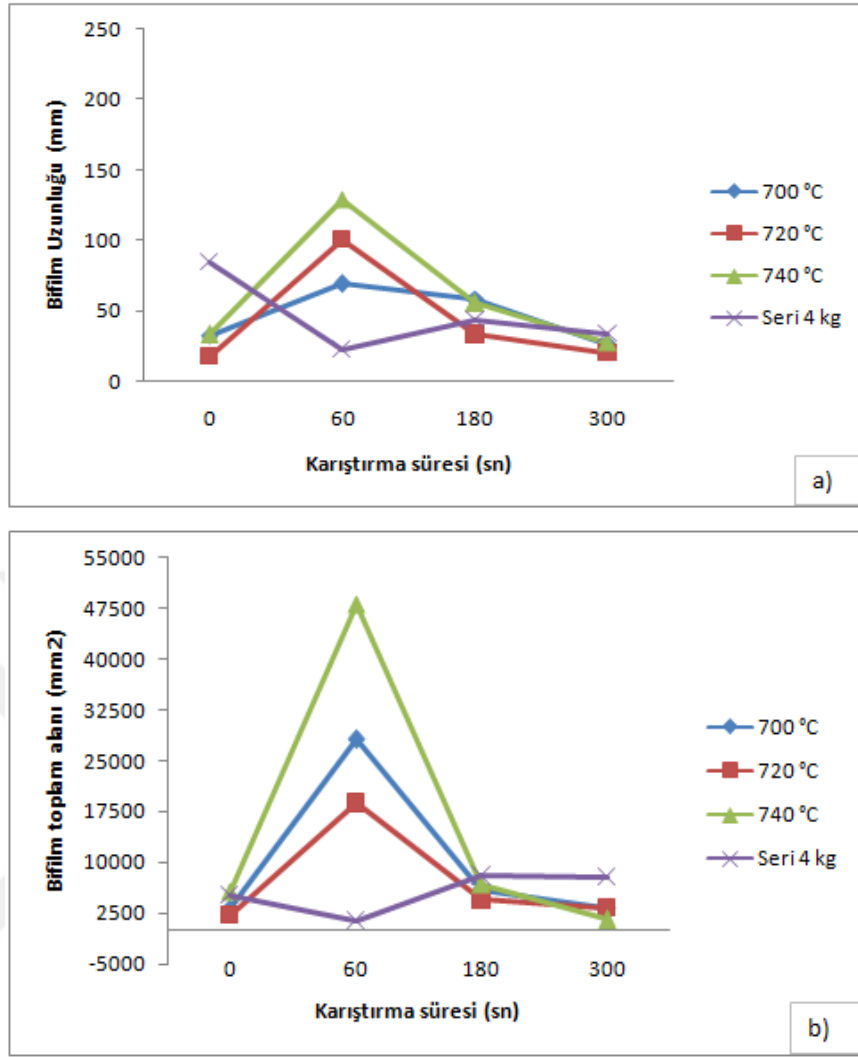


Şekil 4.2 Metal miktarına bağlı farklı sıcaklıklarda elde edilen bifilm alan değerleri a) 1 kg, b) 2 kg, c) 4 kg (devamı)

- Farklı sıcaklıklarda ultrasonik işlem uygulanmadığı zaman sıvı metal miktarı arttıkça bifilm uzunlukları azalmaktadır. Bunun nedeni erimiş metalde oksit ve inklüzyonların yoğunluk farkından dolayı potanın üst kısmında toplanması olduğu düşünülmektedir.
- Ultrasonik işlem uygulandığında süreye bağlı olarak 1 kg lık pota denemelerinde 60 sn de en düşük bifilm değerleri gözlenmiştir. Ancak sürenin artmasına bağlı olarak bifilm miktarı artmaktadır. Bunun nedeni uygulama sırasında ilk başlarda yüzeye doğru hareket ettirilen inklüzyonların uygulama süresinin artması ile birlikte tekrar sıvı içerisine alınması olabilir.

- 2 kg lık denemeler göz önüne alındığında karıştırma süresinin artması ilk başlarda bifilm uzunluklarının artmasına yol açmaktadır. Bu durum ultrasonik işlemde boşlukların bir araya gelmesi şeklinde yorumlanabilir. Nitekim 300 sn lik uygulama ile bifilm miktarının en düşük seviyeye geldiği görülmektedir. Bu durum 300 sn lik karıştırma süresi ile inklüzyonların pota yüzeyine doğru sürüklenerek cürufa geçmesinde etkili olduğu şeklinde yorumlanabilir.
- 2 kg lık denemelere sıcaklık açısından bakıldığında sıcaklığın 700 °C gibi düşük olduğu ya da 740 °C gibi göreceli olarak daha yüksek olduğu durumlarda 180 sn lik uygulamaya kadar bifilmelerde artış meydana geldiği görülmektedir. 720 °C de ise süreye bağlı olarak daha stabil bir değişim gözlenmiştir. Ancak 300 sn lik uygulamada 700 ve 740 °C lerde en düşük bifilm değerlerine ulaşılmıştır.
- 4 kg lık denemelerde ise 60 sn lik ultrasonik uygulama en yüksek bifilm değerlerinin elde edildiği durumdur. Ancak uygulama süresinin artması özellikle bifilm uzunluklarının azalmasına olumlu yönde etki ettiği görülmüştür.
- 4 kg lık denemelere sıcaklık açısından bakıldığında 60 saniyelik ultrasonik işlemin uygulandığı durumda tüm sıcaklıklarda bifilm uzunluklarının arttığı gözlenmiştir. Uygulama süresinin artmasına bağlı olarak ise bifilm uzunluklarında azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Bu durum inklüzyonların ve gaz boşluklarının yüzeye doğru yönlendirilerek cürufa geçişi şeklinde yorumlanabilir.

Benzer deneme çalışmasını seri üretimde mekanik rotor ve flaks kullanılarak yapılan gaz giderme işlemi sonrasında gerçekleştirilmiştir. Bu denemedeki amaç ultrasonik işlemin gaz giderme işlemi sonrasındaki etkisini görmektir. Bu deneme 4 kg lık sıvı alüminyum kullanılarak yapıldığı için önceki 4 kg lık yapılan çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'te gösterilmektedir.

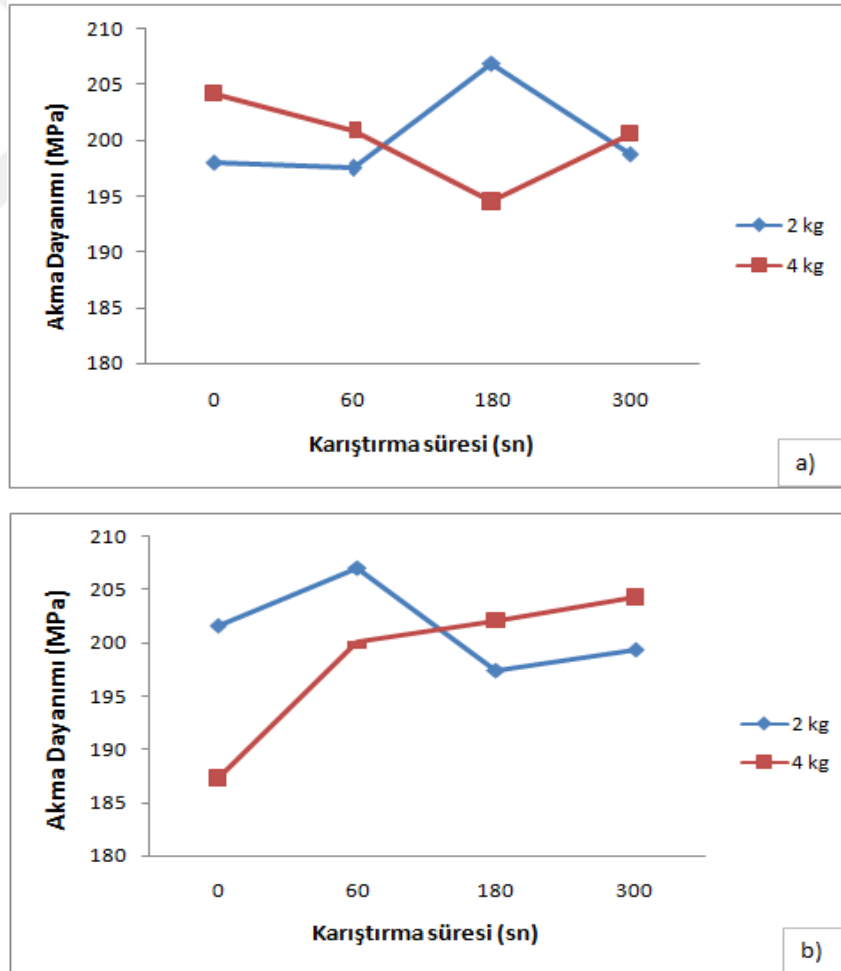


Şekil 4.3 4 kg sıvı metal miktarında farklı sıcaklıklarda ultrasonik işlemin seri üretim gaz giderme işlemi öncesi ve sonrası uygulama sonrası a) bifilm uzunluk ve b) bifilm toplam alan değerleri

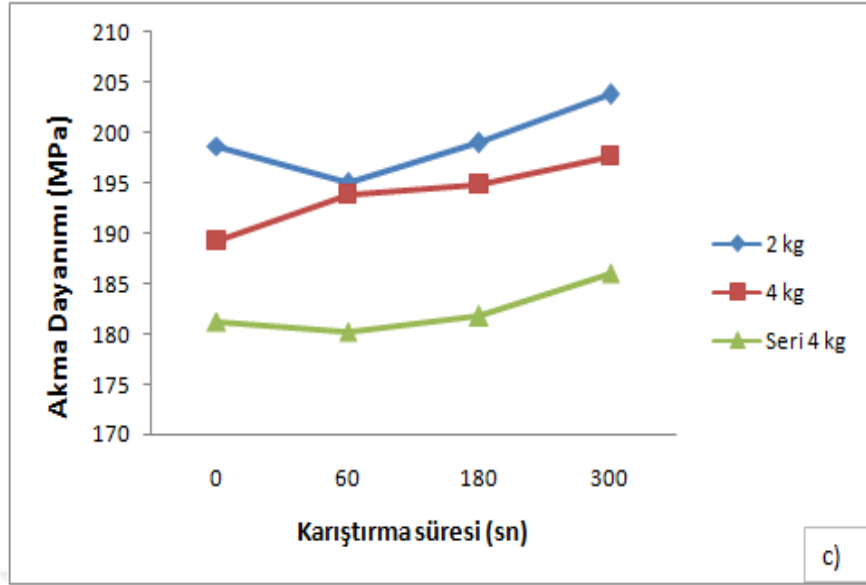
Seri üretimde gaz giderme işlemi sonrası alınan 4 kg lık denemelere ait bifilm ölçümlerine bakıldığında bifilmelerin uzunlukları ultrasonik işlem uygulanmadan önce diğer numunelere göre en yüksek değerdedir. Ancak ultrasonik işlemin uygulanması ile birlikte bu değerlerde düşme meydana gelirken en iyi sonuç 60 sn lik karıştırma işleminde elde edilmiştir. Benzer şekilde Şekil 2.3b’de bifilm alanları açısından da aynı durum söz konusudur. Ancak seri üretimde gaz giderme işlemi sonrası 60 sn lik karıştırma işlemi en iyi sonuçları vermektedir.

4.2 Mekanik Testler

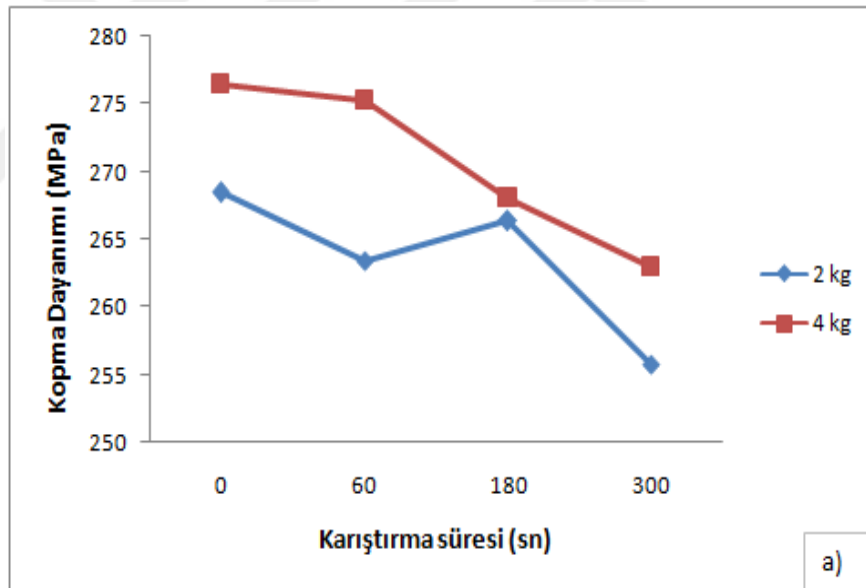
Deneme üretimlerinden 2 ve 4 kg lık olanlar için feder kalıbına döküm işlemleri gerçekleştirilmiş ve mekanik testler için numuneler üretilebilmiştir. Feder kalıbının hacmi 1,6 kg olduğu için 1 kg lık denemeler için mekanik test gerçekleştirilememiştir. Ayrıca 740 °C’de seri üretimde mekanik karıştırma ve flaks ile gaz giderme işlemi sonrasında 4 kg lık alınan sıvı alüminyuma da ultrasonik uygulama yapılmıştır. Farklı sıcaklıklarda farklı ultrasonik uygulama süreleri sonrası elde edilen numunelere yapılan mekanik testlerde akma ve kopma dayanımları ile % uzama değerleri sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da verilmektedir. Bu şekillerde karşılaştırılan deney setleri için 5 er adet numune ölçümü yapılmıştır ve sonuçlar ölçüm ortalamaları tarafından temsil edilmektedir.



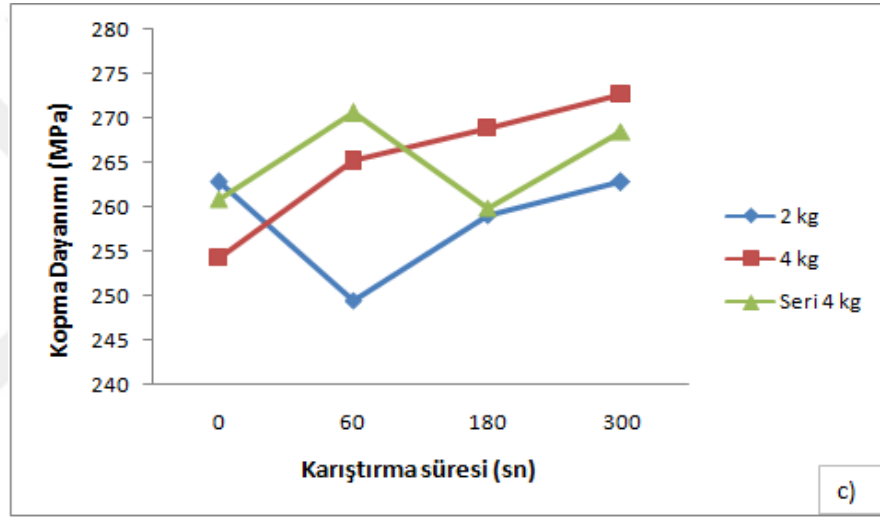
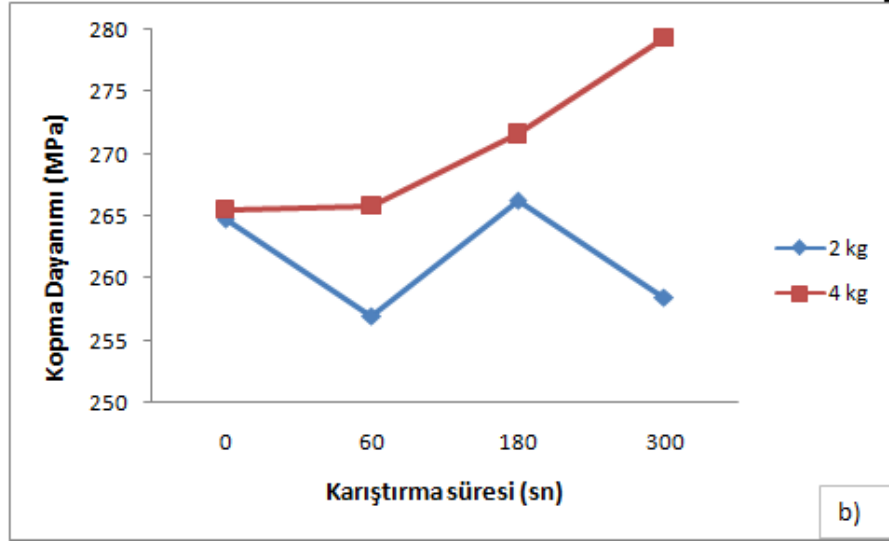
Şekil 4.4 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı akma dayanımı değişimleri a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C



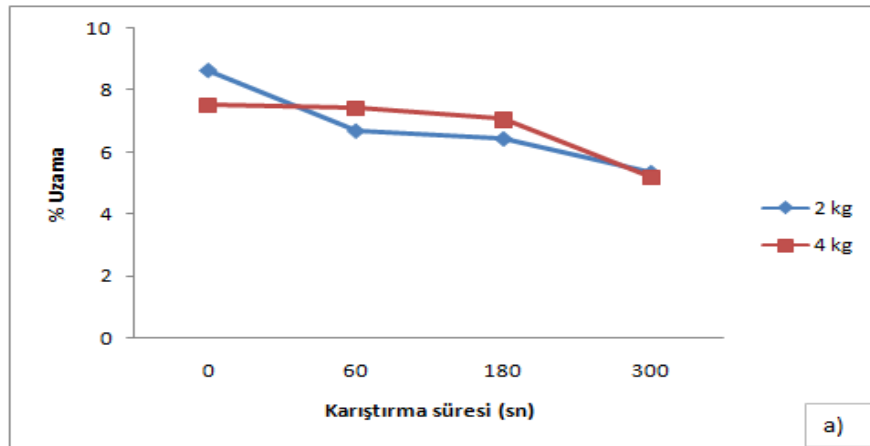
Şekil 4.4 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı akma dayanımı değişimleri a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C (devamı)



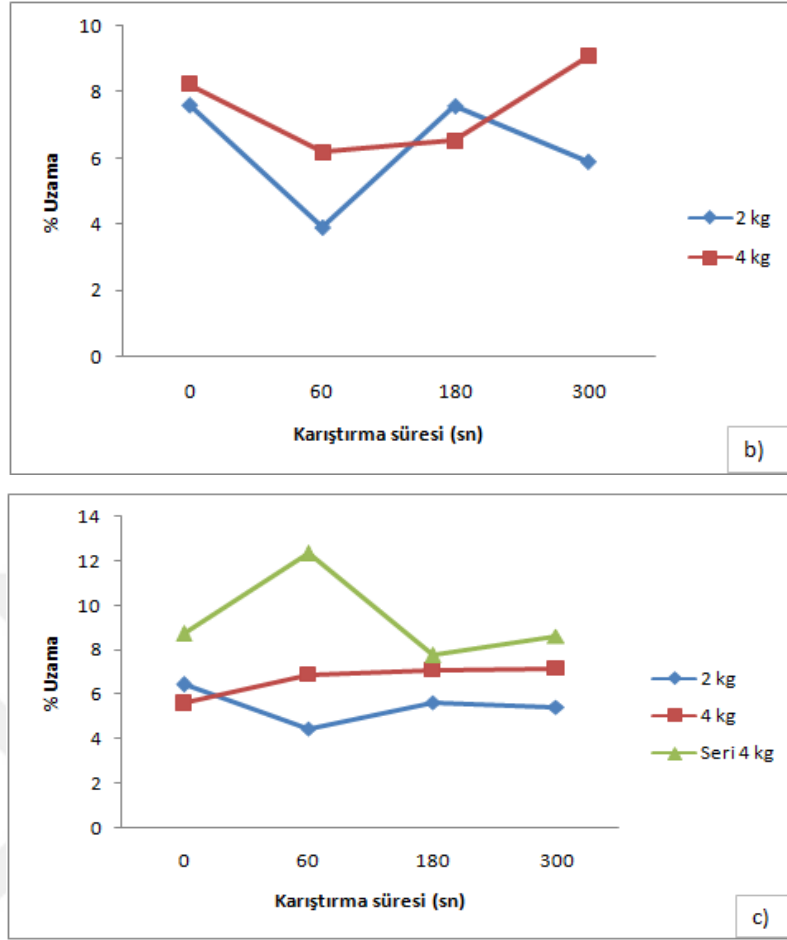
Şekil 4.5 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı kopma dayanımı değişimleri a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C



Şekil 4.5 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı kopma dayanımı değişimleri a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C (devamı)



Şekil 4.6 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı % uzama değişimleri a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C



Şekil 4.6 Farklı sıcaklık uygulamalarında metal miktarına bağlı % uzama değişimleri a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C (devamı)

- 2 kg lık denemelerde elde edilen çekme numunelerinin tüm sıcaklıklar için kopma dayanımlarına bakıldığında karıştırma işleminin 60 sn gibi düşük bir sürede yapıldığında kopma dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Aynı sıcaklıklarda 180 sn lik karışırtılarda kopma dayanımlarında artış meydana gelirken 300 sn lik karışırtılarda 740 °C haricindeki sıcaklıklarda tekrar azalma meydana gelmektedir. 2 kg lık denemelerde en uygun değerler 180 sn lik karıştırmanın yapıldığı 720 ve 700 °C lerde görülmektedir.
- 4 kg lık denemelerde elde edilen çekme numunelerinin kopma dayanımlarına bakıldığında sıcaklığın artması karıştırma işlemi uygulanmamış numunelerde kopma dayanımının azalmasına yol açtığı görülmüştür. Ancak ultrasonik işlemin uygulanmaya başlaması ile birlikte 700 °C de elde edilen numunelerin kopma dayanımları azalırken 720 ve 740 °C lerde artış meydana

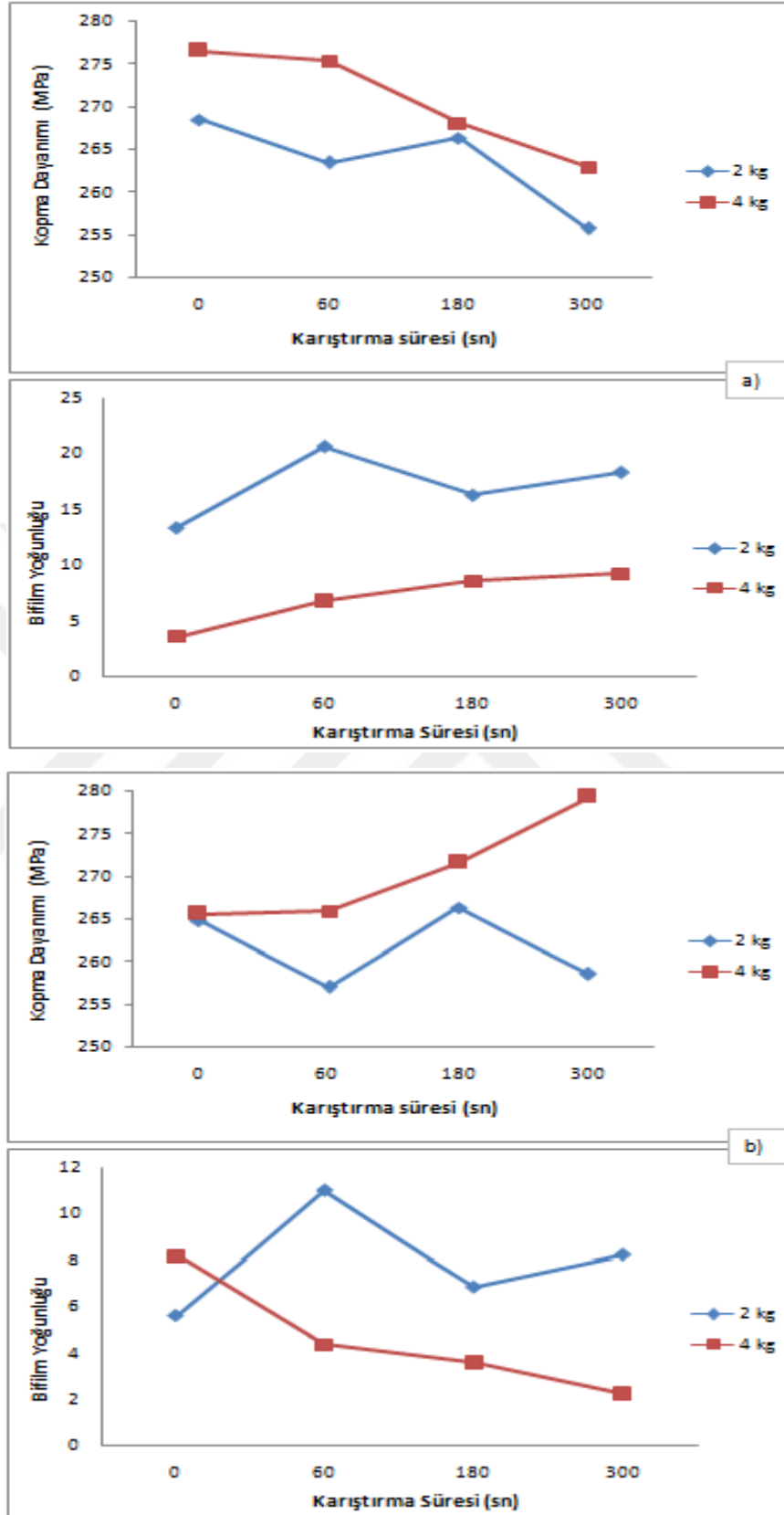
geldiği görülmüştür. Bunun nedeni sıvı alüminyuma ultrasonik işlemin uygulanma süresinin uzun olması halinde metalde soğumanın meydana gelmesidir. 4 kg lık denemelerde 300 sn lik ultrasonik işlemin uygulanması sonrasında 720 °C de en yüksek kopma değerlerine ulaşıldığı görülmüştür.

- Ayrıca seri üretimde mekanik karıştırma ve flaks uygulaması sonrası alınan 4 kg lık alüminyuma uygulanan ultrasonik işleme ait sonuçlarda Şekil 4.5c’de verilmektedir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında 60 sn ultrasonik işlem uygulama sonrası kopma değerinde artış görülmektedir. Karıştırma süresinin artması ile birlikte 180 sn de kopma dayanımı azalırken 300 sn de tekrar artış görülmüştür. Ancak elde edilen bu artış 60 sn de ulaşılan değerden düşüktür. Bu durumda ultrasonik yöntem seri üretimde mekanik karıştırma sonrası kullanılacak olursa 60 sn lik uygulama yapılması en iyi sonuçları vereceği düşünülmektedir.

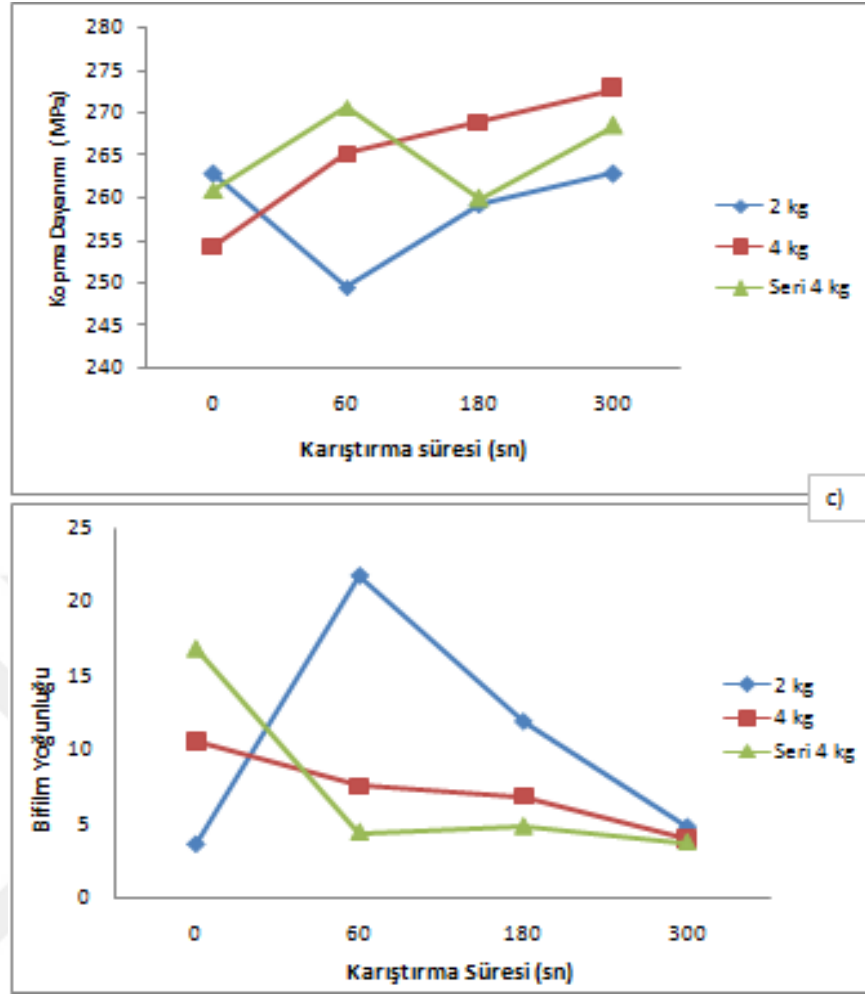
Denemelerde üretilen numunelerin kopma dayanımlarının bifilm yoğunluğu ile karşılaştırılması bifilmelerin mekanik özellikler üzerine etkisini ortaya koymak açısından faydalı olacaktır. Kopma dayanımı bifilm yoğunluğu arasındaki ilişki şekil 4.7’de gösterilmektedir.

Alüminyum içindeki bifilmelerin uzunluk ve alanları genel olarak yorum yapmada yanlış sonuçlar verebilir. Bu nedenle mekanik testler ile karşılaştırmak için bifilm yoğunluğu değerlerini göz önüne almak daha doğru olacaktır. Bifilm yoğunluğunu şu formülle hesaplayabiliriz;

$$\text{Bifilm Yoğunluğu} = (\text{Toplam bifilm uzunluğu} / \text{Tarama alanı}) * 100 \quad (4.1)$$



Şekil 4.7 Farklı sıcaklıklarda kopma dayanımı - bifilm karşılaştırması a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C

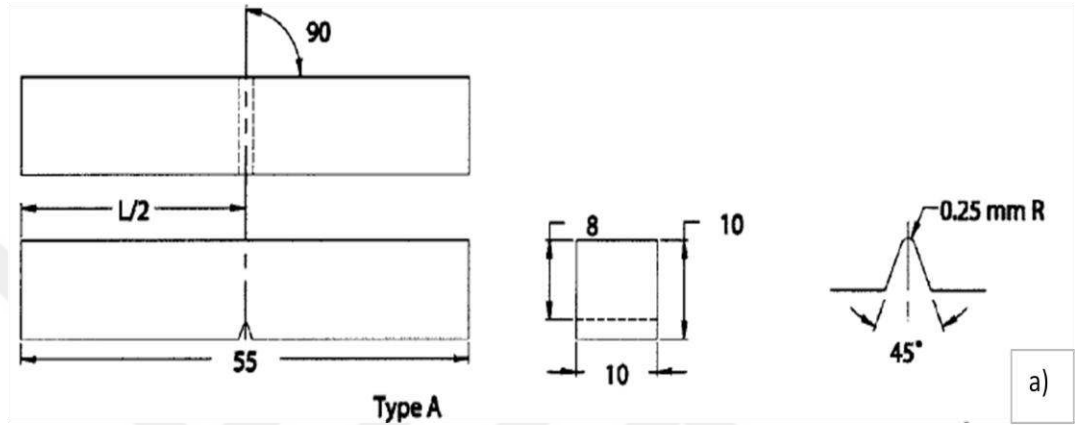


Şekil 4.7 Farklı sıcaklıklarda kopma dayanımı - bifilm karşılaştırması a) 700 °C, b) 720 °C, c) 740 °C (devamı)

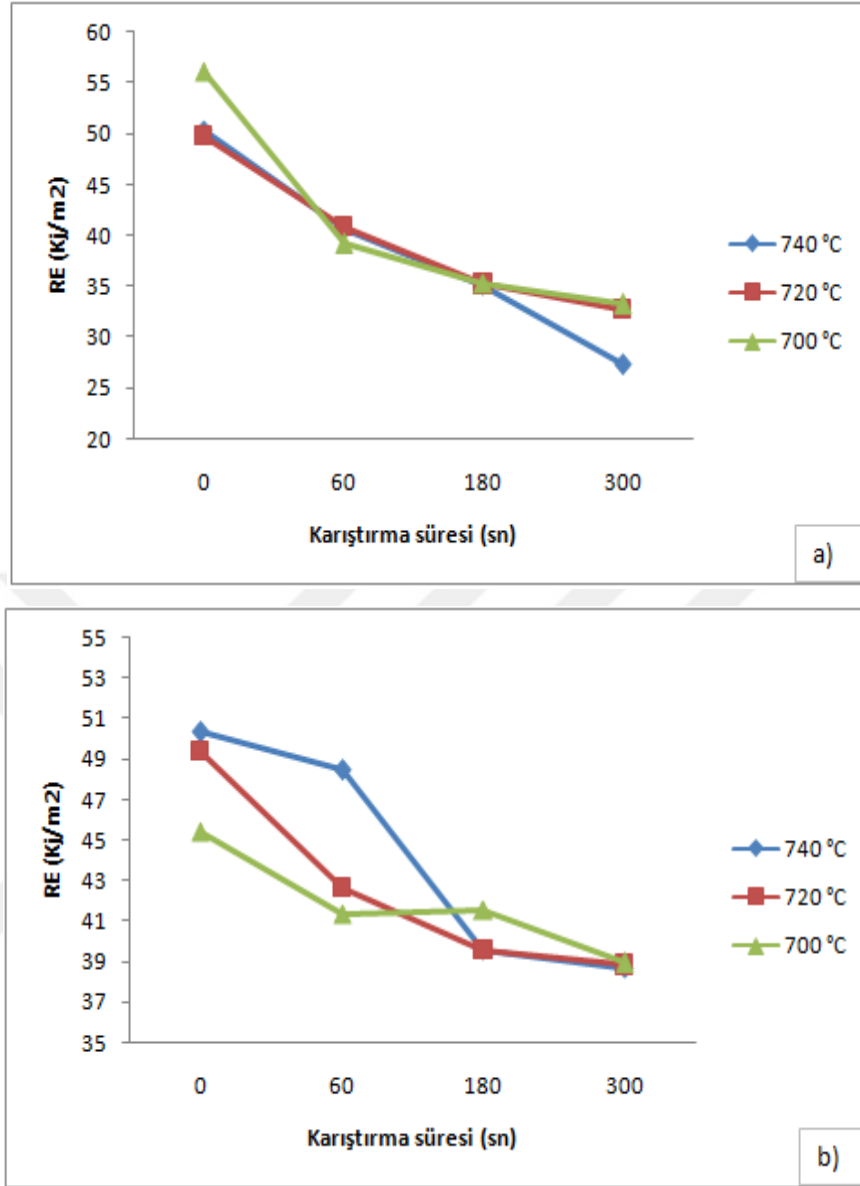
Elde edilen sonuçlara genel olarak bakıldığında bifilm yoğunluğunun artması durumunda kopma dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Mekanik özellikte meydana gelen azalmaların nedeni yapı içinde kalan inklüzyon ve gaz boşluklarının olumsuz etkisi olarak değerlendirilebilir. Seri üretimde gaz giderme işlemi sonrası yapılan ultrasonik karıştırma işleminde karıştırma süresine bağlı olarak en iyi kopma dayanımının 60 sn lik karıştırma süresi olduğu söylenebilir. Ayrıca bifilm yoğunluğunda meydana gelen değişimin birebir kopma dayanımında da farklılık göstermesi bifilm yoğunluğu ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

4.3 Charpy Darbe Testi

Üretilen numuneler ASTM E-23 standardına göre işlenerek Şekil 4.8'deki gibi charpy darbe testi numuneleri oluşturulmuştur. Uygulanan charpy darbe testi sonuçları ise Şekil 4.9'da verilmektedir.



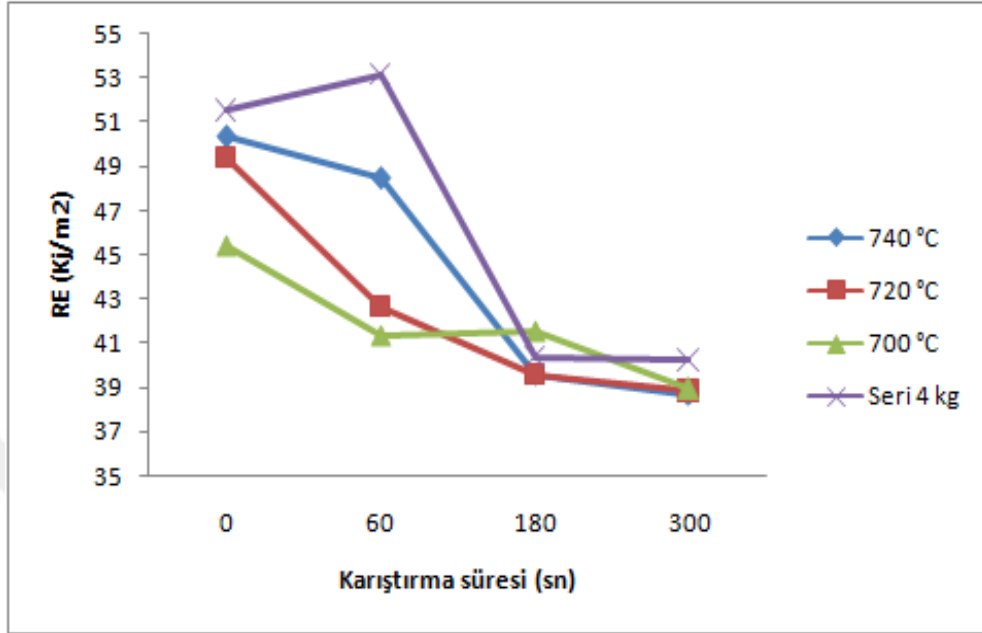
Şekil 4.8 Charpy darbe testi numuneleri a) ASTM E-23 e göre numune boyutları, b) işlenmiş numuneler



Şekil 4.9 Charpy darbe testi sonuçları a) 2 kg, b) 4 kg

- Şekil 4.9a' ya bakıldığında 2 kg lık sıvı alüminyumda ultrasonik işlem uygulanmadan önce 700 °C de en yüksek charpy test sonucu elde edildiği görülmektedir.
- Şekil 4.9a'da aynı sıcaklıkta farklı sürelerde uygulanan ultrasonik işlemin karıştırma süresinin artması charpy test sonuçlarını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Şekil 4.9b'de 4 kg lık sıvı alüminyumda ultrasonik işlemin farklı sürelerde uygulanması durumunda charpy test sonuçlarında yine azalma görülmektedir. Ancak buradaki azalma 40-45 kJ/m² değerlerinde olup 2 kg lık denemeler ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir.

Şekil 4.10'da verilen seri üretimde gaz giderme işlemi sonrası 4 kg lık denemeden alınan numunelere ait Charpy test sonuçları da görülmektedir.



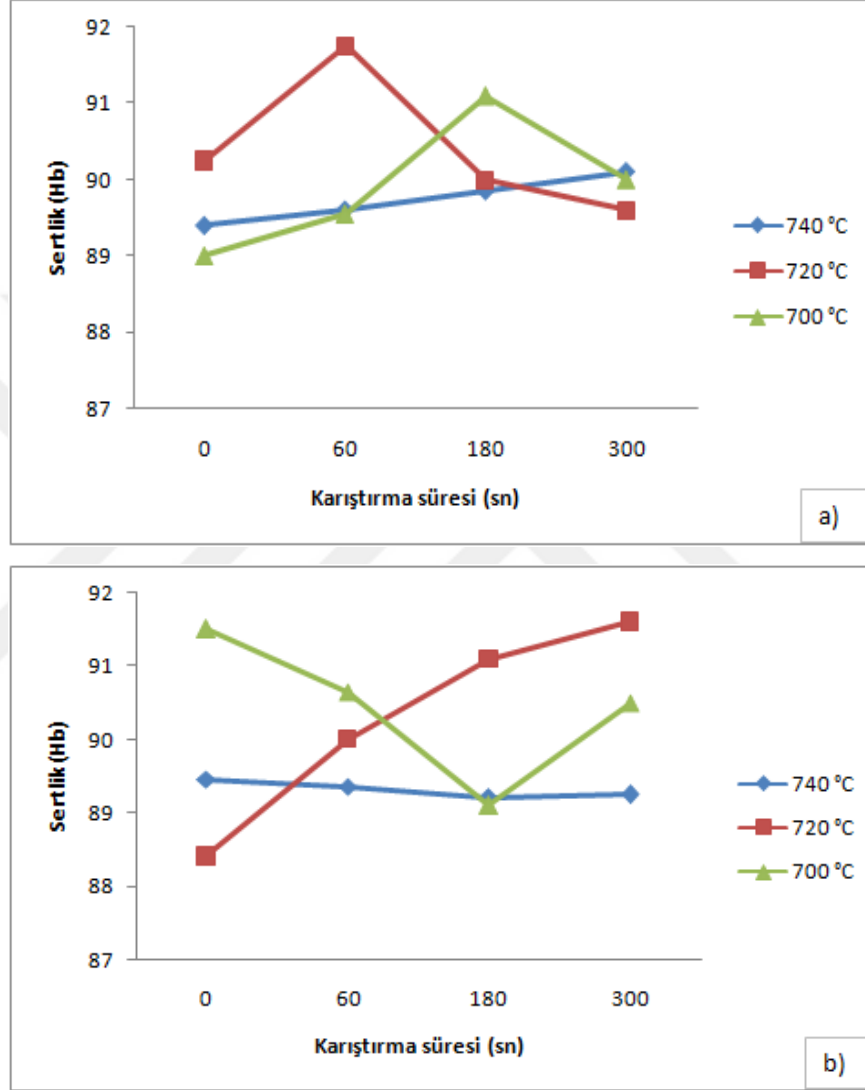
Şekil 4.10 4 kg lık seri üretim ve laboratuvar denemelerine ait charpy darbe testi sonuçları

Şekil 4.10 a bakıldığında seri üretimde gaz giderme sonrası ultrasonik işlemin 60 sn uygulanması sonrası en iyi test sonucunun elde edildiği görülmektedir.

Charpy test sonuçları genel olarak ele alındığında 2 kg lık denemelerde karıştırma işlemi sırasında yüzeyde oluşan cürufu aşırı dalgalanma meydana gelmemesine ve cürufun yarılmamasına rağmen sıvı alüminyum miktarının az olması cürufun alt kısmındaki inklüzyonların tekrar sıvı alüminyum içine karışmasına yol açtığı düşünülmektedir. Bu nedenle charpy test sonuçlarında karıştırmanın artması ile mekanik özelliklerin azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. 4 kg lık denemelerde ise sıvı alüminyum miktarının fazla olması nedeniyle ortaya çıkan azalma tablosu daha düşük ve belli bir aralıkta stabildir. Ancak seri üretimde rotorla mekanik olarak gaz giderme işlemi yapılmasının ardından ilave olarak ultrasonik işlemin uygulanması halinde en iyi charpy değerlerinin 60 sn lik karıştırma ile elde edildiği görülmüştür. Karıştırma süresinin artması ile hızlı bir şekilde düşüş meydana gelmekte ve gaz giderme işlemi uygulanmadan doğrudan ultrasonik işlemin uygulanması halinde elde edilen sonuçlara yakın değerlere ulaşıldığı görülmektedir.

4.4 Sertlik Ölçümü

Üretilen numunelere sertlik ölçümü de yapılmıştır. Ölçüm değerleri Şekil 4.11’de gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Sertlik ölçümü test sonuçları a) 2 kg, b) 4 kg

- 2 kg lık denemelere ait sertlik ölçüm sonuçlarına bakıldığında 60 sn lik ultrasonik uygulama ile maksimum sertlik değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Ancak karıştırma süresinin artması ile bu değer azalmaktadır. 700 °C’de yapılan denemelerde sertlik değeri karıştırma süresine bağlı olarak artış gösterirken en yüksek değere 180 sn lik karıştırmada ulaşılmıştır. 740 °C

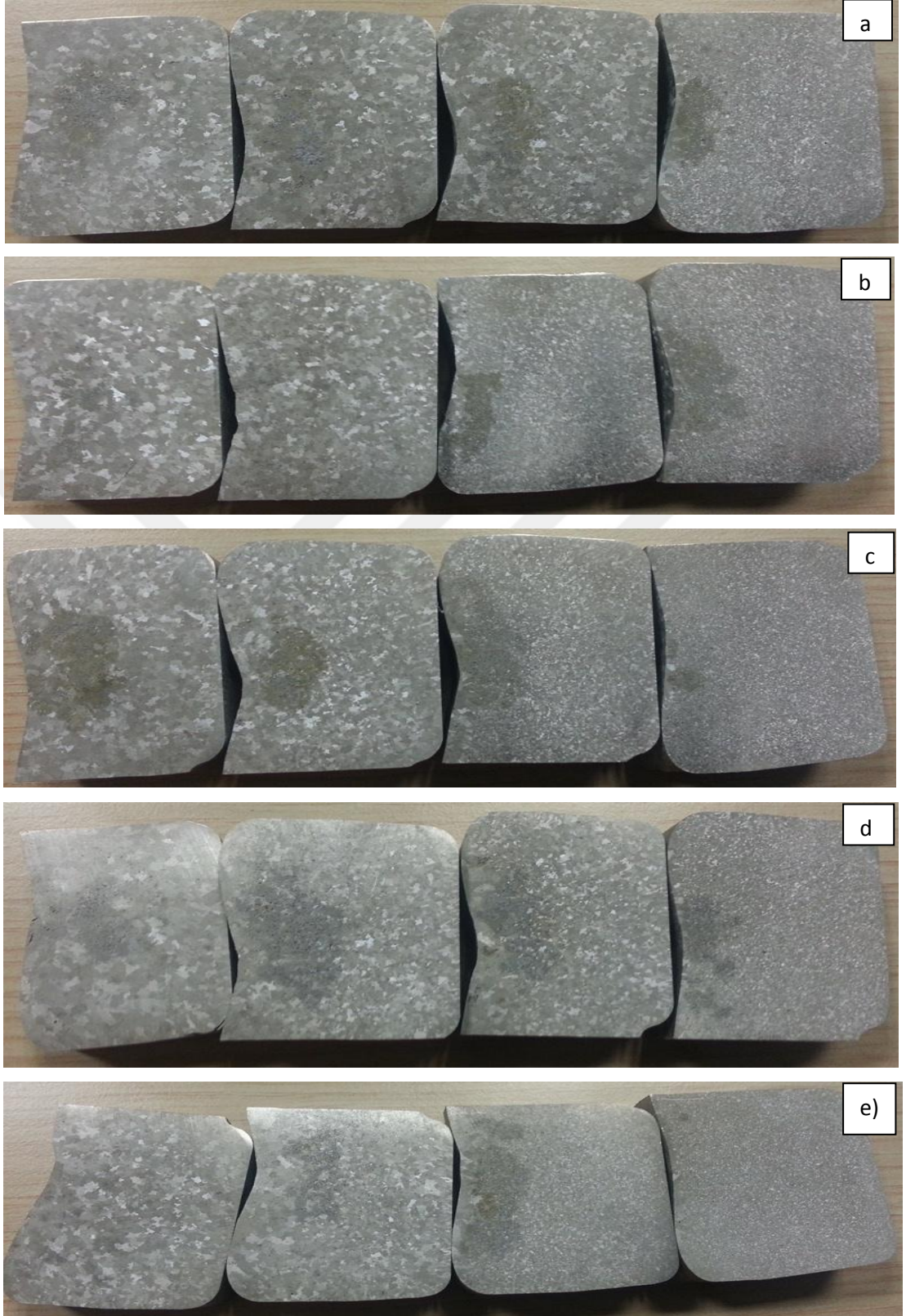
de ise genel olarak aşırı bir değişim göstermemekle birlikte stabil bir durumda küçük artışlar meydana gelmiştir.

- 4 kg lık denemelere ait sertlik ölçüm sonuçlarına bakıldığında 700 °C de ultrasonik işlem uygulama süresine artışı ile sertlik değerlerinde azalma meydana gelirken en düşük değer 180 sn karıştırma süresinde elde edildiği görülmektedir. 720 °C de düzenli bir artış meydana gelirken bu sıcaklıkta maksimum değerine 300 sn lik karıştırma ile ulaşılmıştır. 740 °C de ise başlangıç durumuna göre küçük miktarlarda azalma meydana geldiği görülmektedir.

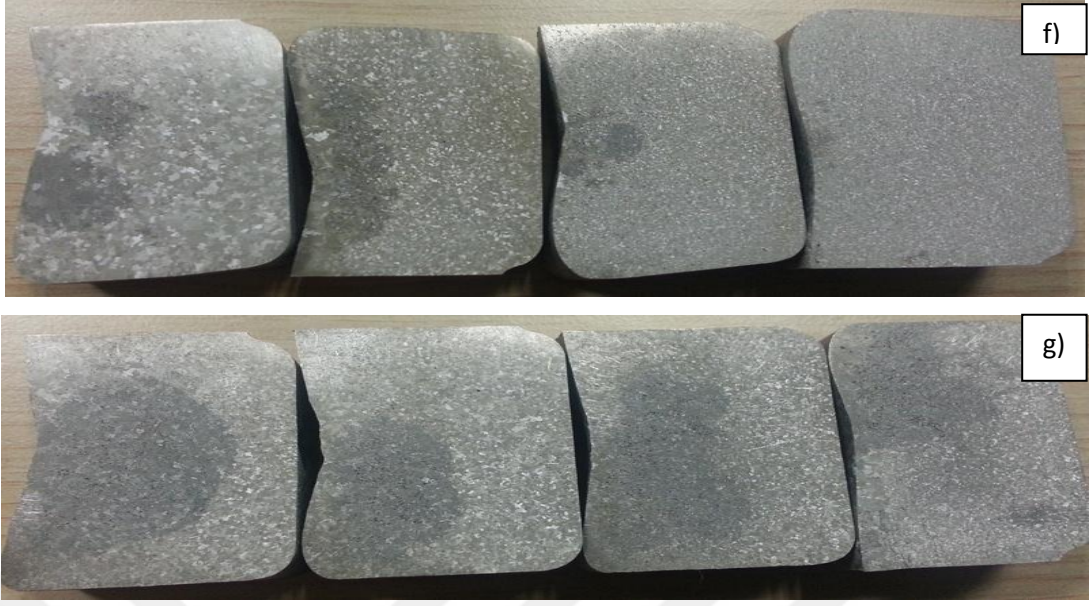
Sertlik ölçüm sonuçlarını genel olarak ele almak gerekirse 2 kg lık denemelerde karıştırma süresinin artması ve sıcaklığın artışı ile birlikte sertlik değerlerinde nisbi olarak azalmalar meydana gelmektedir. 4 kg lık denemelerde ise karıştırma süresinin artışı ve sıcaklığın artışı ile birlikte sertlik değerlerinde artış meydana gelmektedir. Ancak her iki sıvı miktarında da genel olarak stabil durumda olan ve aşırı değişim göstermeyen sıcaklık değeri 740 °C'dir. Bu açıdan bakıldığında elde edilen ürün standardını sağlamak için 740 °C'deki çalışma sıcaklığı ve 60 – 180 sn arasında bir ultrasonik uygulama süresinin avantajlı olacağı düşünülmektedir.

4.5 Makro - Mikro Yapı Analizleri

Denemeler sonrası elde edilen numunelerde makro yapı incelemesi de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.12 de verilmektedir.



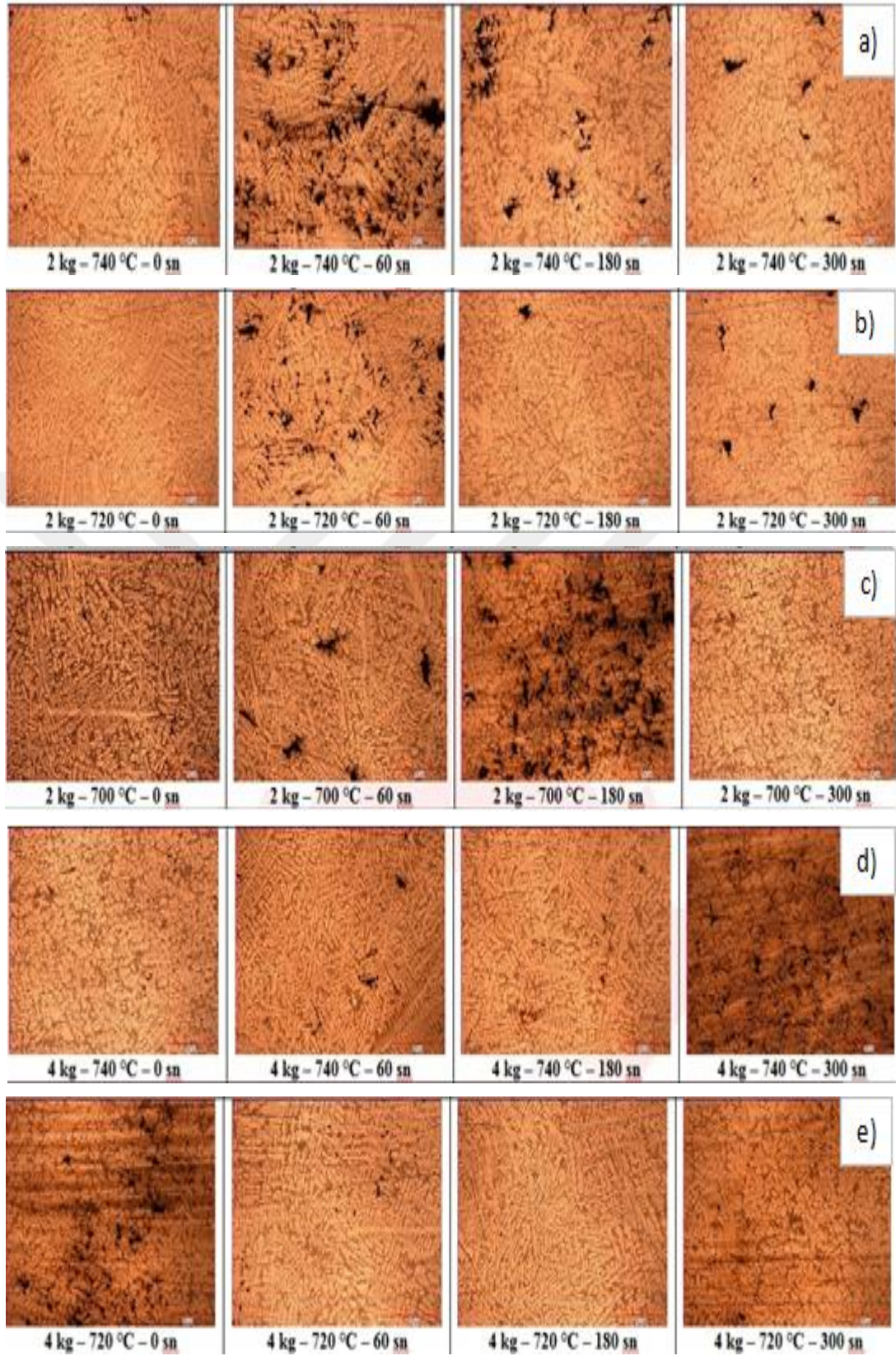
Şekil 4.12 Soldan Sağa 0, 60, 180, 300 sn lik denemelerin makro yapı numuneleri **a)** 2 kg 740 °C, **b)** 2 kg 720 °C, **c)** 2 kg 700 °C, **d)** 4 kg 740 °C, **e)** 4 kg 720 °C, **f)** 4 kg 700 °C, **g)** 4 kg seri üretim



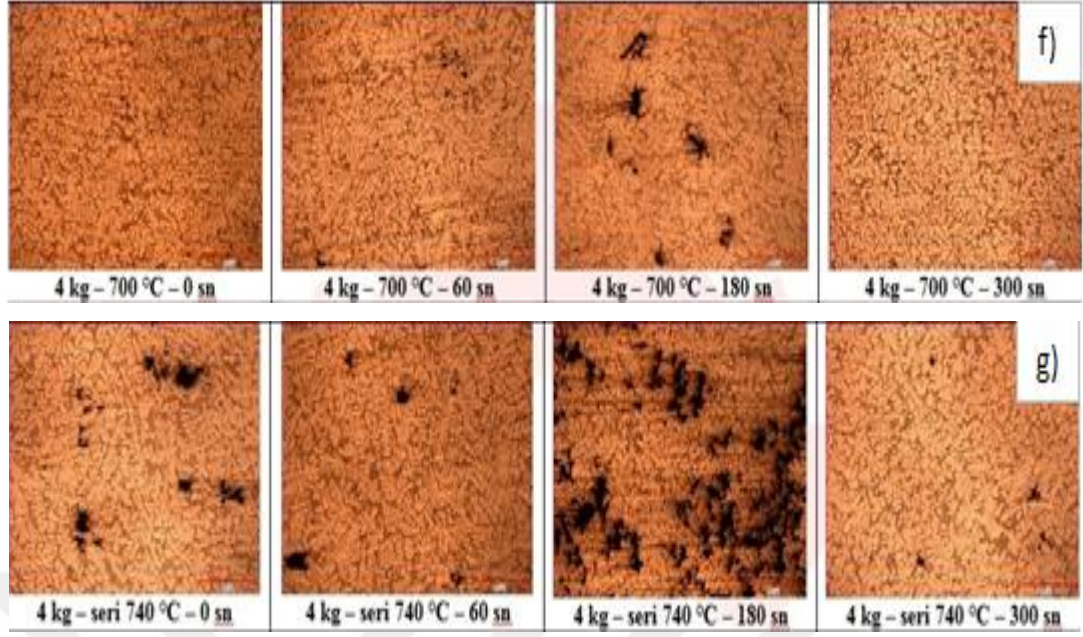
Şekil 4.12 Soldan Sağa 0, 60, 180, 300 sn lik denemelerin makro yapı numuneleri a) 2 kg 740 °C, b) 2 kg 720 °C, c) 2 kg 700 °C, d) 4 kg 740 °C, e) 4 kg 720 °C, f) 4 kg 700 °C, g) 4 kg seri üretim (devamı)

Makro yapı fotoğraflarına genel olarak bakıldığında aynı sıvı alüminyum miktarında aynı sıcaklıkta fakat farklı ultrasonik karıştırma sürelerinde üretilen numunelerde karıştırma süresinin artmasının makro yapıda tanelerin küçülmesine yol açtığını göstermektedir. Aynı sıvı alüminyum miktarlarında aynı karıştırma sürelerinde farklı sıcaklıklardaki numuneler karşılaştırıldığında ise sıcaklığın azalması ile birlikte makro yapıdaki tane boyutlarının küçüldüğünü göstermektedir. Çünkü numune üretimi gerçekleştirilirken daha düşük sıcaklıklarda çalışılması halinde katılaşma süresi daha kısa olmakta ve tanelerin büyümesi için yeterli süre olmadan katılaşma işlemi tamamlanmaktadır.

Benzer bir şekilde üretilen numunelere mikro yapı incelemesi de yapılmıştır. Şekil 4.13 mikro yapılarda meydana gelen değişimleri göstermektedir.



Şekil 4.13 Deneme numunelere ait mikro yapı görüntüleri a) 2 kg 740 °C, b) 2 kg 720 °C, c) 2 kg 700 °C, d) 4 kg 740 °C, e) 4 kg 720 °C, f) 4 kg 700 °C, g) 4 kg seri üretim (Numune kodları; sıvı metal miktarı-uygulama sıcaklığı-karıştırma süresi olarak belirlenmiştir.)



Şekil 4.13 Deneme numunelere ait mikro yapı görüntüleri a) 2 kg 740 °C, b) 2 kg 720 °C, c) 2 kg 700 °C, d) 4 kg 740 °C, e) 4 kg 720 °C, f) 4 kg 700 °C, g) 4 kg seri üretim (Numune kodları; sıvı metal miktarı-uygulama sıcaklığı-karıştırma süresi olarak belirlenmiştir.) (devamı)

2 kg lık numunelere bakıldığında genel olarak mikro çekintilerin meydana geldiği görülmektedir. Yapısal bir inceleme yapıldığında karıştırma süresinin artması ile birlikte bu düzensizliğin ortadan kalktığı görülmektedir. 700 °C 300 sn karıştırma ile yapının daha homojen bir hal aldığı görülmektedir. 4 kg lık denemelere ait numunelere bakıldığında 2 kg lık numunelere göre daha düzenli bir yapı görülmektedir. Benzer şekilde sıcaklığın azalmasına karşılık karıştırma süresinin artması içyapının daha homojen ve küçük olmasını sağlamıştır.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde proje kapsamında elde edilen bulgular ile ilgili önerilerimiz maddeler halinde sıralıyor olacağız.

Proje ve tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonucu ultrasonik yöntemle gaz giderme metodunun A356 alüminyum alaşımı mekanik özellikleri üzerine olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Bu en belirgin şekilde döner rotor ve flaks yardımı ile yapılan gaz giderme sonrası uygulanan 60 sn lik denemede görüldü.

Yapılan çalışmalar gösteriyor ki belirlenen sıvı metal miktarına uygulanan optimum genlik ve optimum ultrasonik işlem süresi sonrası elde edilecek olan sıvı metal cüruf temizleme işlemi sonrası parça üretiminde kullanılabilir temizliğe ulaşacak ve istenen mekanik özellikleri sağlıyor olacaktır.

5.1 Bifilm

Yapılan bifilm incelemelerinde 1 kg lık denemeler için en düşük değerler 60 sn lik ultrasonik uygulama sonucu elde edilmiştir ve süre arttıkça bifilm miktarları artmıştır.

2 kg lık denemelerde 300 sn lik uygulamada 700 ve 740 °C lerde en düşük bifilm değerlerine ulaşılmıştır.

4 kg lık denemelerde ise ultrasonik işlemin 60 sn uygulanması halinde en yüksek bifilm değerleri elde edilirken uygulama süresinin artması bifilm uzunlukları azalmıştır.

Seri üretimde gaz giderme işlemi sonrası ultrasonik işlemin 60 sn uygulanması halinde en düşük bifilm yoğunluğunun elde edildiği görülmüştür.

Görülen bu farkların nedeni 1 kg lık numunelerde metal miktarının az olmasından dolayı 60 sn lik işlemin yeterli gelmesi ve sürenin uzamasına bağlı olarak metal yüzeyine çıkarılmış olan oksit tabakalarının yeniden ergiyik alüminyum içerisine alınmasıdır. Bunu 4 kg lık numunelerde işlem süresinin artmasına paralel olarak bifilm miktarlarının azalması sonucu ile de bağdaştırabiliriz. Burada da metal miktarı kısmen fazla olduğu için işlem süresi 60 sn iken metal temizliği yeteri kadar yapılamamakta ve artan süreye bağlı olarak daha iyi bir metal temizliği sağlanabilmektedir.

5.2 Mekanik Testler

5.2.1 Kopma Dayanımı

2 kg lık denemelerde elde edilen çekme numunelerinin tüm sıcaklıklar için kopma dayanımlarına bakıldığında en uygun değerler 180 sn lik ultrasonik karıştırmanın yapıldığı 720 ve 700 °C lerde görülmektedir.

4 kg lık denemelerde numunelerin kopma dayanımları azalırken 720 ve 740 °C lerde uygulama ile artış meydana gelmiştir. En yüksek kopma değerlerine 720 °C de 300 sn lik uygulama sonrasında ulaşıldığı görülmüştür.

Ayrıca seri üretimde mekanik karıştırma ve flaks uygulaması sonrası alınan numunelerde kopma değerindeki artışın en iyi durumu 60 sn ultrasonik işlem uygulama sonrası görülmüştür.

5.2.2 Charpy Darbe Testi

Aynı sıcaklıkta farklı sürelerde uygulanan ultrasonik işlemde karıştırma süresinin artması charpy test sonuçlarını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir.

4 kg lık sıvı alüminyumda ultrasonik işlemin farklı sürelerde uygulanması durumunda charpy test sonuçlarında azalma görülmektedir. Ancak buradaki azalma

40-45 kJ/m² değerlerinde olup 2 kg lık denemeler ile karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni metal miktarının fazla olmasından dolayı uzun ultrasonik işlem sürelerinin metal yüzeyindeki oksit tabakasını sıvı metal içerisine geri alma kapasitesinin azalmasıdır şeklinde yorumlayabiliriz.

5.2.3 Mekanik Özellikler ile Bifilm İlişkisi

Bifilm yoğunluğunun artması durumunda numunelerin kopma dayanımlarında azalma meydana gelmektedir. Mekanik özellikte meydana gelen azalmaların nedeni yapı içinde kalan inklüzyon ve gaz boşluklarının olumsuz etkisi olarak değerlendirilebilir.

Kopma dayanımı sonuçları incelendiğinde metal içerisindeki bifilm miktarları ile paralel sonuçların elde edildiği görülmüş ve bifilmliğin mekanik özellikler üzerinde direkt etkisi olduğu bu sayede kanıtlanmıştır.

5.3 Makro Yapı Analizleri

Aynı alüminyum miktarında aynı sıcaklıkta fakat farklı ultrasonik karıştırma sürelerinde üretilen numunelerde karıştırma süresinin artması makro yapıda tanelerin küçülmesine yol açmaktadır.

Aynı alüminyum miktarlarında aynı karıştırma sürelerinde farklı sıcaklıklardaki numuneler karşılaştırıldığında ise sıcaklığın azalması ile birlikte makro yapıdaki tane boyutlarının küçüldüğü görülmektedir.

Yapılan her iki karşılaştırma sonucu karıştırma süresinin artması ile tane boyutunun küçültülebildiği ve sıcaklığın da bunun ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Çünkü düşük sıcaklıklarda işlem gerçekleştirildikten sonra yapılan dökümde katılma kısmi olarak daha çabuk gerçekleşeceğinden dolayı elde edilen tane boyutları da daha yoğun bir şekilde sabit kalacaktır.

5.4 Mikro Yapı Analizleri

2 kg lık numunelere bakıldığında karıştırma süresinin artması ile birlikte içyapı düzensizliği ortadan kalkmaktadır. 700 °C 300 sn karıştırma ile yapı daha homojen bir hal almaktadır.

4 kg lık numunelere bakıldığında 2 kg lık denemelere benzer şekilde sıcaklığın azalmasına karşılık karıştırma süresinin artması halinde daha homojen ve küçük taneli içyapı elde edilmektedir.

Mikro yapı incelemesinde de makro yapı incelemesinde olduğu gibi ultrasonik işlem süresi ve sıcaklığa bağlı olarak mikro yapısal özellikler değişmekte ve işlem süresi ile doğru, sıvı metal sıcaklığı ile ise ters orantılıdır.

5.5 Öneriler

Endüstriyel uygulamalar için kullanılmak istenmesi halinde gaz giderme işlemi sonrası 60 sn lik ultrasonik işlem uygulanması 4 kg lık denemelerde olumlu sonuç vermiştir. Ancak bunun firma çalışma şartlarındaki sıvı metal transfer potası tonajına uygun bir şekilde yeniden test edilerek doğrulanması gerekmektedir.

Yapılan denemeler kapsamında bifilm ölçümlerinin; ürünün mekanik özellikleri hakkında önceden bilgi vermesi açısından önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle seri üretim yapan sanayilerde ürün kalitesini araştırma anlamında bifilm incelenmesi yapılabilir.

Bu çalışma özellikle düşük sıcaklıklarda (700 ve 720 °C) farklı ultrasonik uygulama sürelerinde (60 – 180 sn arası) denemeler yapılarak daha da geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Alba-Banea, N., Pabel, T., Villa-Sierra, N. ve Eskin, D. (2013). Effect of ultrasonic melt treatment on degassing and structure of aluminium alloys. *Material Science Forum*, 765, 271-275.
- Büyükuncu, M.G. (2010). *Ötektik altı Al-Si döküm alaşımlarında bileşimin optimizasyonu ile döküm kabiliyeti ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Campbell, J. (2011). *Complete casting hand book, metal casting processes, metallurgy, techniques and design* (1. Baskı). London: Elsevier yayınları.
- Chen, C.J. (2014). *Optimization of mechanical properties in A356 via simulation and permanent mold test-bars*. Doktora Tezi, Department of Materials Science and Engineering - Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio.
- Colley, L.J. (2011). *Micro structure-property models for heat treatment of A356 aluminum alloy*. Doktora Tezi, Materials Engineering - The University of British Columbia, Vancouver
- Çolak, M. ve Kayıkçı, R.(2009). A 356 döküm alaşımında elektromanyetik karıştırmanın mikro yapı ve mekanik özelliklere etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 3, 345-351.
- Demircioğlu, P. (2002). *Alüminyum alaşımlarının dökümünde gaz oluşumu ve gaz giderme tekniklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Dişpınar, D. ve Campbell, J. (2011). *Porosity, hydrogen and bi-film content in Al alloy castings*. *Materials Science and Engineering A* 528 3860-3865.

Donthamsety, S. ve Nageswara, R.D.(2010). Investigation on mechanical properties of A356 nanocomposites fabricated by ultrasonic assisted cavitation. *Journal of Mechanical Engineering*, 4, 2.

Eker, A. A. (2008). *Al ve alaşımları ders notu*. 18 Nisan 2015, www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum_ve_Aluminyum_Ala_simleri.pdf.

Eskin, G.I. (1995). Cavitation mechanism of ultrasonic melt degassing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2, 137-141

Eskin, G.I. (2001). Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys. *Ultrasonic Sonochemistry* 8, 319-325.

Han, S.W., Kumai, S. ve Sato, A. (2002). Effects of solidification structure on short fatigue crack growth in Al-7%Si-0.4%Mg alloy castings. *Material Science and Engineering*, A332, 56-63.

Han, S.W., Kumai, S. ve Sato, A. (2001). Fatigue crack growth behaviour in semi-liquid die-cast Al-7%Si-0.4%Mg alloys with fine effective grain structure. *Material Science and Engineering*, A308, 225-232.

Kaufman, J.G. ve Rooy, E.L. (2004). *Aluminium alloy casting: properties, processes and applications*. 20 Mayıs 2015, Materials Park, OH: ASM International. <http://www.asminternational.org/>

Önel, K., Dokumacı, E., Eken, C., Çubuklusu, H. E., Aybarç, U. ve Çe, Ö. B. (2015). Alüminyum gaz giderme işleminde ultrasonik yöntemin kullanılması. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 667, 17-21.

- Perkins, J.P. (1988). Power ultrasonic equipment - practise and application. *Sonochemistry Sempozyumu, Warwick University, UK*.
- Puga, H., Barbosa, J., Gabriel, J., Seabra, E., Riberio, S. ve Prokic, M. (2011). Evaluation of ultrasonic aluminium degassing by piezoelectric sensor. *Journal of Materials Processing Technology*, 1026-1033.
- Puga, H., Costa, S., Barbosa, J. ve Ribeiro, C.S. (b.t.). *Use of acoustic energy in the processing of molten aluminium alloys*. 18 Mayıs 2015, <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/26067/4/Use%20of%20Acoustic%20Energy%20in%20the%20Processing%20of%20Molten%20Aluminium%20Alloys.pdf>
- Puga, H. (2010). *Ultrasonic treatment of aluminium alloys*, *Semana de Engenharia*, 28 Haziran 2015, http://www3.dsi.uminho.pt/seeum2010/cd/artigos/1673_2.pdf
- Puga, H., Barbosa, J., Costa, S., Ribeiro, S., Pinto, A.M.P. ve Prokic, M. (2013). Influence of indirect ultrasonic vibration on the microstructure and mechanical behavior of Al–Si–Cu alloy. *Materials Science & Engineering A* 560, 589-595.
- Savaş, Ö. (2005). *Alüminyum-Silisyum döküm alaşımlarında mikro porozite oluşumuna etki eden faktörlerin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Kocaeli.
- Tavitas, F. J, Medrano, S., Valtierra, J.E., Gruzleski, F.H., Samuel, ve Doty, H.W. (2008). *A TEM study of the aging behavior of 319 type alloys*. 14 Haziran 2015, <https://getinfo.de/en/search/id/BLCP%3ACN069453749/>.
- Tiryakioğlu, M., Staley, J.T., Campbell, J. (2004). Evaluating structural integrity of cast Al–7%Si–Mg alloys via work hardening characteristics II. A new quality index. *Materials Science and Engineering*, A368, 231-238.

Uludağ, M. (2011). *Farklı şartlarda dökülmüş modifiyeli Al-12Si alaşımlarında yapı ve özellikler*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Uludağ, M., Çetin, M., Bingöl, M., Ortaç, Ö., Dişpınar, D. (2014). Al-7Si-0,3Mg alaşımında Sr modifikasyonunun Si morfolojisine ve porozite üzerine etkisi, *Selçuk Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya*.

Xu, H., Jian, X., Meek, T.T. ve Han, Q. (2004). Degassing of molten aluminum A 356 alloy using ultrasonic vibration. *Materials Letters*, 58, 3669-3673.

Zhang, L. (2013). *Ultrasonic processing of aluminum alloys*. Yüksek Lisans Tezi, Materials Science and Engineering University of Science and Technology, Beijing-China.