KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ULTRASONİK TİTREŞİM UYGULAMASI İLE A360 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

FAHRİ VATANSEVER

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ULTRASONİK TİTREŞİM UYGULAMASI İLE A360 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

FAHRİ VATANSEVER

Prof. Dr. Sedat KARABAY		
Danışman,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....
Prof. Dr. Şenol YILMAZ		
Jüri Üyesi,	**Sakarya Üniversitesi**	.....
Yrd. Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK		
Jüri Üyesi,	**Kocaeli Üniversitesi**	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 21.12.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Alüminyum ve alaşımları ekonomik ve hafif olmaları, mekanik ve fiziksel özellikleri, korozyona karşı gösterdikleri dayanım, farklı yöntemlerle üretilebilme kabiliyetleri ve daha birçok nedenle makine, imalat, inşaat ve ulaşım başta olmak üzere birçok sektörde kullanımı hızla artmakta olan bir malzemedir.

Hızla gelişen teknolojiye paralel olarak malzemelerden beklenilen nitelikler de artmaktadır. Bu durum farklı yöntemler kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Ultrasonik titreşim uygulaması malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılan, diğer yöntemlere kıyasla nispeten yeni bir yöntemdir. Bu çalışmada A360 alüminyum alaşımının mikroyapısını, dolayısıyla mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla ultrasonik titreşim uygulamasının etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmam için ihtiyaç duyulan maddi desteği sağlayan Kocaeli Üniversitesi Rektörlüğüne, her türlü ilgi ve alakayı gösteren değerli tez danışmanım Prof. Dr. Sedat KARABAY'a, süreç boyunca her türlü desteği sağlamakla birlikte aynı zamanda mesleki açıdan gelişmeme büyük katkıları olan sevgili hocalarım Yrd. Doç. Dr. Alpay Tamer ERTÜRK ve Yrd. Doç. Dr. Ersin Asım GÜVEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için gerekli teknik donanımın temin edilmesinde katkılarını esirgemeyen ÇEMSAN A.Ş.'ye ve çalışmada kullanılan alüminyum alaşımının tedariğini sağlayan ŞİRVANLI Alüminyum Döküm ve Metal İşleme San. Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan deneysel çalışmalar için her türlü teknik desteği sağlayan teknisyen Abdulkadir YAYLA'ya ve Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı'ndaki çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen meslektaşım Arş. Gör. Erhan BALCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Taramalı elektron mikroskobu çekimleri ve EDS analizlerinde yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Muzaffer ZEREN ve Uzm. Serap GÜMÜŞ'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak beni büyüterek bu günlere getiren sevgili annem Zehra VATANSEVER ve babam Fikri VATANSEVER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Söz konusu tez çalışması Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından 2017/002 proje numarası ile desteklenmiştir.

Aralık - 2017 Fahri VATANSEVER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 3
1.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları 3
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması 6
1.2.1. Dövme alüminyum alaşımları 7
1.2.2. Döküm alüminyum alaşımları 8
1.2.3. Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemleri 9
1.3. Ultrasonik Titreşim 11
1.3.1. Ultrasonik titreşim kullanılarak tane inceltme 11
1.4. Literatür Araştırması 14
2. MALZEME VE YÖNTEM 33
2.1. Al-Si Alaşımları ve A360 Alüminyum Alaşımı 33
2.2. Çalışmada Kullanılan Ultrasonik Titreşim Uygulama Ekipmanı 36
2.3. Deneysel Yöntem 38
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 48
3.1. Ultrasonik Titreşim Uygulamasının Malzemenin Mikroyapısı Üzerine Etkisi 48
3.1.1. Optik mikroskop görüntüleri 49
3.1.2. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri 55
3.1.3. İkincil dendrit kolları arasındaki mesafe 61
3.2. Ultrasonik Titreşim Uygulamasının Malzemenin Sertliğine Etkisi 65
3.3. Ultrasonik Titreşim Uygulamasının Malzemenin Çekme Dayanımı Üzerine Etkisi 70
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 73
KAYNAKLAR 75
EKLER 80
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 119
ÖZGEÇMİŞ 120

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. 2016 yılında dünya üzerinde gerçekleşen alüminyum tüketiminin sektörlere göre dağılımı 3
Şekil 1.2. Audi A8 model otomobil şasisinde kullanılan alüminyum parçalar 5
Şekil 1.3. 70Cu-30Zn alaşımı için Hall-Petch diyagramı 12
Şekil 1.4. Eriyiğe ultrasonik titreşim uygulanması esnasında meydana gelen olaylar 13
Şekil 1.5. Ultrasonik titreşim uygulamasının AA2014 ve AA7075 alaşımlarının mikroyapıları üzerindeki etkisi; (a) ultrasonik titreşim uygulanmamış AA2014 alaşımı, (b) 5 dk boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış AA2014 alaşımı, (c) ultrasonik titreşim uygulanmamış AA7075 alaşımı, (d) 5 dk boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış AA7075 alaşımı 14
Şekil 1.6. 634-574 °C arasında sürekli olarak ultrasonik titreşim uygulanmış A356 alüminyum alaşımının mikroyapıları; (a) ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın, (b) titreşim uygulaması ile 15
Şekil 1.7. A356 alüminyum alaşımında, SEM ile 2000x büyütmede görüntülenen ötektik modifikasyon; (a) ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın, (b) ultrasonik titreşim uygulaması ile 16
Şekil 1.8. Ultrasonik titreşim uygulamasının Al-11Cu alaşımının mikroyapısı üzerine etkisi; (a) radyatör eriyiğe daldırılmış ancak ultrasonik titreşim uygulanmamış, (b) ultrasonik titreşim uygulanmış 19
Şekil 1.9. Ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda elde edilen Al-%8Si alaşımının mikroyapıları; (a) titreşim uygulaması olmaksızın, (b) 1. durum, (c) 2. durum, (d) 3. durum 31
Şekil 2.1. Al-Si faz diyagramı 33
Şekil 2.2. Ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü ticari Al-Si alaşımlarının mikroyapıları; (a) α-alüminyum fazı içerisinde gelişen fan şekilli Al_{51}-$(MnFe)_3$-Si_2 fazı, silisyum kristalleri, Al_2Cu ve kompleks ötektik bölgeler içeren ötektik altı A319(Al-5.7Si) alaşımı, (b) α-alüminyum dendritleri, birincil silisyum taneleri ve kompleks ötektik bölgeler içeren ötektik A339(Al-11.9Si) alaşımı, (c) büyük birincil silisyum taneleri, ötektik silisyum kristalleri ve α-alüminyum matris fazında Al_2Cu fazı bulunduran ötektik üstü A390(Al-15Si) alaşımı 34
Şekil 2.3. A360 alaşımı kullanılarak kokil kalıba döküm ve kum kalıba döküm yöntemleriyle üretilmiş parçalar 36
Şekil 2.4. Alüminyum eriyiğe ultrasonik titreşim uygulamasında kullanılan düzeneğin şeması 36
Şekil 2.5. Alüminyum eriyiğe ultrasonik titreşim uygulanmasında kullanılan düzenek 38

Şekil 2.6. Deneysel çalışma aşamaları 39
Şekil 2.7. Külçe halindeki alaşımın şerit testerede kesilmesi..... 40
Şekil 2.8. Alaşımın ergitilmesinde kullanılan Vesta marka elektrikli fırın..... 41
Şekil 2.9. Radyatörün pota içerisindeki eriyiğe daldırılarak ultrasonik titreşimin eriyiğe iletilmesi 42
Şekil 2.10. Eriyik alaşımın döküldüğü kalıplar; (a) 23 °C, (b) 300 °C 42
Şekil 2.11. Metkon marka metalografik taşlama ve parlatma cihazı 43
Şekil 2.12. Mikroskop görüntüsü almaya hazır numuneler..... 44
Şekil 2.13. Ultrasonik titreşim genliğinin ölçülmesi..... 44
Şekil 2.14. Leica marka optik mikroskop..... 45
Şekil 2.15. Jeol marka SEM cihazı..... 46
Şekil 2.16. (a) Wolpert marka sertlik ölçme cihazı, (b) Dartec marka çekme test cihazı..... 47
Şekil 2.17. ASTM B557M-10 standardına göre çekme numunesi boyutları 47
Şekil 3.1. 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunelerin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) mikroyapı görüntüleri; (a) Titreşim uygulanmamış, (b) 180 sn, (c) 300 sn, (d) 600 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 49
Şekil 3.2. 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 2 numaralı numunelerin (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit) mikroyapı görüntüleri; (a) Titreşim uygulanmamış, (b) 20 kHz, (c) 17,5 kHz, (d) 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış 50
Şekil 3.3. 20 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış 3 ve 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) mikroyapı görüntüleri; (a) ve (b) Titreşim uygulanmamış, (c) ve (d) 180 sn, (e) ve (f) 300 sn, (g) ve (h) 600 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış (a, c, e, g: ısıl işlem uygulanmamış, b, d, f, h: T6 ısıl işlemi uygulanmış) 52
Şekil 3.4. 20 kHz frekansında, 180 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış farklı numunelerin mikroyapı görüntüleri; (a) titreşim uygulanmamış 1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit), (b) titreşim uygulanmış 1 numaralı numune, (c) titreşim uygulanmamış 2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit), (d) titreşim uygulanmış 2 numaralı numune, (e) titreşim uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit), (f) titreşim uygulanmış 3 numaralı numune..... 54
Şekil 3.5. 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunelerin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri; (a), (c) ve (e) 180 sn, (b), (d) ve (f) 300 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış..... 57
Şekil 3.6. 20 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri; (a) ultrasonik titreşim uygulanmamış, (b) 180 sn, (c) 300 sn, (d) 600 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış..... 58
Şekil 3.7. 17,5 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 3 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) EDS analizleri 59

Şekil 3.8. 20 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış ve T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) EDS analizleri 60
Şekil 3.9. İkincil dendrit kolları arasındaki mesafenin ölçülmesinde kullanılan yöntemler 62
Şekil 3.10. 1 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafelerin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 63
Şekil 3.11. 2 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit) numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafelerin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 64
Şekil 3.12. 3 numaralı (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafelerin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 65
Şekil 3.13. 1 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 66
Şekil 3.14. 2 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit) numunelerin sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 67
Şekil 3.15. 3 numaralı (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 68
Şekil 3.16. T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 69
Şekil 3.17. 3 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) çekme dayanımının uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 70
Şekil 3.18. T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) çekme dayanımının uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi 71

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Metalik elementlerin yoğunlukları 4
Tablo 1.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 7
Tablo 1.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 8
Tablo 2.1. A360 alaşımının kimyasal bileşimi 35
Tablo 2.2. A360 alaşımının özellikleri 35
Tablo 2.3. Kalıplardan alınan numunelerin özellikleri 40
Tablo 2.4. Deney parametreleri 40
Tablo 2.5. T6 ısıl işlemi için önerilen sıcaklık ve süreler 43
Tablo 3.1. Çekilen görüntülerin ve yapılan analizlerin EKLER kısmındaki sayfa numaraları 48

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ϕ : Çap

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing Materials (Amerikan Test Malzemeleri Topluluğu)
EDS	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi)
HB	: Hardness Brinell (Brinell Sertliği)
İDKA	: İkincil Dendrit Kolları Arasındaki Mesafe
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SiC	: Silisyum Karbür
UST	: Ultrasonic Treatment (Ultrasonik Titreşim Uygulaması)

ULTRASONİK TİTREŞİM UYGULAMASI İLE A360 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının A360 alüminyum alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla eriyik halindeki A360 alaşımına farklı frekans ve sürelerde ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Ayrıca farklı ultrasonik titreşim parametreleri sonucunda elde edilen numunelere T6 ısıl işlemi uygulanarak ultrasonik titreşim ile T6 ısıl işlemi kombinasyonunun mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen numunelerin mikroyapıları optik ve taramalı elektron mikroskoplarıyla incelenmiş, ayrıca sertlik ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ultrasonik titreşim uygulamasının kaba dendritler halindeki birincil α-Al fazını daha küçük dendritlere dönüştürdüğünü göstermektedir. Ayrıca ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe azalırken, sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerde artış meydana gelmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum, Tane İnceltme, Ultrasonik Titreşim.

IMPROVING MECHANICAL PROPERTIES OF A360 ALUMINUM ALLOY USING ULTRASONIC VIBRATION

ABSTRACT

In this study, ultrasonic vibration treatment effects on the microstructure and mechanical properties of A360 alloy were investigated. For this purpose ultrasonic vibration treatment with different frequencies and durations was applied to A360 alloy melt. Also T6 heat treatment was applied to samples which were obtained by ultrasonic vibration with different parameters in order to investigate the combination of T6 heat treatment and ultrasonic vibration treatment effect on the microstructure and mechanical properties. The microstructure of cast samples was characterized by optical and scanning electron microscopy, also hardness and tensile tests were carried out. The results indicate that in the case of the ultrasonic vibration treatment, primary α-Al phases are transformed from coarse dendrites to smaller dendrites. Besides, secondary dendrite arm spacing of the alloy decreased and mechanical properties such as hardness and tensile strength increased.

Keywords: Aluminum, Grain Refinement, Ultrasonic Vibration.

GİRİŞ

Alüminyum ve alaşımları gösterdikleri birçok üstün özellikle çelikten sonra gelen en önemli ikinci endüstriyel metal olmakla beraber günlük yaşantımızda da sıklıkla karşılaştığımız bir malzemedir [1, 2]. Hızla gelişen teknolojiye paralel olarak malzemelerin karşılaması gereken nitelikler de artmaktadır. Bu durum farklı yöntemler kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Ultrasonik titreşim uygulaması malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılan, diğer yöntemlere kıyasla nispeten yeni bir yöntemdir.

Ultrasonik titreşimler insan kulağının duyamayacağı seviyedeki frekanslara sahip (20 kHz – 1 GHz) titreşimler olarak tanımlanmaktadır [3]. Sağlık sektöründen mühendisliğe, imalattan askeri teknolojilere kadar birçok alanda ultrasonik titreşim uygulamalarının sayısız örneğine rastlanmaktadır.

Ultrasonik titreşim uygulaması metalürjide eriyik halindeki alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu uygulama sonucunda mikroyapıda tane incelmesi sağlandığı, segregasyonun azaldığı, homojenliğin arttığı, mekanik özelliklerin iyileştiği ve alaşım içerisinde çözünen gazların giderildiği birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir [4-35].

Eriyik halindeki alaşımların ultrasonik titreşim kullanılarak işlenmesi ile ilgili laboratuvar düzeyindeki ilk denemeler 1940'lı, endüstriyel düzeydeki ilk denemeler ise 1950-1960'lı yıllara dayansa da bu proses halen seri üretimde kullanılarak nihai ürüne yansımamıştır. Son yıllardaki teknolojik gelişmelere bağlı olarak gelişmiş ekipmanların üretilmesi, modelleme tekniklerindeki gelişmeler ve endüstrideki temiz teknolojiye olan talep sebebiyle son 15 yılda konu ile ilgili araştırmalarda büyük bir artış yaşanmıştır [36, 37].

Bu tez çalışmasının amacı ultrasonik titreşim uygulamasının A360 alüminyum alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesidir. Bu amaçla A360 alüminyum alaşımı eriyiğine 20 - 17,5 - 15 kHz frekanslarında ve 0, 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış ve elde edilen

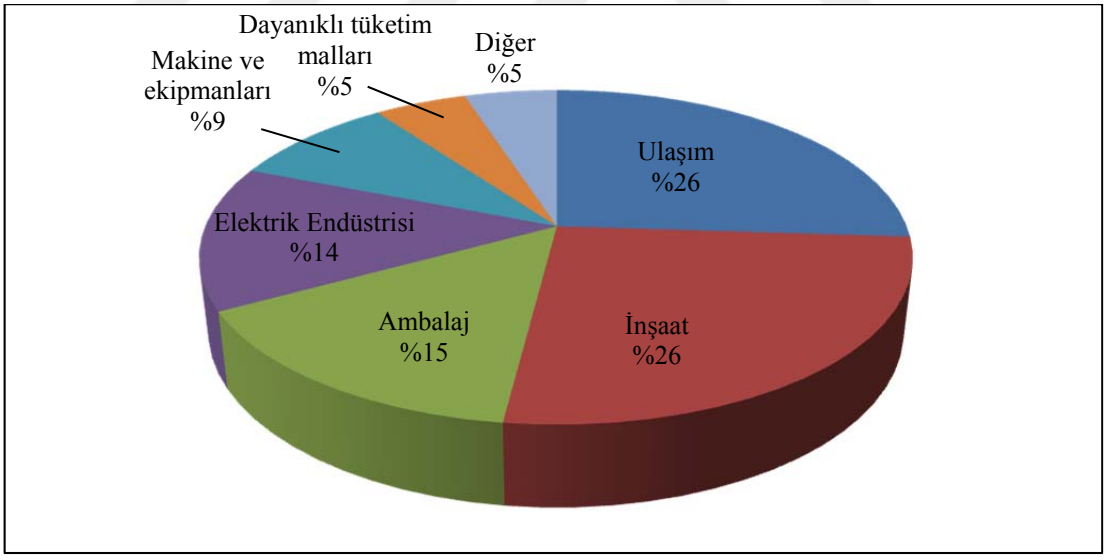
numunelerin, mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca elde edilen numunelerin bir kısmına T6 ısıl işlemi uygulanarak ultrasonik titreşim ile T6 ısıl işlemi kombinasyonunun malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en fazla bulunan element olan alüminyum, ekonomik ve hafif oluşu, mekanik ve fiziksel özellikleri, korozyon dayanımı, dökülebilme, dövülebilme ve talaşlı işlenme kabiliyeti, görünümü, elektrik ve ısı iletkenliğinin iyi olması gibi özellikler sergilemesi nedeniyle çelikten sonra gelen en önemli ikinci endüstriyel metaldir [1, 2].

Alüminyum ve alaşımları başta ağırlığın önemli olduğu otomotiv, havacılık, kara, demir ve deniz yolu ulaşımı, inşaat sektörleri olmak üzere ambalaj, iletken tel üretimi, makine imalatı ve ev araç gereçleri gibi birçok sektörde kullanılmaktadır [1, 2].



Şekil 1.1. 2016 yılında dünya üzerinde gerçekleşen alüminyum tüketiminin sektörlere göre dağılımı [38]

Saf haldeki alüminyum uygulanan ısıl işleme bağlı olarak 90 ile 140 N/mm^2 çekme dayanımına sahiptir. Bu haliyle kullanım alanının kısıtlı olması ile beraber iletken üretimi ve ambalaj sektörlerinde kullanılmaktadır. Saf alüminyum alaşımlandırılarak çekme dayanımı 500 N/mm^2'nin üzerine kadar çıkarılabilmektedir. Genel olarak

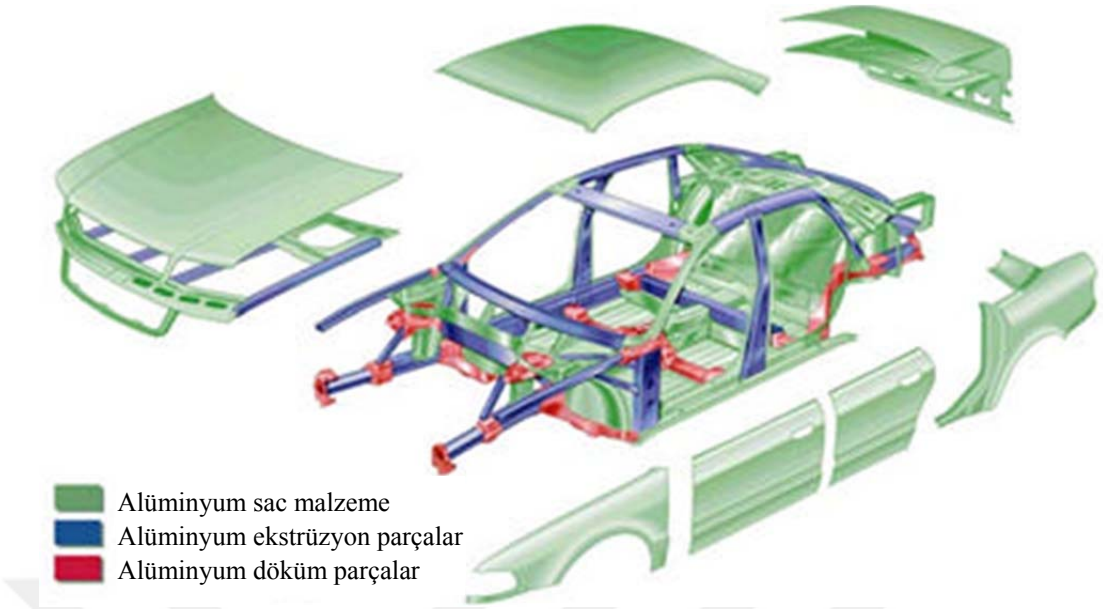
kullanılan 300'den fazla alüminyum alaşımı olmakla beraber birçok farklı alaşım şirket-müşteri ilişkileri çerçevesinde geliştirilmiş ve üretilmiştir [1, 39].

Alüminyumun yoğunluğunun (2,7 g/cm^3) sanayide en çok kullanılan metal olan çeliğin (7,83 g/cm^3) yoğunluğunun neredeyse üçte biri olması alüminyumun tercih edilmesindeki en önemli neden olarak ön plana çıkmaktadır. Hafif olmasına ek olarak sahip olduğu yüksek dayanım/ağırlık oranı alüminyumu diğer metaller karşısında avantajlı hale getirmektedir [40, 41].

Tablo 1.1. Metalik elementlerin yoğunlukları [39]

Element		Yoğunluk (g/cm^3)	Alüminyuma göre yoğunluk
Lityum	Li	0,53	0,20
Magnezyum	Mg	1,74	0,64
Alüminyum	Al	2,70	1,00
Titanyum	Ti	4,51	1,67
Çinko	Zn	7,13	2,64
Kalay	Sn	7,28	2,70
Demir	Fe	7,87	2,92
Bakır	Cu	8,93	3,31
Gümüş	Ag	10,50	3,89
Kurşun	Pb	11,34	4,20
Altın	Au	19,28	7,15
Osmiyum	Os	22,58	8,37

Yoğunluğuna göre dayanımının yüksek olması yakıt tüketiminin taşıt ağırlığına bağlı olduğu ulaşım sektöründe alüminyumu taşıt araçlarının üretiminde kullanılan en önemli malzemelerden biri yapmaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere dünya üzerinde gerçekleşen alüminyum tüketiminin yaklaşık dörtte biri taşıt araçlarının üretimine aittir. Otomotiv sektöründe alüminyumdan imal edilmiş motor bloğu, dişli kutusu ve pompa gövdeleri, jantlar, silindir başlıkları, pistonlar, koltuk kızakları, darbe çubukları, radyatörler ile sac parçalar yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 40, 42]. Ayrıca otomotiv sektörüne ek olarak ulaşım ve taşımacılık için kullanılan uçak, tren vagonları ve deniz araçları ile günümüzde kullandığımız daha birçok araçta çeşitli alüminyum parçalar kullanılmaktadır. Örneğin hava araçlarında, helikopter pervaneleri, uçak gövde ve kanatları ile birçok diğer parçanın imalatında alüminyum kullanılmaktadır. Öyle ki ticari taşımacılıkta kullanılan uçaklarda kullanılan alüminyum miktarı ağırlıkça %70'i bulabilmektedir [41].



Şekil 1.2. Audi A8 model otomobil şasisinde kullanılan alüminyum parçalar [42]

Alüminyumun folyo şeklinde üretilebilmesi, kolay şekillendirilebilmesi ve hava geçirmez oluşu alüminyumu iyi bir ambalaj malzemesi yapar. Alüminyum bu özellikleriyle bugün meşrubat kutularından çikolata paketlerine kadar birçok üründe ambalaj malzemesi olarak kullanılmaktadır [40].

Alüminyum mükemmel düzeyde elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Alüminyumun elektrik iletkenliği aynı ağırlıktaki bakırın neredeyse iki katıdır. Bu nedenle yüksek iletkenlik ve mekanik özelliklerin ihtiyaç duyulduğu uzun, yüksek voltajlı elektrik iletim hatlarında kullanılan çelik özlü alüminyum tellerin üretiminde kullanılan yegane malzeme olmuştur. Buna ek olarak alüminyum yeraltı kablolarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyumun ısıl iletkenliği ise bakırın yaklaşık olarak %50-60'ı civarındadır. Bu sebeple ısı değiştirgeçleri, evaporatörler, otomobil radyatörleri ve silindir başlıkları üretiminde kullanılmaktadır [1, 40].

Alüminyum sahip olduğu mekanik özelliklerin yanı sıra sahip olduğu dekoratif görünüm dolayısıyla inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca boyanabilen ve kaplanabilen özellikte olması alüminyumun inşaat sektöründeki kullanım alanını arttırmaktadır [40].

Alüminyumun manyetik olmayan özellikte olması, kıvılcım üretmemesi, atmosferde, tatlı ve tuzlu suda, petrokimyasal ve kimyasalları içeren birçok ortamda üstün korozyon dayanımı sergilemesi, zehirli bileşen içermemesi, çevre dostu olması ve geri dönüşümünün kolay olması diğer özellikleri arasında sayılabilir [1, 41].

Alüminyumun geri dönüşümünün kolay olmasının yanı sıra cevherden üretime göre daha düşük maliyetli olması nedeniyle dünya üzerindeki alüminyumun %50'si ikincil alüminyum üretimi olarak adlandırılan ve hurda alüminyumun geri dönüştürülerek tekrar yarı mamul haline getirilmesi olarak tanımlanabilecek olan yöntem ile üretilmektedir. Alüminyumun sonsuz defa geri kazanımı yapılabilen bir malzeme olması bu yöntemi öne çıkaran diğer bir faktördür [41].

Alüminyum cevherinin işlenerek alüminyum malzemenin üretilmesi ise birincil alüminyum üretimi olarak tanımlanır. Birincil alüminyum üretiminde önce alüminyumun hammaddesi olan boksit cevheri Bayer prosesi ile alüminaya (Al_2O_3) dönüştürülür. Elde edilen alümina daha sonra yüksek elektrik akımı ile elektroliz işlemine tabi tutularak saf alüminyum elde edilir [39, 41].

1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Saf alüminyum düşük dayanıma ve sertliğe sahiptir [1]. Bu haliyle birçok mühendislik uygulaması için gerekli olan özellikleri karşılamadığından, endüstride genellikle Cu, Mn, Si, Mg, Zn gibi diğer elementler ile alaşımlandırılarak kullanılır.

Alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılmasında dünya üzerinde birçok standart olmakla beraber dünya genelinde en çok kabul gören ve kullanılan gösterim şekli Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Alüminyum Birliği'nin (Aluminum Association – AA) kullandığı standarttır [39].

Alüminyum ve alaşımları genellikle dövme ve döküm alaşımları olmak üzere iki kategoriye ayrılarak incelenirler. Daha detaylı bir sınıflandırma yapılmak istenildiğinde ısıl işlem görebilen alaşımlar ya da şekil değiştirme sertleşmesi uygulanabilen alaşımlar gibi terimler kullanılarak da sınıflandırılmaktadırlar [1].

1.2.1. Dövme alüminyum alaşımları

Türkçe literatürde işlenik alüminyum alaşımları olarak da karşımıza çıkabilen dövme alüminyum alaşımları genellikle biyet, kütük gibi formlarda üretilirler. Bu biyet ve kütükler daha sonra haddeleme, ekstrüzyon, dövme ve çekme gibi plastik şekil verme yöntemleri kullanılarak nihai ürün haline getirilir [43].

Alüminyum Birliğinin sınıflandırmasına göre dövme alüminyum alaşımları dört rakamdan oluşan bir gösterim ile sınıflandırılırlar. Buradaki ilk rakam ana alaşım elementini belirtir. Tablo 1.2'de ilk rakama göre dövme alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri verilmiştir. İkinci rakam söz konusu alaşımın varyasyonlarını gösterir. Burada varyasyondan kasıt alaşım elementinin miktarındaki değişikliklerdir. 1xxx serisi için son iki rakam en az alüminyum yüzdesini gösterir. 1xxx serisinde en az %99 oranında alüminyum bulunduğundan buradan yola çıkarak örneğin %99,50 saflıkta alüminyum içeren bileşim 1050 ile gösterilmektedir. Diğer seriler için son iki rakam ise isimlendirilen alaşım hangisi ise o alaşım için tayin edilen rakamlardır [43].

Tablo 1.2. Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [1]

Seri	Ana alaşım elementi
1xxx	Saf alüminyum (≥ %99,00)
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan seri

1.2.2. Döküm alüminyum alaşımları

Döküm alüminyum alaşımları kokil kalıba döküm, kum kalıba döküm ve yüksek basınçlı döküm gibi yöntemler kullanılmak suretiyle döküm parçaların üretilmesinde kullanılırlar.

Alüminyum Birliğinin sınıflandırmasına göre döküm alüminyum alaşımları da dövme alüminyum alaşımlarına benzer şekilde dört rakamdan oluşan bir gösterimle sınıflandırılırlar. Dövme alüminyum alaşımlarına benzer şekilde burada da ilk rakam ana alaşım elementini belirtir. İkinci ve üçüncü rakamlar 1xx.x serisi için alüminyumun saflık miktarını belirtirken, diğer seriler için isimlendirilen alaşım için tayin edilen rakamlardır. Dövme alüminyum alaşımlarından farklı olarak bir nokta ile diğerlerinden ayrılan dördüncü rakam ise ürünün üretim formunu belirtmektedir. Burada xxx.0 döküm parçayı, xxx.1 ve xxx.2 ingot dökümünü ifade etmektedir [43].

Tablo 1.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [1]

Seri	Ana alaşım elementi
1xx.x	Saf alüminyum (≥ %99,00)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silisyum (Cu ve Mg ile birlikte)
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer elementler

1.2.3. Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemleri

Isıl işlem metallerin iç yapısını, dolayısıyla sertlik, mukavemet gibi mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan ısıtma ve soğutma işlemlerinin genel adıdır. Alüminyum alaşımlarında kullanılan ısıl işlemler çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma proseslerinden ibarettir.

Alüminyum alaşımlarında ısıl işlem ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi alaşımı oluşturan bileşenlerin çözünürlüğünün sıcaklık ile değişmesi mekanizmasına dayanmaktadır. Alaşımı sertleştiren Cu ve Mg elementlerinin solidüs sıcaklığındaki katı hal çözünürlüğü yüksektir. Bu çözünürlük sıcaklığın düşmesi ile belirgin ölçüde azalmaktadır. Çözeltiye alma işlemi katı çözeltide çözünen bileşimin miktarını arttırmak amacıyla ötektik sıcaklığın hemen altında bir sıcaklıkta ısıtma yapılarak bu sıcaklıkta çözünme işleminin gerçekleşmesi için bir süre beklenilmesinden ibarettir [44].

Çözeltiye alma işleminden sonra alaşıma su verilerek "hızlı soğuma" sağlanır ve böylece yüksek sıcaklıkta alaşım içerisinde çözünmüş olan elementler ile fazların çökelmesi engellenerek düşük sıcaklıklarda aşırı doymuş bir yapı elde edilir. Bu işlemin sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi için optimum bir soğuma hızı sağlanmalıdır. Düşük hızda gerçekleşen bir soğuma işlemi kalıntı gerilme ve çarpılma riskini azaltırken, lokal bölgelerde aşırı yaşlanma, tane sınırlarını azaltma, korozyona olan eğilimi arttırma ve yaşlandırma işlemine olan eğilimi azaltma gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Buna karşın yüksek hızda gerçekleşen soğutma işlemi ise yüksek dayanım ve süneklik özelliklerini beraberinde getirmektedir. Su verme işlemi için soğutma hızı seçimi istenilen mikroyapı ve özellikler gözetilerek gerçekleştirilmelidir [44].

Çözeltiye alma işleminden sonra uygulanan diğer bir işlem yaşlandırmadır. Yaşlandırma işleminin amacı kararlı çökeltilerin oluşmasını sağlayarak malzemenin sertliğinin arttırılmasıdır. Yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında yapılırsa "doğal yaşlandırma", daha yüksek sıcaklıklarda yapılırsa "yapay yaşlandırma" olarak adlandırılır [44].

Alüminyum alaşımları için kullanılan temper ve ısıl işlem kısaltmaları aşağıda verilmiştir [1].

F: Üretildiği gibi

O: Tavlanmış

H: Şekil değiştirme sertleşmesi uygulanmış

W: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış

T: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış ve yaşlandırılmış

T1: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış

T2: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş, soğuk şekil değiştirilmiş ve doğal yaşlandırılmış

T3: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, soğuk şekil değiştirilmiş ve doğal yaşlandırılmış

T4: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış

T5: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış

T6: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış

T7: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış ve aşırı yaşlandırılmış

T8: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, soğuk şekil değiştirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

T9: Çözelti ısıl işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekil değiştirilmiş

T10: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş, soğuk şekil değiştirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

1.3. Ultrasonik Titreşim

İngilizce'deki "ultrasonic" ve "ultrasound" kelimelerinden dilimize geçen "ultrasonik" ve "ultrason" kelimeleri ses üstü anlamına gelmektedir. Ses dalgaları bir mekanik titreşim çeşididir. İnsan kulağı mükemmel bir akustik detektör olmakla birlikte, insanların duyma üst limitinin yaş ve diğer faktörlere bağlı olarak 20 kHz civarında olduğu değerlendirilmektedir. Ultrasonik veya diğer adıyla ultrason, insanların duyma üst limitinin üzerindeki frekanslardaki (20 kHz - 1 GHz) ve düşük dalga boylarındaki titreşim olarak tanımlanabilir. Ultrasonik titreşimlerin sağlık sektöründen mühendisliğe birçok uygulama alanı olmakla birlikte, ultrasonik görüntüleme, ultrasonik tahribatsız muayene ve temassız mesafe ölçümü en çok bilinen uygulama alanlarıdır. Ultrasonik titreşim sanayi ve metalürjide yaygın olarak kullanılmaktadır. Uygulama alanlarına örnek olarak kaynak, lehim, plastiklerin birleştirilmesi, kompozit malzemelerin üretimi, çeşitli malzemelerin işlenmesi ve kesilmesi, eriyik halindeki metallerin gaz giderme ve tane inceltme işlemleri gösterilebilir [3, 45].

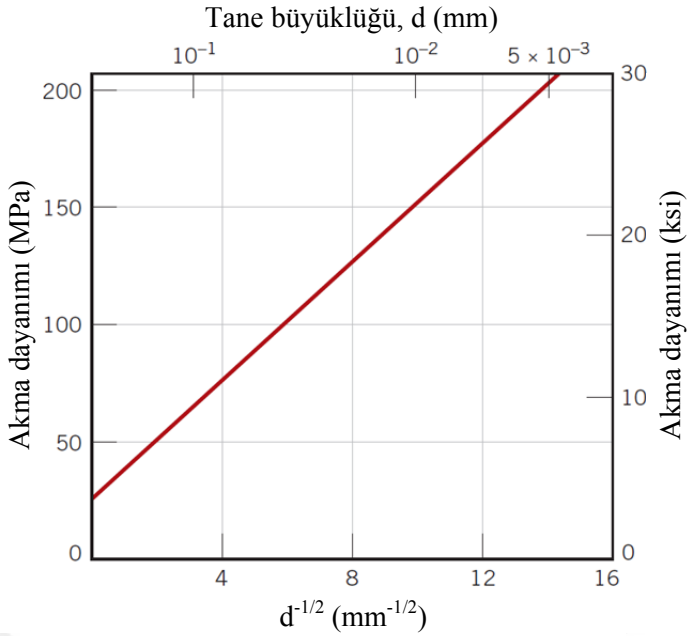
1.3.1. Ultrasonik titreşim kullanılarak tane inceltme

Malzemelerin mekanik özellikleri sahip oldukları tane yapısına bağlıdır. İnce taneli ve eş eksenli tane yapısının mekanik özellikleri geliştirdiği bilinmektedir. Malzemelerin tane büyüklüğü çoğu mekanik özellik üzerinde etkisi olan ölçülebilir bir büyüklüktür. Tane büyüklüğü azaldıkça oda sıcaklığında sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı ve darbe dayanımı artmaktadır [12, 13, 16, 31, 46].

Tane büyüklüğünün akma gerilmesine olan etkisi Hall-Petch bağıntısıyla şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d_o^{-1/2} \qquad (1.1)$$

Denklem (1.1)'de σ_y akma gerilmesini, d_o ortalama tane çapını σ_0 ve k_y farklı malzemeler için sabitleri belirtmektedir [47].



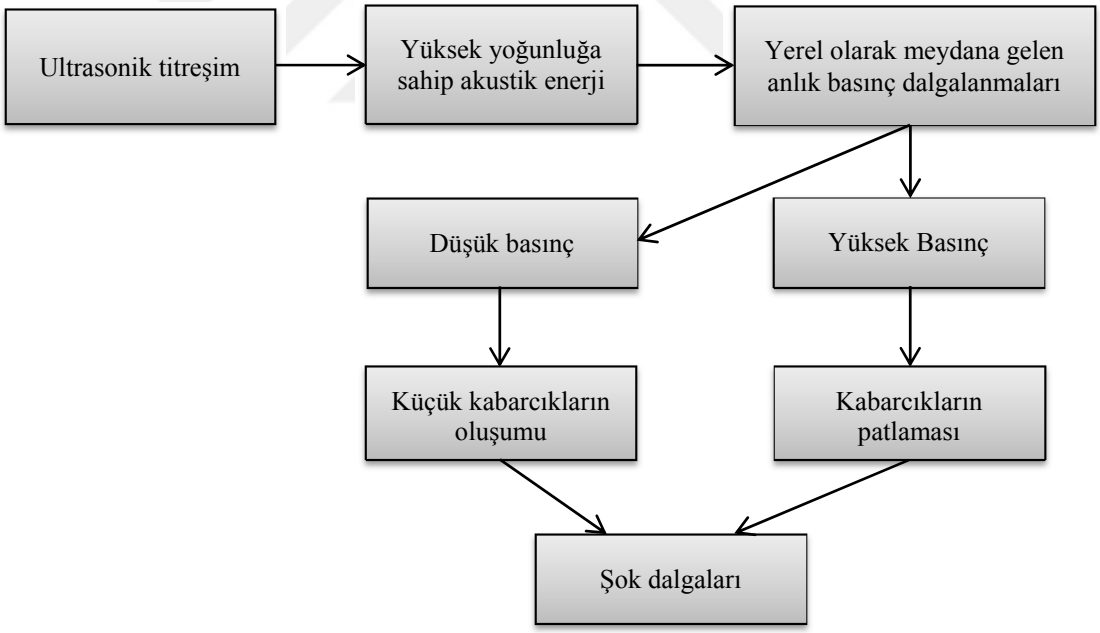
Şekil 1.3. 70Cu-30Zn alaşımı için Hall-Petch diyagramı [47]

Tane büyüklüğünün mekanik özellikleri doğrudan etkilemesinden dolayı mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde tane inceltme işlemi önemli yer tutmaktadır. Tane inceltme işlemi için kullanılan metotlar; soğuma hızının kontrolü, kimyasal metotlar ve fiziksel metotlar olarak sıralanabilir. Tane inceltme işlemi için kimyasal incelticiler en sık kullanılan yöntemdir. Ancak bu amaçla kullanılan incelticiler her alaşım için kullanılamamaktadır. Ayrıca inceltme işlemi esnasında kullanılan kimyasal içeriğin bir kısmı inceltme sağlarken diğer bir kısmı impüriteye dönüşerek mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilmektedir. Bu olumsuz özellikleri nedeniyle bazı durumlarda fiziksel tane inceltme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu yöntemler arasında en bilinenleri elektromanyetik karıştırma, mekanik karıştırma ve ultrasonik karıştırmadır [16, 25, 26, 48, 49].

İngilizce literatürde “Ultrasonic Melt Treatment (UST)” ya da “Ultrasonic Melt Processing” olarak geçen ve dilimize “Eriyik halindeki alaşımların ultrasonik titreşim kullanılarak işlenmesi” olarak çevirebileceğimiz proses, eriyiğin radyatör denen bir araç vasıyasıyla yüksek frekanslardaki ultrasonik titreşime maruz bırakılması olarak tanımlanabilir.

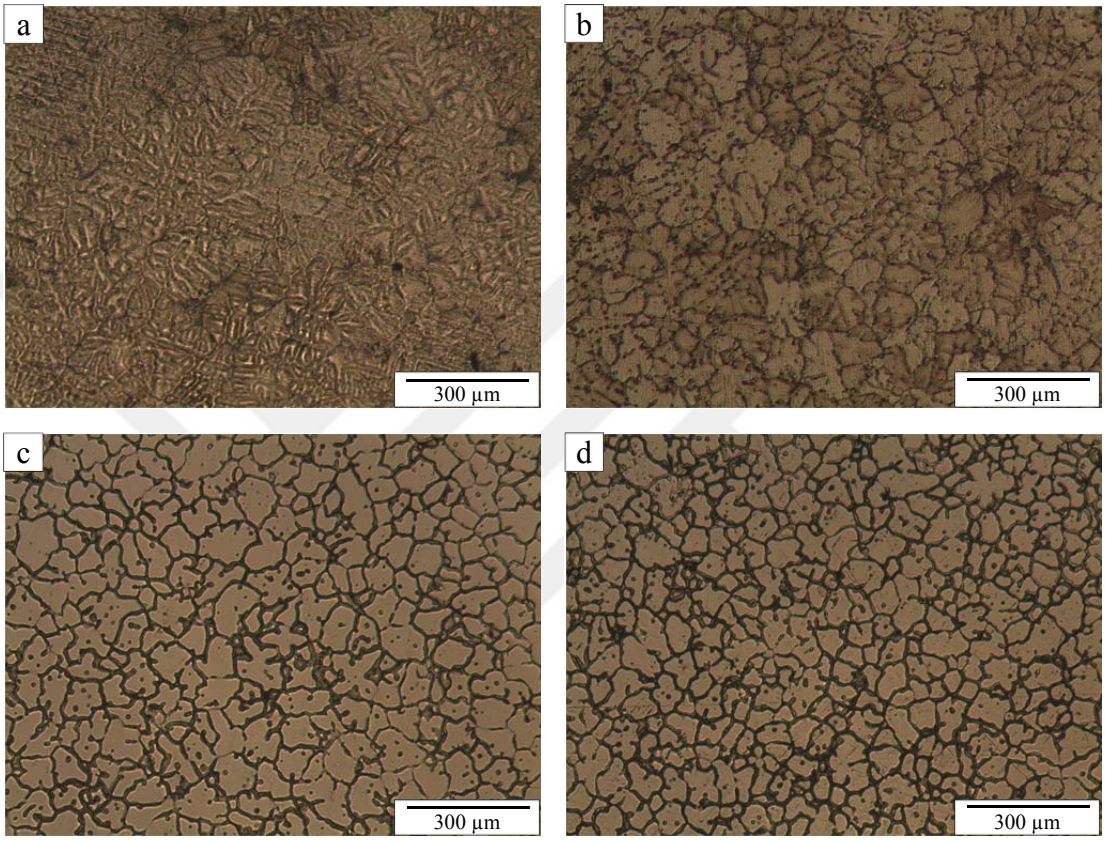
Eriyik halindeki alaşımın yüksek yoğunluktaki ultrasonik titreşime maruz bırakılmasının temel faydaları mikroyapının incelmesi, segregasyonun azaltılması, homojenliğin arttırılması ve alaşım içerisinde çözünen gazların giderilmesidir [12, 24, 50].

Ultrasonik titreşimin eriyik alaşım içerisinde meydana getirdiği değişiklerin en önemli ve en iyi bilinen nedeni kavitasyondur. Ultrasonik titreşim eriyiğe yüksek yoğunlukta akustik enerji uygulamaktadır ve bu enerji anlık olarak yerel basınç dalgalanmalarına neden olur. Bu dalgalanmalar esnasında düşük basınç küçük kabarcıkların oluşmasına neden olurken, yüksek basınç oluşan kabarcıkların patlamasına neden olarak şok dalgaları meydana getirir. Kabarcıkların patlamaları esnasında çok kısa süreli oluşan yerel sıcaklık artışları (1000 °C'ye kadar), yüksek basınçlar (on binlerce MPa) ve kuvvetler meydana gelir. Ortaya çıkan bu fiziksel etkilerin ultrasonik gaz giderme, tane inceltme ve dendritik yapının parçalanması mekanizmalarının nedeni olduğu öne sürülmektedir [48, 50].



Şekil 1.4. Eriyiğe ultrasonik titreşim uygulanması esnasında meydana gelen olaylar [48]

Dendritik mikroyapı gösteren malzemelerde ultrasonik titreşim uygulaması dendritik yapının parçalanmasına sebep olurken eş eksenli tanelere sahip mikroyapı gösteren malzemelerde tanelerin incelmesine sebep olmaktadır. Söz konusu bu durum, bu tez çalışması kapsamında farklı alaşımlarla yapılan deneysel çalışmaların görüntülerinden oluşan Şekil 1.6'da görülmektedir.



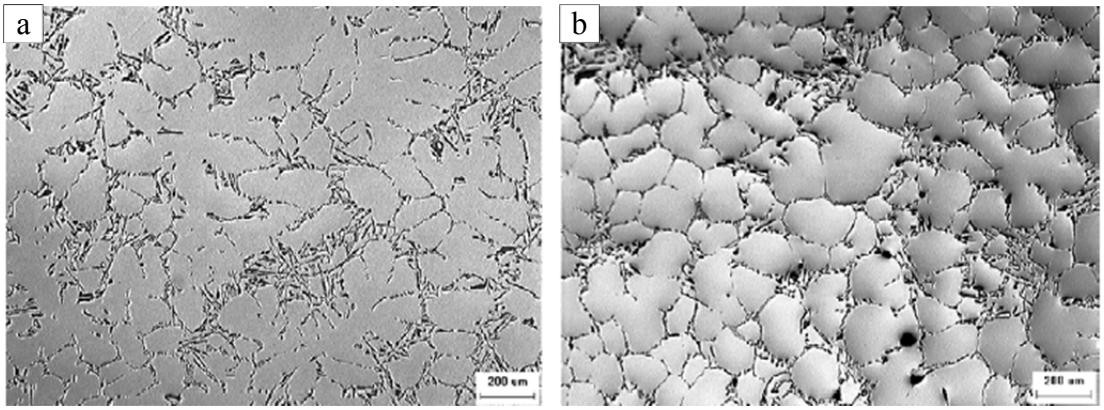
Şekil 1.5. Ultrasonik titreşim uygulamasının AA2014 ve AA7075 alaşımlarının mikroyapıları üzerindeki etkisi; (a) ultrasonik titreşim uygulanmamış AA2014 alaşımı, (b) 5 dk boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış AA2014 alaşımı, (c) ultrasonik titreşim uygulanmamış AA7075 alaşımı, (d) 5 dk boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış AA7075 alaşımı [51, 52]

1.4. Literatür Araştırması

Ultrasonik titreşimler günümüzde birçok sektörde sayısız uygulamada kullanılmaktadır. Bu kullanım bir ölçüm ya da test yapılması şeklinde olabildiği gibi bir ürünün imalatına yönelik de olabilmektedir. İmalat sektörünün bir alt kolu olarak değerlendirilebilecek metalürjik uygulamalarda eriyik halindeki metalin ultrasonik titreşim kullanılarak işlenmesi prosesi ile ilgili ilk denemeler 1940'lı yıllarda yapılmış olsa da söz konusu yöntem henüz endüstriyel bir üretim metoduna

uygulanarak nihai ürün haline getirilebilmiş değildir. Bu konu ile ilgili çalışmalar son yıllarda giderek artmaktadır.

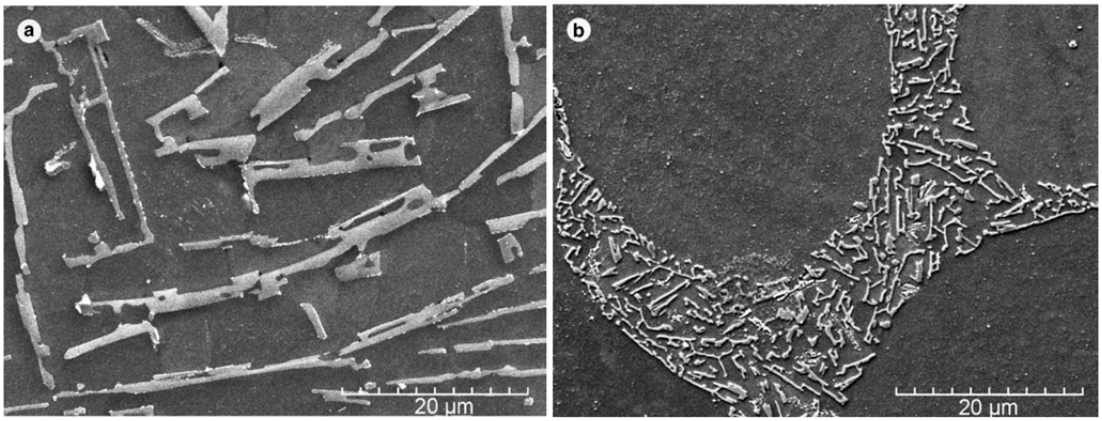
Jian ve arkadaşları 2004 yılında yaptıkları çalışmada farklı koşullardaki ultrasonik titreşim uygulamasının A356 alüminyum alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla söz konusu alaşım 650 °C'ye ısıtılmış ve titreşimin uygulanacağı sıcaklıklara ulaşıncaya kadar soğumaya bırakılmıştır. Eriyik istenilen sıcaklığa geldiğinde, aynı sıcaklığa önceden ısıtılmış olan radyatör eriyiğin içine daldırılmak suretiyle 20 kHz frekansındaki ve 1,5 kW gücündeki ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen uygulamanın süresi üç farklı şekilde belirlenmiştir. Bunlar 634-574 °C arasında sürekli, 614-574 °C arasında 5, 10, 20 saniye aralıklarla ve 614, 610 ve 605 °C'de izotermal olarak 5, 10, 20 saniye boyunca uygulama şeklindedir. Titreşim uygulaması sonrasında eriyik fırında soğutulmuştur. Mikroyapı incelemeleri sonucunda elde edilen verilere göre sürekli olarak titreşim uygulaması ile dendritik olmayan ve küresel bir mikroyapı elde edilirken, aralıklar şeklindeki ultrasonik titreşim uygulamasının mikroyapıyı inceltmede daha da etkili olduğunu, izotermal olarak uygulanan titreşimin etkisinin ise bu iki uygulamaya göre daha kısıtlı olduğu tespit edilmiştir [4].



Şekil 1.6. 634-574 °C arasında sürekli olarak ultrasonik titreşim uygulanmış A356 alüminyum alaşımının mikroyapıları; (a) ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın, (b) titreşim uygulaması ile [4]

Jian ve arkadaşları 2006 yılında ultrasonik titreşim uygulaması kullanılarak A356 alüminyum alaşımındaki ötektik silisyum fazının modifiye edilmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla söz konusu alaşım 700 °C'de ergitilmiş ve silisyum partiküllerinin tamamen çözünmesini sağlamak amacıyla bu sıcaklıkta 30 dakika

boyunca bekletilmiştir. Sonrasında eriyik halindeki alaşım 630 °C'de iken 250 gram kapasiteli bakırdan yapılmış bir kalıba dökülerek 1500 W gücünde, 20 kHz frekansında ve 56,7 µm genliğindeki ultrasonik titreşim alaşıma uygulanmıştır. Titreşimin eriyiğe uygulanması için Ti-6Al-4V titanyum alaşımından yapılmış bir radyatör kullanılmıştır. Ayrıca ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın aynı koşullar altında döküm işlemi de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerin optik ve taramalı elektron mikroskoplarında incelenebilmesi için gerekli metalografik işlemler yapılarak numunelerin mikroyapıları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulaması yapılmamış numuneler kaba alüminyum dendritleri arasında iğnemsi ötektik silisyum barındırırken, ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda bu yapı küreselleşmiş ve alüminyum taneleri arasına düzgün bir şekilde dağılmış Al-Si ötektiğine dönüşmüştür. Ayrıca ötektik silisyumun boyu 26 µm'den 2 µm'ye, genişliği ise 2,7 µm'den 0,6 µm'ye düşmüştür [5].



Şekil 1.7. A356 alüminyum alaşımında, SEM ile 2000x büyütmede görüntülenen ötektik modifikasyon; (a) ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın, (b) ultrasonik titreşim uygulaması ile [5]

Xu ve arkadaşları 2006 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının A356 alüminyum alaşımının gaz giderme işlemi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında ayrıca ultrasonik titreşim uygulaması vakum altında gaz giderme işlemi ile beraber uygulanmıştır. Bu amaçla 20 kHz frekansında ve 1,5 kW gücündeki ultrasonik titreşim düzeneği kullanılmıştır. Düzeneğin ürettiği titreşim titanyum alaşımından yapılmış bir radyatör vasıtasıyla bir ergitme ocağı içerisinde bulunan eriyik halindeki alaşıma iletilmiştir. Farklı vakum basınçları altında yapılan deneyler sonucunda elde edilen eriyiklerin yoğunlukları düşürülmüş basınç testi kullanılarak ölçülmüştür. Böylece numunelerin porozite seviyeleri

belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulaması düşük miktarda eriyiğin gaz giderme işleminde kullanıldığında etkili olmakla beraber eriyik miktarı arttıkça gaz giderme etkisi azalmaktadır. Vakum altında gaz giderme ile ultrasonik titreşim kullanılarak gaz giderme işlemi gaz giderme hızı açısından karşılaştırıldığında, vakum altında gaz gidermenin ultrasonik yönteme kıyasla çok daha yavaş olduğu belirlenmiştir. Bunlara ek olarak ultrasonik titreşim ile vakum altında gaz giderme işlemi beraber uygulandığında gaz giderme işleminin daha etkili olduğu tespit edilmiştir [6].

Jun-wen ve arkadaşları 2007 yılında ultrasonik titreşim uygulamasının Al-%1,65Si alaşımının makroyapısı üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla 320 gram ağırlığındaki alaşım 750 °C'de elektrik fırınında ergitildikten sonra oda sıcaklığındaki grafit potaya dökülmüştür. Alaşım soğumakta iken sıcaklığı likidüs sıcaklığı olan 649,5 °C'nin 10 °C üzerine geldiğinde, 600 °C'ye ısıtılmış radyatör eriyiğe daldırılmak suretiyle ultrasonik titreşim uygulanmaya başlanmış ve 0, 20, 40, 60, 80, 100 ve 120 saniye boyunca uygulama gerçekleştirilmiştir. Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı 25 kHz ve gücü 150 W'tır. Titreşim uygulamasının ardından eriyik halindeki alaşım pota içerisinde katılaştırılmış ve makroyapı incelemesi için hazırlanmıştır. Ayrıca soğuma işlemi esnasında pota içerisine yerleştirilen termokupl vasıtasıyla eriyiğin sıcaklığı ölçülerek soğuma eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu eğriler ile makroyapı görüntüleri incelendiğinde, ultrasonik titreşim uygulamasının eriyiğin içerisindeki sıcaklık dağılımındaki homojensizliği azalttığı ve makroyapının 100 saniyeye kadar uygulanan titreşim neticesinde giderek inceldiği ancak bu süreden fazla titreşim uygulamasının makroyapıyı kaba bir hale dönüştürdüğü tespit edilmiştir [7].

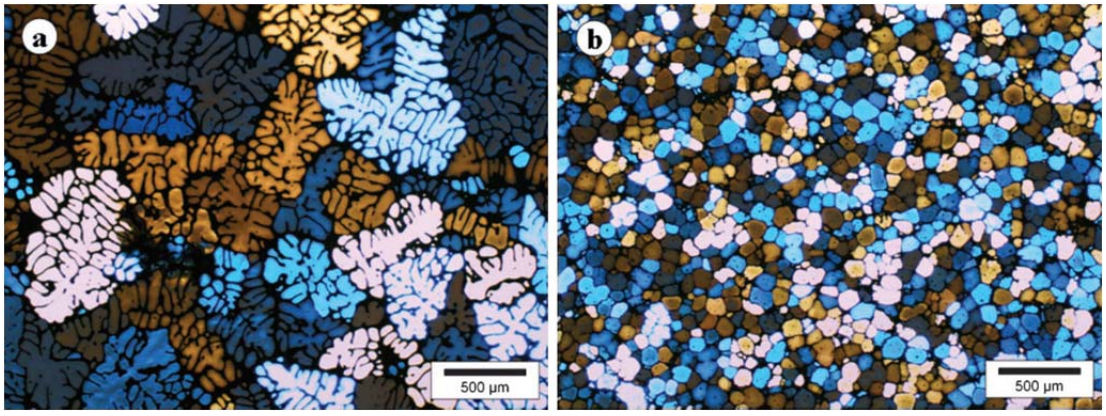
Youn ve arkadaşları 2008 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının A390 alüminyum alaşımında neden olduğu mikroyapısal ve mekanik özelliklerdeki değişiklikleri incelemişlerdir. Bunun için A390 eriyiğine farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde, 840 W gücünde ve 20 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Bu çalışmanın sonucunda ultrasonik titreşim uygulaması ile birincil silisyum fazının boyutunun azalarak dendritlere homojen bir şekilde dağıldığı belirlenmiştir. Ayrıca ultrasonik titreşim uygulamasıyla malzemenin sertliğinin,

çekme dayanımı ile kopma uzamasısının %10 civarında arttığı ve ultrasonik titreşim uygulamasının poroziteyi giderdiğini tespit edilmiştir [8].

Feng ve arkadaşları 2008 yılında ultrasonik titreşim uygulamasının ötektik üstü Al-%23Si alüminyum alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada literatürdeki diğer çalışmaların genelinin aksine titreşim uygulaması radyatörün eriyik içerisine daldırılması suretiyle alaşıma iletilmemiştir. Bunun yerine radyatörle birleşik şekilde bir pota tasarlanmış ve titreşim eriyiğe bu pota vasıtasıyla iletilmiştir. Külçe halindeki alaşımdan 200 gramı fırın içerisinde 800 °C'ye ısıtılarak ergitildikten sonra yine bu sıcaklıkta yarım saat bekletilmiştir. Daha sonra 680 °C'ye ısıtılan pota içerisine dökülerek 20 kHz frekansında, 50 W gücünde ve 4 μm genliğindeki ultrasonik titreşim fırın içerisinde bulunan potadaki eriyiğe 10 dakika boyunca uygulanmıştır. Hemen ardından pota fırından çıkarılarak içerisindeki eriyik ile birlikte oda sıcaklığındaki suyun içerisine sokulmak suretiyle hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın aynı koşullarda döküm işlemi yapıldıktan sonra elde edilen örneklerin mikroyapı incelemesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ultrasonik titreşim uygulamasının alaşımda bulunan küçük gaz boşluklarını giderdiğini, mikroyapıda bulunan iri taneli birincil silisyum fazını küçülterek yapıya homojen bir şekilde dağıttığını ve dendritik yapıdaki α-Al fazını küçülterek eş eksenli taneler haline getirdiğini göstermektedir. Araştırmacılar yapıdaki bu değişimlerin sebebinin ultrasonik titreşim uygulamasının meydana getirdiği kavitasyon mekanizması olduğunu ileri sürmüşlerdir [9].

2009 yılında Atamanenko ve arkadaşları yaptıkları çalışmada %99,7 saflıkta, %4 ve %11 bakır içeren üç farklı alüminyum alaşımı kullanarak ultrasonik titreşimin alaşımların tane büyüklüğü ve mikroyapıları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla 0,4 kg ağırlığındaki alaşımlar elektrik fırınında 1003 °K'e ısıtılmış, ardından atmosfer şartlarında katılaşacakları önceden ısıtılmış olan grafit potalara dökülmüşlerdir. Daha sonra titanyum alaşımından yapılmış ve 473 °K'ye ısıtılmış olan radyatör, pota içerisindeki alaşımın sıcaklığı 963 °K iken eriyiğe daldırılmış ve eriyik katılaşana kadar ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik titreşimin etkisinin görülebilmesi açısından radyatör eriyiğe daldırılarak ancak titreşim uygulanmadan aynı işlemler tekrarlanmıştır. Daha sonra katılaşan alaşımlar kesilmiş ve mikroyapıları incelenmiştir. Şekil 1.8'de de görüldüğü üzere ultrasonik

titreşim uygulaması tane büyüklüğünde ciddi anlamda azalma gerçekleşmesine sebep olmuştur [10].



Şekil 1.8. Ultrasonik titreşim uygulamasının Al-11Cu alaşımının mikroyapısı üzerine etkisi; (a) radyatör eriyiğe daldırılmış ancak ultrasonik titreşim uygulanmamış, (b) ultrasonik titreşim uygulanmış [10]

Chen ve arkadaşları 2009 yılında yaptıkları çalışmada farklı güç ve sürelerdeki ultrasonik titreşim uygulamasının ticari magnezyum ile AZ91 ve AM60 magnezyum alaşımlarının mikroyapıları ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla 500 ile 1000 W gücünde, 15 ile 20 kHz frekanslarında çalışabilen bir ultrasonik titreşim düzeneği kullanılmıştır. Ticari magnezyum ve magnezyum alaşımları koruyucu atmosferli bir elektrik fırınında, 650°C'de ergitilerek 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşime tabi tutulmuşlardır. Titreşimin eriyik halindeki alaşıma iletilmesi için Ti-6Al-4V alaşımından yapılmış bir radyatör kullanılmıştır. Yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda ultrasonik titreşim uygulamasının tane büyüklüğünde azalma meydana getirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca güçteki, frekanstaki ve uygulama süresindeki artış ile tanelerin daha fazla inceldiği ve yapıya daha homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Son olarak araştırmacılar ultrasonik titreşim uygulamasının bu çalışmada kullanılan tüm malzemelerin mikroyapısını geliştirdiği ancak sadece ticari magnezyumun mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkisinin olduğunu belirtmişlerdir [11].

Eskin ve arkadaşları 2010 yılında yaptıkları çalışmada farklı oranlarda Zr ve Ti içeren alaşımlara ultrasonik titreşim uygulayarak ultrasonik titreşim uygulamasının tane inceltme mekanizması üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla 0,2 kg ağırlığındaki alaşımlar bir elektrik fırınının içerisinde 780 °C'de ergitildikten sonra

grafit potalara dökülerek farklı sıcaklıklarda (740-710-700 °C) 10 saniye boyunca titreşim uygulanmıştır. Uygulanan titreşimin frekansı 17,5 kHz, gücü 4 kW ve titreşimin genliği 40 μm'dir. Elde edilen sonuçlar alüminyum alaşımlarına katılaşma esnasında ultrasonik titreşim uygulamasının alaşımın içerisinde Zr ve Ti gibi geçiş metalleri bulunması halinde daha verimli olduğunu göstermiştir [12].

Yao ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının Mg-8Li-3Al alaşımının mikroyapısı, korozyon dayanımı ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Söz konusu alaşım argon atmosferli bir elektrik fırınında ergitilerek, 600 °C'ye ısıtılmış paslanmaz çelik bir kalıba dökülmüştür ve yine argon atmosferinde 90 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Uygulanan ultrasonik titreşimin gücü sırasıyla 0, 50, 110, 170, 210, 260 W ve frekansı 20 kHz'tir. Yapılan mikroyapı incelemelerine göre 170 W'a kadar artan ultrasonik güç ile α fazı giderek küreselleşmiştir. Ancak 260 W gücündeki titreşim uygulaması sonucunda elde edilen α fazı tanelerinin 170 W'a göre daha kaba olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapısal incelemeler sonucunda ultrasonik titreşim uygulaması sonucu belirgin şekilde tane inceltme etkisi meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca ultrasonik titreşim uygulamasının çekme dayanımı, kopma uzaması ve korozyon dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir [13].

Puga ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının AlSi9Cu3 alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla 0,4 kg ağırlığındaki alaşımı 700 °C'de ergitilmiş ve homojenizasyon için 15 dakika boyunca aynı sıcaklıkta bekletilmiştir. Daha sonra alaşımın titreşim uygulanacak sıcaklıklar olan 615, 620, 630 ve 640 °C'ye kadar soğuması beklenmiştir. Alaşım istenilen sıcaklığa geldikten sonra Ti6Al4V alaşımdan yapılmış olan radyatör eriyiğe yüzeyden 10 mm daldırılmak suretiyle 120 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Titreşimin frekansı 19,8 kHz olmakla birlikte titreşim uygulama düzeneğinin gücü 200, 400 ve 600 W olarak değiştirilmiştir. Titreşim uygulama işleminden sonra eriyik 300 °C'ye ön ısıtılmış çelik kalıba dökülmüştür. Elde edilen sonuçlar tane büyüklüğünün uygulanan ultrasonik titreşimin gücündeki artışla giderek azaldığını, sıcaklıktaki artışla ise giderek arttığını, ayrıca çekme dayanımı ve kopma uzaması değerlerinin güçteki artış ile giderek arttığını göstermiştir [14].

Lü ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada endirekt ultrasonik titreşim uygulamasının yarı-katı döküm (rheocasting) yöntemi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla 20 kHz frekansında ve 2,6 kW gücündeki bir ultrasonik düzenek kullanarak paslanmaz çelikten yapılmış bir pota içerisinde bulunan eriyik haldeki 5083 alüminyum alaşımına, potanın altındaki radyatör vasıtasıyla 20, 30, 40, 50, 60 ve 70 saniye süresince titreşim uygulanmıştır. Sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulaması yarı-katı döküm yöntemiyle beraber uygulandığında mikroyapıyı iyileştirip mekanik özellikleri geliştirdiği gibi, ayrıca alaşım içerisindeki gazı gidererek yoğunluğu da arttırmaktadır [15].

Das ve arkadaşları 2011 yılında yaptıkları çalışmada yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşim uygulamasının ötektik altı ticari LM6 alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla söz konusu alaşım 750 °C'de ergitilmiş ve 2 saat boyunca aynı sıcaklıkta bekletilerek homojenize olması sağlanmıştır. Daha sonra 750 °C'ye ısıtılmış bir pota içerisine 250 gram eriyik aktarılmıştır ve atmosfer ortamında alaşım katılaşana kadar Ti-6Al-4V alaşımından yapılmış bir radyatör vasıtasıyla ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı 20 kHz ve genliği 25 μm'dir. Elde edilen numunelerin mikroyapıları incelendiğinde ultrasonik titreşim uygulamasının birincil α-Al fazını incelterek dendritik formdan küresel forma dönüşmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu etki yapının genelinde görülmekle beraber, radyatöre yakın bölgelerde küreselleşen α-Al tanelerinin daha yoğun olduğu belirlenmiştir. Ultrasonik titreşim uygulaması ayrıca ötektik silisyum plakalarının boyunu kısaltmaktadır. Ancak α-Al fazındaki değişimin aksine ötektik silisyumdaki değişim ultrasonik titreşimin uygulandığı radyatörden uzaklaştıkça giderek etkisini kaybetmektedir. Araştırmacılar ayrıca mikroyapıdaki bu modifikasyonun ultrasonik titreşimin sebep olduğu heterojen çekirdeklenme dolayısıyla gerçekleştiğini belirtmişlerdir [16].

Zhang ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü Al-Si alaşımlarının mikroyapıları üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Bunun için alaşımlara likidüs sıcaklığının üzerinde ve likidüs ile ötektik sıcaklık arasında ayrı ayrı titreşim uygulamışlardır. Uygulanan titreşimin gücü 4 kW, genliği 40 μm ve her bir uygulama için kullanılan eriyik miktarı 0,35 kilogramdır. Ötektik altı Al-Si alaşımları için 690-660 °C

arasında yani alaşım tamamıyla sıvı fazda iken ve 690-610 °C arasında yani alaşım katılaşmaya başlamışken titreşim uygulanmıştır. Ayrıca ultrasonik titreşim uygulaması yapılmaksızın da döküm işlemi yapılmıştır. Titreşim uygulaması yapılmaksızın gerçekleştirilen döküm uygulamasının sonucunda mikroyapıda tamamıyla büyümüş birincil Al dendritlerine rastlanmıştır. 690-660 °C arasındaki titreşim uygulamasının tane büyüklüğünü bir noktaya kadar düşürdüğü tespit edilmiştir. Katılaşma başladığı esnada yani 690-610°C aralığında gerçekleştirilen ultrasonik titreşim uygulamasının ise dendritik mikroyapıyı küresel tanelere sahip bir mikroyapıya dönüştürdüğü tespit edilmiştir [17].

Patel ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada farklı sürelerdeki ultrasonik titreşim uygulamasının farklı sıcaklıklardaki AS41 magnezyum alaşımları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla ilk olarak 200 gram ağırlığındaki alaşım argon gazlı atmosfere sahip bir elektrik fırınında, çelik bir potanın içerisinde ergitilmiştir. Alaşımlar titreşim uygulamasının yapılacağı sıcaklıklar olan 605 ve 620 °C'ye kadar soğuduktan sonra titreşimi eriyiğe iletecek olan radyatör eriyiğe daldırılarak 30, 60 ve 90 saniye boyunca titreşim uygulaması yapılmıştır. Titreşim uygulanmadan önce radyatör titreşim uygulamasının yapılacağı sıcaklığa ısıtılmıştır. Uygulanan ultrasonik titreşimin genliği sabit olmakla birlikte 48 μm'dir. Ayrıca titreşim uygulamasının etkilerinin görülebilmesi amacıyla, aynı koşullar altında herhangi bir titreşim işlemi uygulanmadan döküm işlemi de gerçekleştirilmiştir. AS41 alaşımının likidüs sıcaklığı 620 °C civarındadır. Araştırmacıların elde ettikleri sonuçlar şöyle sıralanabilir; likidüs sıcaklığı üzerinde titreşim uygulaması eş eksenli tanelerin oluşmasına sebep olurken, bu sıcaklığın altındaki titreşim uygulaması daha küresel tanelerin oluşmasına neden olmaktadır. Ultrasonik titreşim uygulanarak yapılan döküm işlemi sonrasında normal döküm işleminde görülen dendritik yapı neredeyse kaybolmuştur. Ultrasonik titreşim uygulama süresindeki artışa orantılı olarak tane büyüklüğü azalmaktadır [18].

Ünal ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada endirekt ultrasonik titreşim uygulamasının Etial 195 alaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla söz konusu alaşım bir elektrik fırını içerisindeki grafit potada 740 °C sıcaklıkta ergitilmiştir. Eriyik halindeki alaşım, 60 °C sıcaklıkta su ihtiva eden bir ultrasonik banyo içerisindeki paslanmaz çelikten yapılmış kalıba

dökülmüştür. Kalıba 40 kHz frekansında ve 0,5 kW güçteki ultrasonik titreşim 25-50 saniye boyunca uygulanarak kalıp içerisindeki alaşım katılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek için ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın, eşdeğer koşullarda döküm işlemi de gerçekleştirilerek numuneler elde edilmiştir. Kalıp içerisine yerleştirilmiş termokupl vasıtasıyla katılaşma esnasındaki soğuma eğrileri çizilmiştir. Elde edilen soğuma eğrilerine göre titreşim uygulanarak ve uygulanmadan elde edilen örneklerin ötektik reaksiyonları süre ve sıcaklık açısından incelendiğinde benzer şekilde gerçekleşmiştir. Araştırmacılar buradan ultrasonik titreşim uygulamasının ötektik faz üzerinde bir etkisi olmadığı sonucunu çıkarmışlardır. Elde edilen numunelerin mikroyapıları incelendiğinde endirekt ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda dendritlerin daha kalın ancak daha kısa bir yapıya kavuştuğu, birincil silisyum fazının ise parçalara ayrılarak küçüldüğü tespit edilmiştir. Yapılan sertlik testleri endirekt ultrasonik titreşim uygulamasının alaşımın sertliğini %15-20 aralığında arttırdığını, yapılan çentik darbe deneyi ise titreşim uygulanmış numunelerin daha sünek özellik gösterdiğini ortaya koymuştur. Araştırmacılar mekanik özelliklerdeki bu gelişmelerin mikroyapıdaki modifikasyon olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar son olarak ultrasonik titreşim uygulamasının eriyikte basınç ve sıcaklık dalgalanmalarına sebep olduğunu ve bu dalgalanmaların heterojen çekirdeklenmeye neden olarak küçük taneler meydana getirdiğini belirtmişlerdir [19].

Zhang ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının ötektik üstü (Al-%17,8Si), ötektik (Al-%11,6Si) ve ötektik altı (Al-%6,7Si) alaşımlarının mikroyapıları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Söz konusu alaşımlar 750 °C'de ergitildikten sonra aynı sıcaklığa ısıtılmış grafit potalara boşaltılmışlar ve sıcaklıkları likidüs sıcaklıklarının 50 °C üstündeki sıcaklık değerinde iken bir radyatör vasıtasıyla 20 kHz frekansında ve 260 W gücündeki ultrasonik titreşime tabi tutulmuşlardır. Alaşımlar daha sonra su soğutmalı bakır bir kalıp içerisinde katılaştırılmışlardır. Ultrasonik titreşim uygulaması yapılmaksızın aynı işlemler tekrarlandıktan sonra elde edilen örneklerin mikroyapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre titreşim uygulaması yapılmaksızın dökülen ötektik üstü alaşım birincil silisyum ve ötektik fazlardan oluşan bir mikroyapı gösterirken uygulama sonrasında birincil silisyum fazı küçülmüştür. Ötektik

alaşımda ise uygulama öncesi mikroyapı dendritik birincil α-Al ve ötektik fazlardan oluşurken, uygulama sonrasında eş eksenli α-Al tanelerinden oluşan bir mikroyapı elde edilmiştir. Ötektik altı alaşımda ise ötektik alaşım için elde edilen sonuca benzer olarak birincil α-Al boyutunun küçüldüğü tespit edilmiştir [20].

Zhang ve arkadaşları 2013 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının, Al-Si alaşımlarının mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri olan demir içerikli intermetaliklerin yapıları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla Al-%12Si-%2Fe alaşımı bir elektrik fırını içerisinde 800 °C'de ergitilerek 30 dakika boyunca aynı sıcaklıkta tutulduktan sonra önceden ısıtılmış bir grafit potaya aktarılmıştır. Bu pota içerisinde 720 ve 610 °C'de olmak üzere 60 ila 120 saniye boyunca 20 kHz frekanstaki ve 270 W gücündeki ultrasonik titreşim atmosfer ortamındaki eriyiğe uygulanmıştır. Uygulama işleminden sonra eriyik atmosfer ortamında ve su soğutmalı bakır bir kalıpta soğutulmak suretiyle farklı numuneler elde edilmiş ve mikroyapı incelemeleri gerçekleşmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulamasının söz konusu alaşımın mikroyapısında mevcut olan iğnemsi demir fazının morfolojisini değiştirerek daha çok yüzeyli (poligonal) bir hale, hatta 610 °C'de yani solidifikasyon esnasında, titreşim uygulanması durumunda küresel bir hale getirdiğini tespit etmişlerdir. Uygulama süresi arttıkça bu etkinin daha da arttığı elde edilen bir diğer sonuçtur [21].

Jian ve arkadaşları 2013 yılında yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşim uygulamasının A356 alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla A356 alaşımı bir fırının içerisinde 700 °C'de 30 dakika boyunca tutularak ergitilmiştir. Daha sonra alaşım fırından çıkarılarak 630 °C'de sıcaklıkta iken bakır bir kalıp içerisine 200 gram ağırlığında dökülmüştür. Kalıbın altına temas eden radyatör vasıtasıyla kalıba ve eriyik halindeki alaşıma katılaşma gerçekleşene kadar titreşim uygulaması gerçekleştirilmiştir. Aynı koşullarda altında titreşim uygulamaksızın döküm işlemi de gerçekleştirilmiştir. Her iki durum ile de elde edilen örneklerin farklı noktalarından kesitler alınmış ve mikroskop altında mikroyapıları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulaması dendritik yapıdaki birincil α-Al fazını küresel hale dönüştürmüş ve silisyumun morfolojisini değiştirerek lifli bir yapıya dönüştürmüştür [22].

Puga ve arkadaşları 2013 yılında endirekt ultrasonik titreşim uygulamasının AlSi9Cu3 alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla 700 °C'de ergitilen alaşım, 680 °C'ye soğutulduktan sonra 300 °C'ye ısıtılmış çelik bir kalıba dökülmüş ve alaşımın sıcaklığı 680-580 °C arasında iken kalıba frekansı 19,8 kHz ve gücü 200, 400, 600 W olan ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ultrasonik titreşim uygulamasının α-Al tanelerinin boyutlarını küçülttüğünü, iğnemsi şekildeki silisyumun morfolojisini değiştirerek lifli bir yapıya dönüştürdüğünü, poroziteyi azalttığını ve akma dayanımı ile kopma uzaması gibi mekanik özellikleri iyileştirdiğini göstermektedir. Ayrıca güçteki artış ile bu etkilerin giderek arttığı tespit edilmiştir. Yazarlar ultrasonik titreşim sebebiyle meydana gelen kavitasyon, heterojen çekirdeklenme ve dendritik yapının parçalanması olaylarının mikroyapı ve mekanik özelliklerdeki gelişmeleri tetiklediğini belirtmişlerdir [23].

Huang ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının yüksek saflıktaki alüminyumun makroyapısı üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla öncelikle 360 gram, %99,999 saflıktaki alüminyum bir fırınının içerisinde 700 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca tutularak ergitilmiştir. Daha sonra eriyik 670 °C sıcaklıkta iken önceden ısıtılmış bir radyatör fırının üzerinden eriyiğe daldırılarak 2 dakika boyunca 20 kHz frekansında ve 1000 W gücünde titreşim uygulanmıştır. Uygulama sonrasında eriyik pota ile beraber fırından çıkarılmış ve atmosfer koşullarında soğutulmuştur. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından aynı işlemler ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın da gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sonrasında elde edilen örneklerin makroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulaması makroyapıdaki kristal sayısını azaltarak yapıyı inceltmiştir [24].

Haghayeghi ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada AA7075 alaşımının basınçlı döküm işlemi için ultrasonik titreşim uygulamasını incelemişlerdir. Bunun için 2 kg alaşım fırında ergitildikten sonra 4 kW gücündeki bir ultrasonik titreşim düzeneği ile 60 saniye süresince 10, 14, 17,5 ve 20 kHz frekanslarında ultrasonik titreşime tabi tutulmuştur. Elde edilen numuneler incelendiğinde 10 ve 14 kHz frekansındaki titreşimlerin mikroyapıda herhangi bir değişikliğe neden olmadığı, bununla birlikte 17,5 ve 20 kHz frekansındaki titreşimlerin tane büyüklüğünde

azalma sağladığı tespit edilmiştir. Yazarlar bu durumun sebebinin 10 ile 14 kHz frekansındaki titreşimlerin alaşımın kavitasyon olayı için gerekli olan eşik değeri geçememesi olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca elde edilen diğer sonuçlar 17,5 ve 20 kHz frekanslarındaki ultrasonik titreşim uygulamasının basınçlı döküm işlemi ile kombine edildiğinde akma ve çekme dayanımını arttırdığını buna ek olarak alaşımdaki poroziteyi azalttığını göstermiştir [25].

Tuan ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada Al-1Mg-0,3Sc alaşımının tane inceltme işleminde döküm sıcaklığının ve ultrasonik titreşim uygulamasının etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikli olarak istenilen bileşimdeki alaşımı elde etmek amacıyla ticari saflıktaki alüminyum ve farklı master alaşımlar bir elektrik fırını içerisindeki SiC potada 800°C'de ergitilmiştir. Homojenliğin sağlanması açısından bu sıcaklıkta 30 dakika boyunca beklenildikten sonra eriyik 800-700 °C arasındaki farklı sıcaklıklara soğutulmuştur. Her bir koşuldaki eriyiğe 20,3 kHz frekansında ve 1200 W gücündeki ultrasonik titreşim ekipmanı kullanılarak 30 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulandıktan sonra eriyik bakırdan yapılmış kalıplara dökülerek su içerisine daldırılmak suretiyle aniden soğutulmuştur. Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi açısından ultrasonik titreşim uygulanmış ve uygulanmamış numuneler 300 °C sıcaklıkta 1 saatten 7 güne kadar değişen sürelerde yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulanmaksızın elde edilen numunelerde, en düşük döküm sıcaklığı olan 700 °C'de dökülerek elde edilen numunelerin mikroyapıları en ince ve eş eksenli tanelerden oluşmaktadır. Buna ek olarak ultrasonik titreşim uygulamasının en etkili olduğu sıcaklık aralığının 700-740 °C olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ultrasonik titreşim uygulaması taneleri inceltmekle beraber tane dağılımını da homojenleştirmektedir. Ultrasonik titreşim uygulaması sonucu yaşlandırma işlemi uygulamaksızın elde edilen numunelerin sertlik değerleri ile ultrasonik titreşim uygulanmamış ancak yaşlandırılmış numunelerin sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu yapılan bir başka tespittir [26].

Jiang ve arkadaşları 2015 yılında yayımladıkları çalışmada 7085 alüminyum alaşımına uygulanan ultrasonik titreşimin etkisini titreşimi uygulamakta kullanılan radyatöre olan uzaklığa bağlı olarak incelemişlerdir. Bu amaçla frekansı 20 kHz olan ve radyatör yüzeyindeki genliği 10 µm olan bir ultrasonik titreşim ekipmanı

kullanmışlardır. Araştırmacılar farklı sıcaklıklardaki eriyiğe ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirmiş olup likidüs sıcaklığından yüksek olan 680-660 °C'deki ultrasonik titreşim uygulamasının mikroyapıya çok az derecede etki ettiğini, buna karşın 650-620 °C'deki uygulamanın mikroyapı üzerinde kayda değer düzeyde tane inceltme etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar önceki çalışmalara dayanarak alaşımın ultrasonik titreşimi eriyiğe ileten radyatör yüzeyinin üzerinde kalarak katılaşan kısımlarında ultrasonik titreşim dolayısıyla herhangi bir tane inceltme etkisi olmadığını belirtmişler, alaşımın radyatör yüzeyi altında kalarak katılaşan kısımda ise yüzeyden uzaklaştıkça tane inceltme etkisinin azaldığını saptamışlardır. Araştırmacılar son olarak titanyum alaşımından yapılmış olan radyatörden erozyona uğrayarak titanyumun eriyiğe geçtiğini, ancak geçen titanyumun tane inceltme etkisi göstermediğini tespit etmişlerdir [27].

Zhai ve arkadaşları 2015 yılında ultrasonik titreşim uygulamasının Al-12,3Sn-6,4Cu alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla söz konusu alaşım bir elektrik fırını içerisinde, argon atmosferi altında ergitilmiştir. Alaşımın sıcaklığı likidüs sıcaklığının 100 °C üzerine geldiğinde alaşıma, alaşım katılaşıncaya kadar 20 kHz frekansında ve 150, 250 ile 500 W güçlerinde ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda birincil alüminyum fazı kaba dendritlerden eş eksenli tanelere dönüşürken, güçteki artış ile söz konusu bu etki doğru orantılıdır. Ek olarak Sn tanelerinin uygulanan ultrasonik titreşimin etkisi ile inceldiği ve Al matris fazına homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Araştırmacılar ayrıca mikroyapısal düzeydeki bu gelişmelerin alaşımın mikrosertlik, abrazif aşınma dayanımı, basma dayanımı ve akma dayanımında gelişme sağladığını belirlemişlerdir [28].

Kotadia ve arkadaşları 2015 yılında yaptıkları çalışmada yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşim uygulamasının ötektik altı ve ötektik üstü alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapıları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışma için Al-7Si (Al-6,31Si-0,57Mg-0,27Fe-0,16Mn) ve Al-16Si (Al-16Si-0,37Fe-0,16Mn) alaşımları, elektrik fırını içerisinde 750 °C'de ergitilmiş ve homojenizasyon işlemi için 2 saat boyunca fırının içerisinde bekletilmiştir. Her bir alaşımdan 250 gram ağırlığındaki eriyik alınarak önceden 750 °C'ye ısıtılmış grafit potalara konulmuştur.

Potaların içerisine daldırılan Ti-6Al-4V alaşımından imal edilmiş radyatör vasıtasıyla alaşımlara 20 kHz frekansında, 25 µm genliğinde titreşim uygulanarak alaşımlar atmosfer ortamında doğal olarak soğutulmuştur. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın aynı koşullarda deneyler yapılmıştır. Elde edilen numunelerin mikroyapıları optik mikroskop vasıtasıyla incelenmiştir. Sonuçlara göre ötektik altı alaşımda ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda yapıda bulunan dendritlerin eş eksenli birincil alüminyum tanelere dönüştüğü, buna ek olarak yapıdaki ötektik silisyumun iğnemsi formdan daha çok yüzeyli bir forma (poligonal) dönüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca uygulama sonucunda ötektik fazın mikroyapıya daha uniform bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir. Ötektik üstü alaşımın mikroyapısı incelendiğinde ise ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda uzun plakalar şeklindeki birincil silisyum tanelerinin daha çok yüzeyli bir forma (poligonal) dönüşerek yapının tamamına dağıldığı tespit edilmiştir. Son olarak yazarlar literatürde daha önce yapılan çalışmalara dayanarak, alaşımın katılaşması esnasında, hem sıvı hem de yarı katı faz boyunca sürekli olarak gerçekleştirilen ultrasonik titreşim uygulamasının alaşım sadece sıvı fazda iken gerçekleştirilen uygulamaya göre mikroyapı üzerindeki etkisinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir [29].

Kamarov ve arkadaşları 2015 yılında ultrasonik titreşim uygulamasının sürekli soğutmalı döküm (DC casting) yöntemi ile birlikte kullanılarak endüstriyel olarak kullanılabilmesini amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada kullanılan alaşım ötektik üstü Al-%17Si alaşımıdır. Söz konusu alaşım elektrik fırınında 840-860 °C aralığında ergitildikten sonra içerisine tane inceltici olarak bir miktar Al-Cu-P master alaşımı eklenmiştir. Daha sonra eriyik sürekli döküm makinesinin kanalına dökülmüş ve 770-800 °C arasındaki sıcaklıkta, seramikten üretilmiş bir radyatör vasıtasıyla ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulanan titreşimin frekans 20 kHz, gücü 2 kW ve üretebildiği maksimum genlik 70 µm'dir. Literatürdeki diğer çalışmalar incelendiğinde bu genlik değerinin epey yüksek mertebede olduğu söylenebilir. Elde edilen döküm alaşımların mikroyapıları incelendiğinde, ultrasonik titreşim uygulamasının sürekli soğutmalı döküm yöntemiyle üretilen alaşımın mikroyapısında bulunan silisyumu küçülterek yapıyı incelttiği tespit edilmiştir. Araştırmacılar ayrıca bu yöntem kullanılarak dakikada 20 kg alaşımın ultrasonik

titreşime tabi tutularak üretim için kullanılabileceği ve seramik malzemenin radyatör yapımı için kullanılan diğer malzemeler olan çelik ve titanyum alaşımlarına göre daha uzun ömürlü olduğunu, dolayısıyla bu malzemeler yerine kullanılmasının daha uygun olduğunu belirtmişlerdir [30].

Ruirun ve arkadaşları 2016 yılında TiAl alaşımının katılaşması esnasında ultrasonik titreşim uygulaması ile mikroyapıyı ve mekanik özellikleri geliştirmeyi amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla eriyik halindeki alaşıma 0, 25, 50, 75 ve 100 saniye boyunca 1200 W gücünde 20 kHz frekansta ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Araştırmacılar bu çalışmanın sonucunda ultrasonik titreşim uygulamasının TiAl alaşımının sahip olduğu dendritik mikroyapıyı dendritik olmayan eş eksenli yapıya dönüştürdüğü tespit etmişlerdir. Ayrıca ultrasonik titreşim uygulama süresi arttıkça tane büyüklüğünün giderek azaldığı, mikrosertlik ile akma dayanımı değerlerinin arttığı belirtilmiştir [31].

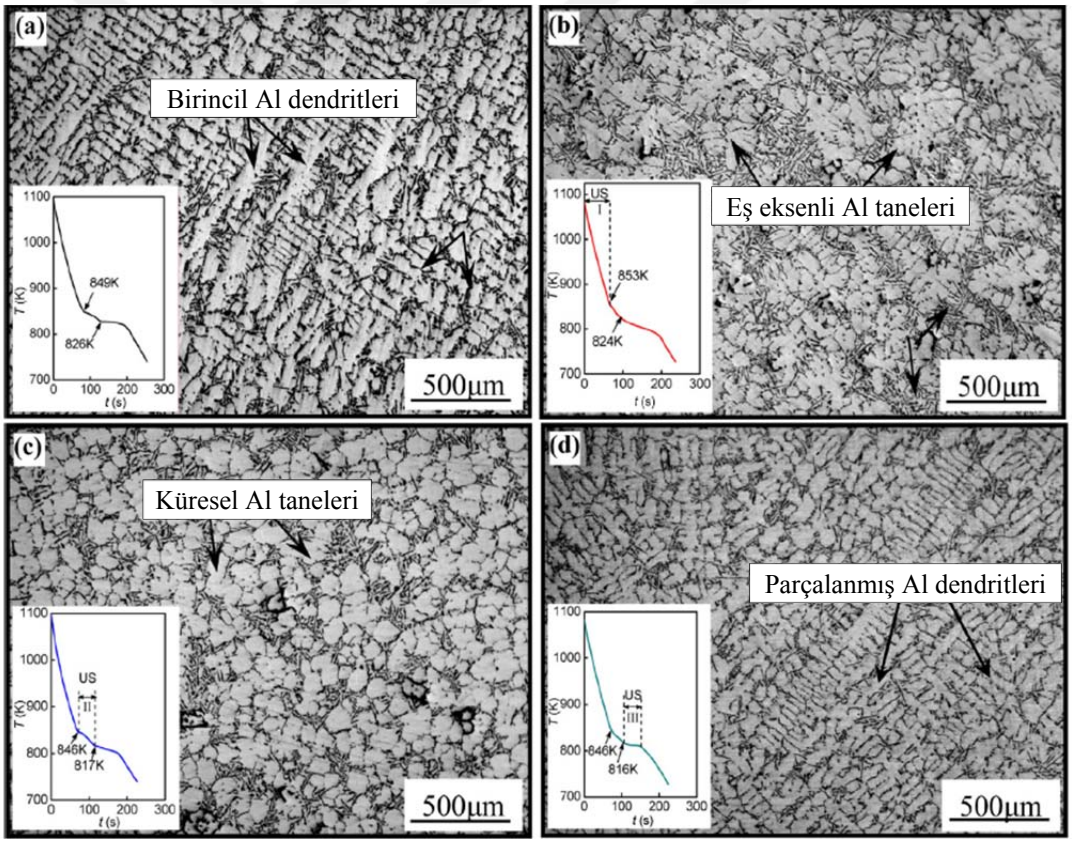
Liang ve arkadaşları 2016 yılında ultrasonik titreşim uygulamasının 35CrMo çeliğinin mikroyapısı üzerindeki etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bunun için 21 kHz frekansında, 400 W gücünde ve genliği 10 μm olan bir ultrasonik titreşim düzeneği kullanılmıştır. 1530 °C sıcaklıkta indüksiyon ile ergitilen 35CrMo çeliği bir kum kalıba dökülmüştür ve aynı sıcaklığa ısıtılan seramikten yapılmış bir radyatör ile ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Titreşim uygulamasından sonra oda sıcaklığında soğutulan çeliğin mikroyapısı incelenmiştir. Buna ek olarak karşılaştırma yapılabilmesi maksadıyla titreşim uygulaması yapılmaksızın aynı prosedür izlenerek döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. İnceleme sonuçlarına göre ultrasonik titreşim uygulaması, titreşim uygulanmamış 35CrMo çeliğinin mikroyapısını değiştirerek kaba dendritleri daha küçük dendritler haline getirmiştir [32].

Jung ve arkadaşları 2016 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının Al-12,2Si-3,3Cu-2,4Ni-0,8Mg-0,1Fe piston alaşımının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bunun için bir kilogram ağırlığındaki alaşım 750 °C'de elektrik fırınının içerisinde ergitilmiş ve argon gazı kullanılarak alaşımın gazı giderilmiştir. 19 kHz frekansında ve 20 μm genliğindeki ultrasonik titreşim, titanyumdan yapılmış radyatör eriyiğe daldırılarak, 750-700 °C

aralığındaki sıcaklıkta 60 saniye boyunca eriyiğe uygulanmıştır. Titreşim uygulamasından sonra eriyik 200 °C'ye ısıtılmış bakır bir pota içerisine dökülerek katılaştırılmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından, ultrasonik titreşim uygulaması yapılmaksızın 700 °C'deki gazı giderilmiş eriyik 200 °C'ye ısıtılmış bir diğer bakır pota içerisine dökülmüştür. Elde edilen numunelerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile soğuma eğrileri incelenerek elde edilen sonuçlara göre titreşim uygulaması birincil silisyum, ötektik silisyum ile Mg_2Si ve alüminyumun diğer metaller ile yapmış olduğu intermetalik fazların boyutlarını azaltarak, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özellikleri geliştirdiğini göstermektedir. Araştırmacılar mikroyapıdaki dolayısıyla mekanik özelliklerdeki bu gelişmelerin nedeninin ultrasonik titreşim uygulamasının bahsedilen fazların katılaşması esnasında meydana gelen çekirdeklenmeyi arttırması olduğunu belirtmişlerdir [33].

Wang ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada yüksek yoğunluklu ultrasonik titreşim uygulamasının Al-%8Si alaşımının mikroyapı ve akma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla söz konusu alaşıma, alaşım tamamıyla sıvı iken (1. durum), α-Al fazının çekirdeklenmesi-çekirdek büyümesi esnasında (2. durum) ve ötektik dönüşümün meydana geldiği esnada (3. durum) olmak üzere üç farklı durumda ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Bunun için alaşım öncelikle elektrik fırınının içinde bulunan grafit potada likidüs sıcaklığının 100 °K üzerindeki sıcaklıkta ergitilmiştir. Daha sonra 573 °K sıcaklığa ısıtılan ultrasonik radyatör pota içerisindeki eriyiğe daldırılmıştır. Bir termokupl vasıtasıyla soğuma süreci takip edilmiş ve yukarıda belirtilen farklı aşamalarda ultrasonik titreşim düzeneği çalıştırılarak, titreşim uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı 20 kHz, gücü ise 500 W'tır. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi açısından titreşim uygulaması gerçekleştirilmeksizin, eriyik halindeki alaşım aynı koşullarda katılaştırılmıştır. Elde edilen numunelerin mikroyapıları incelendiğinde, uygulama yapılmaksızın gerçekleşen katılaşma sonucunda, maksimum α-Al dendrit uzunluğunun 1100 µm, ortalama dendrit uzunluğunun ise 706 µm olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak tamamen sıvı fazda uygulanan titreşimin mikroyapı içerisindeki α-Al dendritlerini ortalama uzunluğu 354 µm olan eş eksenli tanelere dönüştürdüğü, α-Al fazının çekirdeklenmesi - çekirdek büyümesi esnasında

uygulanan titreşimin ortalama uzunluğu 90 µm olan küresel tanelerin oluşumuna sebep olduğu ve ötektik dönüşüm esnasında uygulanan ultrasonik titreşimin bazı dendrit parçalanmalarına sebep olmakla beraber, ortalama dendrit uzunluğunun 554 µm olduğunu tespit etmişlerdir. Sonuç olarak araştırmacılar her üç koşulda da uygulanan titreşimin mikroyapıyı ve akma dayanımını geliştirdiğini belirtmişlerdir. Buna sebep olarak ise ultrasonik titreşim sonucu meydana gelen kavitasyonun çekirdeklenme olayını tetiklediğini ve buna bağlı olarak α-Al fazının incelmesini göstermişlerdir. Araştırmacılar ayrıca daldırılmak suretiyle ultrasonik titreşimin eriyiğe iletilmesini sağlayan radyatör isimli parçanın daldırılma işleminden önce ısıtılması gerektiğini, aksi takdirde bu parça üzerinde hızla katılaşacak olan alüminyum tabakasının titreşimi sönümleyerek eriyiğe iletilmesine engel olmak suretiyle tane inceltme etkisini ortadan kaldıracağını belirtmişlerdir [34].



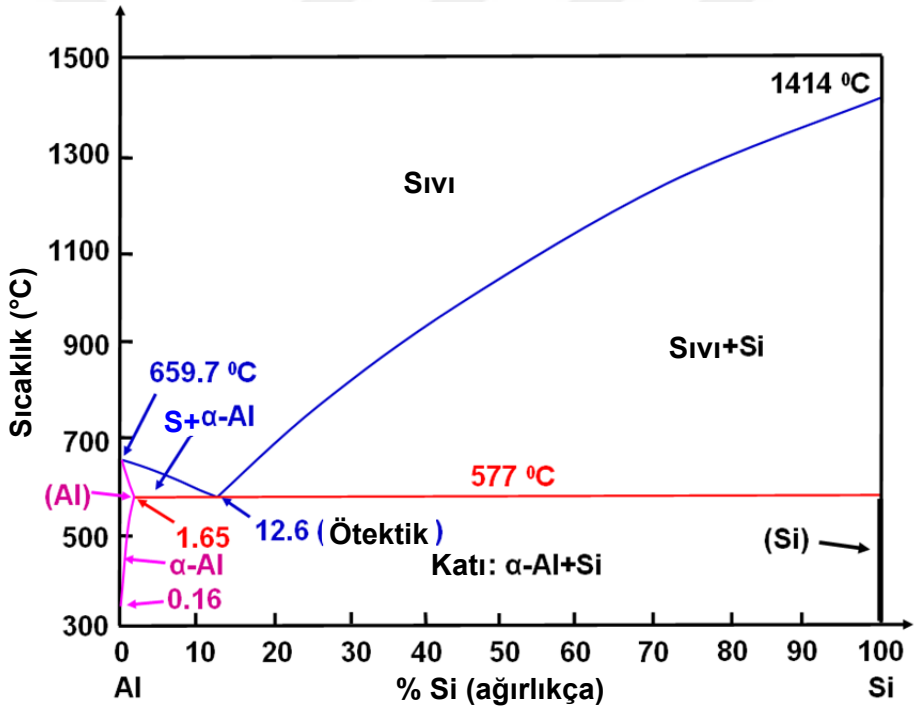
Şekil 1.9. Ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda elde edilen Al-%8Si alaşımının mikroyapıları; (a) titreşim uygulaması olmaksızın, (b) 1. durum, (c) 2. durum, (d) 3. durum [34]

Haghayeghi ve arkadaşları 2017 yılında yaptıkları çalışmada ultrasonik titreşim, elektromanyetik karıştırma ve bu iki yöntemin kombinasyonunun ötektik üstü A390 alaşımının mikroyapısında bulunan silisyumun morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla öncelikle söz konusu alaşım indüksiyon fırınında ergitilmiştir. Daha sonra alaşım soğumakta iken, likidüs sıcaklığının 40 °C üzerindeki sıcaklıkta 30 saniye boyunca bir radyatör vasıtasıyla eriyiğe ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Uygulanan titreşimin frekansı 20 kHz ve gücü 1 kW'dır. Ayrıca titreşim uygulanan alaşımın ağırlığı 540 gramdır. Ultrasonik titreşim uygulamasından sonra eriyik elektromanyetik karıştırma işlemine tabi tutulmak üzere elektromanyetik alanın uygulanacağı potaya dökülmüştür ve karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak ultrasonik titreşim ve elektromanyetik karıştırma aynı koşullardaki eriyiklere ayrı ayrı uygulanmıştır. Elde edilen numunelerin mikroyapıları, akma ve çekme dayanımları incelendiğinde, her üç uygulamanın da birincil ve ötektik silisyum boyutlarını azalttığı, buna bağlı olarak kopma uzamasını, akma ve çekme dayanımlarını arttırdığı tespit edilmiştir. Bu iyileşmelerin sadece ultrasonik titreşim uygulandığında en üst düzeyde olduğu, peşinden iki uygulamanın kombinasyonunun geldiği ve sadece elektromanyetik karıştırmanın bu iki uygulamaya kıyasla daha düşük düzeyde iyileşme meydana getirdiği tespit edilmiştir [35].

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Al-Si Alaşımları ve A360 Alüminyum Alaşımı

Bu çalışmada A360 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşım ana alaşım elementi olarak içerisinde ağırlıkça %9-10 miktarında silisyum bulundurmaktadır. Al-Si alaşımlarının ötektik noktası Şekil 2.1'de görülebileceği üzere %12,6'dır. Ötektik bileşimin altında alaşım elementi içeren alaşımlar ötektik altı, bu bileşimin üzerinde alaşım elementi içerenler ise ötektik üstü alaşımlar olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.1. Al-Si faz diyagramı

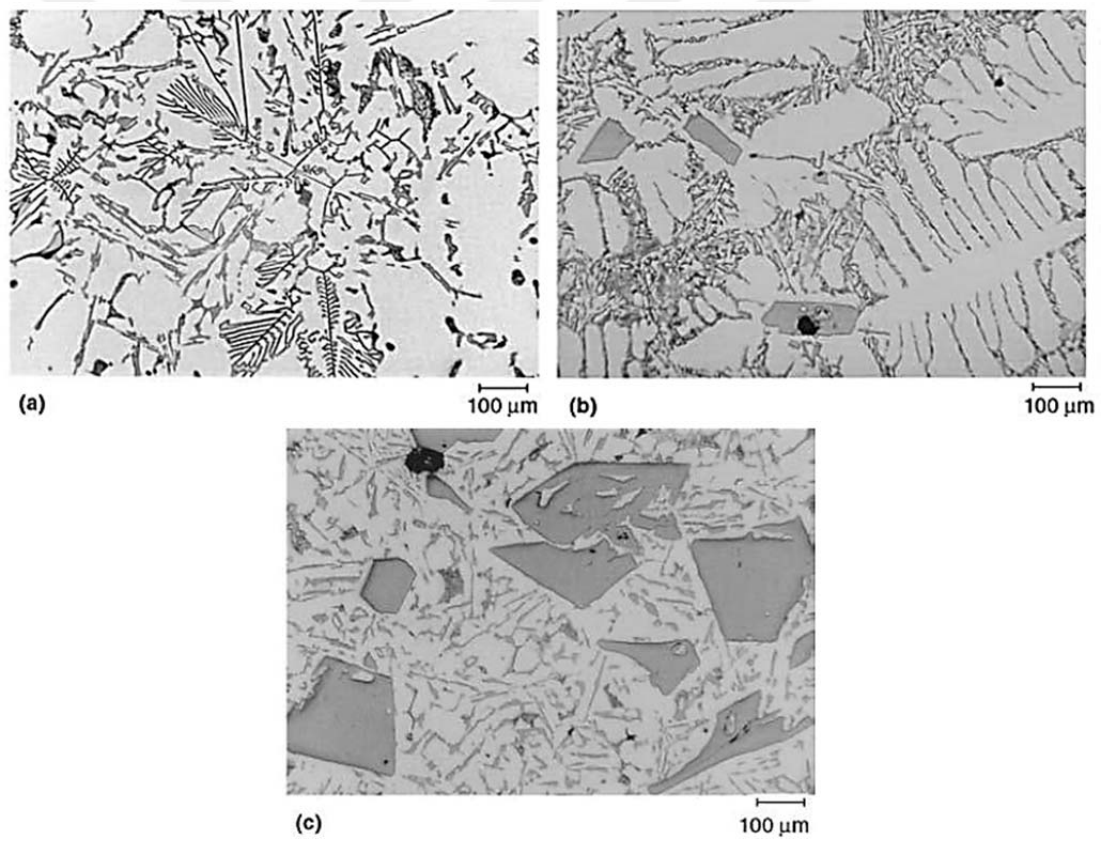
Ötektik altı Al-Si alaşımlarının çoğu %5-10 arasında silisyum içermektedir. Ötektik altı Al-Si alaşımlarının katılaşması esnasında ilk önce ötektik karışımdan ayrılan alüminyum birincil faz olarak katılaşmaya başlar. Geriye kalan eriyik ise soğuma eğrisini izleyerek ötektik bileşimde katılaşır. Bu alaşımlar yüksek dayanım ve sünekliğin istendiği uygulamalarda kullanılırlar [53].

%10-13 arasında silisyum içeren alaşımlar ötektik Al-Si alaşımları olarak adlandırılmaktadır. Bu alaşımların döküm yapısında temel olarak Al-Si ötektik fazı

bulunmaktadır. Bu alaşımların dar katılaşma aralığı, mükemmel akıcılık, kolay dökülebilirlik ve iyi düzeyde aşınma dayanımı özelliklerine sahiptirler [53].

Ötektik üstü alaşımlar %15-20 oranında silisyum içermektedirler. Bu alaşımlarda eriyikten ilk önce katılaşan faz birincil silisyumdur. Ötektik üstü silisyum büyük birincil kristaller şeklinde katılaşmaktadır. Silisyumun bu morfolojisi mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu alaşımlar kayda değer oranlarda aşınma dayanımına sahiptirler. Bu özellikleri ile pistonlar, motor gövdeleri ve kompresör parçalarının üretiminde kullanılırlar [53].

Ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü Al-Si alaşımlarının sahip olduğu mikroyapılar Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü ticari Al-Si alaşımlarının mikroyapıları; (a) α-alüminyum fazı içerisinde gelişen fan şekilli Al_{51}-$(MnFe)_3$-Si_2 fazı, silisyum kristalleri, Al_2Cu ve kompleks ötektik bölgeler içeren ötektik altı A319(Al-5.7Si) alaşımı, (b) α-alüminyum dendritleri, birincil silisyum taneleri ve kompleks ötektik bölgeler içeren ötektik A339(Al-11.9Si) alaşımı, (c) büyük birincil silisyum taneleri, ötektik silisyum kristalleri ve α-alüminyum matris fazında Al_2Cu fazı bulunduran ötektik üstü A390(Al-15Si) alaşımı [54]

A360 alüminyum alaşımının içerisinde bulunan silisyum alüminyum alaşımlarında sertlik, mukavemet, korozyon direnci ve akışkanlığı arttırarak ergime sıcaklığını düşürür. Silisyuma ek olarak alaşımın içerisinde ağırlıkça %0,4-0,6 oranında bulunan magnezyum ve %0,6'ya kadar bulunan bakır alaşıma ısıl işlem uygulanarak mekanik özelliklerinin arttırılabilmesi sağlar [41, 55]. Alaşımın kimyasal bileşimi ve özellikleri Tablo 2.1 ve 2.2'de görülmektedir.

Tablo 2.1. A360 alaşımının kimyasal bileşimi [1]

Element	Kimyasal bileşim (% ağırlıkça)
Silisyum (Si)	9,0-10,0
Demir (Fe)	< 1,3
Bakır (Cu)	< 0,6
Mangan (Mn)	< 0,35
Magnezyum (Mg)	0,4-0,6
Nikel (Ni)	< 0,5
Çinko (Zn)	< 0,5
Kalay (Sn)	< 0,15
Diğer	< 0,25

Tablo 2.2. A360 alaşımının özellikleri [56]

Yoğunluk (g/cm^3)	2,63
Ergime sıcaklığı (°C)	557-596
Çekme dayanımı (Mpa)	315
Kopma dayanımı (Mpa)	165
Elastisite modülü (Gpa)	71
Uzama (%)	4
Sertlik (HB)	75
Isıl iletkenlik (W/mK)	113 (25 °C'de)

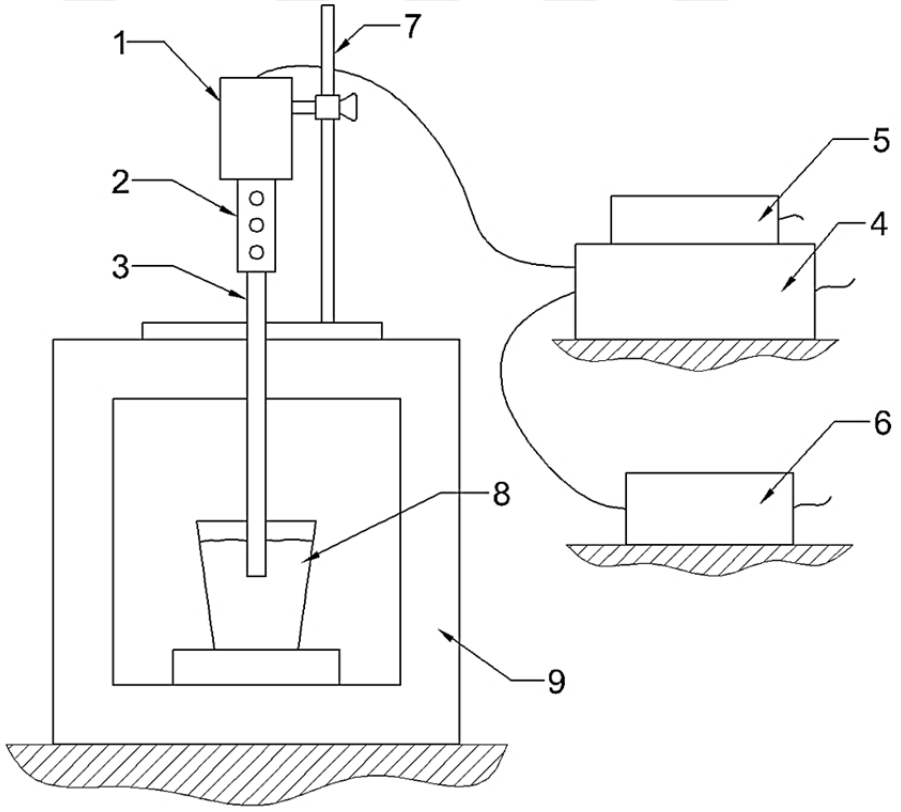
Yüksek korozyon direnci, yüksek süneklik, mükemmel dökülebilirlik, iyi düzeyde kaynak edilebilirlik ve basınca dayanıklılık A360 alaşımının öne çıkan özellikleridir. Bu alaşım kokil kalıba döküm, kum kalıba döküm ve yüksek basınçlı döküm uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [41, 57]. Şekil 2.1'de A360 alaşımından üretilmiş bazı parçalar görülmektedir.



Şekil 2.3. A360 alaşımı kullanılarak kokil kalıba döküm ve kum kalıba döküm yöntemleriyle üretilmiş parçalar [58]

2.2. Çalışmada Kullanılan Ultrasonik Titreşim Uygulama Ekipmanı

Bu çalışmada eriyik halindeki alüminyuma ultrasonik titreşim uygulamak için 300 W gücünde titreşimin frekans ve genliğinin değiştirilmesine imkan veren bir düzenek kullanılmıştır. Bu düzenek Şekil 2.4'deki parçalardan oluşmaktadır.



Şekil 2.4. Alüminyum eriyiğe ultrasonik titreşim uygulamasında kullanılan düzeneğin şeması

1. Transdüser: Elektrik enerjisini ultrasonik titreşim şeklindeki mekanik enerjiye dönüştüren parçadır.

2. Horn: Transdüser tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimi yükseltgeyen parçadır.

3. Radyatör: Düzeneğin oluşturduğu ultrasonik titreşimi alüminyum eriyiğe ileten parçadır. Bu parça Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü atölyesinde üretilmiş olup imalatında yüksek yorulma dayanımı, düşük akustik kayıp, kavitasyon erozyonuna dayanım ve kimyasal inertlik özellikleri sebebiyle Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır [59].

4. Güç amplifikatörü: Ultrasonik fonksiyon düzeneğinin çalışması için gerekli gücü sağlayan parçadır.

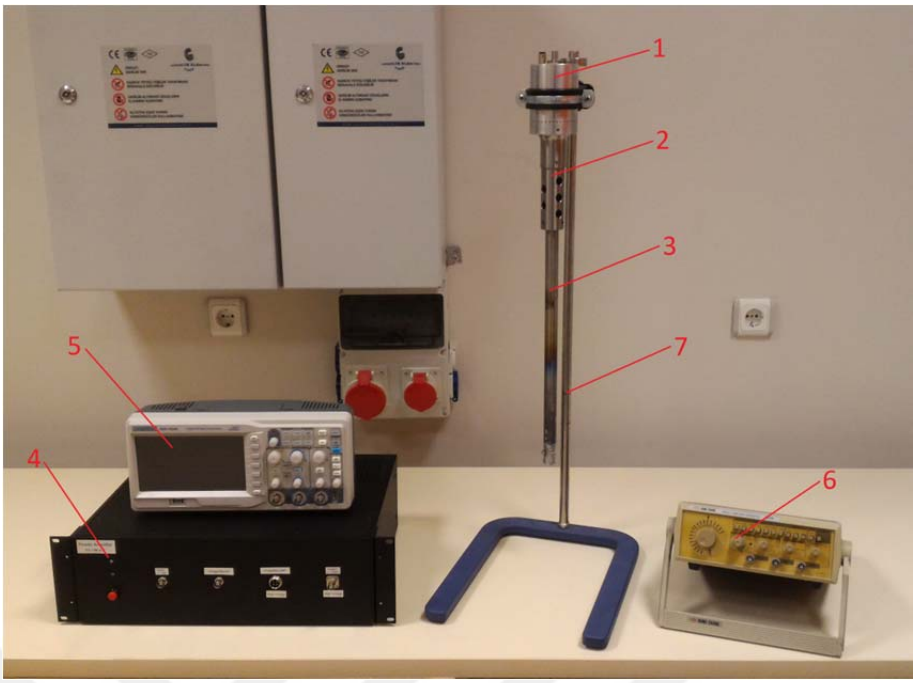
5. Osiloskop: Elektrik sinyalinin genliğinin ve frekansının ölçülmesinde kullanılan parçadır.

6. Ultrasonik fonksiyon üreteci: Ultrasonik fonksiyonu üreten ve ultrasonik titreşimin genliğinin, frekansının ve fonksiyon tipinin değiştirilmesine olanak sağlayan parçadır.

7. Hareketli kelepçe: Transdüser, horn ve radyatörü tutan ve aşağı yukarı hareketiyle radyatörün grafit pota içerisindeki eriyiğe girip çıkmasını sağlayan parçadır.

8. Grafit pota: Külçe halindeki alüminyum alaşımının içerisinde ergitildiği parçadır.

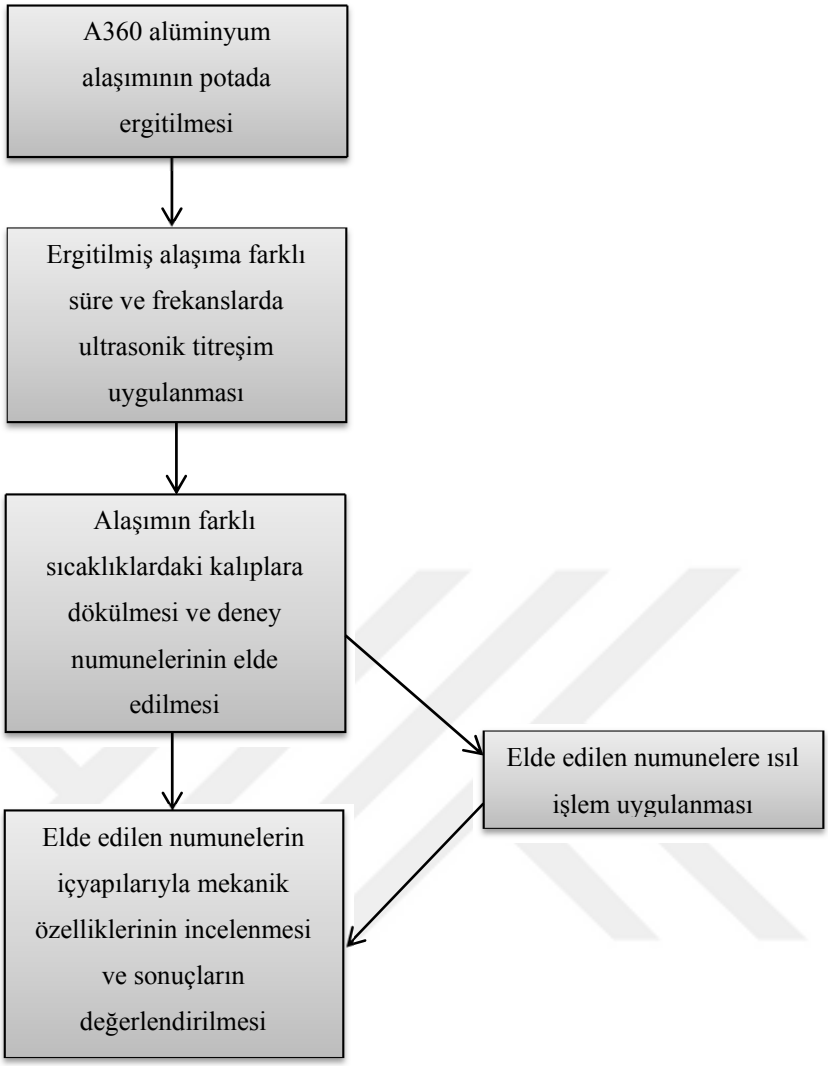
9. Elektrik fırını: Alüminyum alaşımının grafit pota içerisinde ergitilmesini sağlayan parçadır.



Şekil 2.5. Alüminyum eriyiğe ultrasonik titreşim uygulanmasında kullanılan düzenek

2.3. Deneysel Yöntem

Bu çalışma kapsamında mikroyapı ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla ergitilmiş A360 alüminyum alaşımına farklı süre ve frekanslarda ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Titreşim uygulanan ergitilmiş alüminyum alaşımı farklı sıcaklıklardaki kalıplara dökülmüş ve katılaştırılmıştır. Katılaşan alaşım kalıplardan çıkarılmış ve kesilerek numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numunelerin bir kısmına ısıl işlem uygulanmaksızın diğer kısmına ise ısıl işlem uygulanarak içyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Böylece hem ultrasonik titreşim uygulama süresi ve frekansının hem de ultrasonik titreşim uygulaması ile ısıl işlem kombinasyonunun malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 2.6. Deneysel çalışma aşamaları

Deneyler esnasında eriyik halindeki alaşıma 20-17,5-15 kHz frekanslarında ve 180, 300, 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmıştır. Titreşim uygulama işleminden sonra eriyik halindeki alaşım 23 ve 300 °C sıcaklıklarındaki kalıplara dökülmüş ve katılaştırılmıştır. Ayrıca karşılaştırma yapılabilmesi açısından ergitilerek ultrasonik titreşim uygulanmadan döküm işlemi de gerçekleştirilmiştir. Eriyik halindeki alaşım kalıpların içerisinde katılaştıktan sonra iki kalıbın da belirlenen noktalarından örnekler alınmıştır. Alınan bu örneklerin bir kısmı döküldüğü şekilde yani herhangi bir ısıl işlem uygulanmadan, bir kısmına ise T6 ısıl işlemi uygulanarak numuneler elde edilmiştir. Elde edilen bu numunelerin sertlikleri, çekme dayanımları, optik ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Kalıplardan alınan numunelerin özellikleri ve deney parametreleri Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'de belirtilmiştir.

Tablo 2.3. Kalıplardan alınan numunelerin özellikleri

Numune numarası	Kalıp sıcaklığı (°C)	Kesit (mm)	Isıl işlem
1	23	ϕ15	-
2	23	ϕ10	-
3	300	ϕ15	-
4	300	ϕ15	T6

Tablo 2.4. Deney parametreleri

Titreşim frekansı (kHz)	20-17,5-15
Titreşim uygulanma süresi (sn)	0-180-300-600
Titreşim genliği (µm)	6
Ergitme sıcaklığı (°C)	700
Kalıp sıcaklıkları (°C)	23-300
Ergitilen alaşım miktarı (g)	400
Radyatörün çapı (mm)	20
Radyatörün eriyik içerisine daldırılma miktarı (mm)	30

Çalışmada kullanılan A360 alaşımı Gebze'de faaliyet gösteren Şirvanlı Alüminyum Döküm ve Metal İşleme San. Tic. A. Ş.'den temin edilmiştir. Külçeler halinde temin edilen alaşım şerit testerede grafit pota içerisine sığacak şekilde kesilmiştir. Külçe halindeki alaşım kesildikten sonra hassas terazide tartılmış ve her bir ergitme işlemi için 400'er gram alaşım hazırlanmıştır. Ergitme işlemi için Vesta marka elektrikli fırın kullanılmıştır.



Şekil 2.7. Külçe halindeki alaşımın şerit testerede kesilmesi

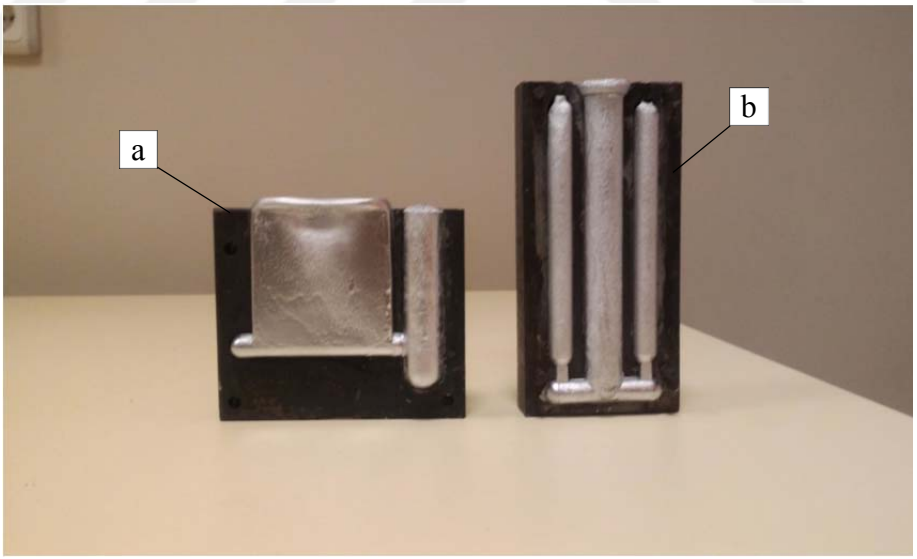


Şekil 2.8. Alaşımın ergitilmesinde kullanılan Vesta marka elektrikli fırın

Pota içerisindeki eriyiğin sıcaklığı K tipi termokupl ile kontrol edildikten sonra eriyik içerisine daldırılacak olan radyatör fırının üzerindeki delik vasıtasıyla fırının içine sokulmuştur. Termal şok ve sıvı alaşımının sıcaklık farkından dolayı radyatörün üzerine yapışmasını engellemek amacıyla radyatör fırının içerisinde eriyiğe daldırılmadan 5 dakika boyunca ısıtılmıştır. Isıtma işleminin ardından radyatör pota içerisinde bulunan eriyik içerisine sıvı metal yüzeyinden 30 mm içeri dalacak şekilde aşağı indirilmiştir. Eriyiğe belirlenen frekans ve sürelerde ultrasonik titreşim uygulandıktan sonra radyatör eriyik içerisinden çıkarılmıştır. Maşa aracılığıyla fırın içerisinden çıkarılan pota içerisindeki eriyik biri oda sıcaklığında (23 °C), diğeri ise 300 °C'ye ısıtılmış kalıplara dökülmüştür. Kalıplardan birinin 300 °C'ye ısıtılmasında bir diğer elektrikli fırın kullanılmıştır. Kalıpların içerisindeki eriyik katılaştıktan ve soğuduktan sonra belirlenen noktalardan katı alaşım kesilmek suretiyle örnekler alınmış ve markalanmıştır.



Şekil 2.9. Radyatörün pota içerisindeki eriyiğe daldırılarak ultrasonik titreşimin eriyiğe iletilmesi



Şekil 2.10. Eriyik alaşımın döküldüğü kalıplar; (a) 23 °C, (b) 300 °C

Alınan numuneler arasından 4 ile numaralandırılan numuneler ultrasonik titreşim uygulamasının ısıl işlem sonrası alaşımın içyapısına olan etkisinin incelenmesi amacıyla T6 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Bunun için alaşımında ergitildiği Vesta marka fırın kullanılmış olup numuneler 530 °C sıcaklıkta 6 saat bekletilerek çözeltiye alındıktan sonra su verilerek soğutulmuş ve 12 saat boyunca 160 °C'de bekletilerek yapay olarak yaşlandırılmıştır.

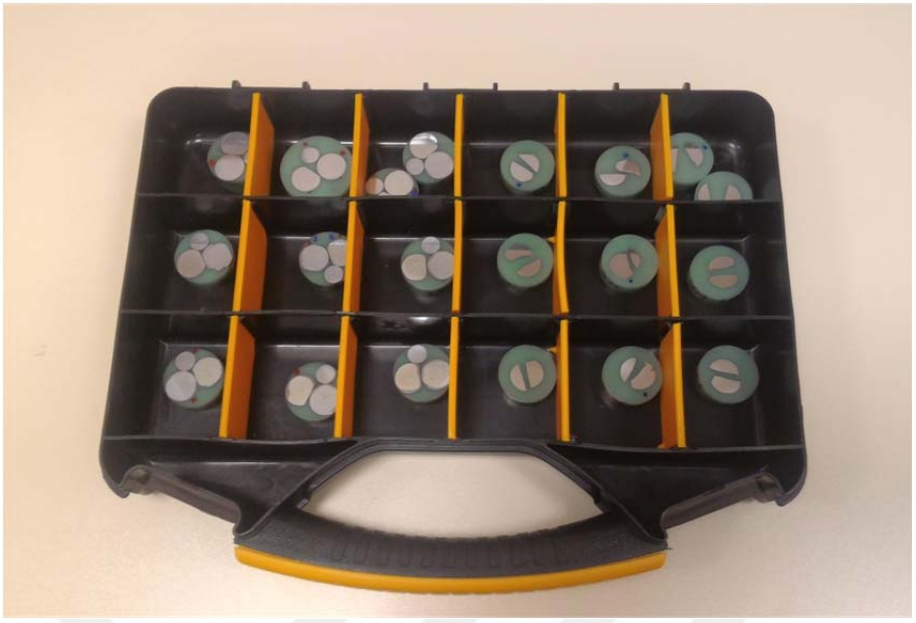
Tablo 2.5. T6 ısıl işlemi için önerilen sıcaklık ve süreler [57]

Çözeltiye Alma				Yaşlandırma	
Temper	Sıcaklık (°C)	Süre (sa)	Soğutma	Sıcaklık (°C)	Süre (sa)
T6	530 ± 5	4-8	Suda	160 ± 5	8-16

Tüm bu işlemlerden sonra alınan numuneler soğuk kalıplama ekipmanları kullanılarak bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler Metkon marka metalografik taşlama ve parlatma cihazında 300 gridden başlanılarak 2400 gride kadar SiC zımpara ile parlatılmıştır. Bu işlemden sonra sırasıyla 6 µm ve 1 µm elmas süspansiyon kullanılarak numunelerin yüzeyleri parlatılmıştır. Son parlatma işlemi 0.06 µm collodial silica süspansiyon kullanılarak yapıldıktan sonra numunelerin yüzeyleri Keller çözeltisi (2 ml HF, 3 ml HCI, 5 ml HNO_3, 190 ml H_2O) ile dağlanarak mikroskobik incelemeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.11. Metkon marka metalografik taşlama ve parlatma cihazı



Şekil 2.12. Mikroskop görüntüsü almaya hazır numuneler



Şekil 2.13. Ultrasonik titreşim genliğinin ölçülmesi

Yapılan tüm bu işlemlere ek olarak deney parametrelerinin tam olarak belirlenmesi açısından eriyiğe uygulanan ultrasonik titreşimin genliği ölçülmüştür. Bu işlem için Keyence marka lazer deplasman ölçer sistemi kullanılmıştır. Genliğin doğru bir şekilde ölçülebilmesi için radyatörün eriyiğe daldırıldığı noktadan ölçüm alınması gerekmektedir. Ancak fırın içerisindeki yüksek sıcaklık nedeniyle ölçümün yapılması

mümkün olmadığından, ölçüm oda sıcaklığında ultrasonik sistem deneylerin yapıldığı parametrelerde çalıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçüm ile titreşimin genliğinin 6 μm olduğu tespit edilmiştir. Titreşimin frekansı ise düzeneğe bağlı olan osiloskop vasıtasıyla ölçülmüştür.

Deneylerin tamamlanmasının ardından elde edilen numunelerin mikroyapısal ve mekanik özellikler açısında değerlendirilmesi aşamasına geçilmiştir. Elde edilen numunelerin mikroyapı görüntülerinin çekilmesinde Leica marka optik mikroskop ve Clemex marka kamera kullanılmıştır. Optik mikroskop görüntülerine ek olarak elde edilen numuneler arasından seçilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin çekimi ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM çekimleri ve EDS analizleri Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Elektron ve Işık Mikroskobisi Laboratuvarında bulunan Jeol marka taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir.

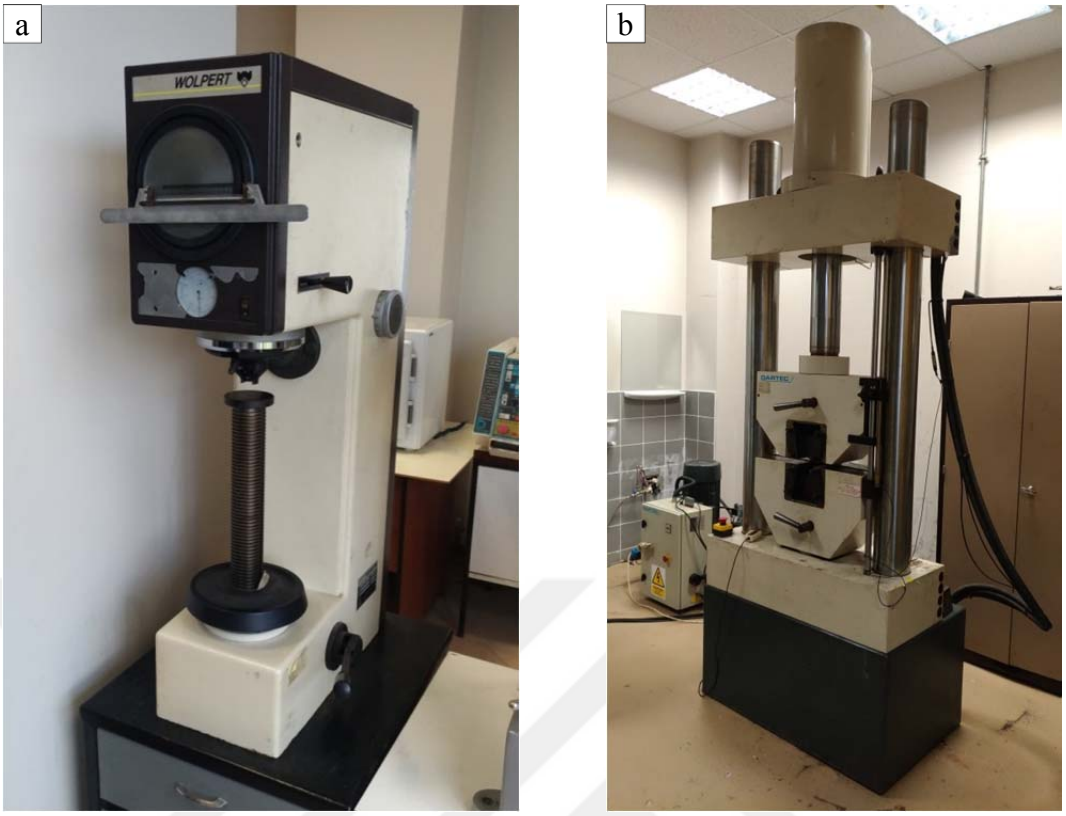


Şekil 2.14. Leica marka optik mikroskop

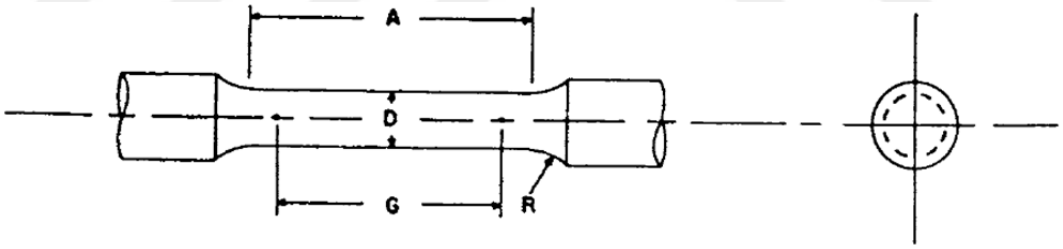


Şekil 2.15. Jeol marka SEM cihazı [60]

Mekanik özelliklerin değerlendirilmesi açısından elde edilen numunelerin sertlik ve çekme gerilmesi değerleri Wolpert marka sertlik ölçme cihazı ve Dartec marka çekme test cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Çekme numunelerinin hazırlanmasında ve çekme hızının belirlenmesinde ASTM B557M-10 standardı esas alınmıştır. Şekil 2.17'de ölçüleri verilen çekme numuneleri döküm sonrası kalıp içerisinde katılaşan silindirik parçaların CNC torna tezgahında işlenmesi ile üretilmiştir. Sertlik değerlerinin ölçülmesi için Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılmış olup, ölçümler ϕ2,5 mm uç ve 62,5 kgf yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.16. (a) Wolpert marka sertlik ölçme cihazı, (b) Dartec marka çekme test cihazı



G (mm)	30.00 ± 0.06
D (mm)	6.00 ± 0.1
R (mm)	6
A (mm)	36

Şekil 2.17. ASTM B557M-10 standardına göre çekme numunesi boyutları

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Ultrasonik Titreşim Uygulamasının Malzemenin Mikroyapısı Üzerine Etkisi

Ultrasonik titreşim uygulamasının malzemenin mikroyapısı üzerine olan etkisinin araştırılması maksadıyla ultrasonik titreşim uygulaması sonucu elde edilen numunelerin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobunda toplamda 700'den fazla görüntüsü çekilmiştir. Çekilen fotoğraflar üzerinden elde edilen mikroyapıların analizi yapılmıştır. Ayrıca dendritik mikroyapı gösteren malzemelerin değerlendirilmesinde bir ölçüt olan ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe ölçülmüştür.

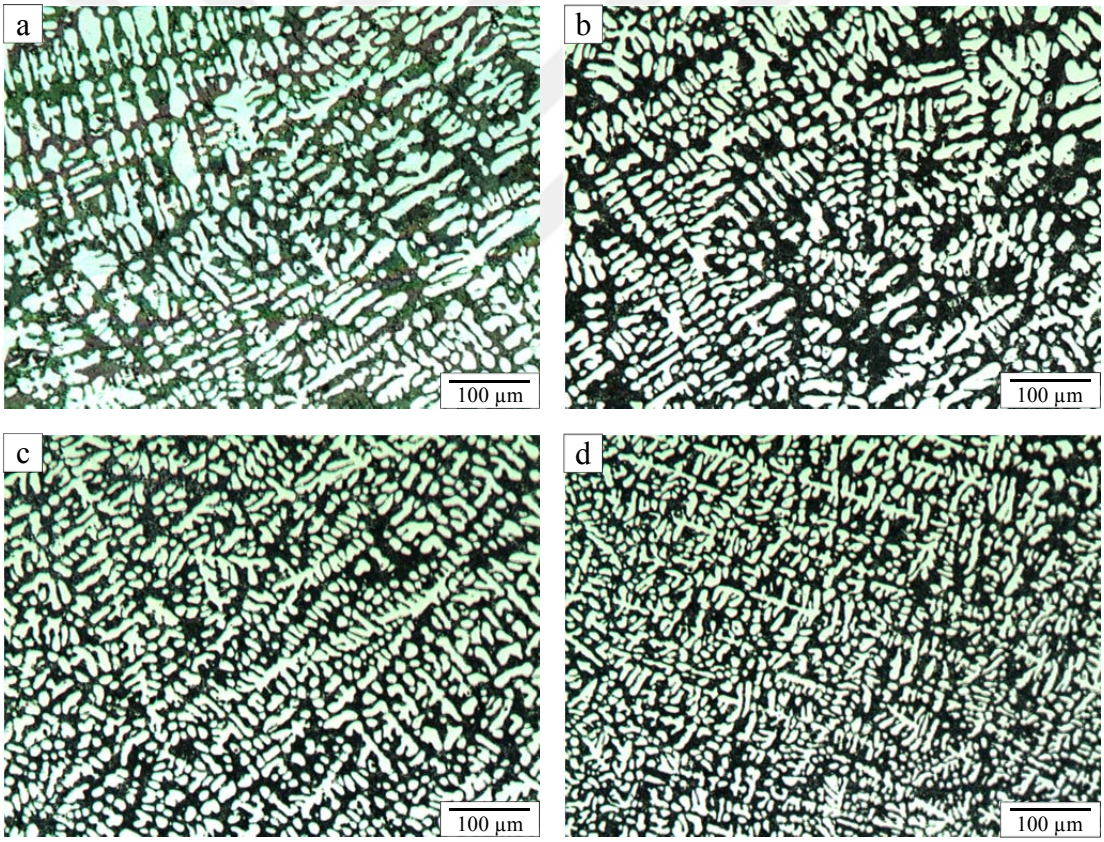
Her numunenin 50x ve 100x büyütmede optik mikroskop fotoğrafları ve belirlenen numunelerin SEM görüntüleri çekilerek EDS analizleri yapılmıştır. Çekilen görüntüler ve yapılan analizler uygulanan ultrasonik titreşimin frekansının ve titreşim uygulama süresinin mikroyapı üzerindeki etkisinin ayrı ayrı ve detaylı bir şekilde incelenebilmesi için Tablo 3.1'de belirtildiği üzere süreye ve frekansa göre tablolar halinde sıralanarak EKLER kısmında verilmiştir.

Tablo 3.1. Çekilen görüntülerin ve yapılan analizlerin EKLER kısmındaki sayfa numaraları

	İçerik	Sayfa no
EK A	Ultrasonik titreşim uygulanan numunelerin uygulanan titreşimin frekansı ve uygulanma süresine göre düzenlenmiş optik mikroskop görüntüleri	81
EK B	Ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanan numunelerin uygulanan titreşimin frekansı ve uygulanma süresine göre düzenlenmiş optik mikroskop görüntüleri	93
EK C	Ultrasonik titreşim uygulanan numunelerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri	105

3.1.1. Optik mikroskop görüntüleri

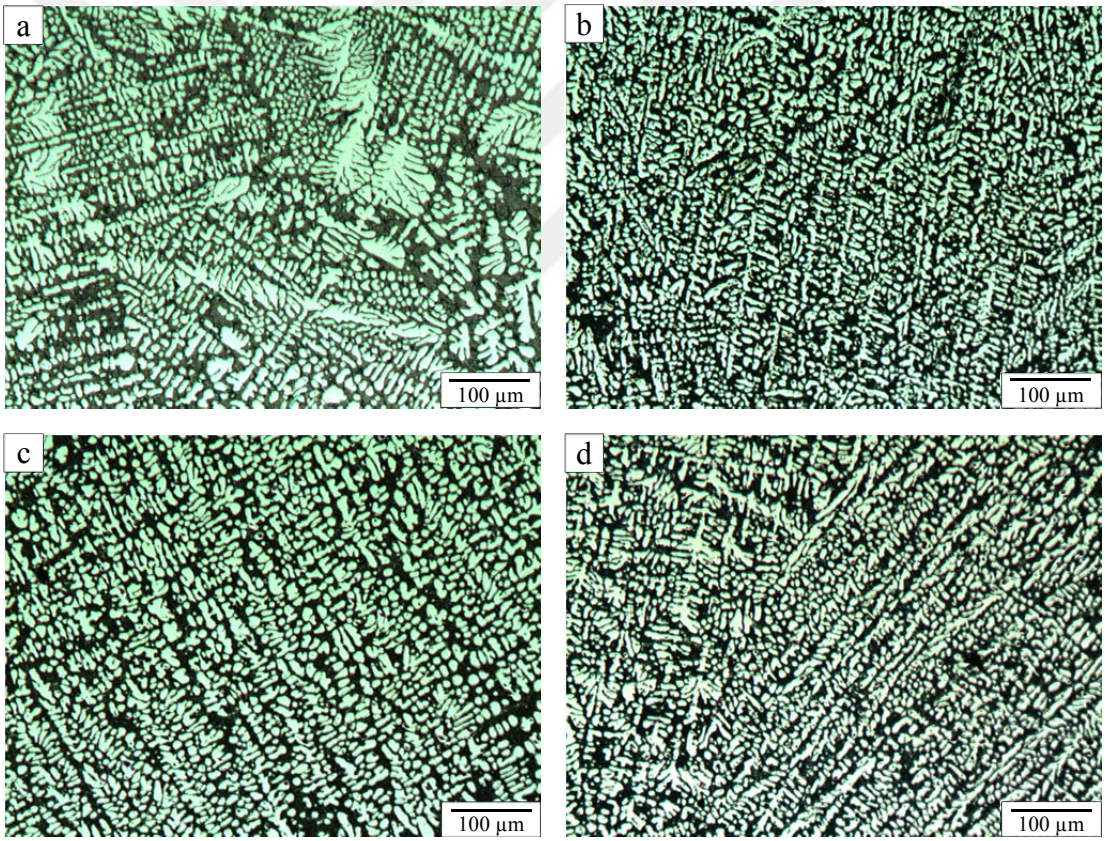
Şekil 3.1'de ultrasonik titreşim uygulama süresinin 1 numaralı numunelerin mikroyapıları üzerindeki etkileri görülmektedir. Şekil 3.1 (a)'da ultrasonik titreşim uygulanmamış numunenin mikroyapısı görülmekle beraber, mikroyapı incelendiğinde 100 μm büyüklüğe varan α-Al dendritlerinden oluşan kaba taneli bir yapı gözlemlenmektedir. Şekil 3.1 (b), (c) ve (d)'de ise sırasıyla 180, 300 ve 600 saniye boyunca 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin mikroyapıları görülmektedir. Bu görüntülerde kaba haldeki α-Al dendritlerinin parçalanarak küçüldüğü ve ötektik faz içerisine daha iyi dağıldığı görülmektedir. Ayrıca artan uygulama süresine paralel olarak bu parçalanma etkisinin de arttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 3.1. 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunelerin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) mikroyapı görüntüleri; (a) Titreşim uygulanmamış, (b) 180 sn, (c) 300 sn, (d) 600 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış

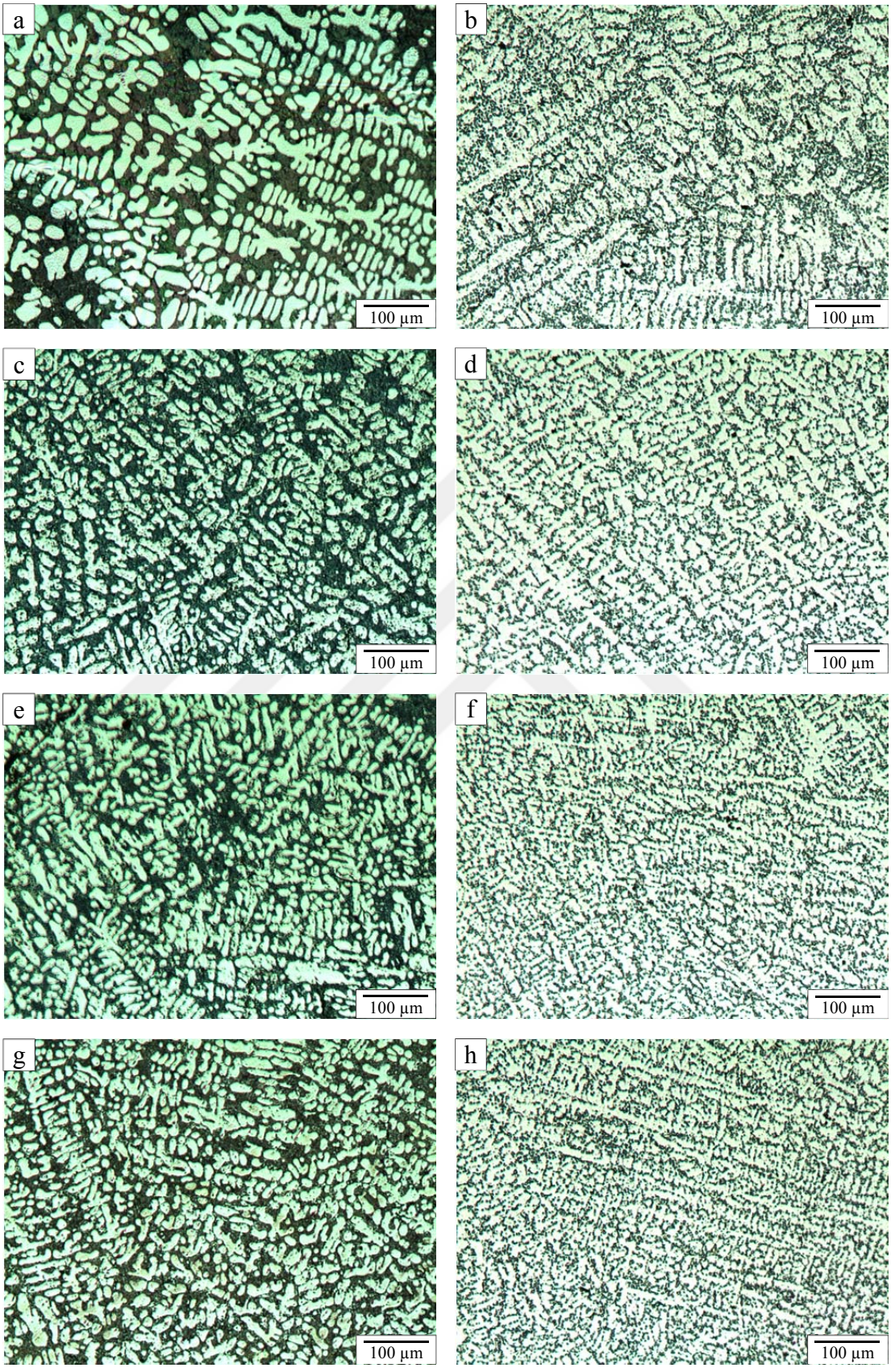
Şekil 3.2'de uygulanan ultrasonik titreşim frekansının 2 numaralı numunelerin mikroyapıları üzerine olan etkileri görülmektedir. Şekil 3.2 (a)'da ultrasonik titreşim uygulaması yapılmaksızın elde edilen numunenin mikroyapısı verilmiş olup iri taneli

dendritlerin heterojen bir şekilde yapıya dağıldığı görülmektedir. Şekil 3.2 (b), (c) ve (d)'de ise sırasıyla 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında, 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulaması yapılmış numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ultrasonik titreşim uygulamasının tüm frekanslar için α-Al dendritlerinin parçalanmasına ve küçülerek yapıya daha iyi bir şekilde dağılmasına neden olduğu görülmektedir. 17,5 ve 15 kHz frekansında titreşim uygulaması sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapısında, yani Şekil 3.2 (c) ve (d)'de verilen görüntülerde, (a)'ya kıyasla daha küçük dendritlere rastlanmakla beraber, 20 kHz frekansında titreşim uygulaması sonucunda elde edilen numunenin mikroyapısında yani (b)'de verilen görüntüde dendritlerin neredeyse tamamen parçalandığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.2. 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 2 numaralı numunelerin (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit) mikroyapı görüntüleri; (a) Titreşim uygulanmamış, (b) 20 kHz, (c) 17,5 kHz, (d) 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış

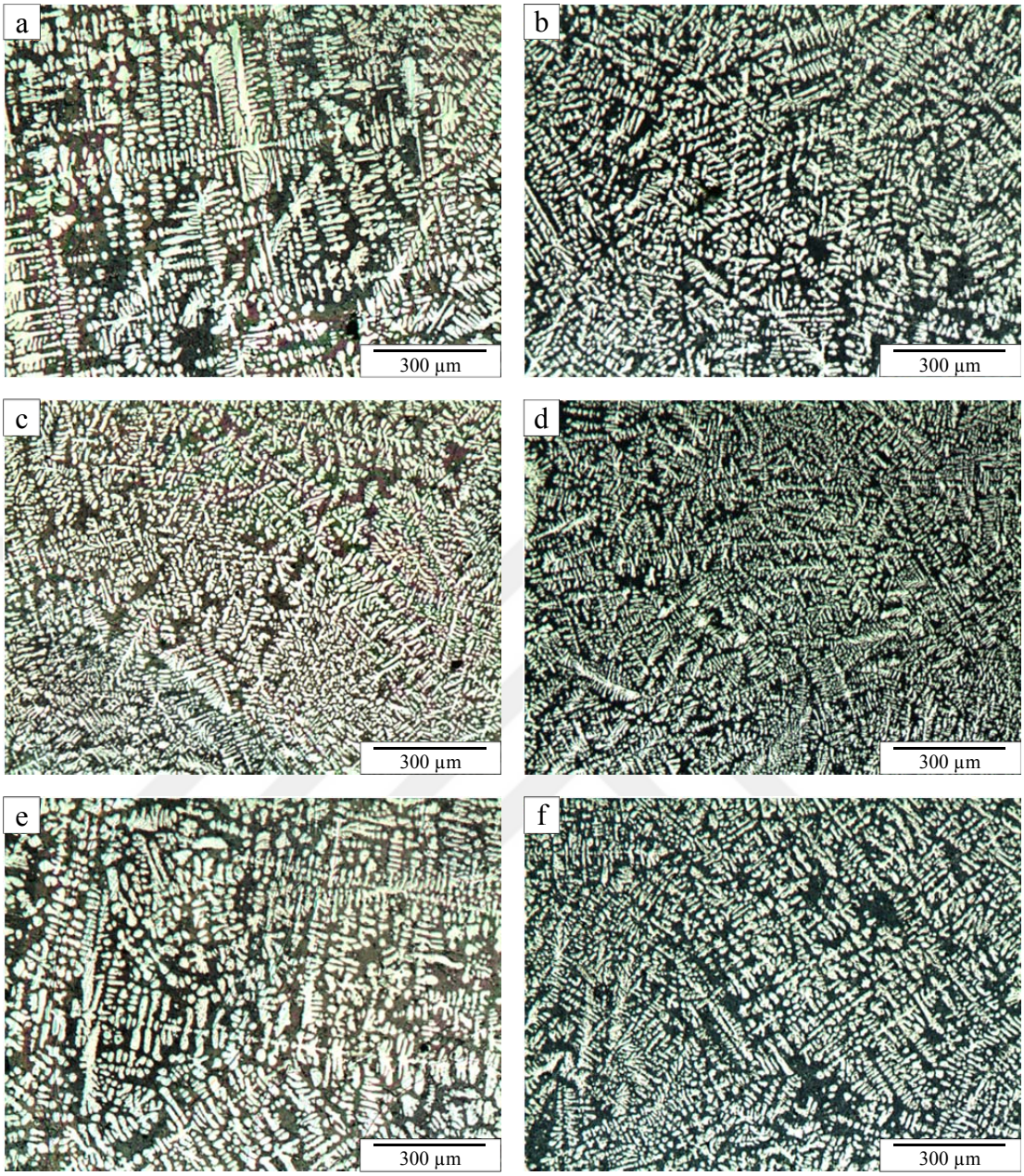
Şekil 3.3'de 20 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış 3 ve 4 numaralı numunelerin mikroyapıları görülmektedir. Şekil 3.3 (a)'da ultrasonik titreşim ve ısıl işlem uygulanmamış numunenin görüntüsü verilmiş olup mikroyapının ötektik faz içerisine dağılmış kaba α-Al dendritlerinden oluştuğu görülmektedir. Şekil 3.3 (b)'de ise ultrasonik titreşim uygulanmaksızın ısıl işlem uygulanmış numunenin mikroyapısı verilmiştir. Burada ısıl işlem uygulaması sonucunda hem α-Al dendritlerinin hem de ötektik fazın yapılarının değiştiği ve birbirleri içerisinde homojene yakın bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Şekil 3.3 (b), (c) ve (d) görüntüleri incelendiğinde ultrasonik titreşim uygulamasının Şekil 3.3 (a)'da görülen kaba dendritlerin parçalanarak küçülmesine sebep olduğu görülmektedir. Ancak Şekil 3.1'de olduğu gibi artan uygulama süresi ile söz konusu parçalama ve küçültme etkisinin artması durumu burada belirgin bir şekilde görülmemektedir. Yani 180 saniyeye ek olarak uygulanan titreşimin etkisi mikroyapıda pek fazla değişikliğe sebep olmamıştır. Şekil 3.3 (d), (f) ve (h) görüntüleri incelendiğinde artan ultrasonik titreşim süresine bağlı olarak mikroyapının giderek inceldiği, ayrıca ısıl işlem uygulamasının ultrasonik titreşim uygulaması ile kombine edildiğinde, mikroyapıda meydana gelen modifikasyonun arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 3.3. 20 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış 3 ve 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) mikroyapı görüntüleri; (a) ve (b) Titreşim uygulanmamış, (c) ve (d) 180 sn, (e) ve (f) 300 sn, (g) ve (h) 600 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış (a, c, e, g: ısıl işlem uygulanmamış, b, d, f, h: T6 ısıl işlemi uygulanmış)

Şekil 3.4'de 20 kHz frekansında 180 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 1, 2 ve 3 numaralı numunelerin mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 3.4 (a), (c) ve (e) sırasıyla ultrasonik titreşim uygulanmamış 1, 2 ve 3 numaralı numunelerin görüntüleridir. Bu üçü arasında en kaba dendritik yapıya sahip numune Şekil 3.4 (e)'de verilen, kalıp sıcaklığı 300 °C olan 3 numaralı numune olup, ardından Şekil 3.4 (a)'da verilen, kalıp sıcaklığı 23 °C olan 1 numaralı numune gelmektedir. Şekil 3.4 (c)'de verilen, kalıp sıcaklığı 23 °C olan ve kesiti 1 numaralı numuneye göre daha küçük olan 2 numaralı numune tüm numuneler arasında en ince mikroyapıya sahip olup, bu duruma hızlı soğumanın sebep olduğu anlaşılmıştır.

Ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda elde edilen Şekil 3.4 (b), (d) ve (f)'de titreşim uygulamasına bağlı olarak, Şekil 3.4 (a), (c) ve (e)'ye kıyasla mikroyapıların inceldiği görülmektedir. Burada da ultrasonik titreşim uygulanmamış numunelerde olduğu gibi en kaba taneli yapının Şekil 3.4 (f)'de verilen 3 numaralı numune olduğu, ardından Şekil 3.4 (b)'de verilen 1 numaralı numunenin geldiği, en ince taneli yapının da Şekil 3.4 (d)'de verilen 2 numaralı numune olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda ultrasonik titreşim uygulamasının farklı soğuma koşullarındaki A360 alaşımının mikroyapılarında değişikliğe sebep olduğunu, dolayısıyla ultrasonik titreşim uygulamasının soğuma hızına ve kesite bağlı olmaksızın mikroyapıda modifikasyon meydana getirdiği söylenebilir.



Şekil 3.4. 20 kHz frekansında, 180 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış farklı numunelerin mikroyapı görüntüleri; (a) titreşim uygulanmamış 1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit), (b) titreşim uygulanmış 1 numaralı numune, (c) titreşim uygulanmamış 2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit), (d) titreşim uygulanmış 2 numaralı numune, (e) titreşim uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit), (f) titreşim uygulanmış 3 numaralı numune

Tüm mikroyapı görüntüleri incelendiğinde sonuç olarak ultrasonik titreşim uygulamasının, titreşim uygulanmaksızın elde edilen numunelerin yapısında bulunan kaba birincil alüminyum dendritlerini parçalayarak küçülttüğü tespit edilmiştir. Bu durum daha önce benzer çalışmalar yapan Zhang ve arkadaşları [17] ile Jung ve arkadaşlarının [33] elde ettiği sonuçlar ile örtüşmektedir. Ancak Kotadia ve arkadaşları [29], Wang ve arkadaşları [34], Jian ve arkadaşları [4], Das ve arkadaşları [16] ile Zhang ve arkadaşlarının [20] yapmış olduğu bir başka çalışmanın sonuçlarında olduğu gibi A360 alaşımının tane yapısı ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda küresel-eş eksenli bir forma dönüşmemiştir. Daha önceden de belirtildiği üzere bu çalışmada ultrasonik titreşim uygulaması alaşım tamamen sıvı fazda iken gerçekleştirilmiştir. Söz konusu alaşım için katılaşma esnasında ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirilmesi halinde diğer araştırmacılar da belirttiği gibi küresel taneli bir mikroyapı elde edilebileceği düşünülmektedir. Zira Zhang ve arkadaşları [17] yaptıkları çalışmada sıvı fazda ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda tane büyüklüğünde bir miktar azalma elde edebilmişken, katılaşma sırasında uygulanan ultrasonik titreşim sonucu daha küçük tane ve küresel-eş eksenli bir mikroyapı elde etmişlerdir.

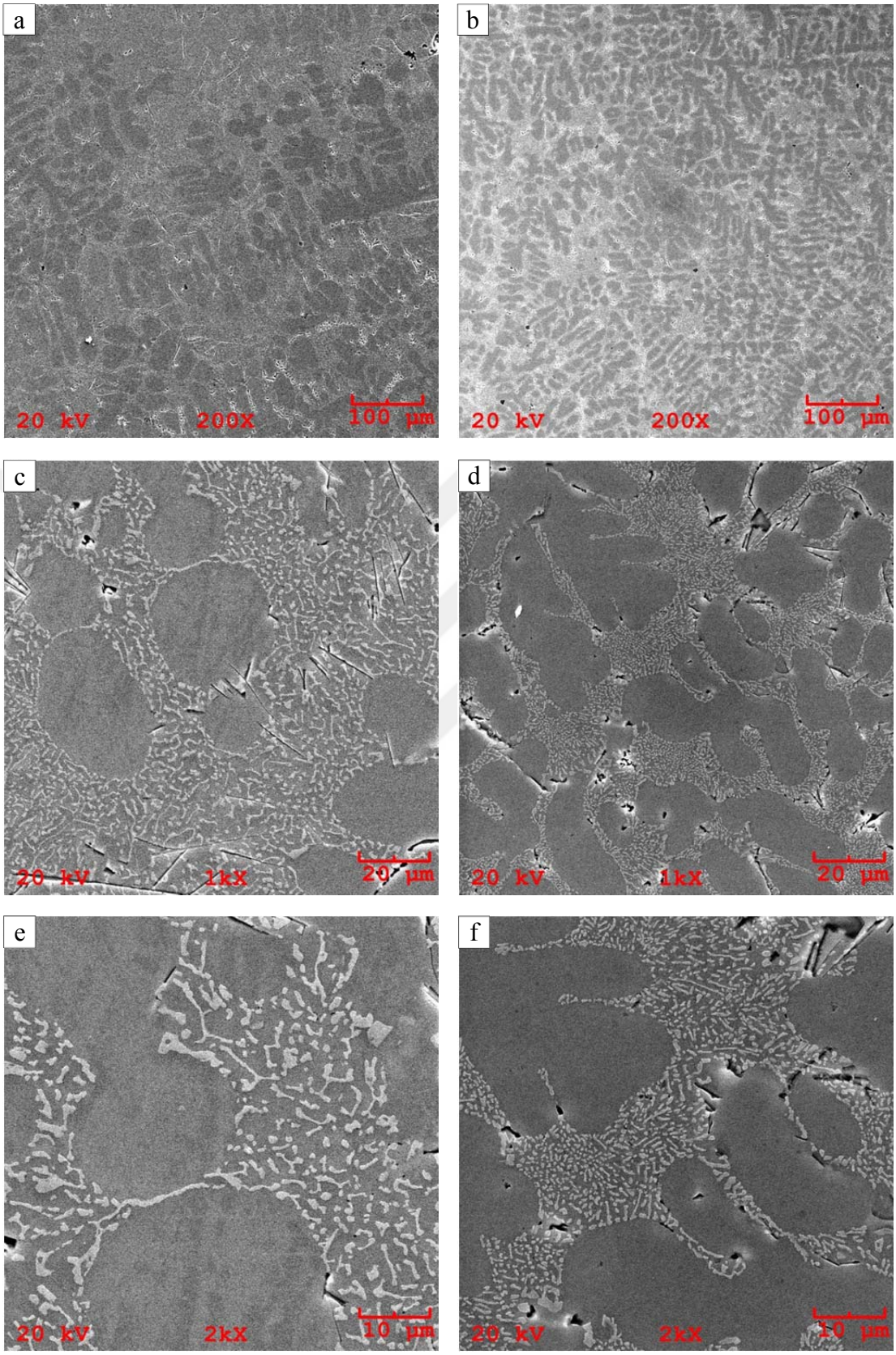
3.1.2. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri

Şekil 3.5 (a), (c) ve (e)'de 15 kHz frekansında 180 saniye ve Şekil 3.5 (b), (d) ve (f)'de yine 15 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunelerin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ultrasonik titreşim uygulama süresi arttıkça (180 saniyeden 300 saniyeye çıktığında) yani Şekil 3.5 (b), (d) ve (f)'de α-Al dendritlerinin parçalanarak daha da küçüldüğü ve mikroyapıya daha iyi şekilde yayıldığı tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 3.5 (a) ve (b) görüntüleri incelendiğinde kolayca görülebilmektedir. Bu duruma ek olarak yine ultrasonik titreşim uygulama süresi arttıkça, ötektik silisyum fazının benzer şekilde küçülmek suretiyle yapıya daha iyi şekilde yayıldığı tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 3.5 (e) ve (f) görüntüleri incelendiğinde kolayca görülebilmektedir.

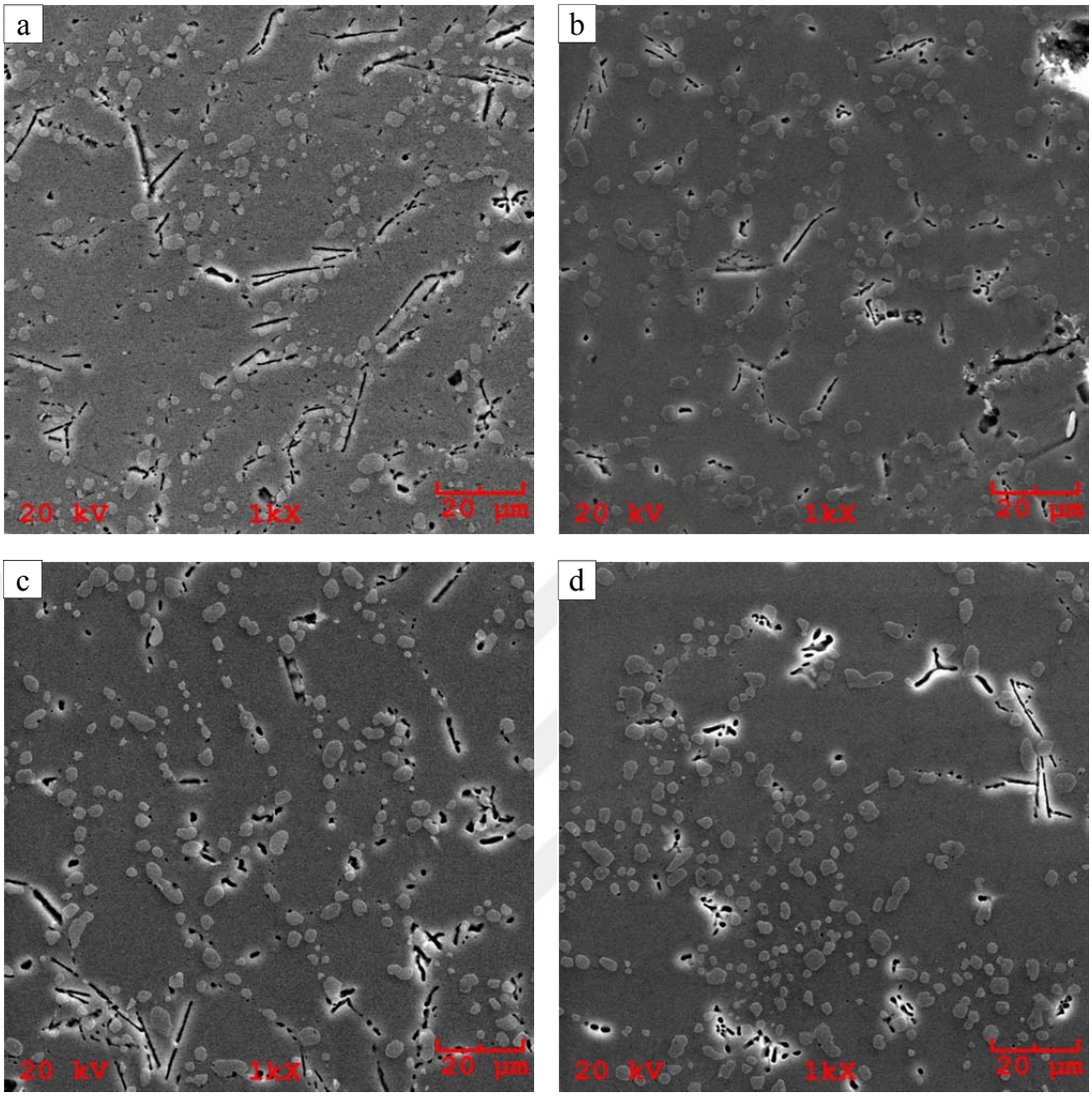
Literatür de benzer çalışmalar yapmış olan Jian ve arkadaşları [5], Zhang ve arkadaşları [20], Das ve arkadaşları [16], Jung ve arkadaşları [33] ile Haghayeghi ve

arkadaşları da [35] ultrasonik titreşim uygulamasının ötektik silisyum fazı üzerinde benzer etkiler meydana getirdiğini belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışmalar söz konusu sonuçlar açısından değerlendirildiğinde A360 alaşımı kullanılarak yapılan bu çalışma ile örtüşmektedir.

Tane büyüklüğünün mekanik özellikler üzerinde etkisi olan ölçülebilir bir büyüklük olduğu daha önce 1. Bölüm'de belirtilmişti. Sonuçlar kısmında da görüleceği üzere gerek α-Al fazındaki, gerekse ötektik fazdaki bu küçülme ve mikroyapıya daha iyi şekilde yayılma durumu ultrasonik titreşim uygulamasının mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemesinin sebebi olduğu düşünülmektedir.

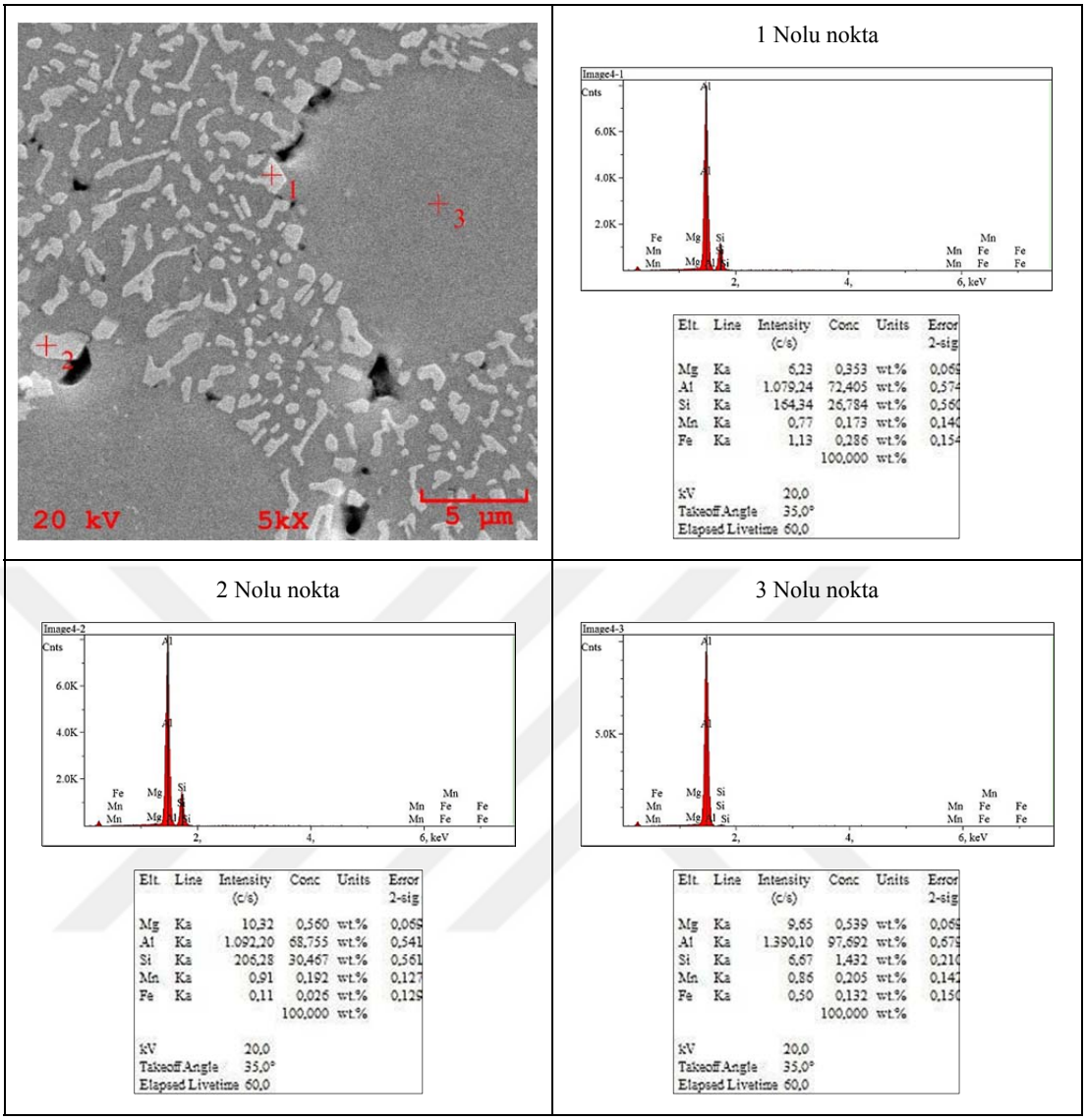


Şekil 3.5. 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunelerin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri; (a), (c) ve (e) 180 sn, (b), (d) ve (f) 300 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış



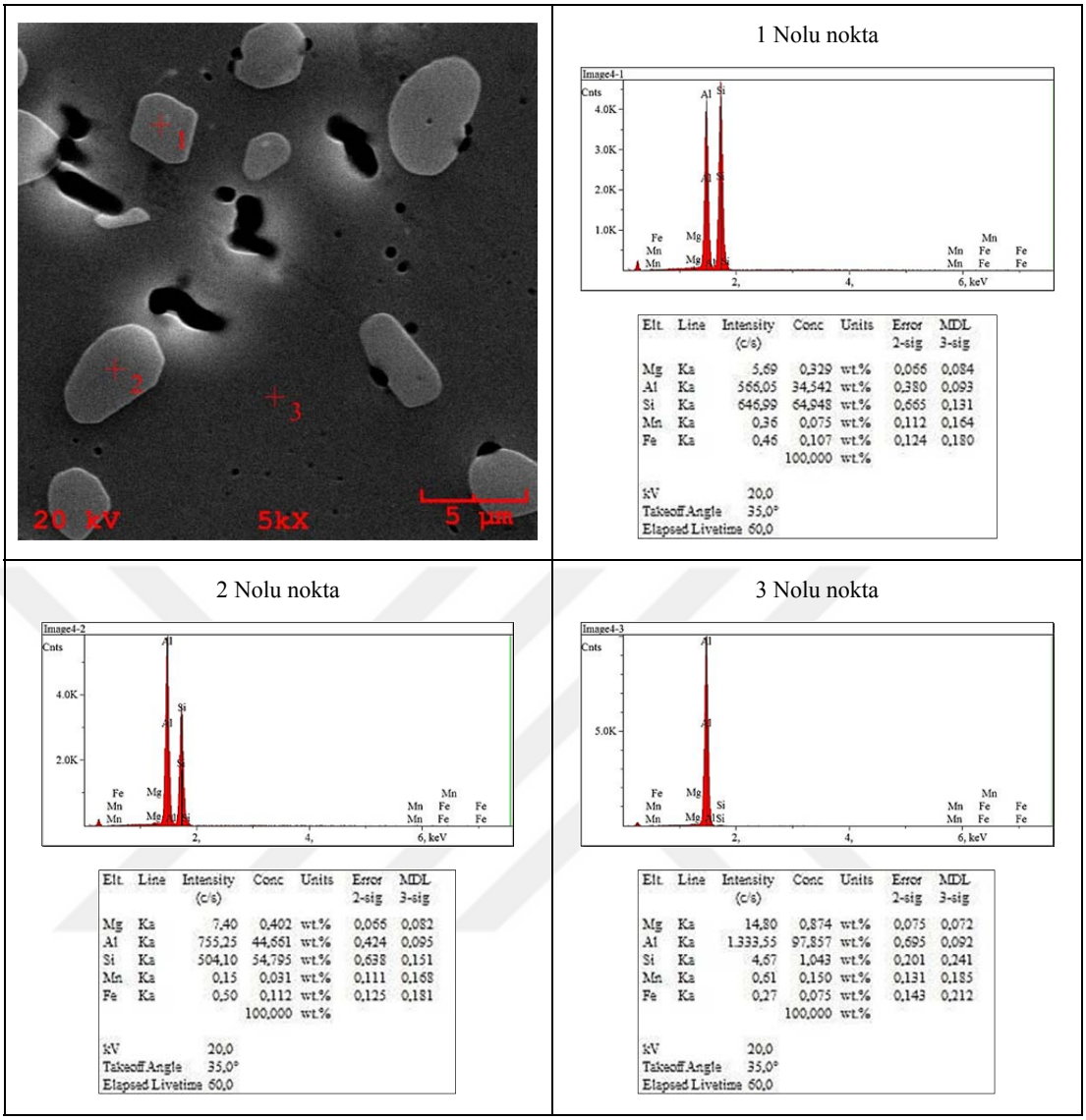
Şekil 3.6. 20 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri; (a) ultrasonik titreşim uygulanmamış, (b) 180 sn, (c) 300 sn, (d) 600 sn boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış

Şekil 3.6'da ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde T6 ısıl işleminin ötektik fazı iğnemsi ya da lifli olarak tabir edilebilecek bir yapıdan küresel veya küresele yakın bir yapıya dönüştürdüğü tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 3.5'deki (c) ve (d) ile Şekil 3.6 karşılaştırıldığında kolayca görülmektedir. Ayrıca bu dönüşüme paralel olarak Şekil 3.5'de görülen dendritik mikroyapının T6 ısıl işlemi ile kaybolduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. 17,5 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 3 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) EDS analizleri

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de sırasıyla 17,5 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 3 numaralı numunenin ve 20 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunenin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Yapılan EDS analizleri neticesinde ısıl işlem uygulanmamış numunelerde ötektik fazda ortalama %32 mertebesinde silisyum bulunduğu, T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin ötektik fazında ise ortalama %58 mertebesinde silisyum bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum T6 ısıl işleminin ötektik fazdaki silisyum miktarını arttırdığını göstermektedir.



Şekil 3.8. 20 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) EDS analizleri

Çekilen görüntüler ve yapılan analizlerin tamamı EK-C'de sunulmuştur.

3.1.3. İkincil dendrit kolları arasındaki mesafe

Malzemelerin özellikleri ile mikroyapıları arasında ilişki olduğu ve mikroyapının inceltilmesi ile malzemenin mekanik özelliklerinin gelişeceği bilinmektedir. Bu durum daha ince taneli mikroyapıya sahip malzemelerin daha fazla tane sınırına sahip olması ve bu tane sınırlarının dislokasyonların hareketini engellemesi şeklinde açıklanabilir. İnce taneli malzemeler kaba taneli malzemelere göre daha sert, daha mukavemetli ve daha yüksek akma dayanımına sahiptirler [47, 61, 62].

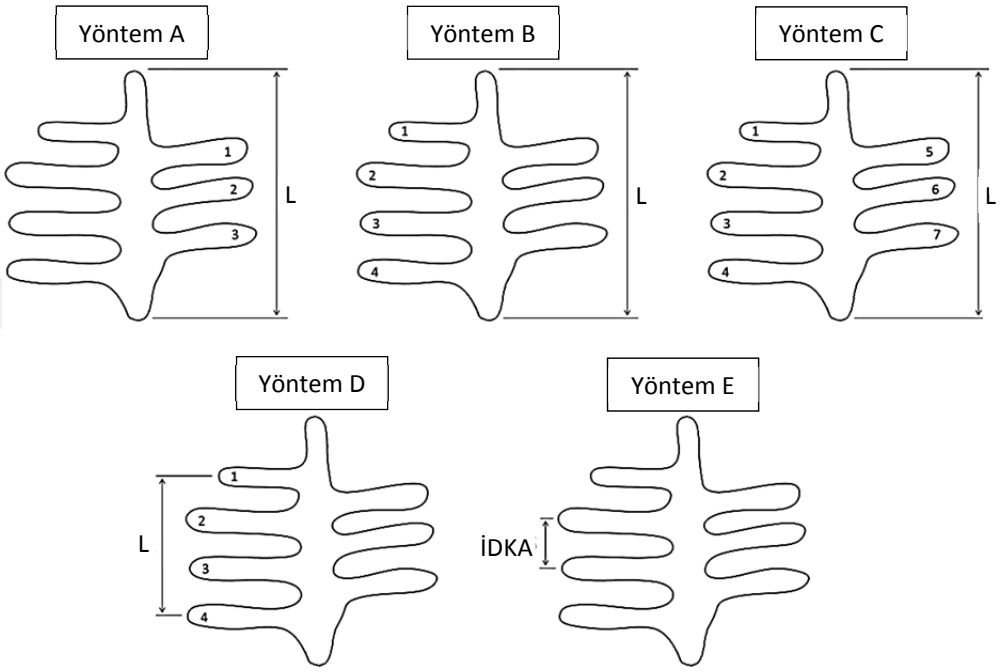
Eş eksenli tane yapısına sahip malzemelerin mikroyapılarının değerlendirilmesinde ASTM tane büyüklüğü numarasından yararlanılır. ASTM tane büyüklüğü numarasının sayısal olarak belirlenmesi amacıyla, tane yapısını gösteren fotoğraflar üzerine eşit büyüklükte çizgiler çizilerek bu çizgilerin kestiği tane adedi belirlenir. Çizilen çizginin uzunluğu, çizginin kestiği tane adedi ve fotoğrafın hangi büyütmede çekildiği göz önüne alınarak ve standartlaştırılmış ASTM kriterleri kullanılarak yapılan basit hesaplamalarla ASTM tane büyüklüğü numarası belirlenmiş olur [47, 61, 62].

Ancak döküm alüminyum alaşımları ve diğer döküm alaşımlarının mikroyapılarında eş eksenli tane yapısı yerine genellikle dendritik birincil yapı bulunduğundan alternatif bir değerlendirme yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Dendritik yapıya sahip malzemelerin mikroyapılarının değerlendirilmesinde ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin (İDKA) ölçülmesi yöntemi kullanılmaktadır. Malzemelerde ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin azalması sertliği ve mekanik özellikleri arttırmaktadır [61, 63].

İkincil dendrit kolları arasındaki mesafenin ölçülmesinde literatürde 5 farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin tamamı bir mikroskop vasıtasıyla çekilen mikroyapı fotoğraflarının üzerinde dendritik yapıya paralel bir çizginin çizilmesi ve bu çizginin sınırları içerisinde kalan ikincil dendrit kollarının sayılmasına dayanmakla beraber çizginin nereden nereye çekileceği ve hangi ikincil dendrit kollarının sayılacağı hususunda ayrışmaktadırlar. Bu çalışmada yapılan ölçümlerde, ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin ölçümünde en doğru sonucu verdiği ve en az hata oranına sahip olduğu için Şekil 3.9'da verilen D yöntemi kullanılmıştır [61]. Bu yönteme göre ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

$$\text{İkincil dendrit kolları arasındaki mesafe} = \frac{L}{N - 1} \tag{3.1}$$

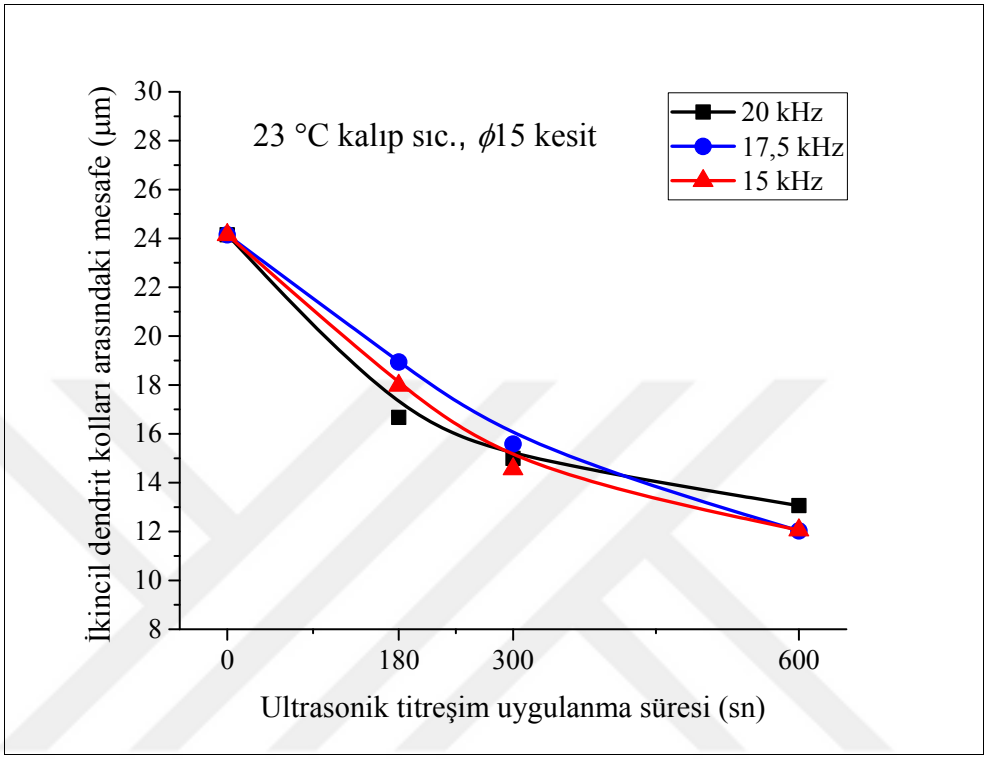
Denklem (3.1)'de L birincil dendrit koluna paralel olarak çizilen çizginin uzunluğunu, N ise çizilen paralel çizginin sınırları içerisinde kalan ikincil dendrit sayısını belirtmektedir.



Şekil 3.9. İkincil dendrit kolları arasındaki mesafenin ölçülmesinde kullanılan yöntemler [61]

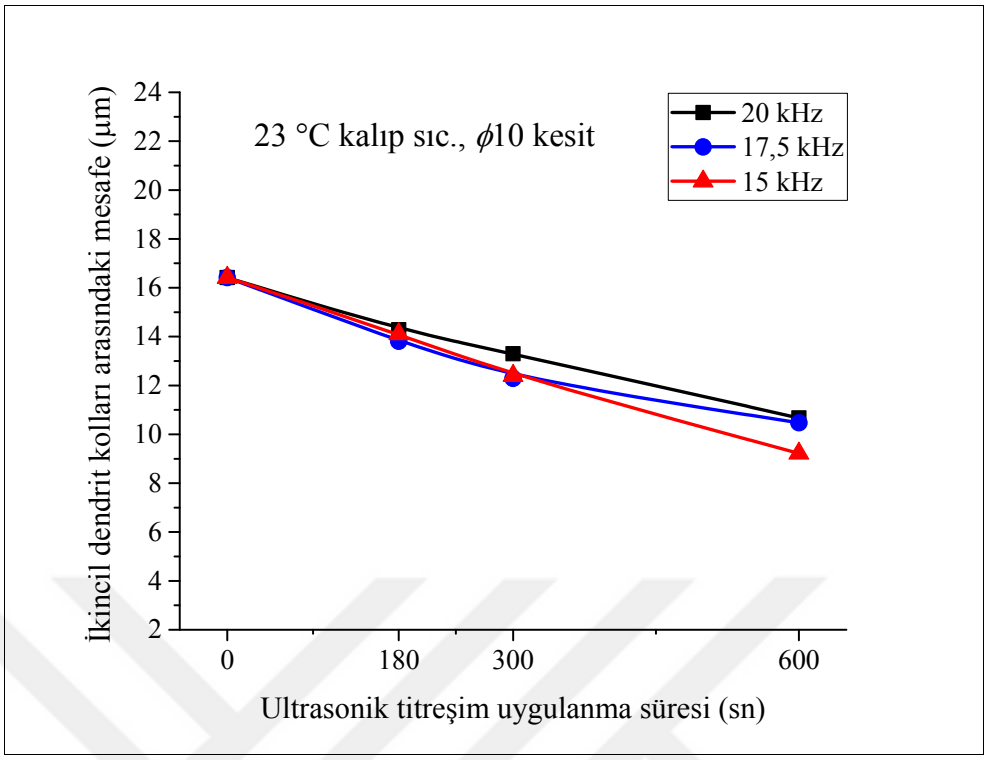
Şekil 3.10'da ultrasonik titreşim uygulamasının 1 numaralı numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafeleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulanmamış numunenin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe 24,15 µm iken, 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanan numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe 15 kHz için 12,06 µm, 17,5 kHz için 12,03 µm ve 20 kHz için 13,06 µm'dir. Grafik incelendiğinde 15 ve 17,5 kHz frekanslarındaki titreşim uygulaması ile 300 saniye uygulama süresine kadar ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin neredeyse lineer olarak azaldığı görülmektedir. Söz konusu frekanslar için 300 saniye uygulama süresinden sonra ikincil dendrit kolları arasındaki mesafedeki azalmanın daha düşük bir eğimle devam ettiği söylenebilir. 20 kHz frekansındaki titreşim uygulaması için ise 180 saniye uygulama süresinden sonra lineere yakın bir azalma olduğu görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 3.10'dan ultrasonik titreşim

uygulamasının tüm frekanslar için benzer şekilde olmak üzere ikincil dendrit kolları arasındaki mesafeyi uygulama süresi ile doğru orantılı olacak şekilde azalttığı çıkarılabilir.



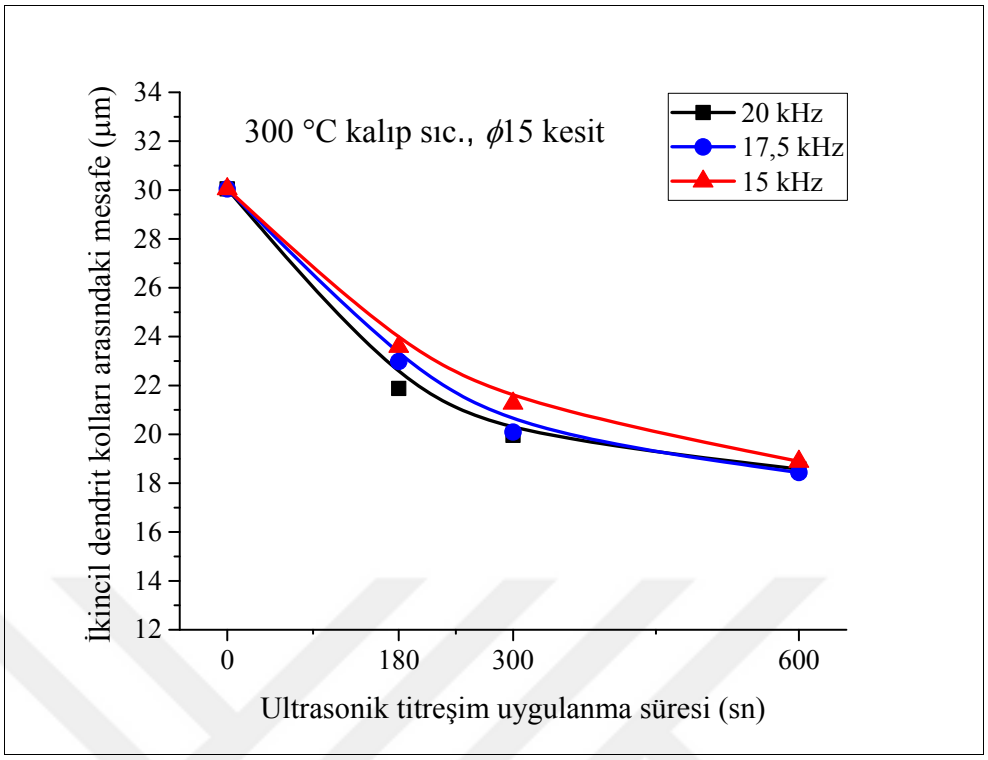
Şekil 3.10. 1 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafelerin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Şekil 3.11'de ultrasonik titreşim uygulamasının 2 numaralı numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafeleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulanmamış numunenin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe 16,42 µm iken, 600 saniye boyunca uygulanan titreşim sonucu bu değerin 15 kHz için 9,22 µm, 17,5 kHz için 10,47 µm ve 20 kHz için 10,67 µm'ye düştüğü gözlemlenmektedir. Tüm frekans değerleri için söz konusu bu azalmanın lineer özellik gösterdiği gözlemlenmektedir. Ayrıca Şekil 3.10 ile karşılaştırıldığında Şekil 3.11'deki değerlerin daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun 2 numaralı numunenin 1 numaralı numuneye kıyasla daha küçük kesit alanına sahip olduğu, dolayısıyla daha hızlı bir soğuma sonucunda katılaşmasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 3.11. 2 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit) numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafelerin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Şekil 3.12'de ultrasonik titreşim uygulamasının 3 numaralı numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafeleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulanmamış numunenin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe 30,05 µm iken 600 saniye boyunca uygulanan titreşim sonucu bu değer 15 kHz için 18,89 µm, 17,5 kHz için 18,44 µm ve 20 kHz için 18,58 µm'ye düşmüştür. Tüm frekans değerleri için 0-600 saniye aralığında ikincil dendrit kolları arasındaki mesafede gözlemlenen azalışın çok benzer karakteristikte olduğu söylenebilir. Ayrıca 3 numaralı numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin 1 ve 2 numaralı numunelere göre daha fazla olduğu, bu duruma sebep olarak ise kalıp sıcaklığının 300 °C olması dolayısıyla soğuma hızının düşük olması gösterilebilir.



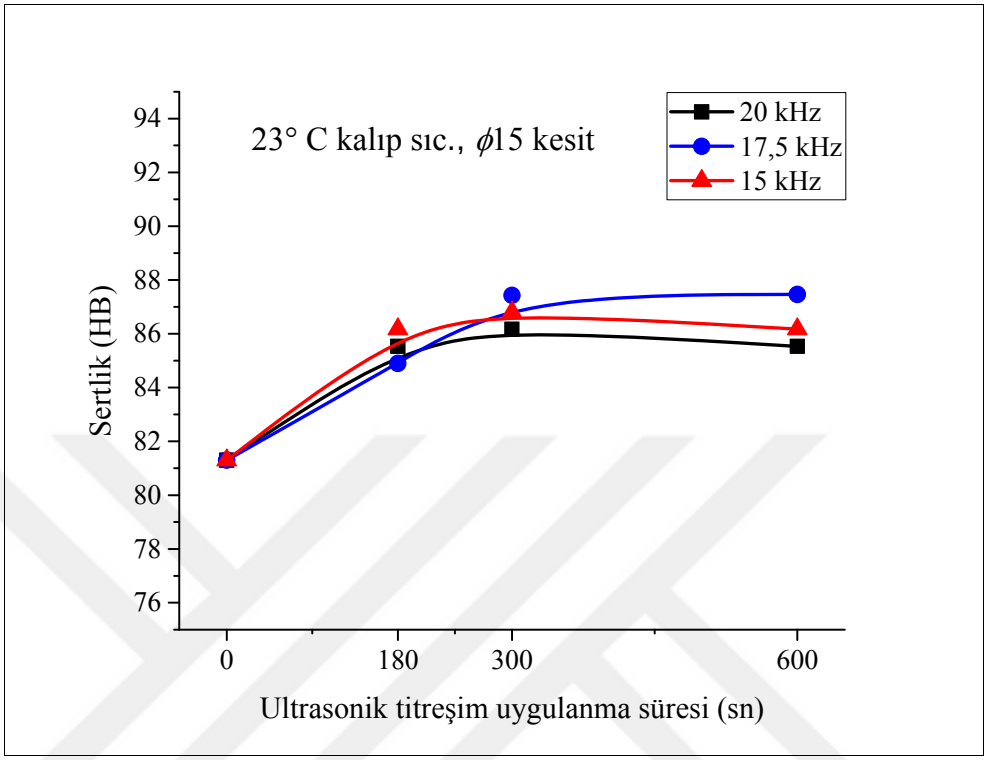
Şekil 3.12. 3 numaralı (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin ikincil dendrit kolları arasındaki mesafelerin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Sonuç olarak Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'deki verilere dayanarak ultrasonik titreşim uygulamasının farklı soğuma hızlarına sahip numunelerin tamamında ikincil dendrit kolları arasındaki mesafeyi azalttığı tespit edilmiştir.

3.2. Ultrasonik Titreşim Uygulamasının Malzemenin Sertliğine Etkisi

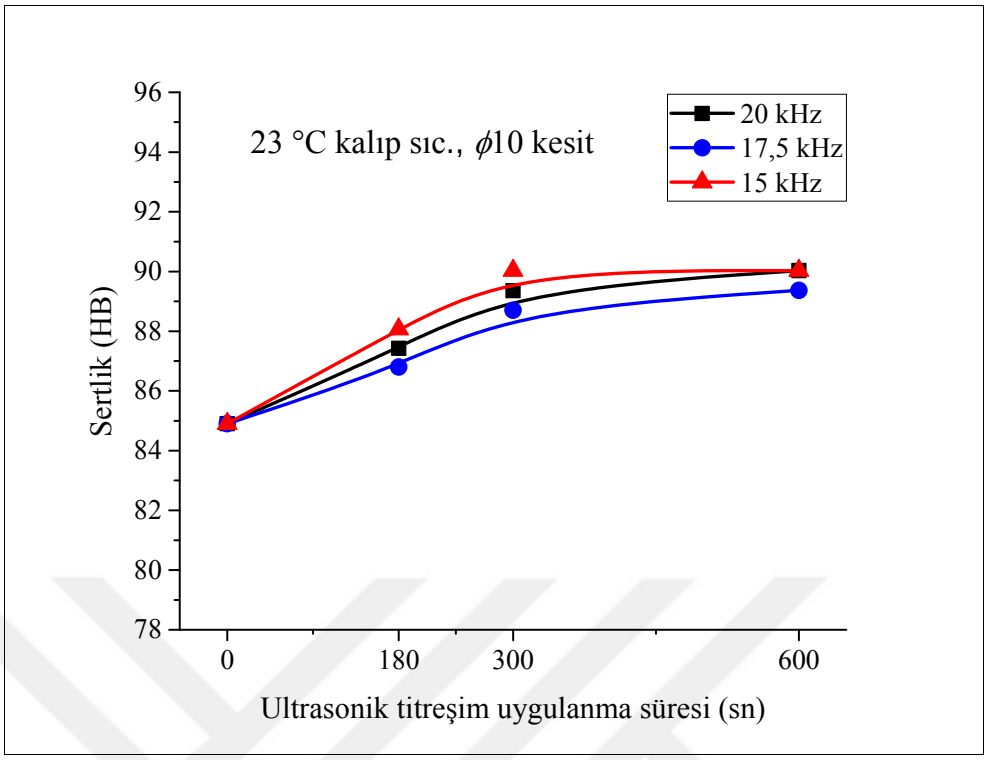
Şekil 3.13'de ultrasonik titreşim uygulamasının 1 numaralı numunelerin sertlikleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulanmamış numunenin sertliği 81,3 HB iken, 600 saniye boyunca uygulanan titreşim sonucu bu değer 15 kHz için 86,17 HB, 17,5 kHz için 87,46 HB ve 20 kHz için 85,53 HB'ye yükselmiştir. Sertlikteki bu artış her üç frekans değeri için de 180 saniyeye kadar hızlı bir şekilde gerçekleşirken, 180 saniyeden sonra tüm frekans değerleri için artış miktarı önemli ölçüde azalmıştır. Öyle ki tüm frekans değerleri için 180 saniyeden sonra 300 saniye uygulama süresi için sertlikte bir miktar artış sağlanırken, 600 saniye uygulama süresindeki sertlik miktarı ile 300 saniye uygulama süresindeki sertliğe çok yakın değerlerdedir. Buna bağlı olarak 1 numaralı numune için 300

saniyeden sonra uygulanan ultrasonik titreşimin sertlik değerleri üzerinde çok büyük değişikliklere neden olmadığı söylenebilir.



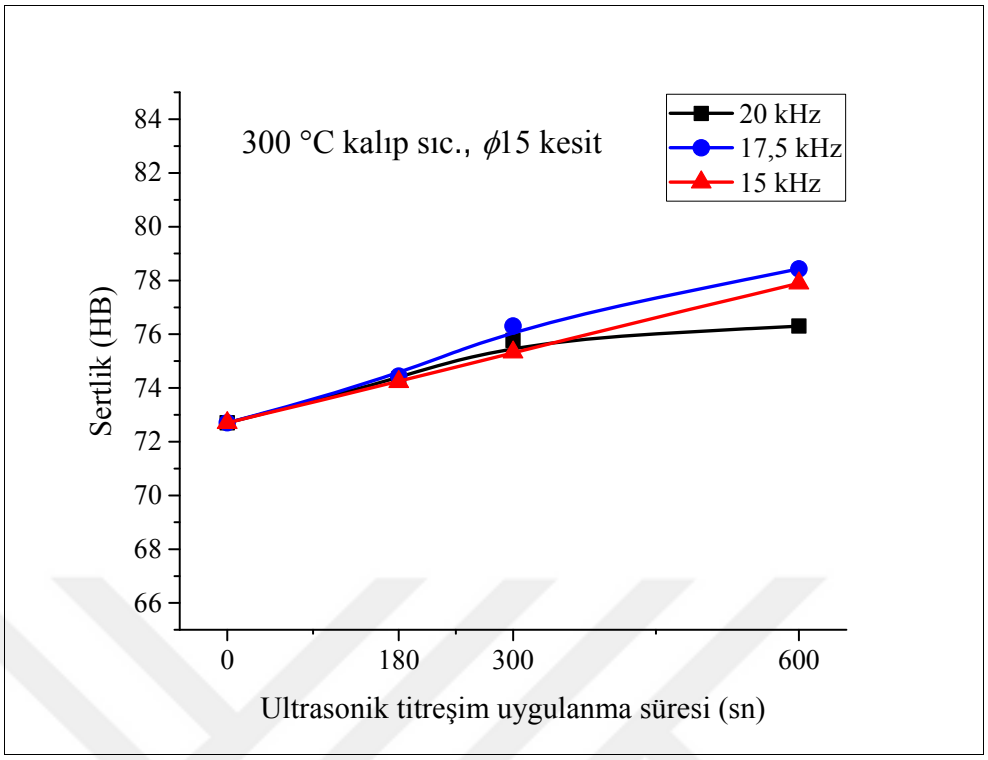
Şekil 3.13. 1 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Şekil 3.14'de ultrasonik titreşim uygulamasının 2 numaralı numunelerin sertlikleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulanmamış numunenin sertliği 84,9 HB iken, 600 saniye boyunca uygulanan titreşim sonucu bu değer 15 kHz için 90,03 HB, 17,5 kHz için 89,37 HB ve 20 kHz için 90,03 HB değerlerine yükselmiştir. Grafik incelendiğinde tüm frekanslar için 300 saniye uygulama süresine kadar ultrasonik titreşim uygulamasının sertlik üzerinde lineere yakın bir şekilde artış meydana getirdiği, ancak 300 saniyeden sonra uygulanan titreşimin 2 numaralı numunelerinde sertliklerini belirgin derecede değiştirmediği söylenebilir.



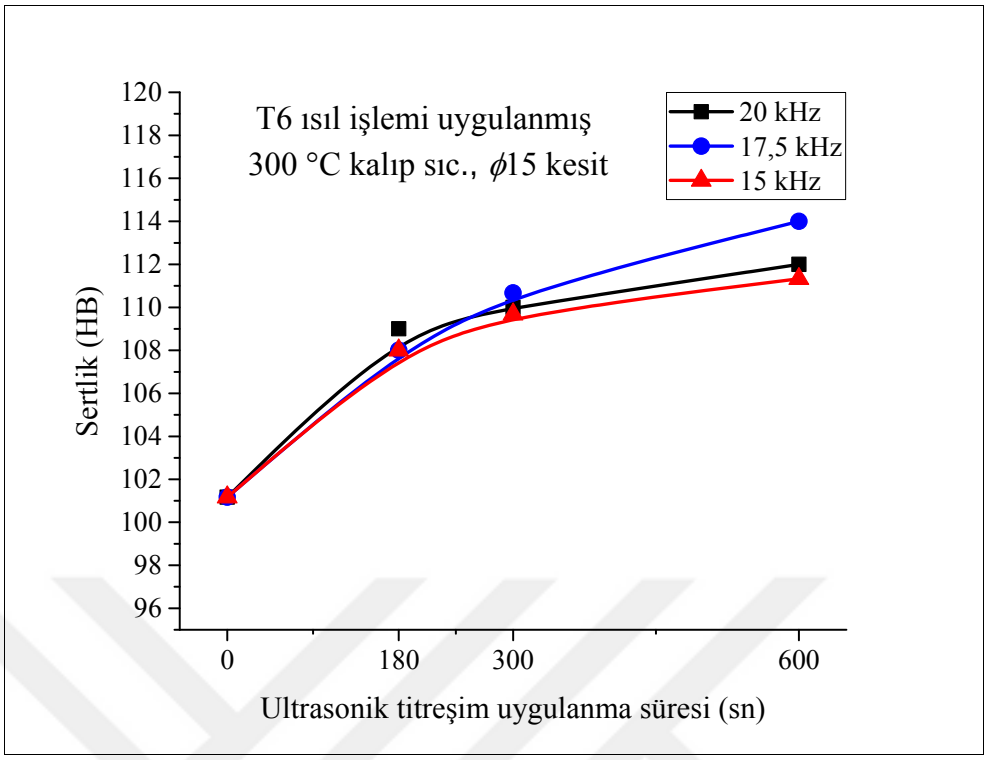
Şekil 3.14. 2 numaralı (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit) numunelerin sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Şekil 3.15'de ultrasonik titreşim uygulamasının 3 numaralı numunelerin sertlikleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulanmamış numunenin sertliği 72,7 HB iken 600 saniye boyunca uygulanan titreşim sonucu bu değer 15 kHz için 77,9 HB, 17,5 kHz için 78,43 HB ve 20 kHz için 76,3 HB değerine yükselmiştir. Burada da 1 numaralı numunelerde görüldüğü gibi tüm frekans değerleri için 300 saniyeye kadar uygulanan ultrasonik titreşimin sertlik değerini lineere yakın şekilde arttırdığı gözlemlenmektedir. 20 kHz frekansında uygulanan ultrasonik titreşim 1 ve 2 numaralı numunelere benzer şekilde 300 saniyeden sonra sertlikte ciddi bir değişikliğe sebep olmazken, 15 ve 17,5 kHz frekanslarında uygulanan ultrasonik titreşim ise 1 ve 2 numaralı numunelerde sonuçlardan farklı olarak 300 saniyeden sonra da sertlikte artış meydana getirmiştir. Bu sonuçlara ek olarak kalıp sıcaklığının 300 °C olması dolayısıyla soğuma yavaş gerçekleştiğinden sertlik değerlerinin genel olarak 1 ve 2 numaralı numunelere göre düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.15. 3 numaralı (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) numunelerin sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Şekil 3.16'da ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin sertlik değerleri görülmektedir. Sadece T6 ısıl işlemi uygulanmış numunenin sertliği 101,17 HB iken 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulaması sonucunda bu değer 15 kHz için 111,33 HB, 17,5 kHz için 114 HB ve 20 kHz için 112 HB'ye yükselmiştir. Her üç frekans için de 180 saniye uygulama süresinden sonra sertlikteki artışın eğimi azalmakla beraber 15 ve 20 kHz frekansları için bu azalmanın daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Buradaki bir başka tespit de T6 ısıl işlemi uygulamasının, ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın malzemenin sertliğini arttırmakla beraber, ultrasonik titreşim uygulaması ile birlikte uygulandığında sertlik değerini daha da arttırmakta olduğudur. Öyle ki, elde edilen tüm numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işleminin kombinasyonu sonucunda elde edilen değerler olduğu görülmektedir.

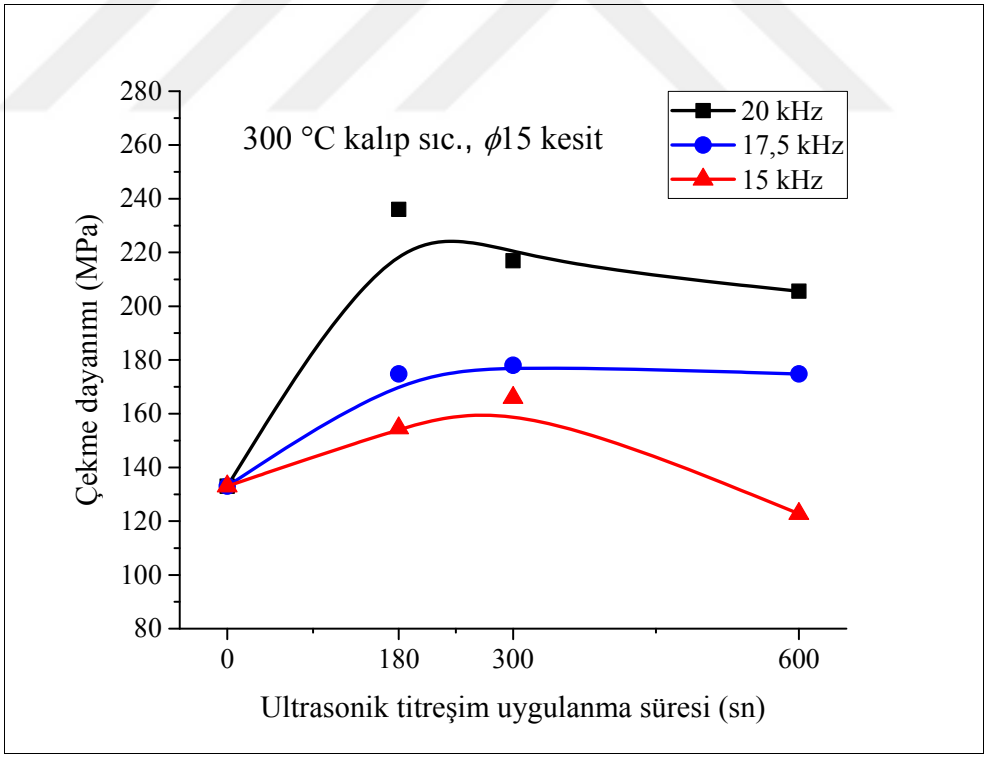


Şekil 3.16. T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) sertliklerinin uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Sonuç olarak tüm numunelerin sertliklerinin ultrasonik titreşim uygulaması ile farklı oranlarda arttığı tespit edilmiştir. Sertlikteki bu artışın nedeninin ultrasonik titreşim uygulamasının mikroyapıda meydana getirdiği modifikasyon olduğu düşünülmektedir. Ünal ve arkadaşları da [19] yapmış oldukları çalışmada ultrasonik titreşim uygulamasının malzemenin sertliğini arttırdığı belirtmişlerdir. Ayrıca Ruirun ve arkadaşları [31] ile Zhai ve arkadaşları [28] yapmış oldukları çalışmalarda ultrasonik titreşim uygulamasının malzemenin mikrosertlik değerlerini arttırdığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışma belirtilen çalışmalar ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların birbirleriyle paralel olduğu anlaşılmaktadır.

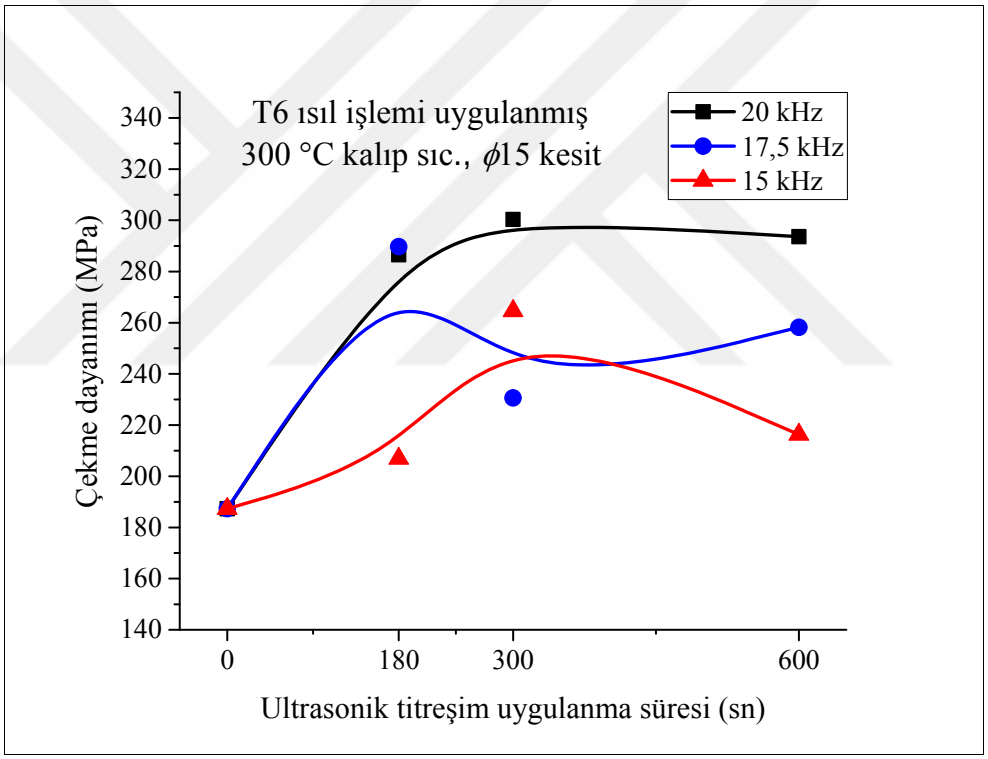
3.3. Ultrasonik Titreşim Uygulamasının Malzemenin Çekme Dayanımı Üzerine Etkisi

Şekil 3.17'de ultrasonik titreşim uygulamasının 3 numaralı numunelerin çekme dayanımları üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirilmemiş numunenin çekme dayanımı 133 MPa iken, 600 saniye boyunca titreşim uygulaması sonucunda bu değer 15 kHz için 122,8 MPa'ya düşmüş ve 17,5 kHz için 174,8 MPa, 20 kHz için ise 205,6 MPa'ya yükselmiştir. Şekil 3.17'de verilen grafik incelendiğinde 15 ve 17,5 kHz frekansları için 300 saniyeye kadar uygulanan titreşimin çekme dayanımını lineere yakın şekilde arttırdığı, 300 saniyeden sonraki uygulamanın ise 15 kHz için çekme dayanımını düşürdüğü, 17,5 kHz için ise çekme dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı görülmektedir. 20 kHz frekansı için ise 180 saniye uygulama süresinde çekme dayanımı hızlı bir artış gösterirken, bu süreden sonra uygulanan ultrasonik titreşim çekme dayanımında artışa değil azalmaya sebep olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.17. 3 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) çekme dayanımının uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Şekil 3.18'de ultrasonik titreşim uygulamasının T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin çekme dayanımları üzerindeki etkisi görülmektedir. Ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirilmeksizin T6 ısıl işlemi uygulanmış numunenin çekme dayanımı 187,29 MPa iken, 600 saniye titreşim uygulaması sonucunda bu değer 15 kHz için 216,3 MPa, 17,5 kHz için 258,2 MPa ve 20 kHz için 293,59 MPa'ya yükselmiştir. 20 kHz frekansı için 180 saniye uygulama süresinden sonra artış kayda değer bir şekilde gerçekleşmezken, 17,5 kHz frekansı için 180 saniye uygulama süresinden sonra çekme dayanımı dalgalı bir şekilde artış göstermektedir. 15 kHz frekansı için ise 300 saniye uygulama süresinden sonra çekme dayanımında artış değil azalma gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.18. T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numunelerin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) çekme dayanımının uygulanan ultrasonik titreşimin süre ve frekansına göre değişimi

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 incelendiğinde sonuç olarak ultrasonik titreşim uygulamasının çekme dayanımı genel anlamda arttırdığı ancak bazı durumlarda çekme dayanımında artış sağlanamadığı tespit edilmiştir. Bu durumun çekme numunelerinin içerisinde bulunan birtakım kusurlardan ileri geldiği düşünülmektir. Bunun dışında ısıl işlem uygulamasının ultrasonik titreşim uygulaması olmaksızın da

çekme dayanımını arttırdığı, iki uygulamanın kombine edilmesi durumunda ise çekme dayanımın maksimum değerini aldığı tespit edilmiştir.

Youn ve arkadaşları [8], Yao ve arkadaşları [13], Puga ve arkadaşları [14], Jung ve arkadaşları [33] ile Haghayeghi ve arkadaşları da [25] yapmış oldukları çalışmalarda ultrasonik titreşim uygulamasının malzemenin çekme dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir. Yapılan çalışma bu çalışmalar ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalar ile paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Ultrasonik titreşim uygulaması A360 alüminyum alaşımının mikroyapısını dolayısıyla mekanik özelliklerini geliştirmektedir. Mikroyapıdaki bu gelişimin sebebinin, ultrasonik titreşim uygulaması gerçekleştirilmeksizin üretilen örneklerdeki kaba ve büyük haldeki birincil alüminyum dendritlerinin ultrasonik titreşim uygulamasının etkisi ile parçalanarak daha küçük dendritlere-tanelere dönüşmesi olduğu düşünülmektedir. Birincil alüminyum fazındaki bu değişimin yanı sıra çekilen SEM görüntüleri incelendiğinde ötektik silisyumun da küçülerek yapıya daha homojen bir şekilde dağıldığı tespit edilmiştir.
- Elde edilen grafikler ve mikroyapılar incelendiğinde ultrasonik titreşim uygulama süresi arttıkça mikroyapı ve mekanik özelliklerdeki modifikasyonun da arttığı tespit edilmiştir. Bununla beraber bazı durumlarda 300 saniye uygulama süresinden sonra ultrasonik titreşim uygulamasının incelenen özellikte kayda değer bir gelişme göstermediği tespit edilmiştir. Sonuçlar uygulanan titreşimin frekansı açısından incelendiğinde ise, frekansın mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde doğrudan bir etkisi olduğu söylenememekle beraber elde edilen sonuçlarda farklı frekanslar için küçük farklılıklar olabildiği tespit edilmiştir.
- Farklı kesit ve soğuma hızlarındaki mikroyapı ve mekanik testlerin sonuçları incelendiğinde ultrasonik titreşim uygulamasının tüm numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Bu durumda malzemenin üzerindeki ultrasonik titreşim etkisinin soğuma hızına ve kesite bağlı olmaksızın mikroyapıda modifikasyon meydana getirdiği söylenebilir.
- Yapılan mekanik testlerin sonuçları incelendiğinde T6 ısıl işleminin malzemenin mekanik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca ultrasonik titreşim ile uygulaması ile T6 ısıl işleminin kombinasyonunun mekanik özellikleri daha da geliştirdiği tespit edilmiştir. Öyle ki, en yüksek sertlik ve çekme dayanımı değerleri her iki işlemin de uygulandığı 4 numaralı numunenin testlerinde elde edilmiştir.

Söz konusu çalışma ile ilgili literatür ve bu çalışmada elde edilen veriler değerlendirildiğinde gelecekte yapılacak çalışmalara ile ilgili öneriler şöyle sıralanabilir:

- Yapılan çalışmada ultrasonik titreşim uygulaması 180, 300 ve 600 saniye süresince gerçekleştirilmiştir. Daha açıklayıcı sonuçlar elde etmek açısından söz konusu sürelerin ara değerlerinde titreşim uygulaması gerçekleştirilebilir.
- Yapılan çalışma çerçevesinde ultrasonik titreşim uygulaması likidüs sıcaklığının üzerinde yani alaşımın tamamen sıvı fazda bulunduğu bir sıcaklık değeri olan 700 °C'de, sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Literatürde yarı katı halde ultrasonik titreşim uygulaması ile alakalı çalışmalar bulunmakta olup, aynı alaşım yarı katı halde ultrasonik titreşim uygulamasına tabi tutularak sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Ultrasonik titreşim uygulaması bu çalışmada olduğu gibi radyatörün sıvı eriyiğe daldırılarak titreşimin direk alaşıma iletilmesi şeklinde gerçekleştirilebileceği gibi katılaşmanın gerçekleşeceği kalıba titreşimin uygulanması şeklinde endirekt olarak da gerçekleştirilebilir. Aynı alaşım için endirekt ultrasonik titreşim uygulaması da gerçekleştirilerek sonuçlar karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Rooy E. L., Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys, Editors: Zorc T. B., Henry S. D., *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM International, Ohio, 17-38, 1990.

[2] King J. F., *The Aluminium Industry*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2001.

[3] Postema M., *Fundamentals of Medical Ultrasonics*, Spon Press, Newyork, 2011.

[4] Jian X., Xu H., Meek T. T., Han Q., Effect of Power Ultrasound on Solidification of Aluminum A356 Alloy, *Materials Letters*, 2005, **59**(2-3), 190-193.

[5] Jian X., Meek T. T., Han Q., Refinement of Eutectic Silicon Phase of Aluminum A356 Alloy Using High-Intensity Ultrasonic Vibration, *Scripta Materialia*, 2006, **54**(5), 893-896.

[6] Xu H., Meek T. T., Han Q., Effects of Ultrasonic Field and Vacuum on Degassing of Molten Aluminum Alloy, *Materials Letters*, 2006, **61**(4-5), 1246-1250.

[7] Jun-wen L., Momono T., Ying F., Zheng J., Tayu Y., Effect of Ultrasonic Stirring on Temperature Distribution and Grain Refinement in Al-1.65%Si Alloy Melt, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, **17**(4), 691-697.

[8] Youn J. I., Kang B. I., Ko D. G., Kim Y. J., Effects of Sonoprocessing on Microstructure and Mechanical Properties of A390 Aluminium Alloy, *International Journal of Cast Metals Research*, 2008, **21**(1-4), 135-138.

[9] Feng H. K., Yu S. R., Li Y. L., Gong L. Y., Effect of Ultrasonic Treatment on Microstructures of Hypereutectic Al-Si Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **208**(1-3), 330-335.

[10] Atamanenko T. V., Eskin D. G., Katgerman L., Temperature Effects in Aluminium Melts to Cavitation Induced by High Power Ultrasound, *International Journal of Cast Metals Research*, 2009, **22**(1-4), 26-29.

[11] Chen Y., Hsu W., Shih J., The Effect of Ultrasonic Treatment on Microstructural and Mechanical Properties of Cast Magnesium Alloys, *Materials Transactions*, 2009, **50**(2), 401-408.

[12] Eskin D. G., Atamanenko T.V., Zhang L., Katgerman L., On the Mechanism of Grain Refinement by Ultrasonic Melt Treatment in the Presence of Transition Metals, Grandfield J. F., Eskin D. G., *Essential Readings in Light Metals*, Springer-Cham, 415-419, 2016.

[13] Yao L., Hao H., Ji S., Fang C., Zhang X., Effects of Ultrasonic Vibration on Solidification Structure and Properties of Mg-8Li-3Al Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, **21**(6), 1241-1246.

[14] Puga H., Costa S., Barbosa J., Ribeiro S., Prokic M., Influence of Ultrasonic Melt Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi9Cu3 Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, **211**(11), 1729-1735.

[15] Lü S., Wu S., Lin C., Hu Z., An P., Preparation and Rheocasting of Semisolid Slurry of 5083 Al Alloy with Indirect Ultrasonic Vibration Process, *Materials Science and Engineering A*, 2011, **528**(29-30), 8635-8640.

[16] Das A., Kotadia H. R., Effect of High-intensity Ultrasonic Irradiation on the Modification of Solidification Microstructure in a Si-rich Hypoeutectic Al-Si Alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 2011, **125**(3), 853-859.

[17] Zhang L., Eskin D. G., Miroux A., Katgerman L., Formation of Microstructure in Al-Si Alloys Under Ultrasonic Melt Treatment, Suarez C.E., *Light Metals 2012*, Springer International Publishers, Switzerland, 999-1004, 2016.

[18] Patel B., Chaudhari G. P., Bhingole P. P., Microstructural Evolution in Ultrasonicated AS41 Magnesium Alloy, *Materials Letters*, 2012, **66**(1), 335-338.

[19] Ünal N., Çamurlu H. E., Koçak S., Düztepe G., Effect of External Ultrasonic Treatment on Hypereutectic Cast Aluminium-Silicon Alloy, *Internation Journal of Cast Metals Research*, 2012, **25**(4), 246-250.

[20] Zhang Y., Lu Y., Jie J., Fu Y., Zhong D., Li T., Overflowing Phenomenon During Ultrasonic Treatment in Al-Si Alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, **23**(11), 3242-6248.

[21] Zhang Y., Jie J., Gao Y., Lu Y., Li T., Effects of Ultrasonic Treatment on the Formation of Iron-containing Intermetallic Compounds in Al-12%Si-2%Fe Alloys, *Intermetallics*, 2013, **42**, 120-125.

[22] Jian X., Han Q., Formation of Hypereutectic Silicon Particles in Hypoeutectic Al-Si Alloys Under the Influence of High-intensity Ultrasonic Vibration, *China* Foundry, 2013, **10**(2), 118-123.

[23] Puga H., Barbosa J., Costa S., Riberio S., Pinto A. M. P., Prokic M., Influence of Indirect Ultrasonic Vibration on the Microstructure and Mechanical Behavior of Al-Si-Cu Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **560**, 589-595.

[24] Huang H., Xu Y., Han Y., Wang J., Sun B., Effect of Ultrasonic Melt Treatment on Structure Refinement of Solidified High Purity Aluminum, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, **24**(7), 2414-2419.

[25] Haghayeghi R., Heydari A., Kapranos P., The Effect of Ultrasonic Vibrations Prior to High Pressure Die-Casting of AA7075, *Materials Letters*, 2015, **153**, 175-178.

[26] Tuan N. Q., Puga H., Barbosa J., Pinto A. M. P., Grain Refinement of Al-Mg-Sc Alloy by Ultrasonic Treatment, *Metals and Materials International*, 2015, **21**(1), 72-78.

[27] Jiang R. P., Li X. Q., Zhang M., Investigation on the Mechanism of Grain Refinement in Aluminum Alloy Solidified Under Ultrasonic Vibration, *Metals and Materials International*, 2015, **21**(1), 104-108.

[28] Zhai W., Liu H., Zuo P., Zhu X., Wei B., Effect of Power Ultrasound on Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of $Al_{81.3}Sn_{12.3}Cu_{6.4}$ Monotectic Alloy, *Progress in Natural Science: Materials International*, 2015, **25**(5), 471-477.

[29] Kotadia H. R., Das A., Modification of Solidification Microstructure in Hypo- and Hyper-eutectic Al-Si Alloys Under High-Intensity Ultrasonic Radiation, *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, **620**, 1-4.

[30] Komarov S., Ishiwata Y., Mikhailov I., Industrial Application of Ultrasonic Vibrations to Improve the Structure of Al-Si Hypereutectic Alloys: Potential and Limitation, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, **46**(7), 2876-2883.

[31] Ruirun C., Deshuang Z., Jingjie G., Tengfei M., Hongsheng D., Yanqing S., Hengzhi F., A Novel Method for Grain Refinement and Microstructure Modification in TiAl Alloy by Ultrasonic Vibration, *Materials Science & Engineering A*, 2016, **653**, 23-26.

[32] Liang G., Shi C., Zhou Y., Mao D., Effect of Ultrasonic Treatment on the Solidification Microstructure of Die-Cast 35CrMo Steel, *Metals*, 2016, **6**(11), 260.

[33] Jung J., Lee S., Lee J., Cho Y., Kim S., Yoon W., Improved Mechanical Properties of Near-eutectic Al-Si Piston Alloy Through Ultrasonic Melt Treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **669**(4), 187-195.

[34] Wang J. Y., Wang B. J., Huang L. F., Structural Evolution of Al-8%Si Hypoeutectic Alloy by Ultrasonic Processing, *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, DOI: 10.1016/j.jmst.2017.07.018.

[35] Haghayeghi R., Paula L. C., Zoqui E. J., Comparison of Si Refinement Efficiency of Electromagnetic Stirring and Ultrasonic Treatment for a Hypereutectic Al-Si Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, **26**(4), 1900-1907.

[36] Eskin D. G., Ultrasonic Melt Processing: Achievements and Challenges, *Materials Science Forum*, 2015, 828-829, 112-118.

[37] Eskin G. I., Eskin D. G., *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, 2015.

[38] https://www.statista.com/statistics/280983/share-of-aluminum-consumption-by-sector/ (Ziyaret tarihi: 12 Ekim 2017).

[39] Dwight J., *Aluminium Design and Construction*, Taylor & Francis e-Library, Newyork, 2002.

[40] Alan, S., Alüminyum Raporu, *Orta Anadolu İhracatçı Birlikleri Genel Sekreterliği,* 4-9, 2008.

[41] Töre, C., *Mekanik Tasarımda Alüminyum ve Özellikleri*, Ankamat Matbaacılık, Haziran, 2012.

[42] Özcömert M., *Otomotiv Endüstrisinde Alüminyum*, İstanbul Ticaret Odası, 2008.

[43] Kaufman J. G., *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, ASM International, Ohio, 2000.

[44] Mohamed A. M. A., Samuel F. H., A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys, Editor: Czerwinski F., *Heat Treatment – Conventional and Novel Applications*, Intech, 55-72 ,2012.

[45] Gallego J. A., Graff K. F., *Power Ultrasonics: Applications of High-intensity Ultrasound*, Woodhead Publishing, United Kingdom, 2015.

[46] Dieter G. E., *Mechanical Metallurgy*, Mcgraw-Hill Book Company, USA, 1961.

[47] Callister W. D., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 7th ed., John Wiley & Sons. Inc., USA, 2007.

[48] Jia S., Fundamental Research Regarding the Ultrasonic Stirring Effects on the Microstructure of A356 Castings, Master Thesis, The University of Alabama, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Tuscaloosa, Alabama, 2013.

[49] Singh S., Patel D., Ansari P., Jadhav D. K., Verma C., Menghani J., Effect of Grain Refinement, Modifier and Stirring on Properties of A356, *Materialstoday: Proceedings*, 2017, **4**(2), 734-739.

[50] Zhang L., Ultrasonic Processing of Aluminum Alloys, PhD Thesis, Delft University of Technology, Materials Innovation Institute, Delft, 2013.

[51] Vatansever F., Ertürk A. T., Güven E. A., Karabay S., Effect of Ultrasonic Melt Treatment on the Hardness of AA7075 Aluminum Alloy, *III. International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Budapest, Hungary, 3-7 May 2017.

[52] Vatansever F., Güven E. A., Ertürk A. T., Karabay S., Grain Refinement of AA2014 Aluminum Alloy Using Ultrasonic Vibration, *III. International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Budapest, Hungary, 3-7 May 2017.

[53] Sigworth G. K. Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings, *International Journal of Metalcasting*, 2014, **8**(1), 7-20.

[54] Stefanescu D. M., Ruxanda R., Solidification Structures of Aluminum Alloys, Editor: G. F. Vander Voort, *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*, ASM International, Ohio, 107-115, 2004.

[55] Voncia M., Kores S., Mrvar P., Medved J., Effect of Ce on Solidification and Mechanical Properties of A360 Alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**(27), 7349-7355.

[56] Kaufman G. J., Rooy E. L., *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Application*, 1st ed., ASM International, USA, 2004.

[57] Geiser W., *Aluminium Alloy Tables*, 7th ed., Alcan S. A., Zurich, 1982.

[58] http://www.sirvanli.com/tr/Calismalar/ (Ziyaret tarihi: 3 Ağustos 2017).

[59] http://sonicsystems.co.uk/page/power-ultrasonics-a-guide/39/ (Ziyaret tarihi: 3 Ağustos 2017).

[60] http://laboratuar.kocaeli.edu.tr/elektronmikroskobi/ (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2017).

[61] Vandersluis E., Ravindran C., Comparision of Measurement Methods for Secondary Dendrite Arm Spacing, *Metallography, Microstructure and Analysis*, 2017, **6**(1), 89-94.

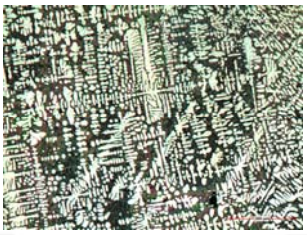
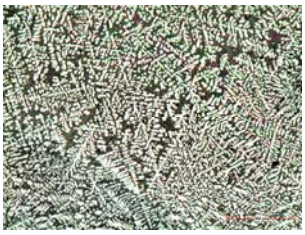
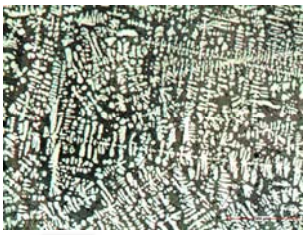
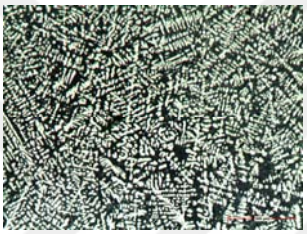
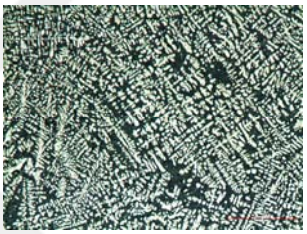
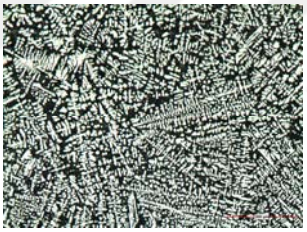
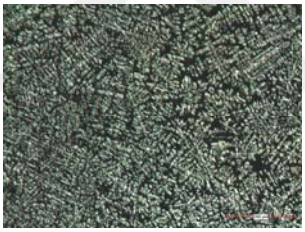
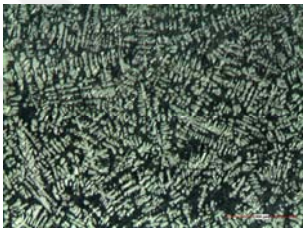
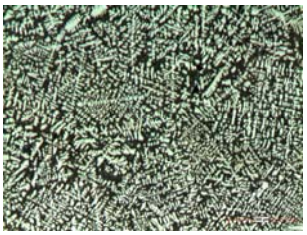
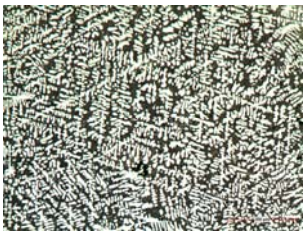
[62] Pürçek G., Metallerde Mukavemet Arttırıcı Mekanizmalar (Ders Notları), Trabzon, 2007.

[63] Turhal M. Ş., Savaşkan T., Relationships Between Secondary Dendrite Arm Spacing and Mechanical Properties of Zn-40Al-Cu Alloys, *Journal of Materials Science*, 2003, **38**(12), 2639-2646.

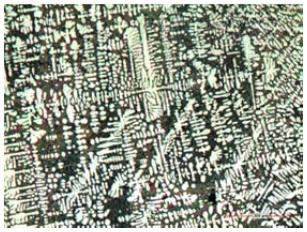
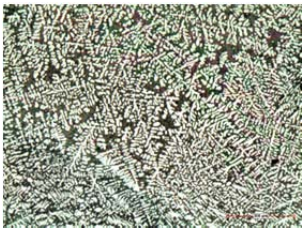
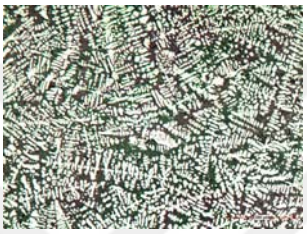
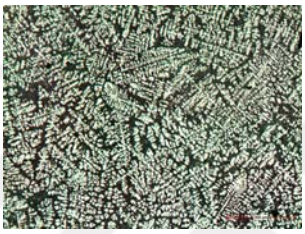
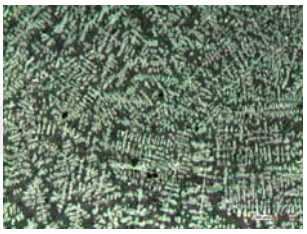
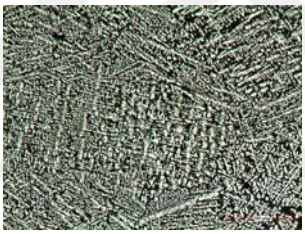
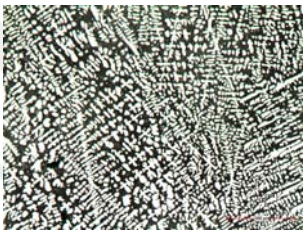
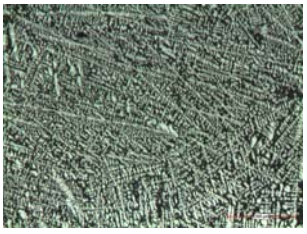
EKLER

EK-A Ultrasonik titreşim uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri

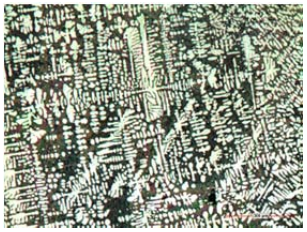
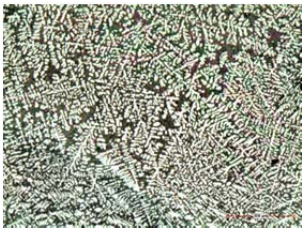
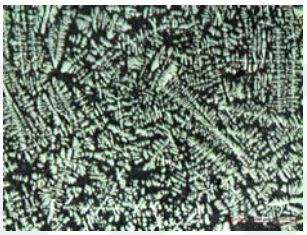
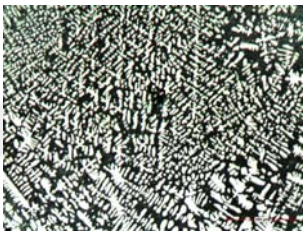
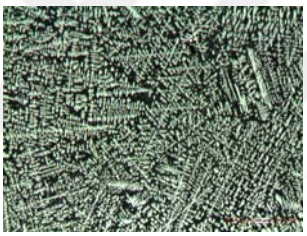
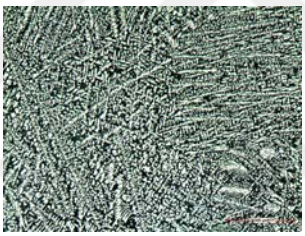
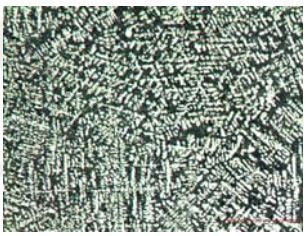
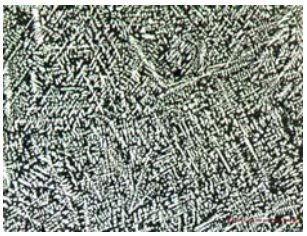
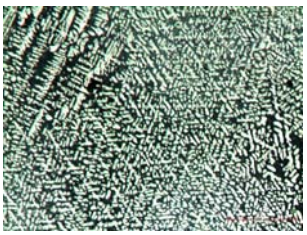
Tablo A.1. 20 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
180			
300			
600			

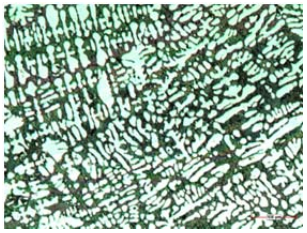
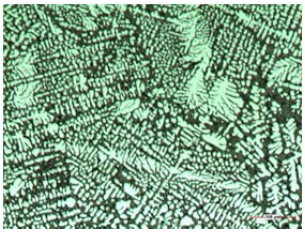
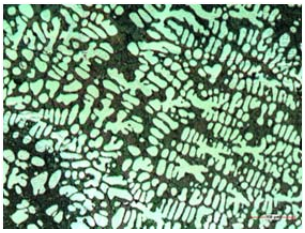
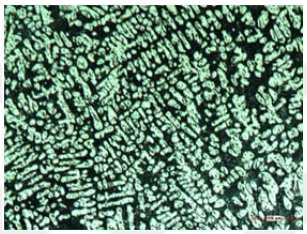
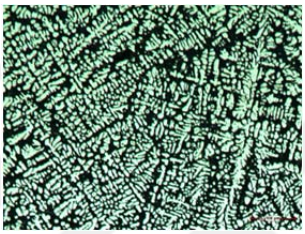
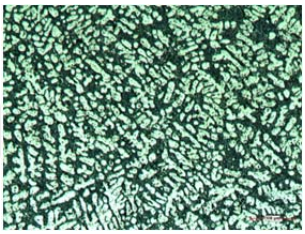
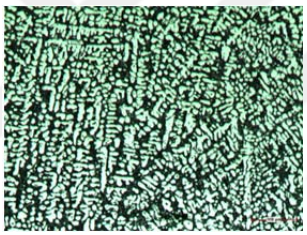
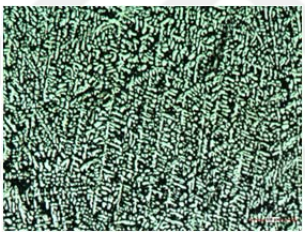
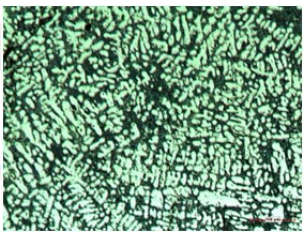
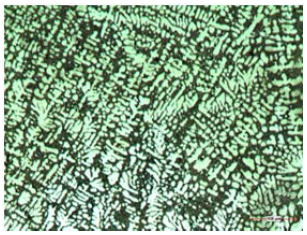
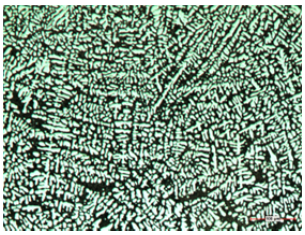
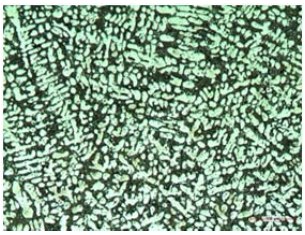
Tablo A.2. 17,5 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
180			
300			
600			

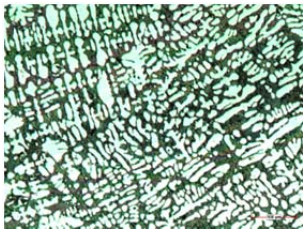
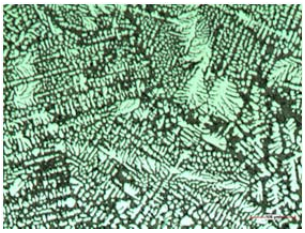
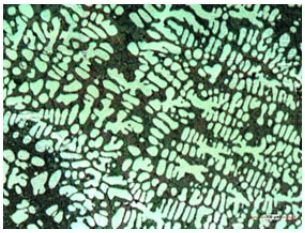
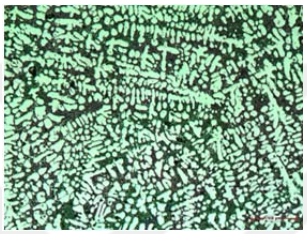
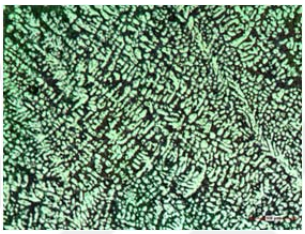
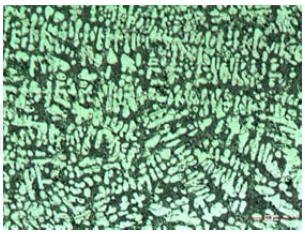
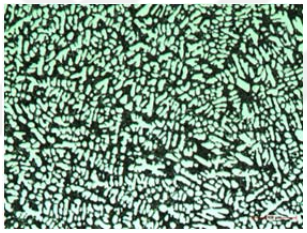
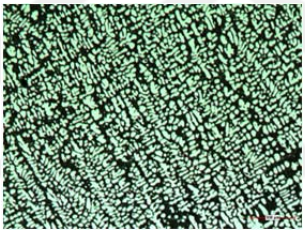
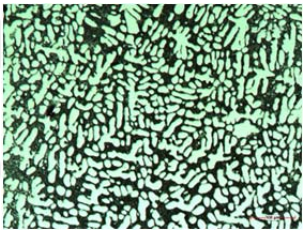
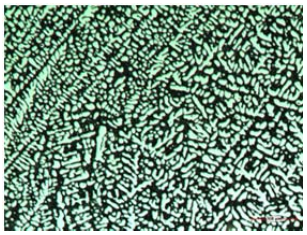
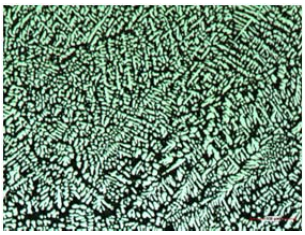
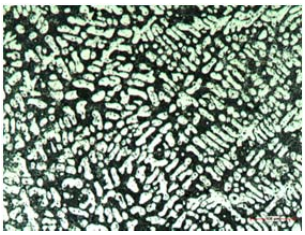
Tablo A.3. 15 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
180			
300			
600			

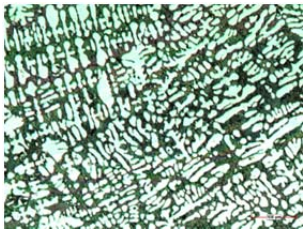
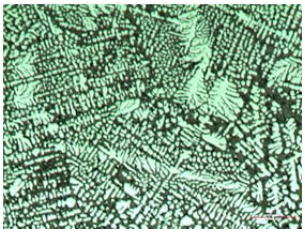
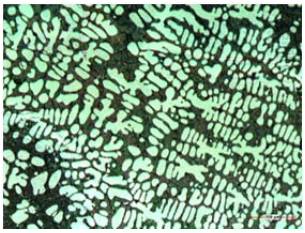
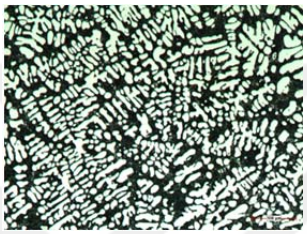
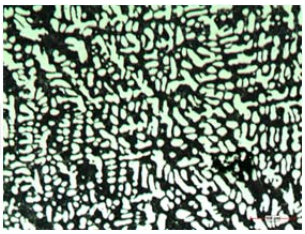
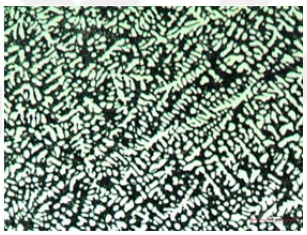
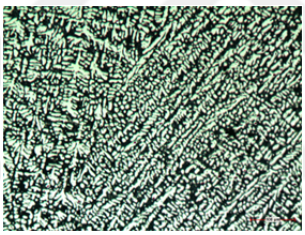
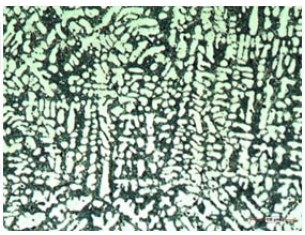
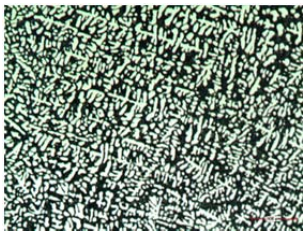
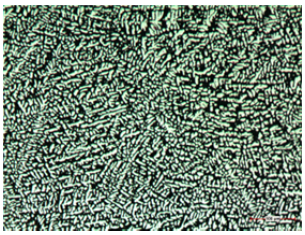
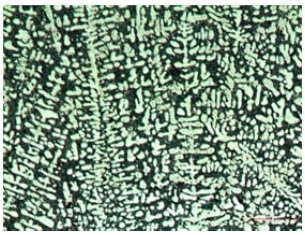
Tablo A.4. 20 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
180			
300			
600			

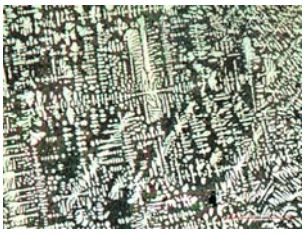
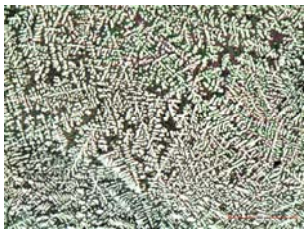
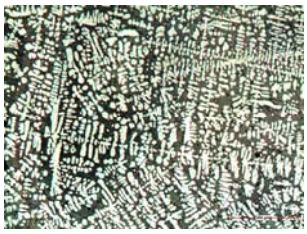
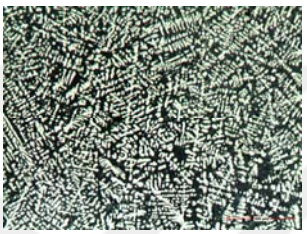
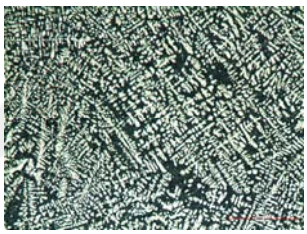
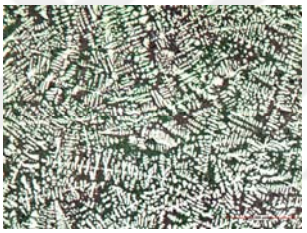
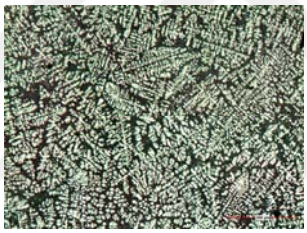
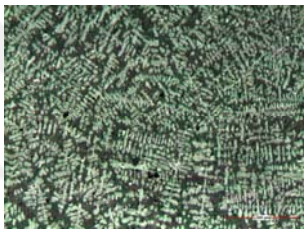
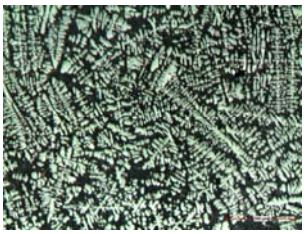
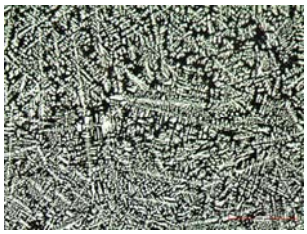
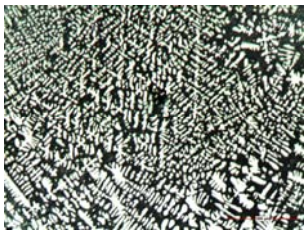
Tablo A.5. 17,5 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
180			
300			
600			

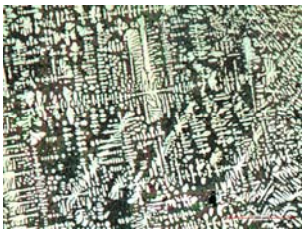
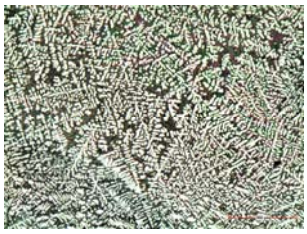
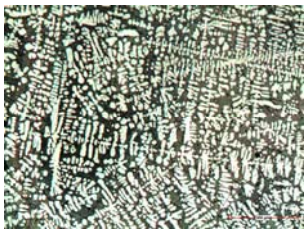
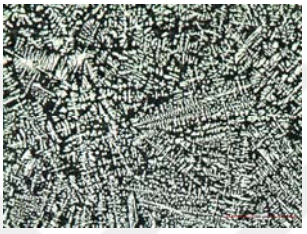
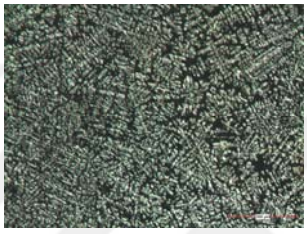
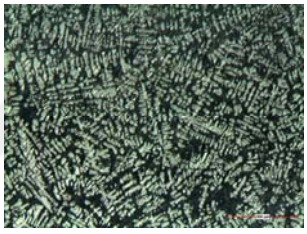
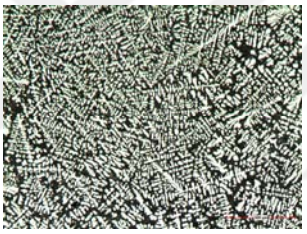
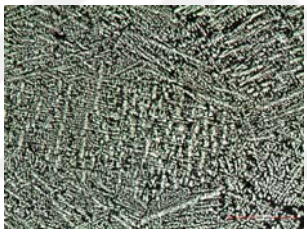
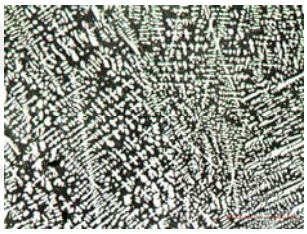
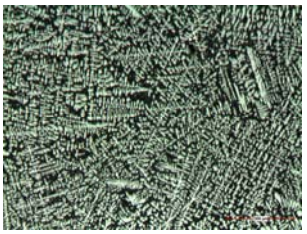
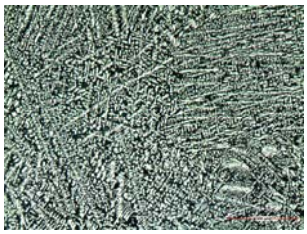
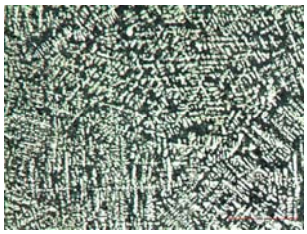
Tablo A.6. 15 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
180			
300			
600			

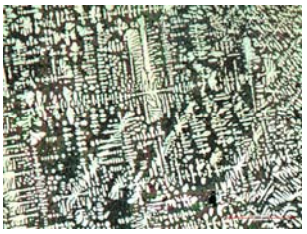
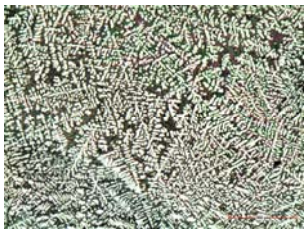
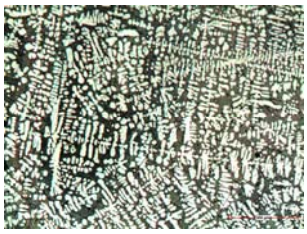
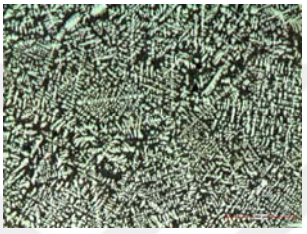
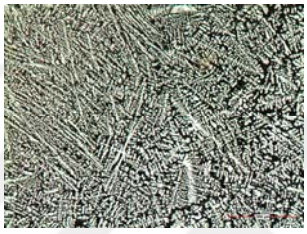
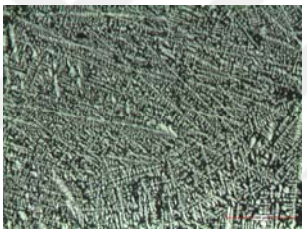
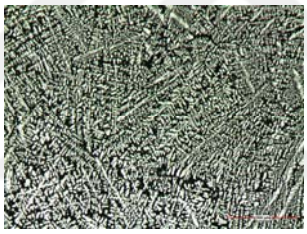
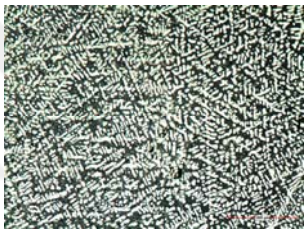
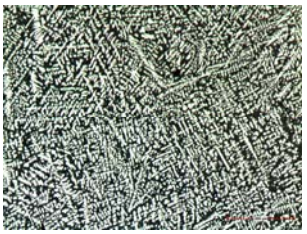
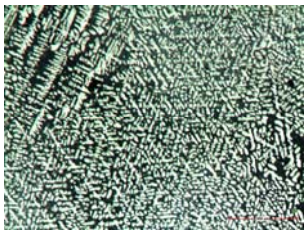
Tablo A.7. 180 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
20			
17,5			
15			

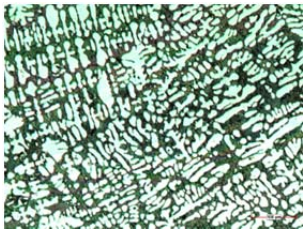
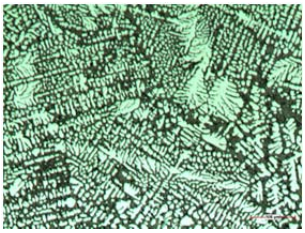
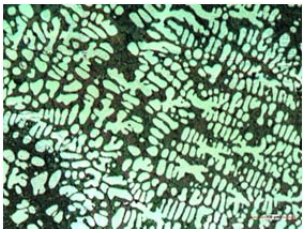
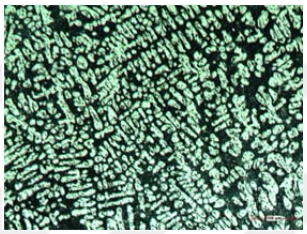
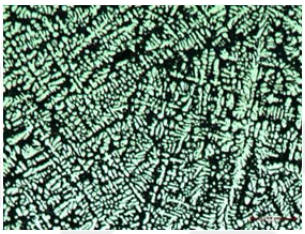
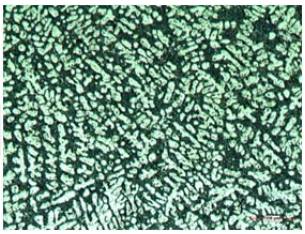
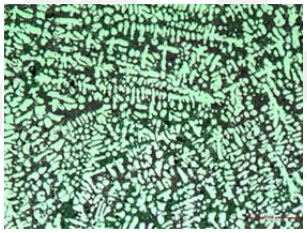
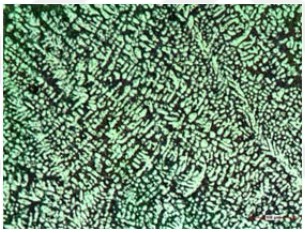
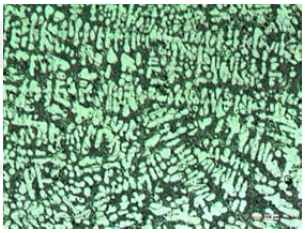
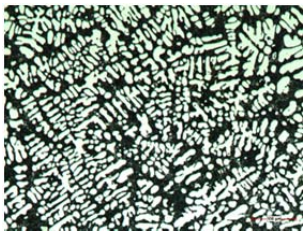
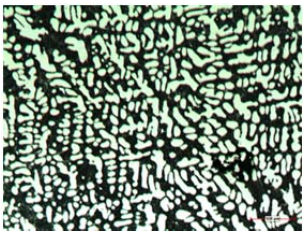
Tablo A.8. 300 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
20			
17,5			
15			

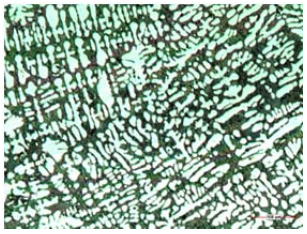
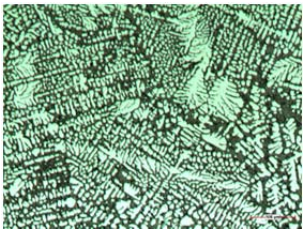
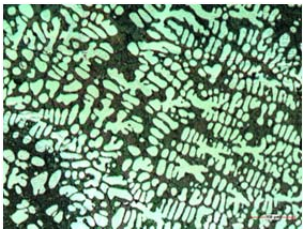
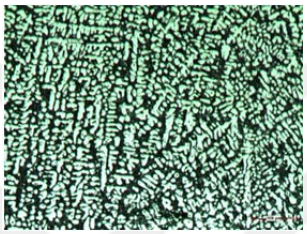
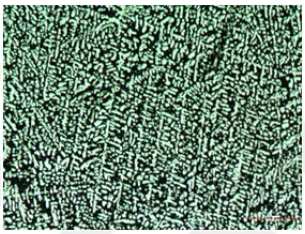
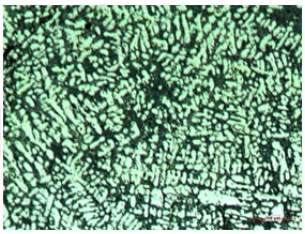
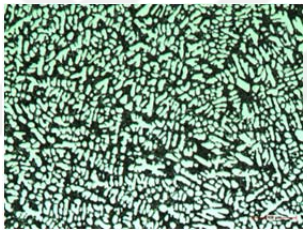
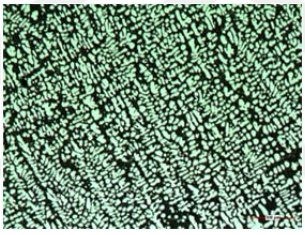
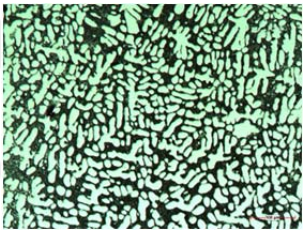
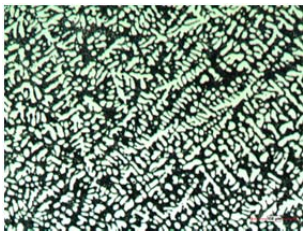
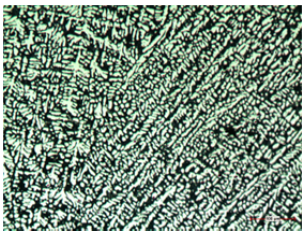
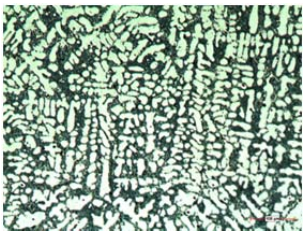
Tablo A.9. 600 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
20			
17,5			
15			

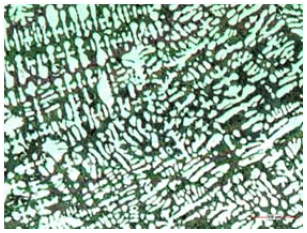
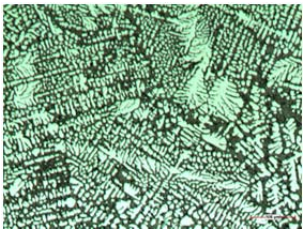
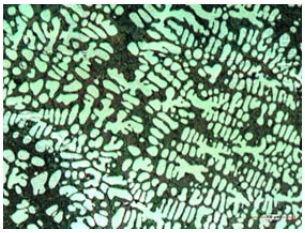
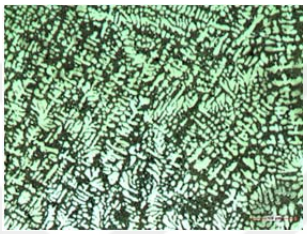
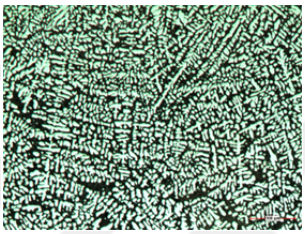
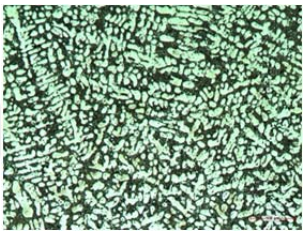
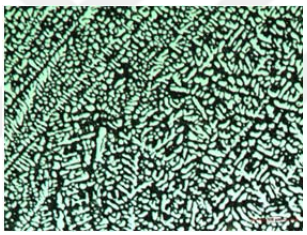
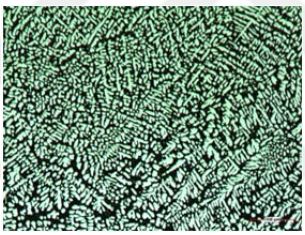
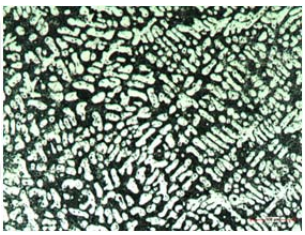
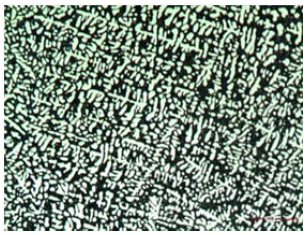
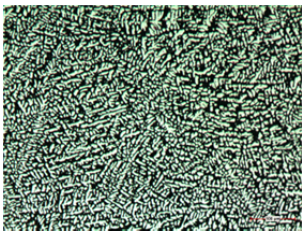
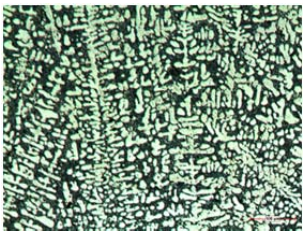
Tablo A.10. 180 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
20			
17,5			
15			

Tablo A.11. 300 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

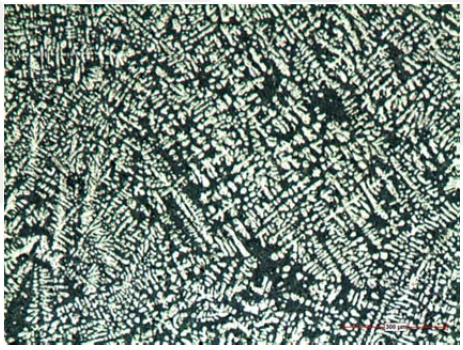
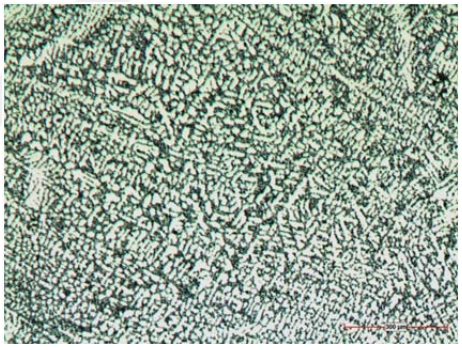
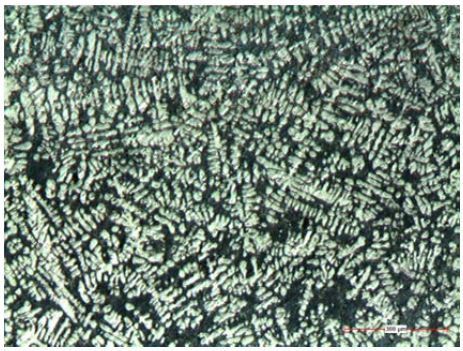
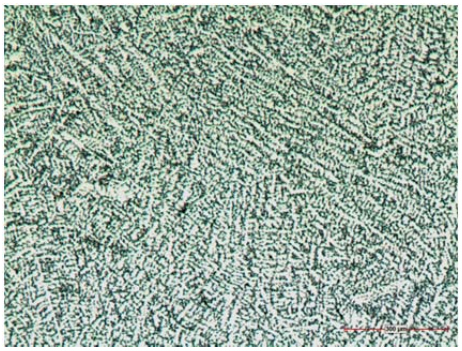
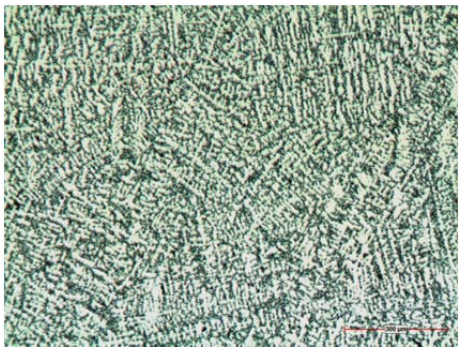
Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
20			
17,5			
15			

Tablo A.12. 600 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

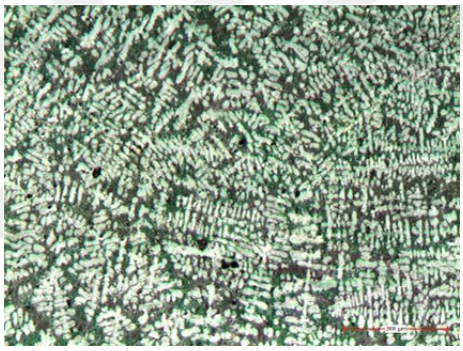
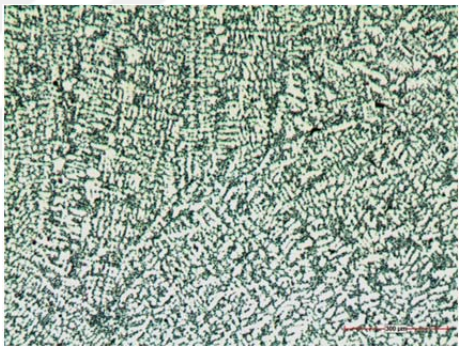
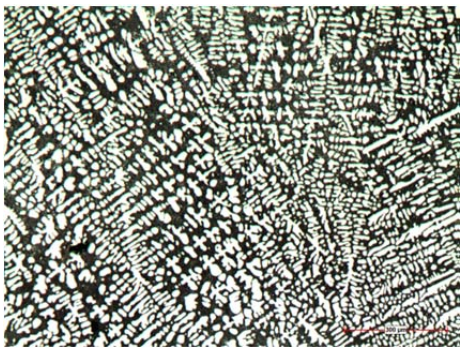
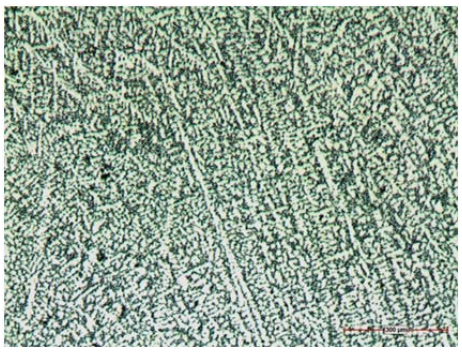
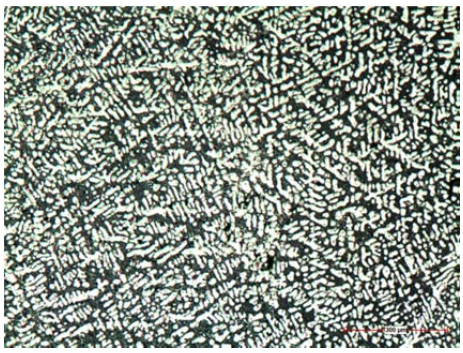
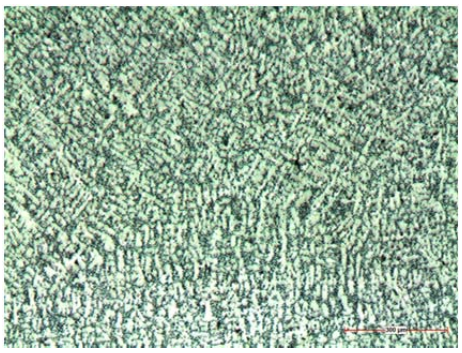
Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	1 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	2 numaralı numune (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit)	3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış			
20			
17,5			
15			

EK-B T6 ısıl işlemi uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri

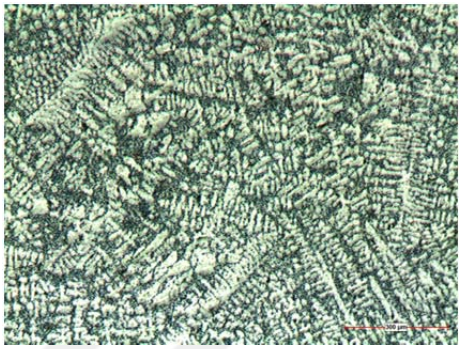
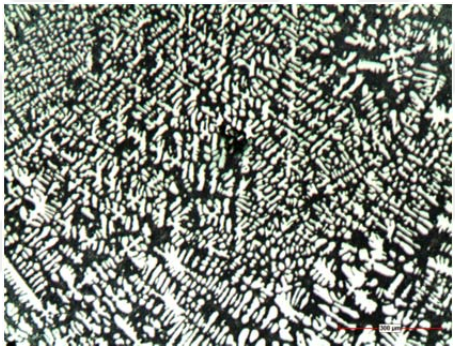
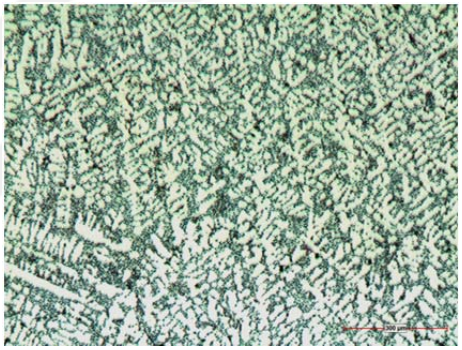
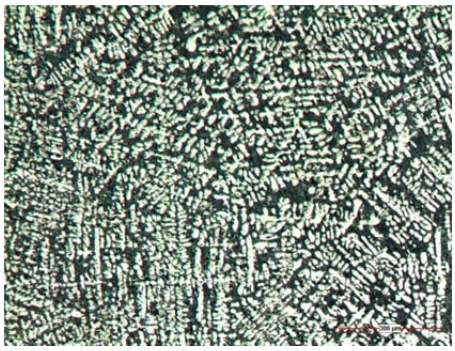
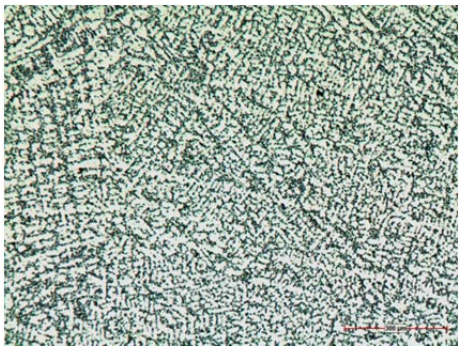
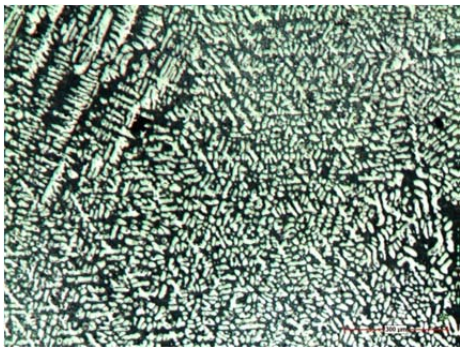
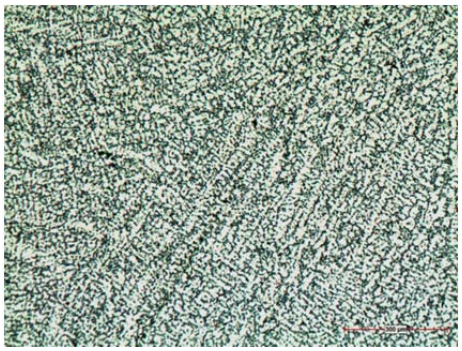
Tablo B.1. 20 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
180		
300		
600		

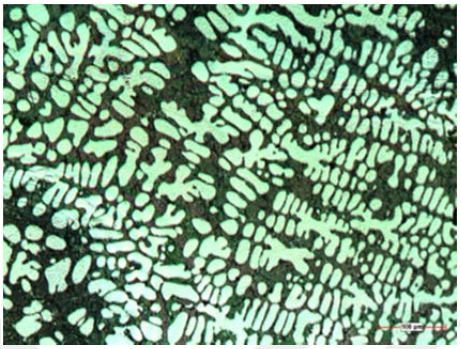
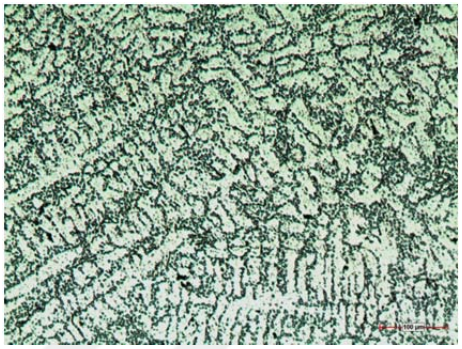
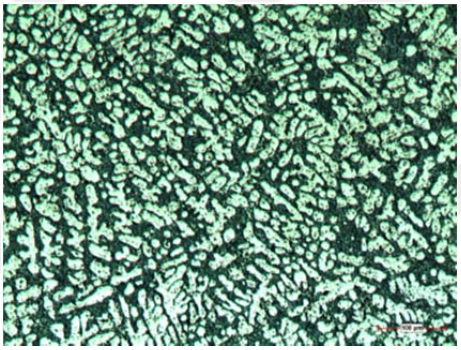
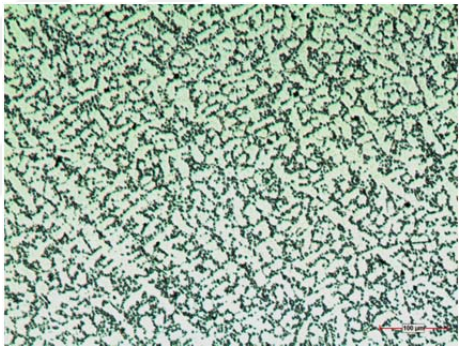
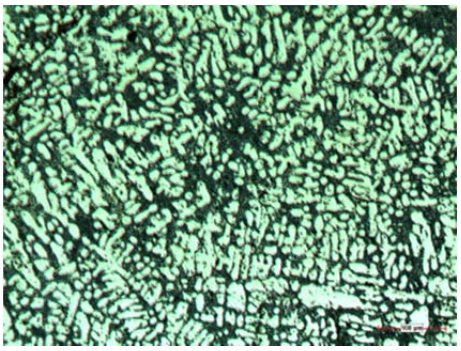
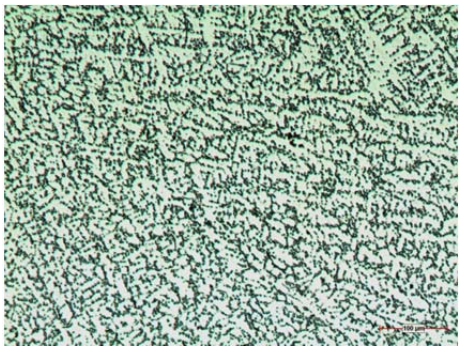
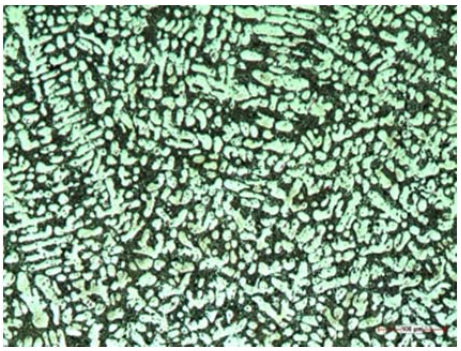
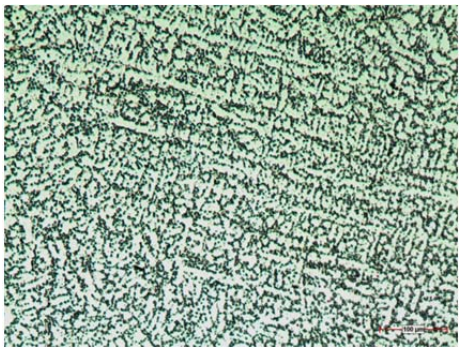
Tablo B.2. 17,5 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
180		
300		
600		

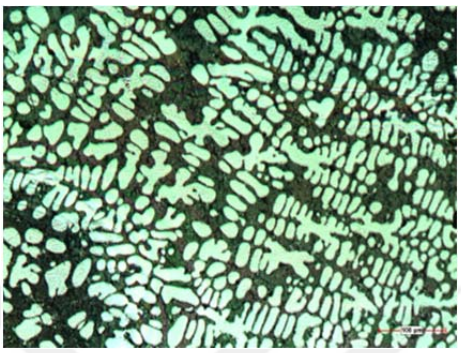
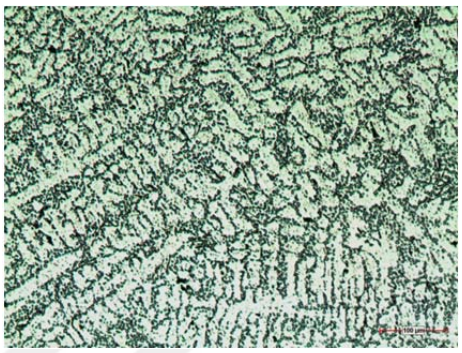
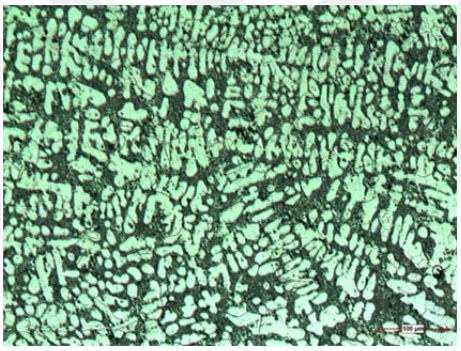
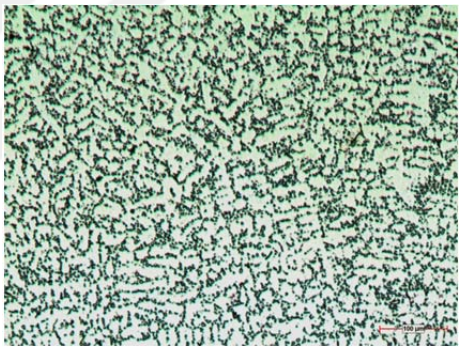
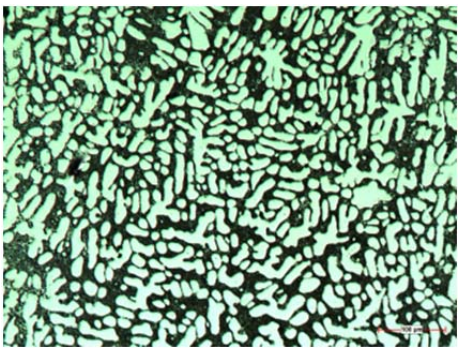
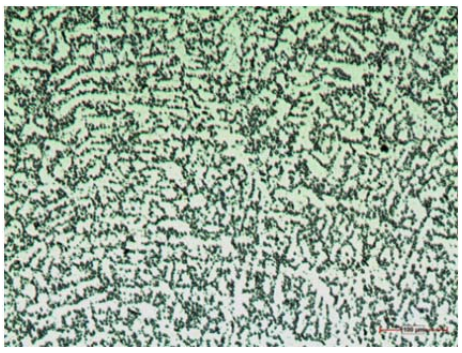
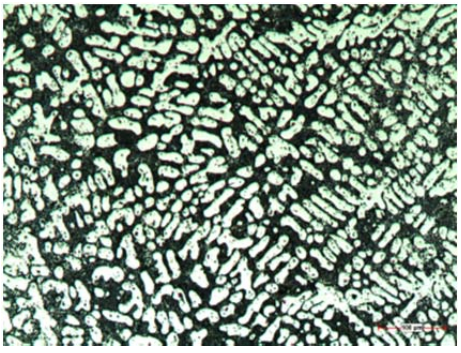
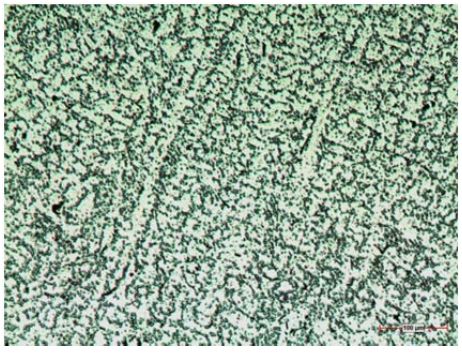
Tablo B.3. 15 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
180		
300		
600		

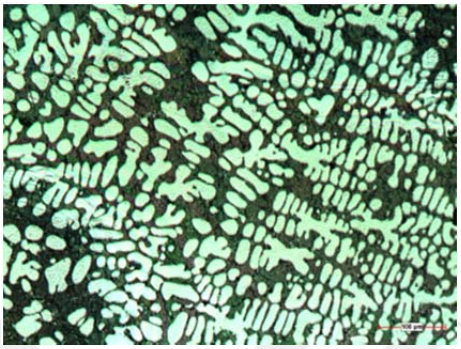
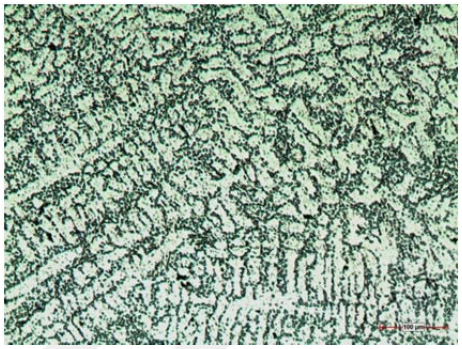
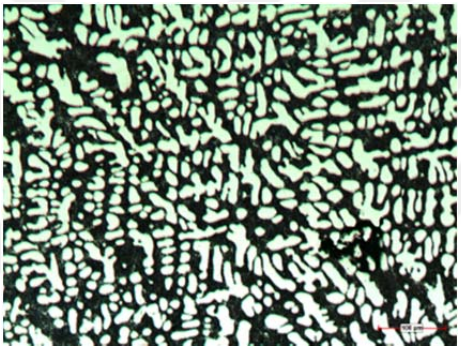
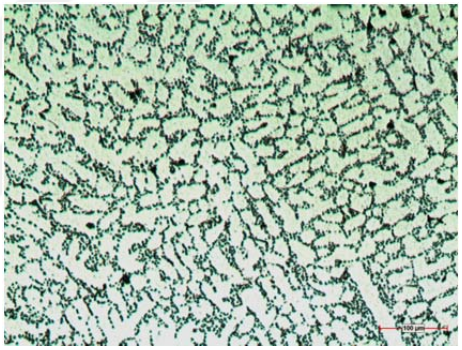
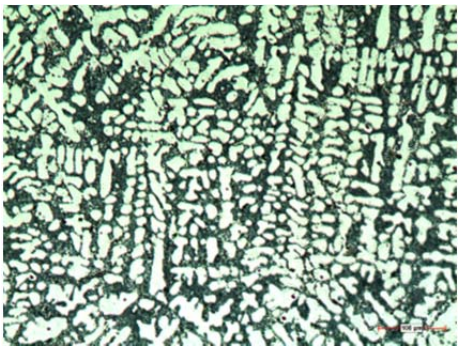
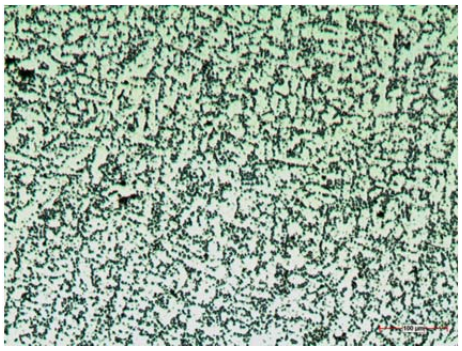
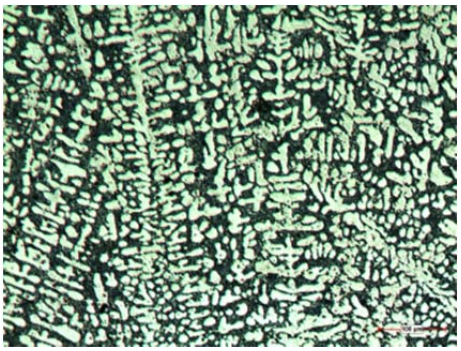
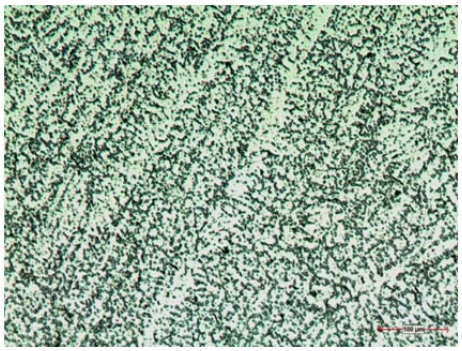
Tablo B.4. 20 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
180		
300		
600		

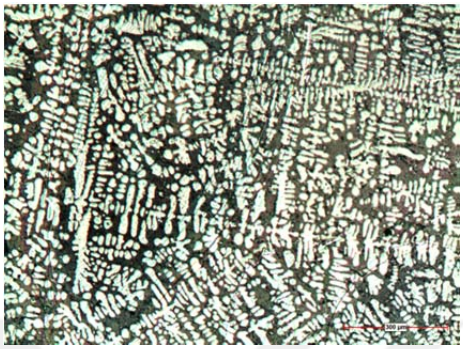
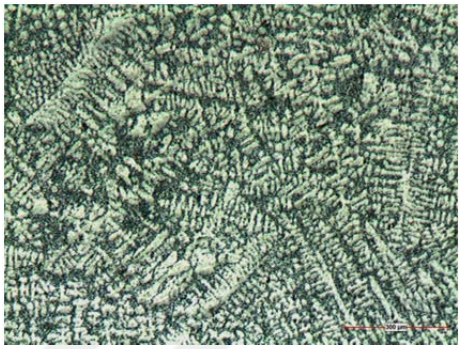
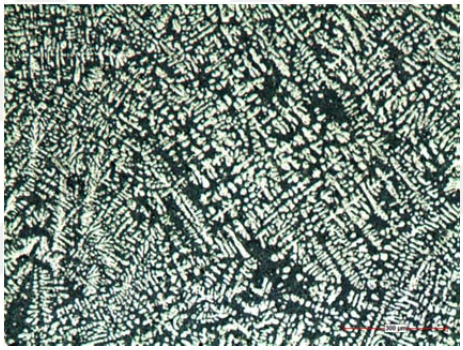
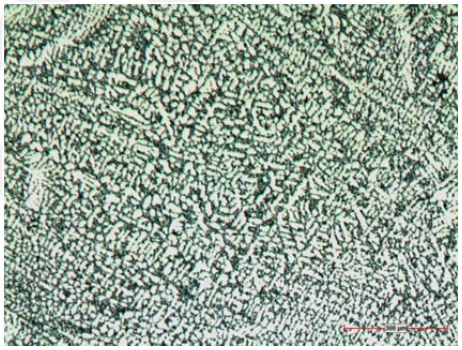
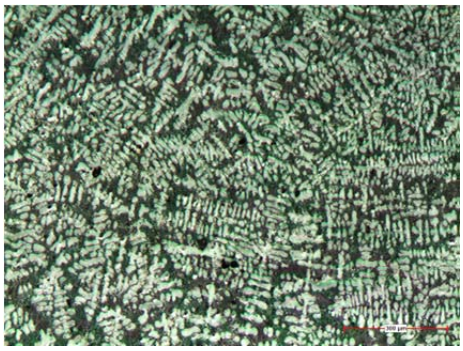
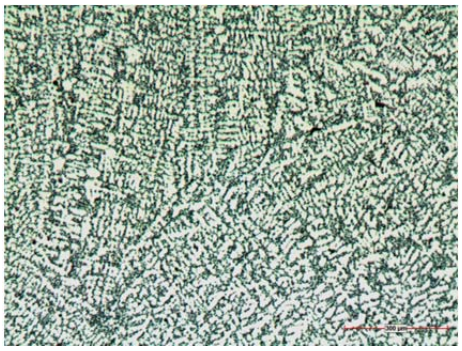
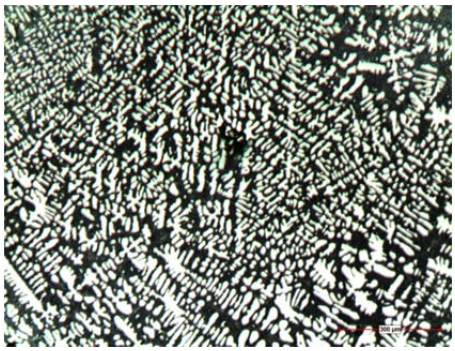
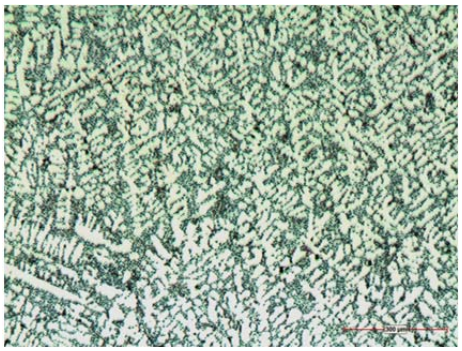
Tablo B.5. 17,5 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
180		
300		
600		

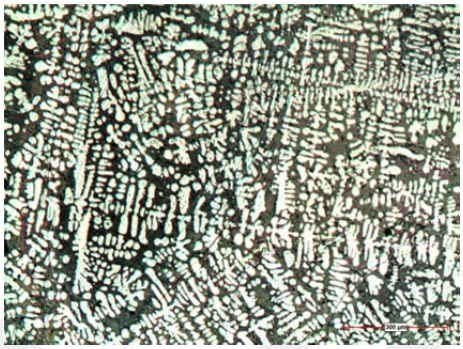
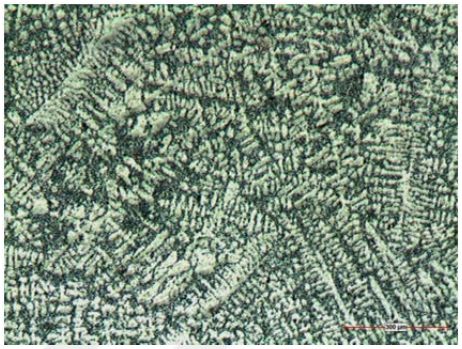
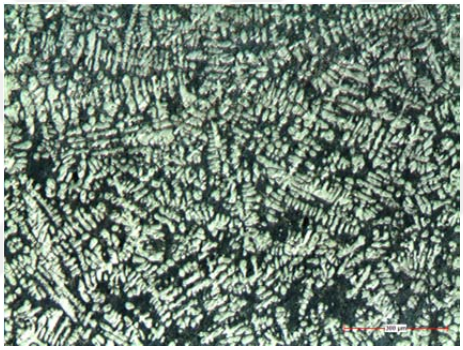
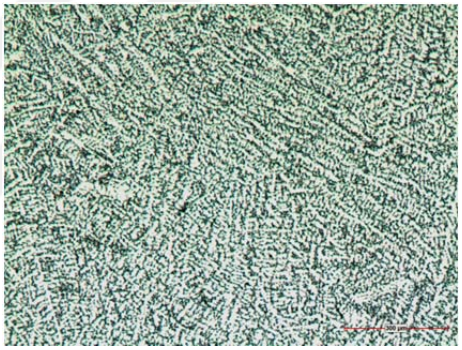
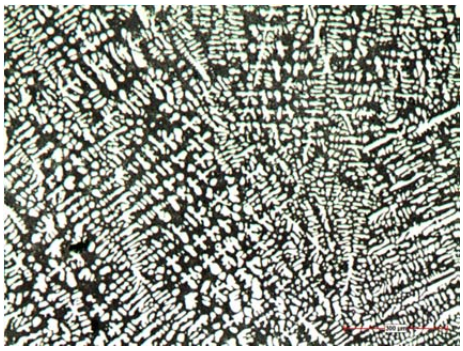
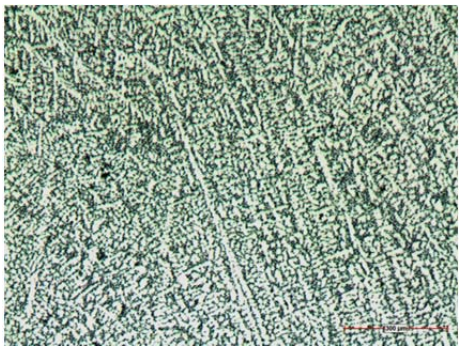
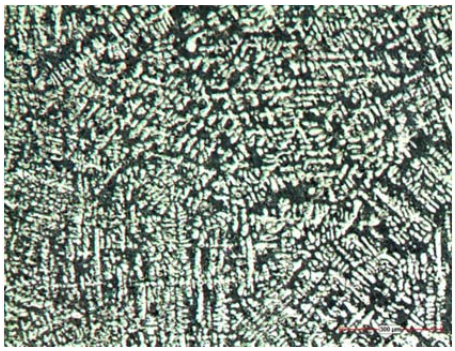
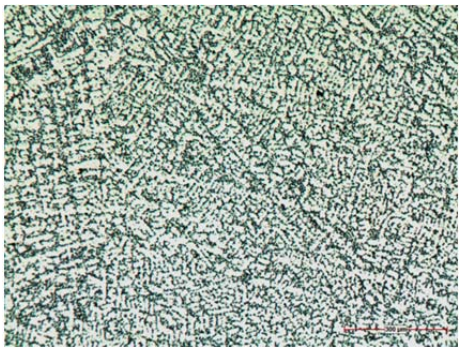
Tablo B.6. 15 kHz frekansında 180, 300 ve 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Ultrasonik titreşim uygulama süresi (saniye)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
180		
300		
600		

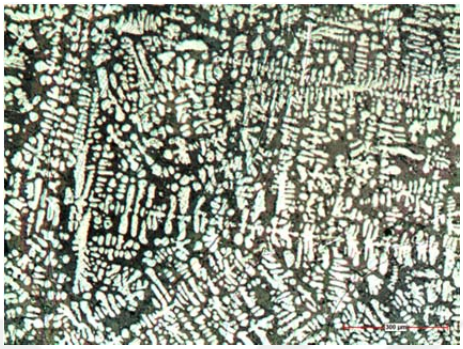
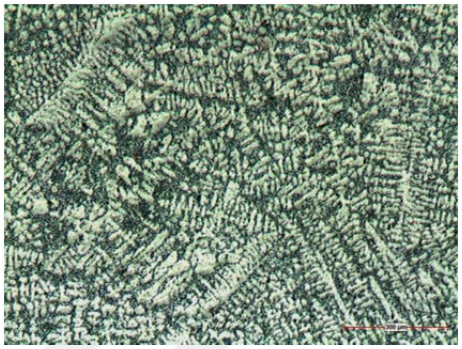
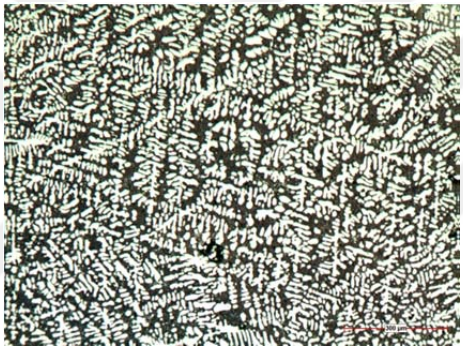
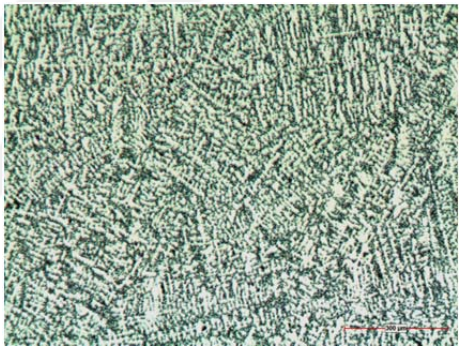
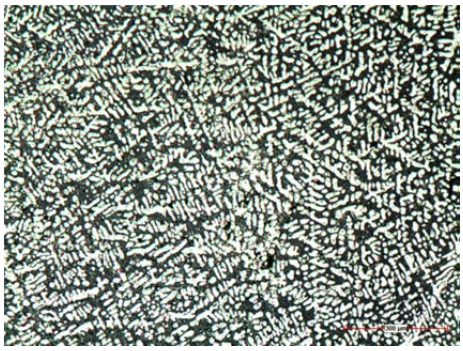
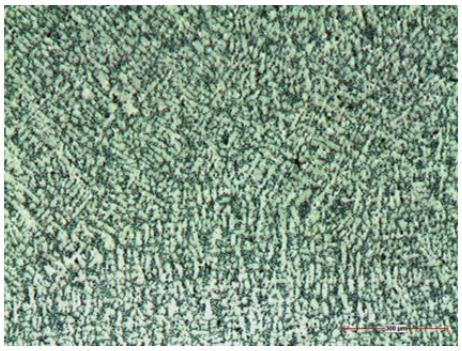
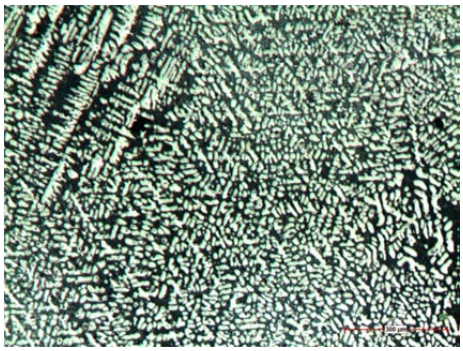
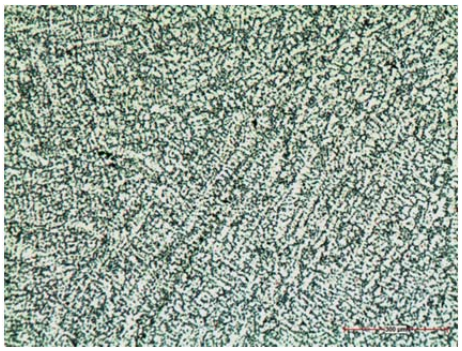
Tablo B.7. 180 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
20		
17,5		
15		

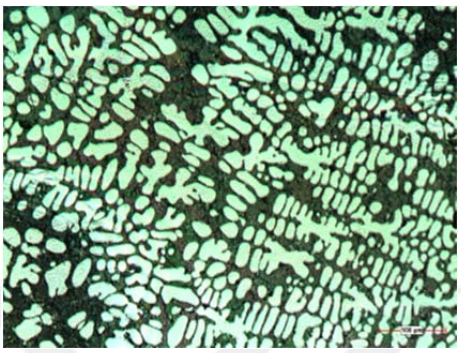
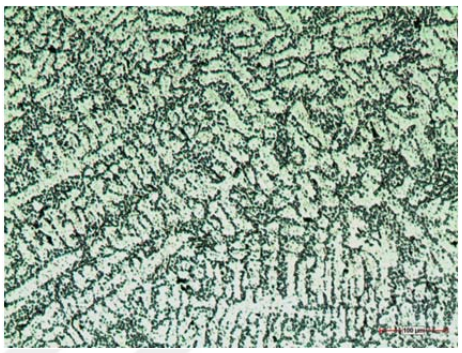
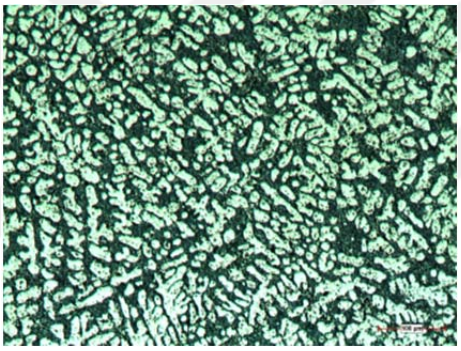
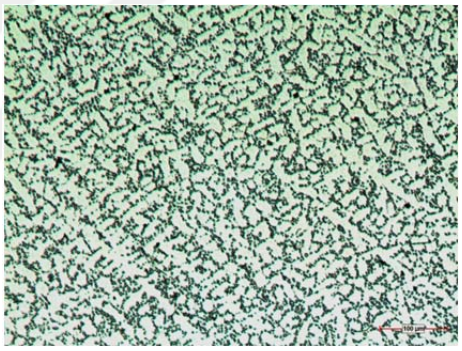
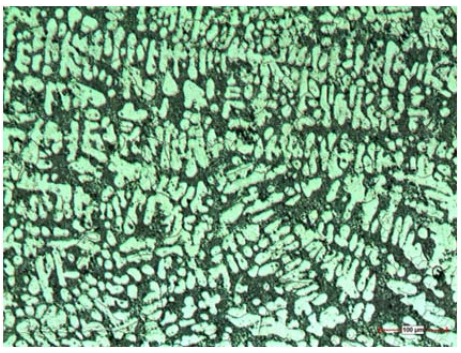
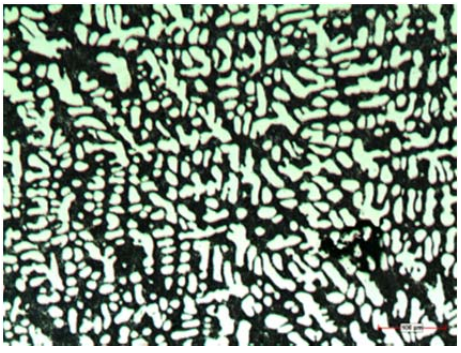
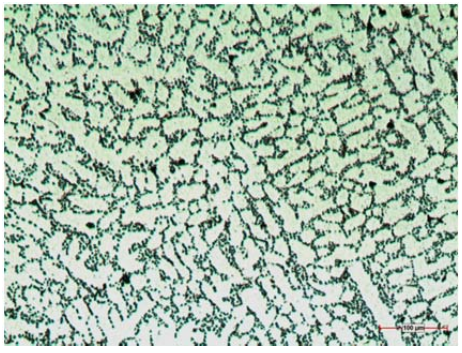
Tablo B.8. 300 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
20		
17,5		
15		

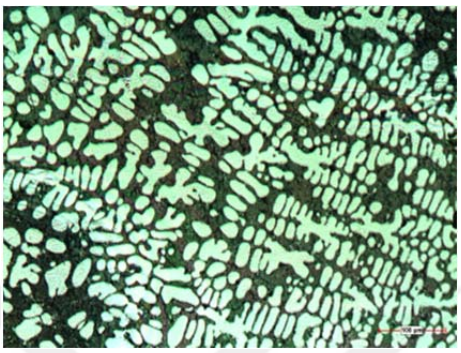
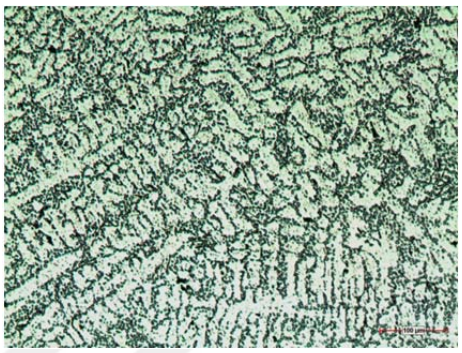
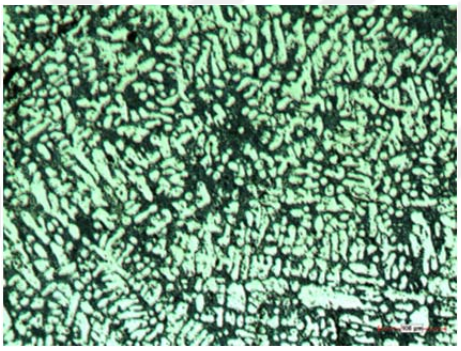
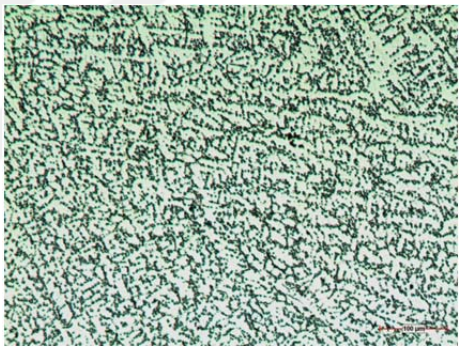
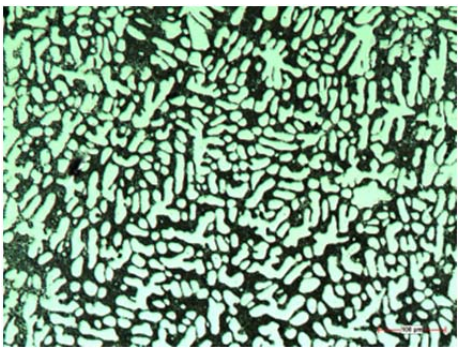
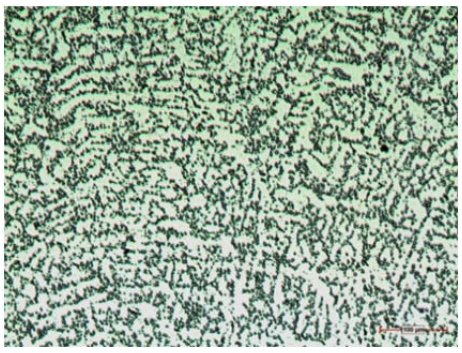
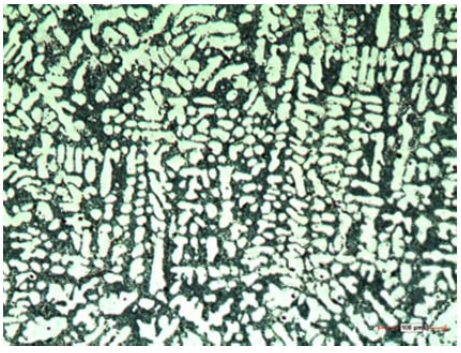
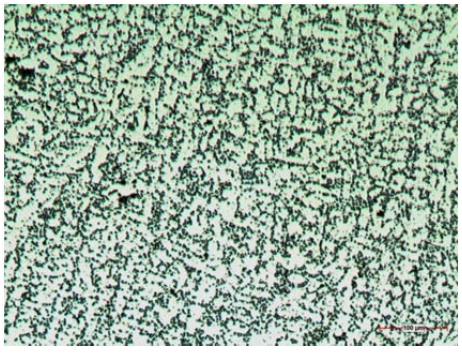
Tablo B.9. 600 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 50x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
20		
17,5		
15		

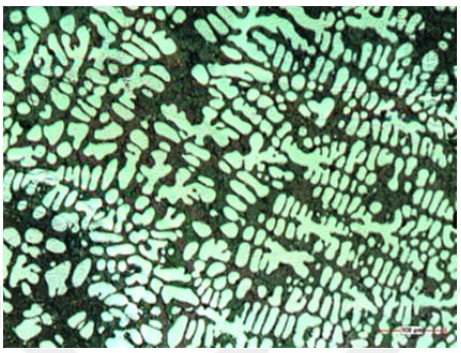
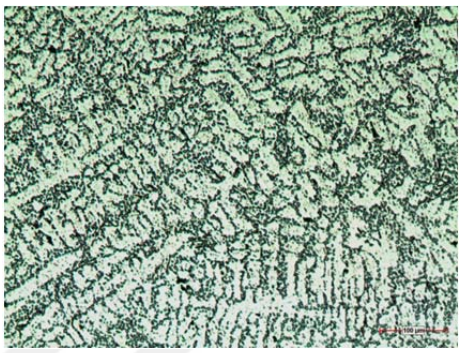
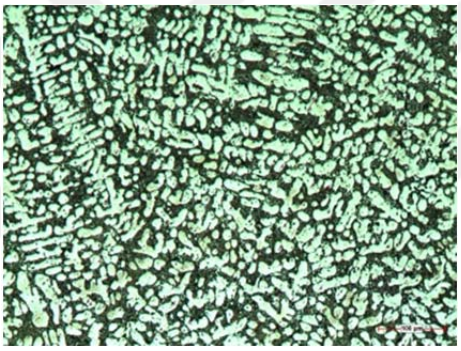
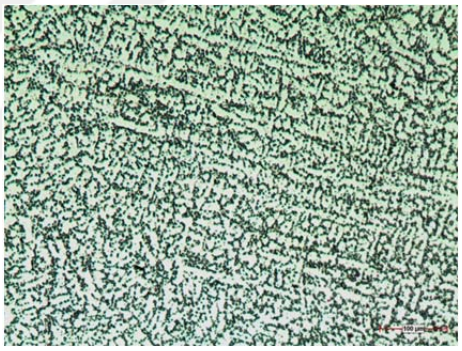
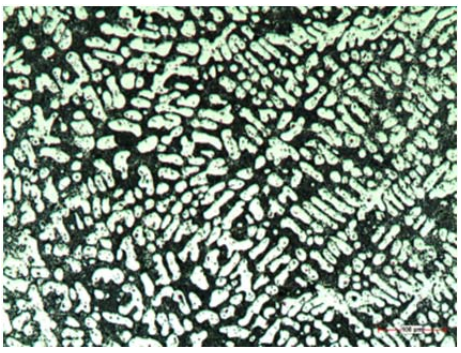
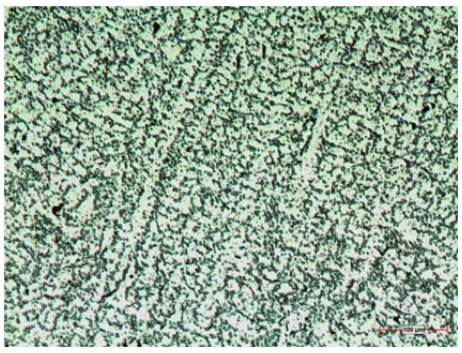
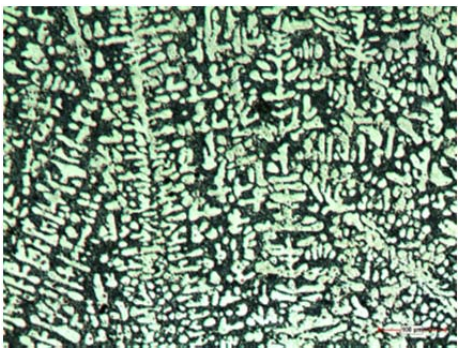
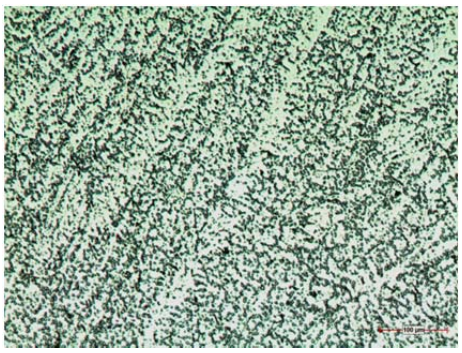
Tablo B.10. 180 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
20		
17,5		
15		

Tablo B.11. 300 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

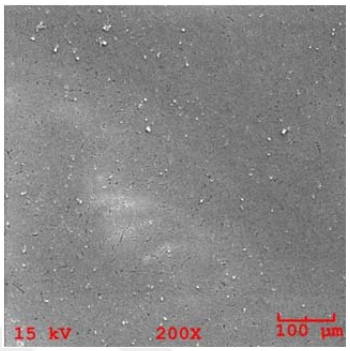
Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
20		
17,5		
15		

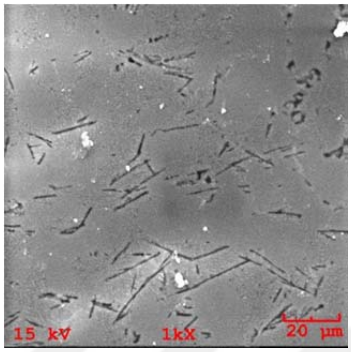
Tablo B.12. 600 saniye boyunca 20, 17,5 ve 15 kHz frekansında ultrasonik titreşim ve T6 ısıl işlemi uygulanmış numunelerin 100x büyütmede optik mikroskop görüntüleri

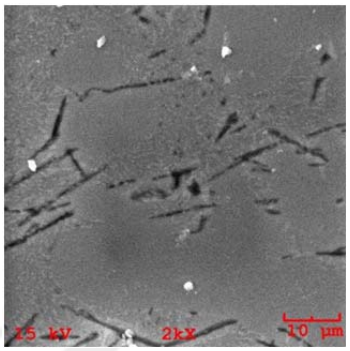
Uygulanan ultrasonik titreşimin frekansı (kHz)	Isıl işlem uygulanmamış 3 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)	T6 ısıl işlemi uygulanmış 4 numaralı numune (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit)
Ultrasonik titreşim uygulanmamış		
20		
17,5		
15		

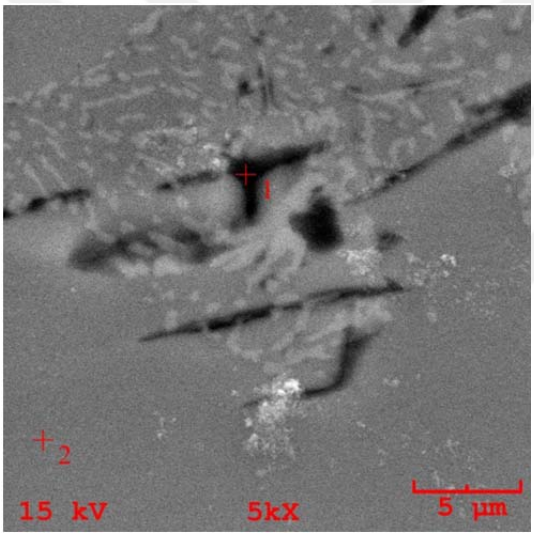
EK-C SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Tablo C.1. Ultrasonik titreşim uygulanmamış 1 numaralı numunenin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

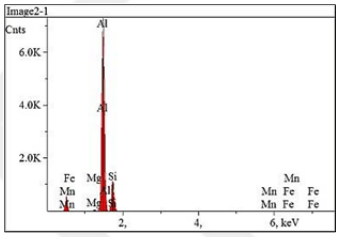






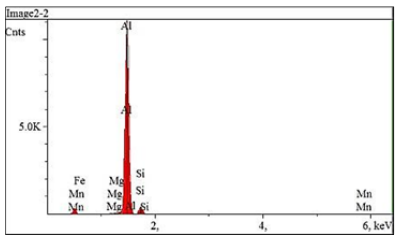


1 Nolu nokta



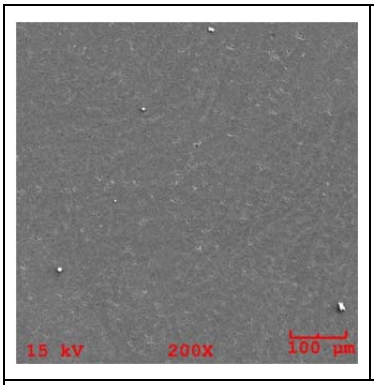
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	8,59	0,532	wt.%	0,077	0,094
Al	Ka	988,89	71,526	wt.%	0,592	0,115
Si	Ka	157,38	27,327	wt.%	0,583	0,233
Mn	Ka	1,37	0,332	wt.%	0,161	0,220
Fe	Ka	1,04	0,283	wt.%	0,178	0,250
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

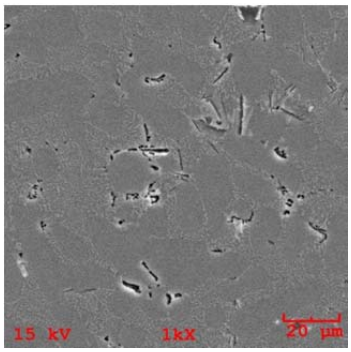
2 Nolu nokta

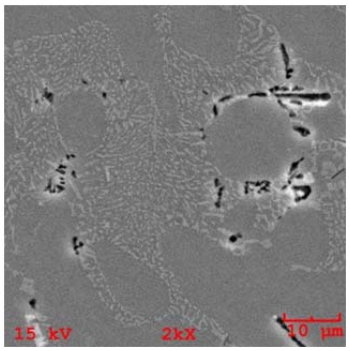


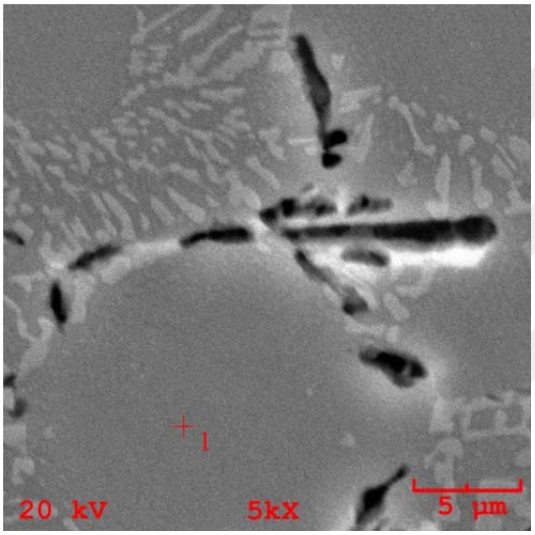
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	8,57	0,405	wt.%	0,058	0,071
Al	Ka	1.525,50	89,447	wt.%	0,594	0,087
Si	Ka	58,98	9,838	wt.%	0,356	0,203
Mn	Ka	0,94	0,185	wt.%	0,124	0,175
Fe	Ka	0,56	0,126	wt.%	0,134	0,195
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

Tablo C.2. 20 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunenin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

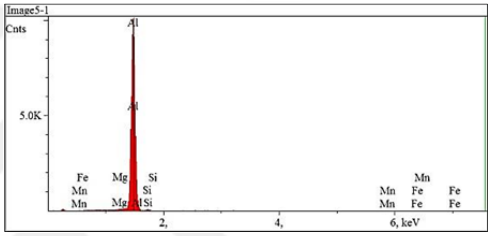




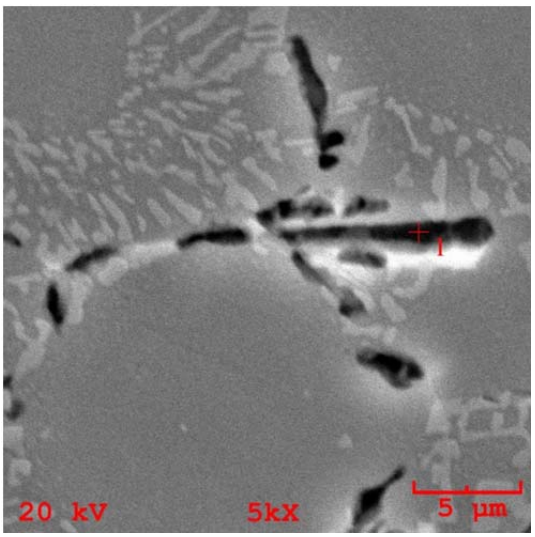




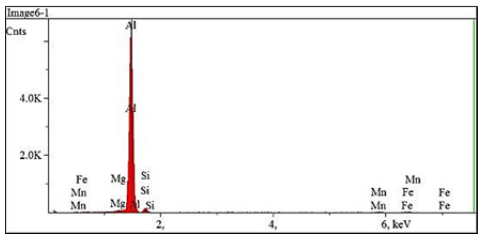
1 Nolu nokta



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	9,78	0,559	wt.%	0,057
Al	Ka	1.357,28	97,602	wt.%	0,687
Si	Ka	7,19	1,579	wt.%	0,209
Mn	Ka	0,68	0,164	wt.%	0,135
Fe	Ka	0,35	0,096	wt.%	0,146
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

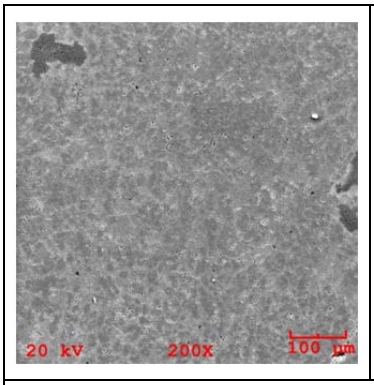


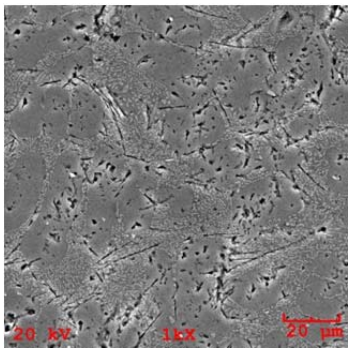
1 Nolu nokta

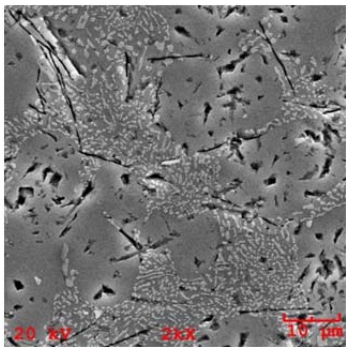


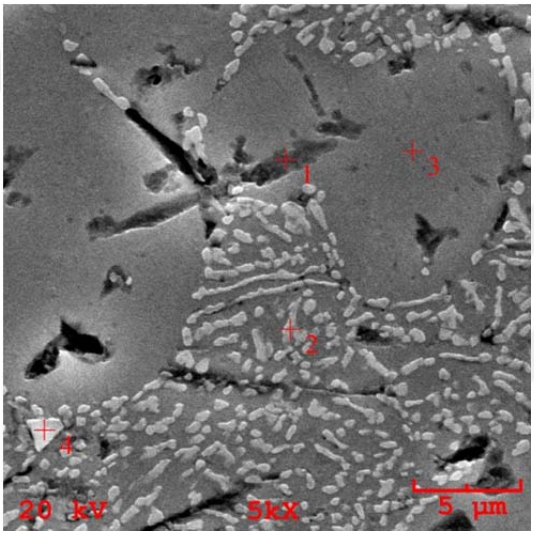
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Erro 2-si
Mg	Ka	10,09	0,869	wt.%	0,0
Al	Ka	888,68	90,197	wt.%	0,7
Si	Ka	19,48	5,445	wt.%	0,3
Mn	Ka	5,19	1,678	wt.%	0,2
Fe	Ka	4,97	1,811	wt.%	0,2
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

Tablo C.3. 20 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 2 numaralı numunenin (23 °C'deki kalıp, ϕ10 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

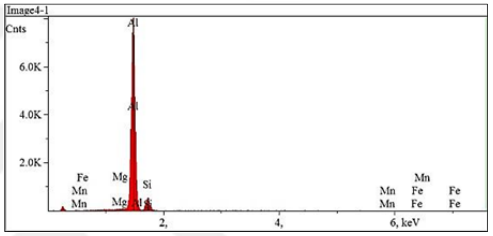






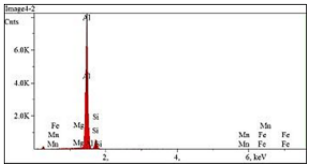


1 Nolu nokta



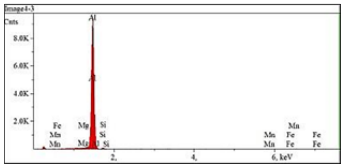
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	8,07	0,515	wt.%	0,074
Al	Ka	1.087,85	84,358	wt.%	0,664
Si	Ka	70,20	14,765	wt.%	0,478
Mn	Ka	0,87	0,226	wt.%	0,148
Fe	Ka	0,46	0,135	wt.%	0,155
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

2 Nolu nokta



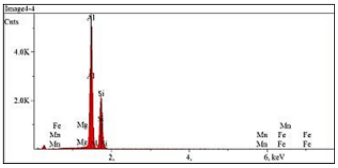
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units
Mg	Ka	5,63	0,352	wt.%
Al	Ka	1.095,22	84,067	wt.%
Si	Ka	73,42	15,287	wt.%
Mn	Ka	0,64	0,167	wt.%
Fe	Ka	0,44	0,128	wt.%
			100,000	wt.%
kV		20,0		
Takeoff Angle		35,0°		
Elapsed Livetime		60,0		

3 Nolu nokta



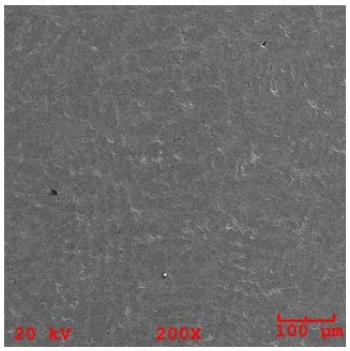
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	8,92	0,531	wt.%	0,07
Al	Ka	1.298,90	97,496	wt.%	0,70
Si	Ka	7,58	1,736	wt.%	0,22
Mn	Ka	0,63	0,161	wt.%	0,14
Fe	Ka	0,27	0,076	wt.%	0,14
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

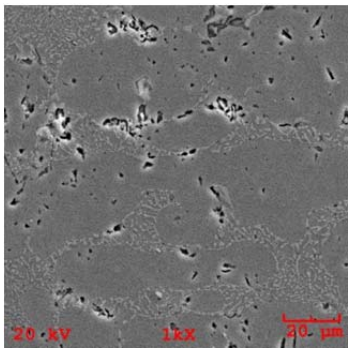
4 Nolu nokta

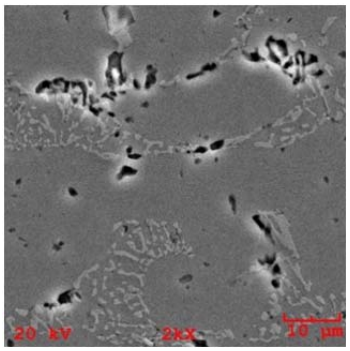


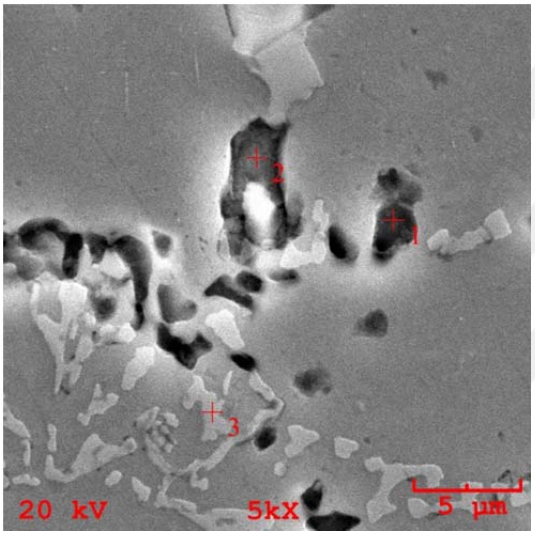
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	4,63	0,299	wt.%	0,07
Al	Ka	739,66	53,668	wt.%	0,51
Si	Ka	312,10	45,793	wt.%	0,68
Mn	Ka	0,28	0,070	wt.%	0,13
Fe	Ka	0,62	0,170	wt.%	0,14
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

Tablo C.4. 20 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 3 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

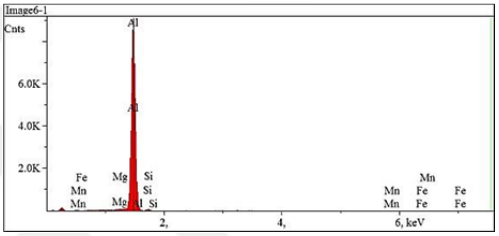






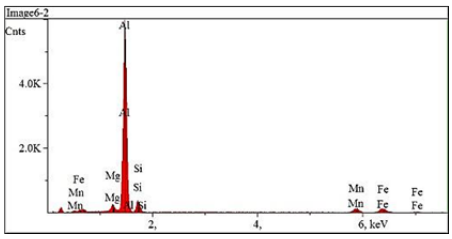


1 Nolu nokta



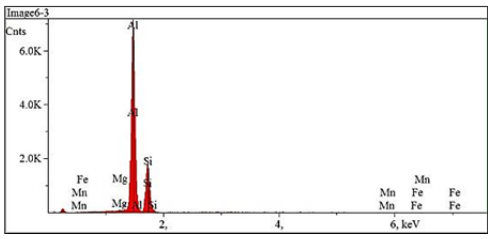
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	10,82	0,675	wt.%	0,071
Al	Ka	1.249,18	96,982	wt.%	0,711
Si	Ka	7,76	1,822	wt.%	0,214
Mn	Ka	0,85	0,221	wt.%	0,145
Fe	Ka	1,03	0,300	wt.%	0,152
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

2 Nolu nokta



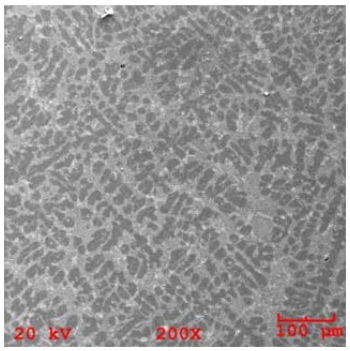
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units
Mg	Ka	27,03	2,388	wt.%
Al	Ka	793,94	74,212	wt.%
Si	Ka	45,49	9,079	wt.%
Mn	Ka	26,58	6,615	wt.%
Fe	Ka	27,40	7,707	wt.%
			100,000	wt.%
kV		20,0		
Takeoff Angle		35,0°		
Elapsed Livetime		60,0		

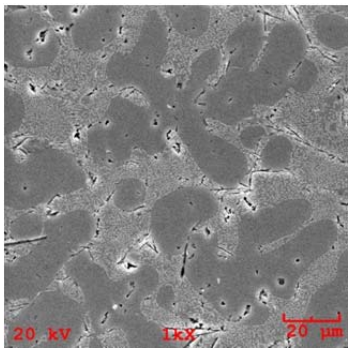
3 Nolu nokta

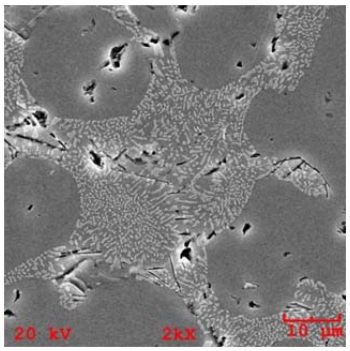


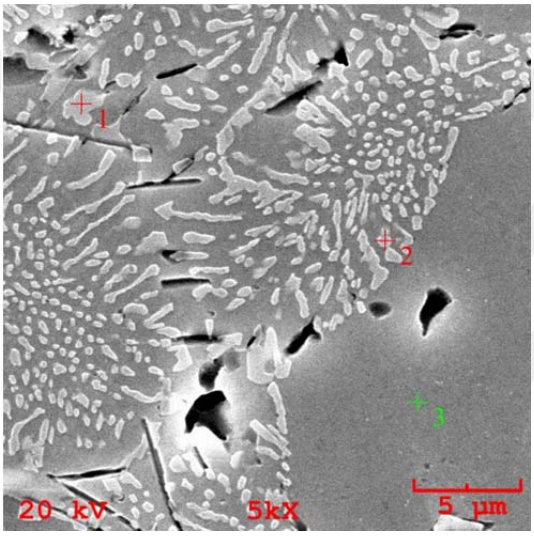
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	6,01	0,348	wt.%	0,069
Al	Ka	940,80	62,860	wt.%	0,534
Si	Ka	246,40	36,526	wt.%	0,615
Mn	Ka	0,62	0,139	wt.%	0,125
Fe	Ka	0,50	0,126	wt.%	0,143
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

Tablo C.5. 17,5 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunenin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

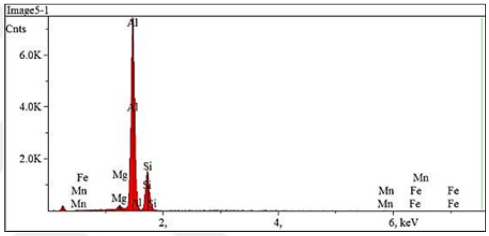






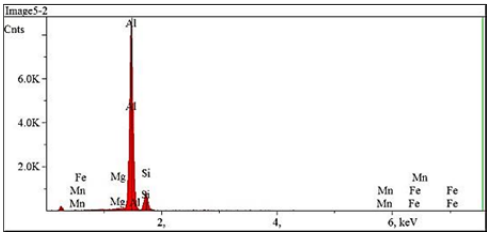


1 Nolu nokta



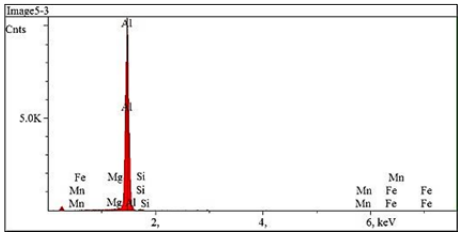
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	19,38	1,135	wt.%	0,09
Al	Ka	995,62	66,196	wt.%	0,54
Si	Ka	211,69	31,803	wt.%	0,58
Mn	Ka	2,21	0,482	wt.%	0,14
Fe	Ka	1,56	0,383	wt.%	0,15
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

2 Nolu nokta



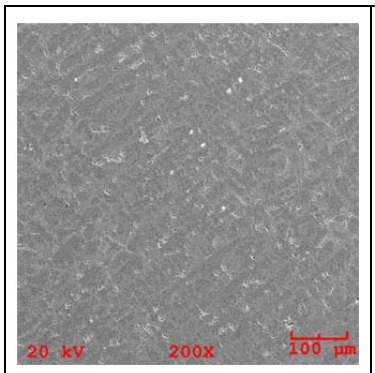
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	8,35	0,475	wt.%	0,074
Al	Ka	1.165,07	79,662	wt.%	0,607
Si	Ka	110,11	19,592	wt.%	0,505
Mn	Ka	0,93	0,215	wt.%	0,136
Fe	Ka	0,22	0,056	wt.%	0,142
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

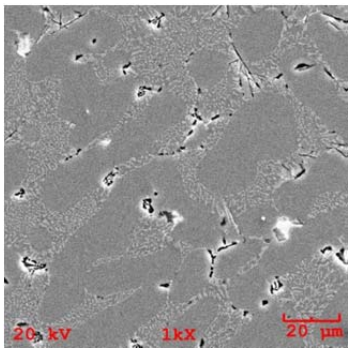
3 Nolu nokta

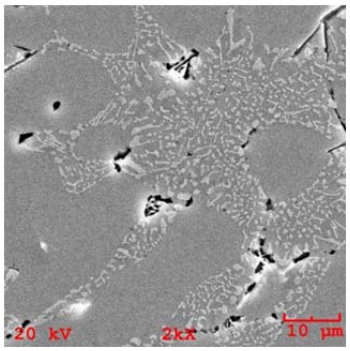


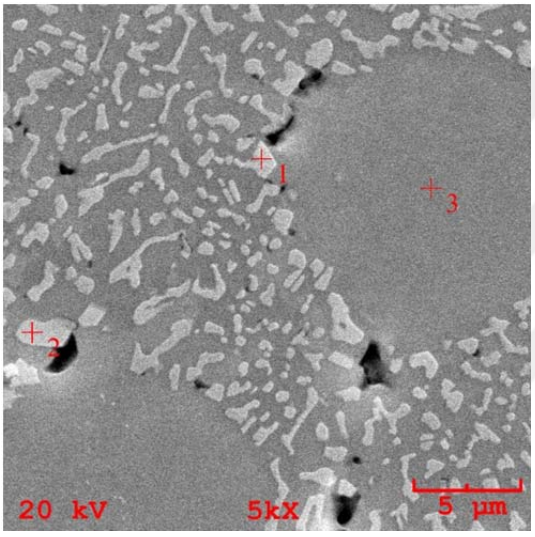
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	9,68	0,529	wt.%	0,065
Al	Ka	1.416,40	97,255	wt.%	0,670
Si	Ka	8,55	1,784	wt.%	0,207
Mn	Ka	1,15	0,266	wt.%	0,137
Fe	Ka	0,64	0,166	wt.%	0,141
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

Tablo C.6. 17,5 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 3 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

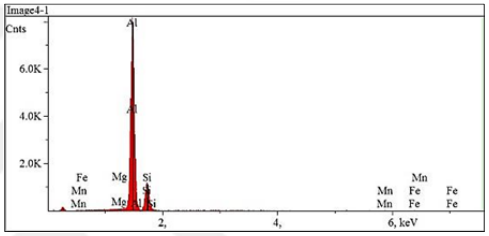






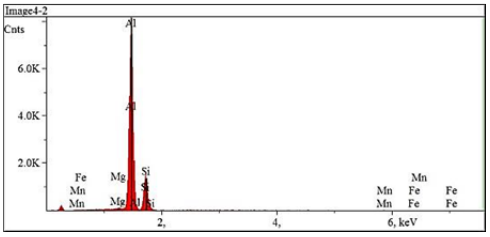


1 Nolu nokta



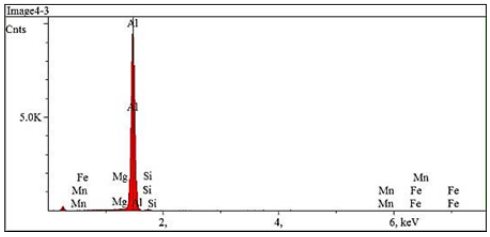
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	6,23	0,353	wt.%	0,06
Al	Ka	1.079,24	72,405	wt.%	0,57
Si	Ka	164,34	26,784	wt.%	0,56
Mn	Ka	0,77	0,173	wt.%	0,14
Fe	Ka	1,13	0,286	wt.%	0,15
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

2 Nolu nokta



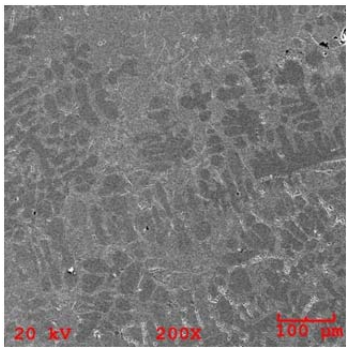
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	10,32	0,560	wt.%	0,06
Al	Ka	1.092,20	68,755	wt.%	0,54
Si	Ka	206,28	30,467	wt.%	0,56
Mn	Ka	0,91	0,192	wt.%	0,12
Fe	Ka	0,11	0,026	wt.%	0,12
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

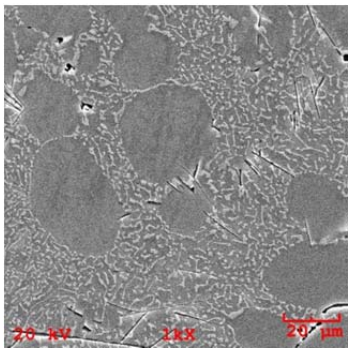
3 Nolu nokta

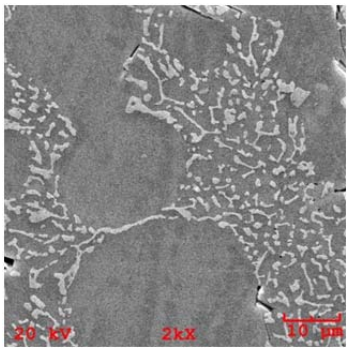


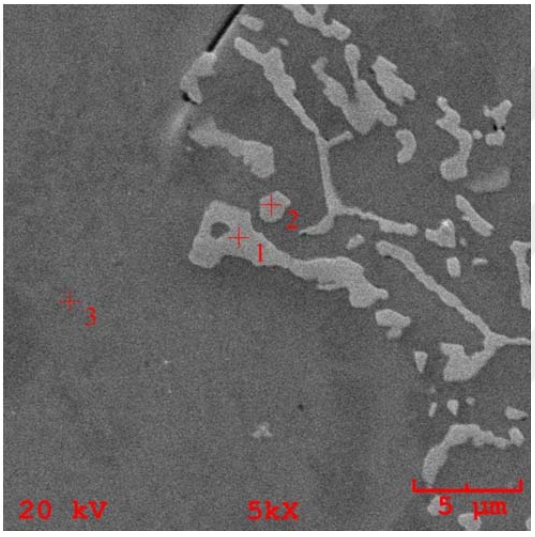
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	9,65	0,539	wt.%	0,06
Al	Ka	1.390,10	97,692	wt.%	0,67
Si	Ka	6,67	1,432	wt.%	0,21
Mn	Ka	0,86	0,205	wt.%	0,14
Fe	Ka	0,50	0,132	wt.%	0,15
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

Tablo C.7. 15 kHz frekansında 180 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunenin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

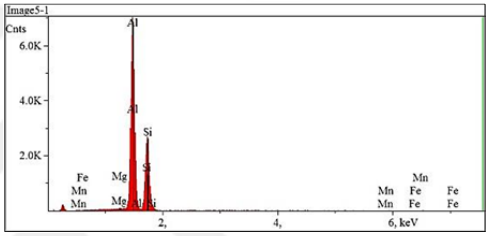






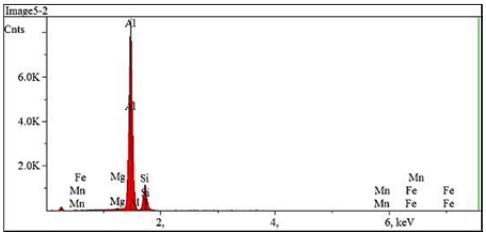


1 Nolu nokta



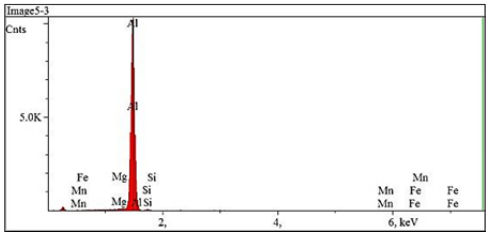
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	6,41	0,335	wt.%	0,064	0,083
Al	Ka	928,88	54,516	wt.%	0,466	0,098
Si	Ka	374,86	44,847	wt.%	0,609	0,172
Mn	Ka	1,14	0,225	wt.%	0,116	0,156
Fe	Ka	0,35	0,078	wt.%	0,123	0,182
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

2 Nolu nokta



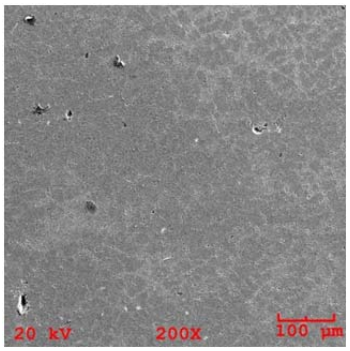
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	7,48	0,411	wt.%	0,070	0,090
Al	Ka	1.140,02	74,469	wt.%	0,574	0,111
Si	Ka	153,44	24,869	wt.%	0,540	0,230
Mn	Ka	0,72	0,159	wt.%	0,126	0,179
Fe	Ka	0,37	0,091	wt.%	0,135	0,197
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

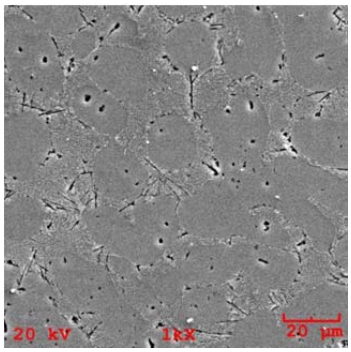
3 Nolu nokta

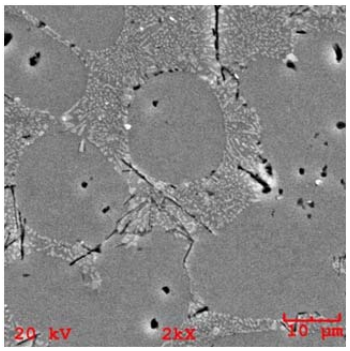


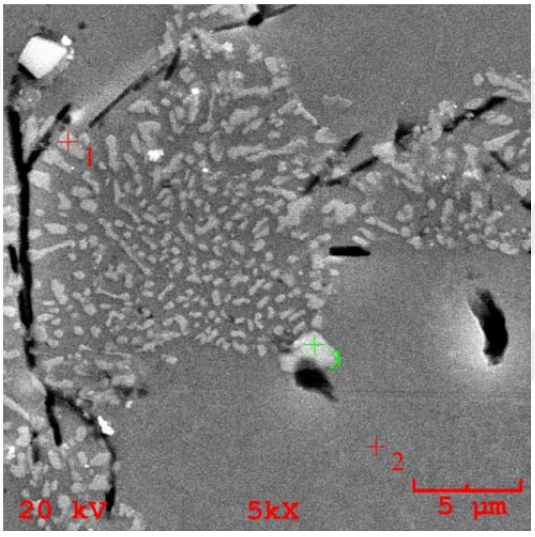
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	11,05	0,624	wt.%	0,069	0,075
Al	Ka	1.380,33	97,652	wt.%	0,681	0,090
Si	Ka	6,75	1,456	wt.%	0,203	0,217
Mn	Ka	0,58	0,139	wt.%	0,132	0,188
Fe	Ka	0,48	0,129	wt.%	0,142	0,205
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

Tablo C.8. 15 kHz frekansında 180 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 3 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

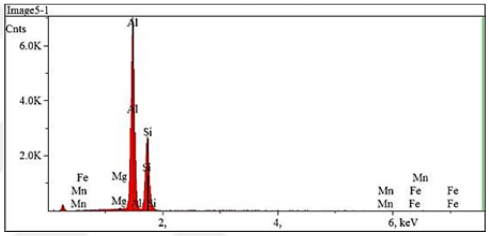






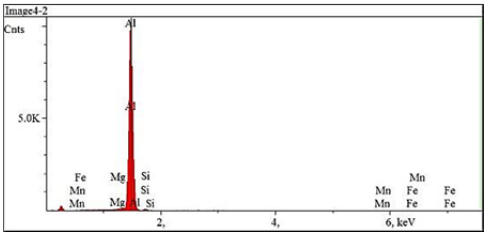


1 Nolu nokta



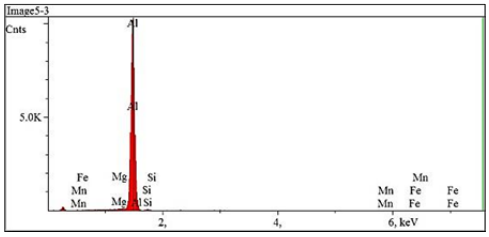
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	6,41	0,335	wt.%	0,064	0,083
Al	Ka	928,88	54,516	wt.%	0,466	0,098
Si	Ka	374,86	44,847	wt.%	0,609	0,172
Mn	Ka	1,14	0,225	wt.%	0,116	0,156
Fe	Ka	0,35	0,078	wt.%	0,123	0,182
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

2 Nolu nokta



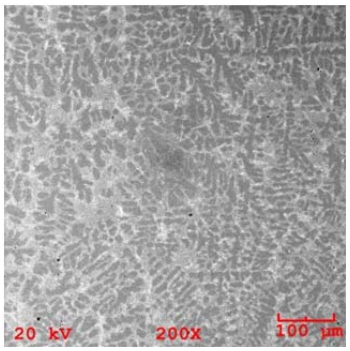
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	9,06	0,497	wt.%	0,066	0,076
Al	Ka	1.407,23	97,574	wt.%	0,574	0,093
Si	Ka	7,58	1,504	wt.%	0,214	0,233
Mn	Ka	0,77	0,180	wt.%	0,132	0,185
Fe	Ka	0,55	0,144	wt.%	0,137	0,195
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

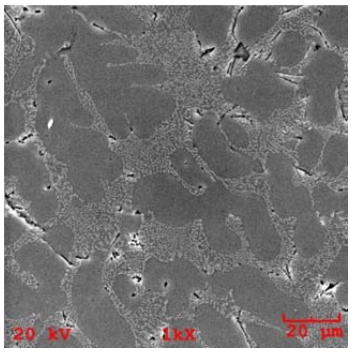
3 Nolu nokta

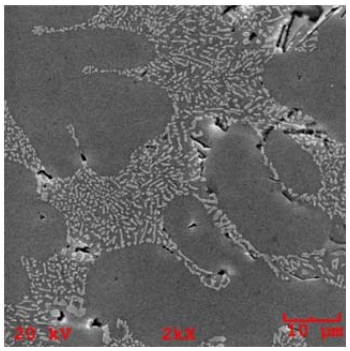


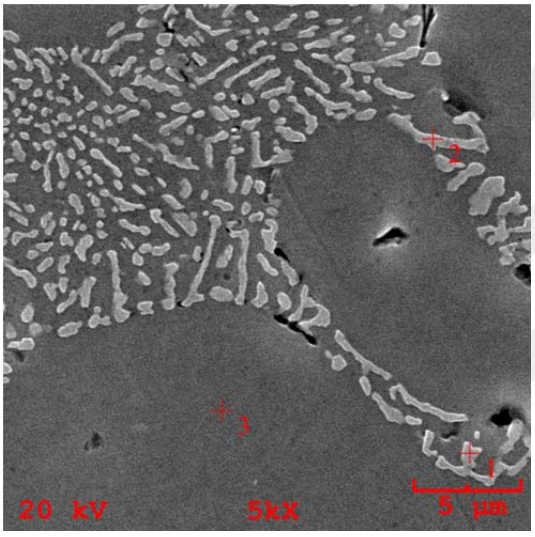
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	11,05	0,624	wt.%	0,069	0,075
Al	Ka	1.380,33	97,652	wt.%	0,681	0,090
Si	Ka	6,75	1,456	wt.%	0,203	0,217
Mn	Ka	0,58	0,139	wt.%	0,132	0,188
Fe	Ka	0,48	0,129	wt.%	0,142	0,205
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

Tablo C.9. 15 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 1 numaralı numunenin (23 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

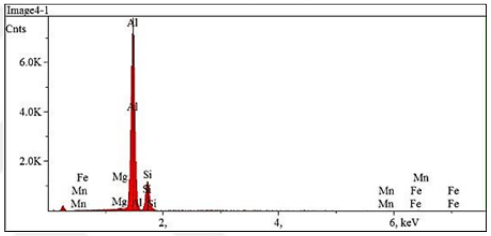






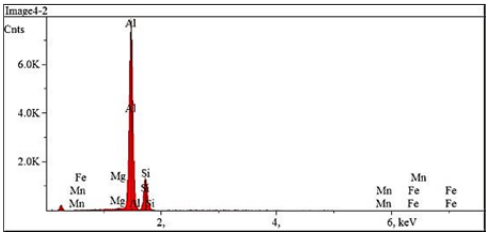


1 Nolu nokta



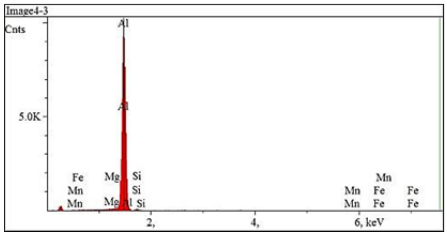
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	7,70	0,450	wt.%	0,075
Al	Ka	1.042,52	71,571	wt.%	0,577
Si	Ka	167,14	27,569	wt.%	0,570
Mn	Ka	0,87	0,201	wt.%	0,138
Fe	Ka	0,42	0,109	wt.%	0,145
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

2 Nolu nokta



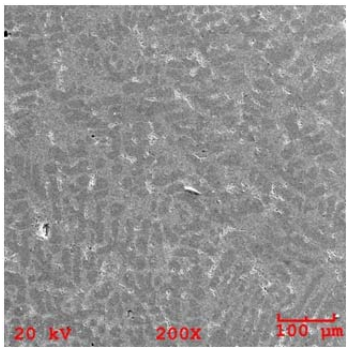
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	7,47	0,424	wt.%	0,072
Al	Ka	1.054,11	70,116	wt.%	0,562
Si	Ka	184,27	29,165	wt.%	0,573
Mn	Ka	1,32	0,295	wt.%	0,139
Fe	Ka	0,00	0,000	wt.%	0,000
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

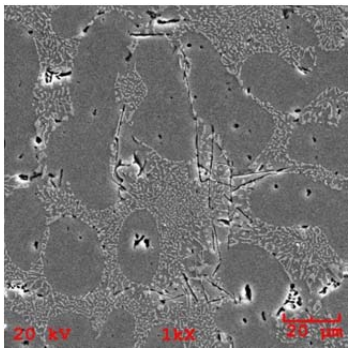
3 Nolu nokta

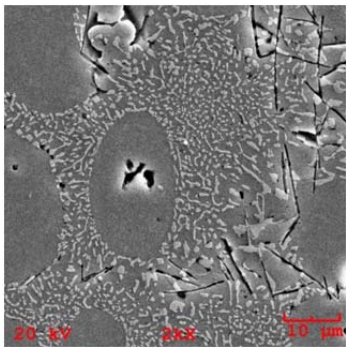


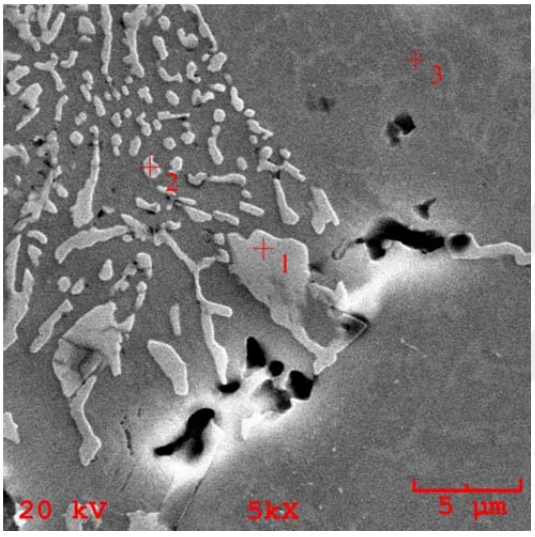
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	10,67	0,602	wt.%	0,068	0,075
Al	Ka	1.375,49	97,377	wt.%	0,680	0,089
Si	Ka	7,92	1,707	wt.%	0,211	0,216
Mn	Ka	0,79	0,189	wt.%	0,138	0,193
Fe	Ka	0,45	0,125	wt.%	0,142	0,205
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

Tablo C.10. 15 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış 3 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

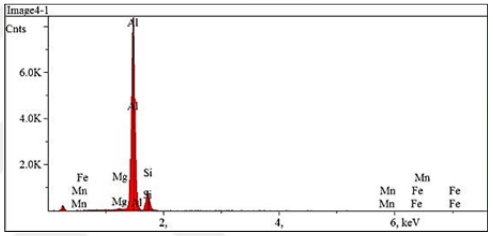






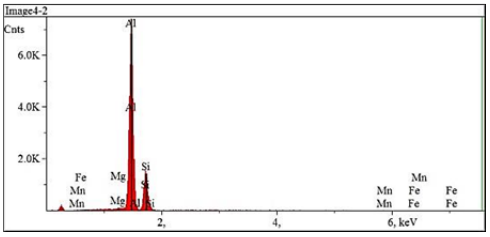


1 Nolu nokta



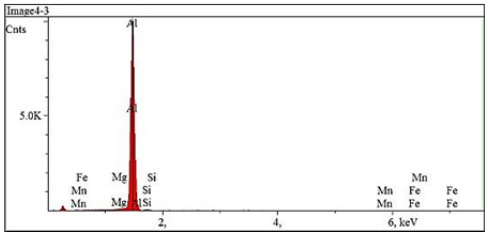
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	6,75	0,392	wt.%	0,073	0,094
Al	Ka	1.128,59	78,894	wt.%	0,611	0,120
Si	Ka	112,67	20,349	wt.%	0,524	0,263
Mn	Ka	0,88	0,207	wt.%	0,141	0,197
Fe	Ka	0,60	0,158	wt.%	0,150	0,215
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

2 Nolu nokta



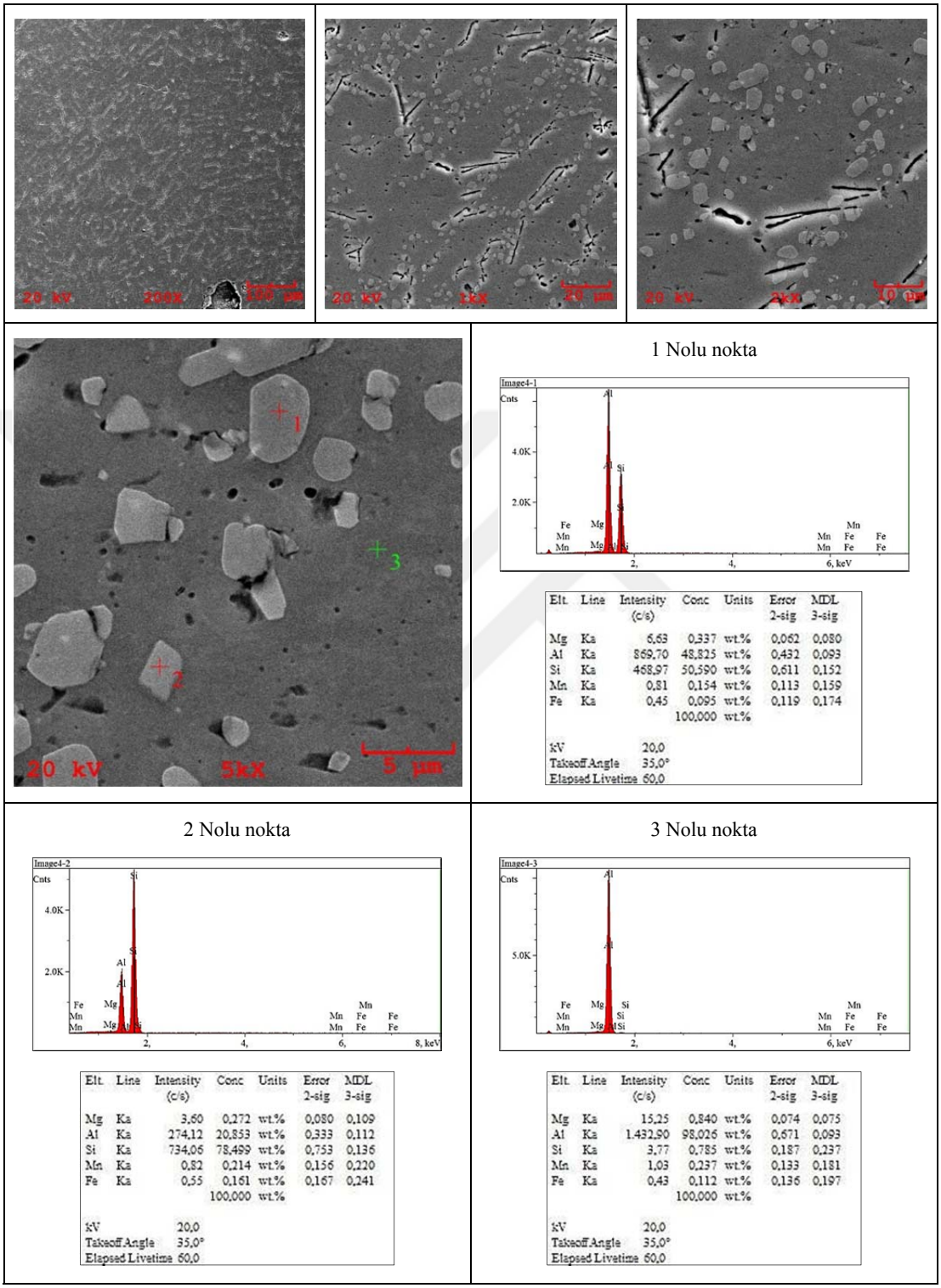
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	7,85	0,451	wt.%	0,071	0,089
Al	Ka	999,98	66,809	wt.%	0,550	0,109
Si	Ka	211,87	32,671	wt.%	0,596	0,213
Mn	Ka	0,03	0,006	wt.%	0,117	0,178
Fe	Ka	0,25	0,063	wt.%	0,132	0,195
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

3 Nolu nokta

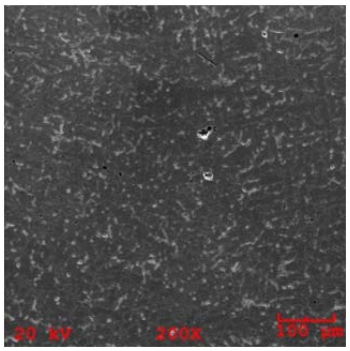


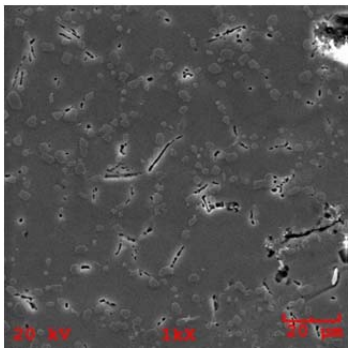
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	8,67	0,490	wt.%	0,068	0,081
Al	Ka	1.367,70	97,724	wt.%	0,685	0,097
Si	Ka	6,85	1,496	wt.%	0,213	0,234
Mn	Ka	0,57	0,138	wt.%	0,133	0,191
Fe	Ka	0,56	0,153	wt.%	0,145	0,207
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

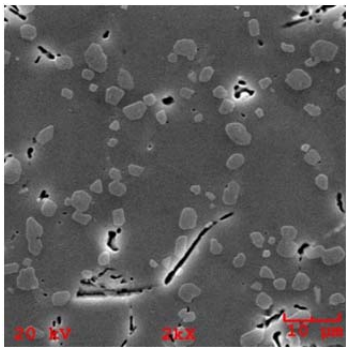
Tablo C.11. Ultrasonik titreşim uygulanmamış ve T6 ısıl işlemi yapılmış 4 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

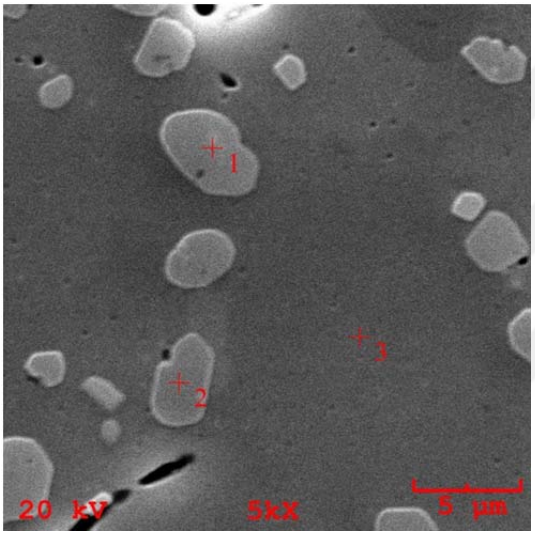


Tablo C.12. 20 kHz frekansında 180 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış ve T6 ısıl işlemi yapılmış 4 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

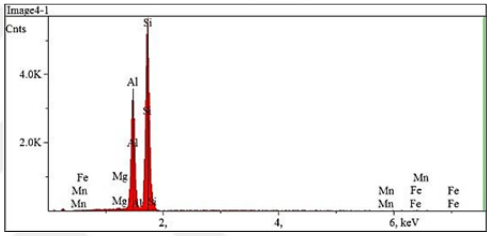






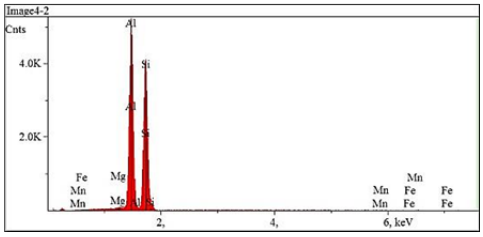


1 Nolu nokta



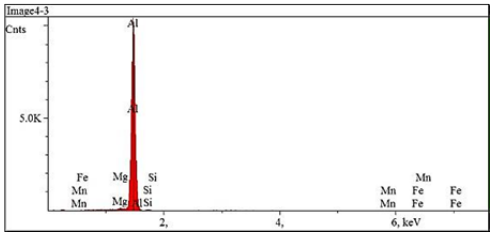
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	4,85	0,278	wt.%	0,064	0,085
Al	Ka	471,83	27,980	wt.%	0,338	0,091
Si	Ka	789,85	71,555	wt.%	0,662	0,120
Mn	Ka	0,49	0,099	wt.%	0,117	0,170
Fe	Ka	0,38	0,087	wt.%	0,129	0,189
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

2 Nolu nokta



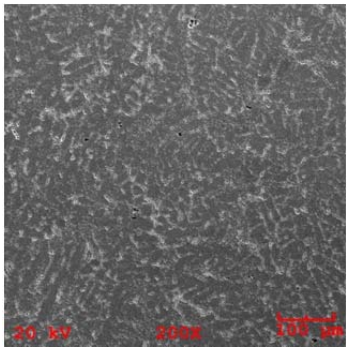
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	6,21	0,334	wt.%	0,063	0,080
Al	Ka	705,52	40,923	wt.%	0,402	0,089
Si	Ka	571,21	58,466	wt.%	0,638	0,133
Mn	Ka	1,37	0,269	wt.%	0,118	0,156
Fe	Ka	0,04	0,008	wt.%	0,111	0,169
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

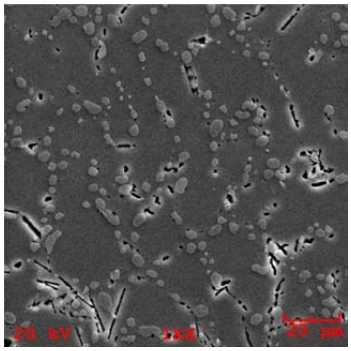
3 Nolu nokta

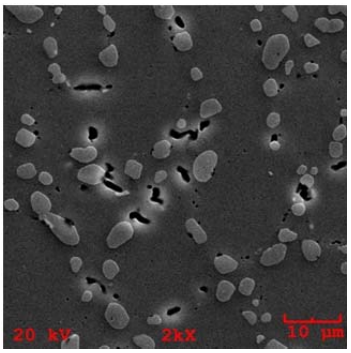


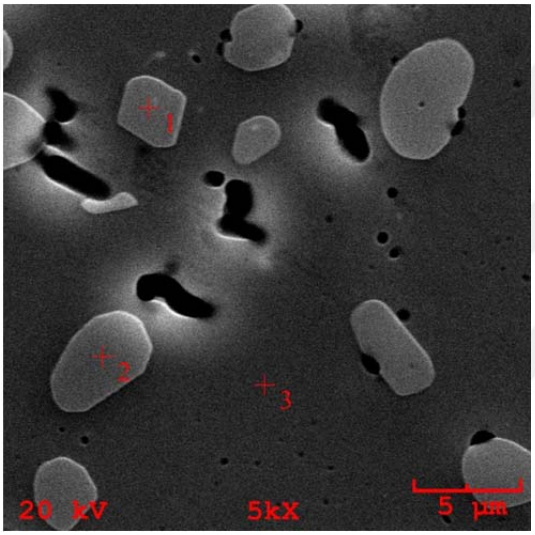
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	14,22	0,808	wt.%	0,076	0,079
Al	Ka	1.387,69	98,115	wt.%	0,683	0,095
Si	Ka	3,36	0,725	wt.%	0,186	0,239
Mn	Ka	0,87	0,205	wt.%	0,135	0,187
Fe	Ka	0,55	0,146	wt.%	0,143	0,204
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

Tablo C.13. 20 kHz frekansında 300 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış ve T6 ısıl işlemi yapılmış 4 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

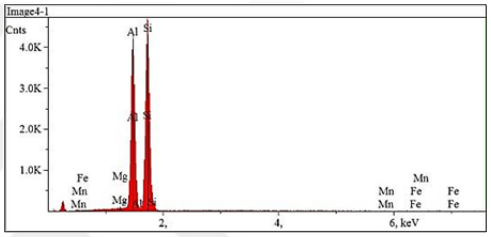






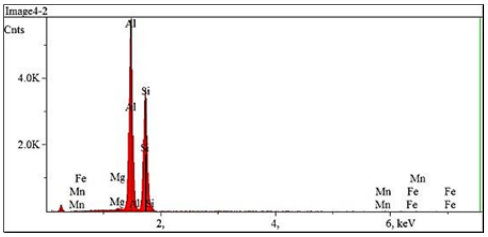


1 Nolu nokta



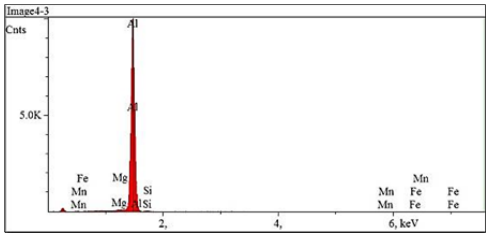
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	5,69	0,329	wt.%	0,066	0,084
Al	Ka	566,05	34,542	wt.%	0,380	0,093
Si	Ka	646,99	64,948	wt.%	0,665	0,131
Mn	Ka	0,36	0,075	wt.%	0,112	0,164
Fe	Ka	0,46	0,107	wt.%	0,124	0,180
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

2 Nolu nokta



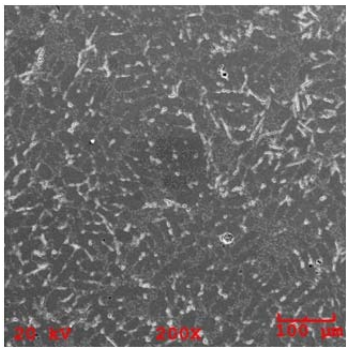
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	7,40	0,402	wt.%	0,066	0,082
Al	Ka	755,25	44,661	wt.%	0,424	0,095
Si	Ka	504,10	54,795	wt.%	0,638	0,151
Mn	Ka	0,15	0,031	wt.%	0,111	0,168
Fe	Ka	0,50	0,112	wt.%	0,125	0,181
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

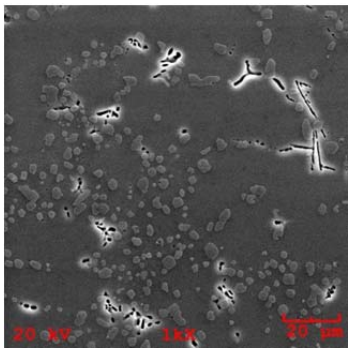
3 Nolu nokta

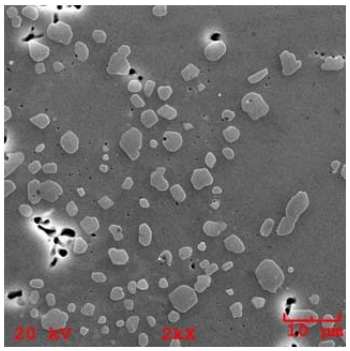


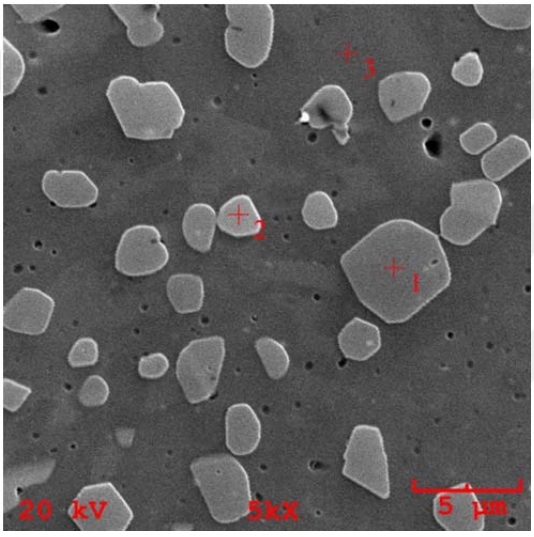
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	14,80	0,874	wt.%	0,075	0,072
Al	Ka	1.333,55	97,857	wt.%	0,695	0,092
Si	Ka	4,67	1,043	wt.%	0,201	0,241
Mn	Ka	0,61	0,150	wt.%	0,131	0,185
Fe	Ka	0,27	0,075	wt.%	0,143	0,212
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

Tablo C.14. 20 kHz frekansında 600 saniye boyunca ultrasonik titreşim uygulanmış ve T6 ısıl işlemi yapılmış 4 numaralı numunenin (300 °C'deki kalıp, ϕ15 kesit) SEM görüntüleri ve EDS analizleri

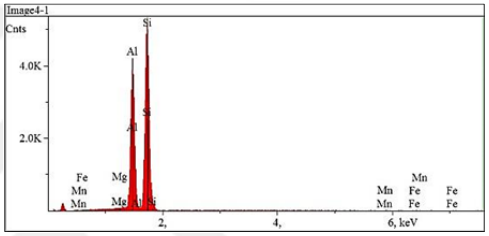






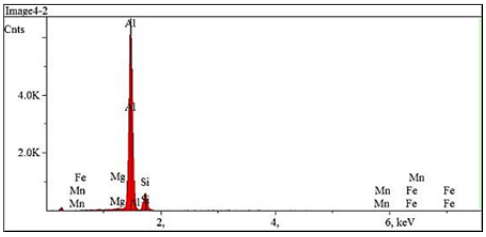


1 Nolu nokta



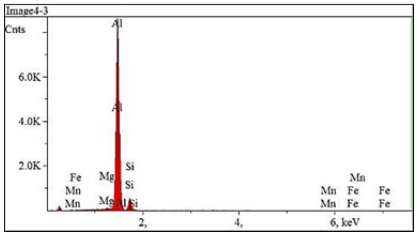
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	4,92	0,267	wt.%	0,062	0,082
Al	Ka	562,60	31,978	wt.%	0,353	0,089
Si	Ka	742,88	67,472	wt.%	0,544	0,120
Mn	Ka	0,70	0,136	wt.%	0,108	0,153
Fe	Ka	0,67	0,147	wt.%	0,118	0,166
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		60,0				

2 Nolu nokta



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig	MDL 3-sig
Mg	Ka	8,93	0,475	wt.%	0,085	0,106
Al	Ka	1.250,97	80,025	wt.%	0,697	0,127
Si	Ka	115,36	19,271	wt.%	0,577	0,271
Mn	Ka	0,06	0,012	wt.%	0,136	0,207
Fe	Ka	0,90	0,217	wt.%	0,160	0,220
			100,000	wt.%		
kV		20,0				
Takeoff Angle		35,0°				
Elapsed Livetime		42,7				

3 Nolu nokta



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	Units	Error 2-sig
Mg	Ka	10,66	0,652	wt.%	0,079
Al	Ka	1.150,30	85,282	wt.%	0,653
Si	Ka	68,55	13,909	wt.%	0,461
Mn	Ka	0,63	0,157	wt.%	0,146
Fe	Ka	0,00	0,000	wt.%	0,000
			100,000	wt.%	
kV		20,0			
Takeoff Angle		35,0°			
Elapsed Livetime		60,0			

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] **Vatansever F.**, Ertürk A. T., Güven E. A., Karabay S., Effect of Ultrasonic Melt Treatment on the Hardness of AA7075 Aluminum Alloy, *III. International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Budapest, Hungary, 3-7 May 2017.

[2] **Vatansever F.**, Güven E. A., Ertürk A. T., Karabay S., Grain Refinement of AA2014 Aluminum Alloy Using Ultrasonic Vibration, *III. International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Budapest, Hungary, 3-7 May 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Fahri Vatansever 1992 yılında İstanbul Bakırköy'de dünyaya gelmiştir. İlk ve ortaöğrenimini Kocaeli'de tamamladıktan sonra 2010 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2015 yılında birincilik derecesiyle mezun olmuştur. 2016 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde araştırma görevlisi olarak göreve başlamış olup halen görevine devam etmektedir.