T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN AZ31 Mg ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN Sn, In VE Ti ELEMENTLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

DERYA DOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. SİBEL DAĞLILAR

İSTANBUL, 2017

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN AZ31 Mg ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN Sn, In VE Ti ELEMENTLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Derya DOĞAN tarafından hazırlanan tez çalışması 04.05.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN

Karabük Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Hayrettin AHLATCI

Karabük Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Işıl KERTİ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Tez çalışmasının hazırlanması ve tamamlanması sürecinde bilgi birikimi ve tecrübesi ile bana yol gösteren ve sabırla destek olan Değerli Hocam Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR'a, tezin her aşamasının bilimsel olarak şekillendirilmesine katkı sağlayan ve emeğini kelimelere sığdıramayacağım Sayın Eş Danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN'e, deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Sayın Hüseyin ZENGİN ile meslektaşım ve kadim dostum Emin KARAÇELEBİ'ye en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs, 2017

Derya DOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 3

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI 4

2.1 Magnezyuma Alaşım İlavesi 5
2.2 Magnezyum Alaşımlarının Gelişimi 8
2.3 Magnezyum Alaşımları 10
2.3.1 Mg-Al Alaşımları 10
2.3.2 Mg-Zn Alaşımları 13
2.3.3 Mg-RE Alaşımları 14
2.4 Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları 15
2.5 Magnezyumun Otomotiv Alanındaki Uygulamaları 17
2.5.1 Tarihsel Uygulamaları 17
2.5.2 Güncel ve Gelecek Uygulamalar 20
2.5.2.1 İç Kısım 22
2.5.2.2 Gövde 24
2.5.2.3 Şasi 25

2.5.2.4 Çekiş Sistemi 26
2.6 Magnezyum Levha Alaşımları 29
2.6.1 Magnezyum Alaşımlı Levhalarda Son Gelişmeler 30
2.6.2 Proses Şartlarının Levha Özellikleri Üzerinde Etkisi 33
2.6.3 Alaşım İlavelerinin Levha Özellikleri Üzerinde Etkisi 34

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR 38

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler 38
3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar 38
3.3 Deneylerin Yapılışı 42
3.3.1 Ergitme ve Alaşımlama Esasları 42
3.3.2 Homojenleştirme Isıl İşlemi 43
3.3.3 Haddeleme İşlemi 44
3.3.4 Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri İçin Hazırlanması 45
3.3.5 Optik Mikroskop ve SEM-EDS İncelemeleri 45
3.3.6 Çekme Deneyi Yapılışı 45
3.3.7 Sertlik Deneyi Yapılışı 46

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME 47

4.1 Kimyasal Bileşim 47
4.2 Mikroyapı Sonuçları 47
4.2.1 Döküm, Homojenleştirme ve Haddeleme İşlemi Sonrası Optik Mikroskop (OM) Sonuçları 47
4.2.1.1 AZ31 Alaşımı Mikroyapı (OM) Sonuçları 48
4.2.1.2 AZ31 Alaşımına Ti İlavesinin Mikroyapı (OM) Sonuçları 50
4.2.1.3 AZ31 Alaşımına In İlavesinin Mikroyapı (OM) Sonuçları 54
4.2.1.4 AZ31 Alaşımına Sn İlavesinin Mikroyapı (OM) Sonuçları 58
4.2.2 Döküm, Homojenleştirme ve Haddeleme İşlemi Sonrası Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS Sonuçları 63
4.2.2.1 AZ31 Alaşımına Ait SEM ve EDS Sonuçları 63
4.2.2.2 AZ31 Alaşımına Ti İlavesinin SEM ve EDS Sonuçları 65
4.2.2.3 AZ31 Alaşımına In İlavesinin SEM ve EDS Sonuçları 68
4.2.2.4 AZ31 Alaşımına Sn İlavesinin SEM ve EDS Sonuçları 69
4.3 Mekanik Deney Sonuçları 72
4.3.1 Döküm, Homojenleştirme ve Haddeleme İşlemi Sonrası Sertlik Deney Sonuçları 72
4.3.1.1 Titanyum (Ti) Etkisi 72
4.3.1.2 İndiyum (In) Etkisi 74
4.3.1.3 Kalay (Sn) Etkisi 75
4.3.2 Döküm ve Haddeleme İşlemi Sonrası Çekme Deney Sonuçları 76
4.3.2.1 % (0,2-0,5-1) Oranlarda Ti İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi . 76
4.3.2.2 % (0,2-0,5-1) Oranlarda In İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi . 77
4.3.2.3 % (0,2-0,5-1) Oranlarda Sn İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi 78

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER 85

KAYNAKLAR 88

ÖZGEÇMİŞ 93

SİMGE LİSTESİ

Al	Alüminyum
Ar	Argon
Bi	Bizmut
Ca	Kalsiyum
Ce	Seryum
Gd	Gadolinyum
Li	Lityum
Mg	Magnezyum
Nd	Neodimyum
In	İndiyum
Si	Silisyum
Sn	Kalay
Sr	Stronsiyum
Mn	Mangan
Ti	Titanyum
Y	İtriyum
Zn	Çinko
Zr	Zirkonyum
σ	Gerilme
α	alfa
β	beta
MPa	megapascal
nm	nanometre

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	The American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
EDX	Energy Dispersive X-Ray Analysis (Enerji Dağılımlı X-Işını Analizi)
HPDC	Yüksek Basınçlı Kalıp Döküm
LPDC	Düşük Basınçlı Kalıp Döküm
OM	Optik Mikroskop
RE	Toprak Alkali Elementler
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 HSP kristal yapının şematik gösterimi ve magnezyumun temel düzlemleri .. 5
Şekil 2. 2 Magnezyum alaşımlarının gelişme yönleri 9
Şekil 2. 3 Magnezyum- alüminyum faz diyagramı..... 11
Şekil 2. 4 Magnezyum- alüminyum alaşımının ötektik mikroyapısı 11
Şekil 2. 5 Mg-Zn ikili alaşım sistemi faz diyagramı 14
Şekil 2. 6 Magnezyumun temel kullanım alanları 16
Şekil 2. 7 Allard tarafından 1952'de geliştirilen magnezyum plakadan yapılmış otomotiv gövdesi 16
Şekil 2. 8 Otomotiv gövde konstrüksiyonunda kullanılan farklı malzemelerin mekanik özellikleri..... 17
Şekil 2. 9 Magnezyumun otomotiv alanındaki uygulamaları 18
Şekil 2. 10 GM ve Chevrolet Corvette magnezyum uygulamaları..... 19
Şekil 2. 11 Magnezyum kalıp döküm gösterge paneli..... 22
Şekil 2. 12 HPDC magnezyum dökümü Lincoln MKT arka bagaj iç paneli..... 24
Şekil 2. 13 Chevrolet Corvette için LPDC magnezyum alaşımlı teker..... 26
Şekil 2. 14 BMW kompozit motor bloğu 28
Şekil 2. 15 USCAR magnezyum çekiş sistemine ait döküm bileşenleri 28
Şekil 3. 1 Deneylerde kullanılan atmosfer kontrollü ergitme ünitesi 38
Şekil 3. 2 Deneylerde kullanılan atmosfer kontrollü ergitme ünitesi kesiti 39
Şekil 3. 3 Deneylerde kullanılan Protherm markalı ısıl işlem fırını..... 40
Şekil 3. 4 Deneylerde kullanılan haddeleme cihazı 40
Şekil 3. 5 Nikon Epiphot marka optik mikroskop 41
Şekil 3. 6 Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka taramalı elektron mikroskobu.. 41
Şekil 3. 7 Ergitme işleminde kullanılan çelik pota resmi 43
Şekil 3. 8 Y-Blok kalıbı kesit resmi 43
Şekil 3. 9 5x30x130 mm boyutlarına getirilen numuneler..... 44
Şekil 3. 10 Numunelerin haddelenmesi 44
Şekil 3. 11 Numune mikroyapı incelemeleri için hazırlanması..... 45
Şekil 3. 12 Çekme deney numunesi (ASTM E 8M-99) 46
Şekil 4. 1 (a) AZ31 döküm, (b) AZ31 homojenleştirilmiş ve (c) AZ31 haddelenmiş numunelerin 200X büyütmede OM görüntüleri..... 49
Şekil 4. 2 (a) AZ31 + 0,2 Ti, (b) AZ31 + 0,5 Ti, (c) AZ31 + 1 Ti döküm sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri..... 50

Şekil 4. 3 (a) AZ31 + 0,2 Ti, (b) AZ31 + 0,5 Ti, (c) AZ31 + 1 Ti homojenleştirme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri 51
Şekil 4. 4 (a) AZ31 + 0,2 Ti, (b) AZ31 + 0,5 Ti, (c) AZ31 + 1 Ti haddeleme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri 52
Şekil 4. 5 (a) AZ31 + 0,2 In, (b) AZ31 + 0,5 In, (c) AZ31 + 1 In döküm sonrası 200X büyütmede (OM) görüntüleri 55
Şekil 4. 6 (a) AZ31 + 0,2 In, (b) AZ31 + 0,5 In, (c) AZ31 + 1 In homojenleştirme sonrası 200X büyütmede (OM) görüntüleri 56
Şekil 4. 7 (a) AZ31 + 0,2 In, (b) AZ31 + 0,5 In, (c) AZ31 + 1 In haddeleme sonrası 200X büyütmede (OM) görüntüleri 57
Şekil 4. 8 (a) AZ31 + 0,2 Sn, (b) AZ31 + 0,5 Sn, (c) AZ31 + 1 Sn döküm sonrası 200X büyütmede (OM) görüntüleri 59
Şekil 4. 9 (a) AZ31 + 0,2 Sn, (b) AZ31 + 0,5 Sn, (c) AZ31 + 1 Sn homojenleştirme sonrası 200X büyütmede (OM) görüntüleri 60
Şekil 4. 10 (a) AZ31 + 0,2 Sn, (b) A + 0,5 Sn, (c) AZ31 + 1 Sn haddeleme sonrası 200X büyütmede (OM) görüntüleri 61
Şekil 4. 11 AZ31 döküm numunenin 1000X büyütmede SEM görüntüsü 63
Şekil 4. 12 AZ31 homojenleştirilmiş numunenin 1000X büyütmede SEM görüntüsü .. 64
Şekil 4. 13 AZ31 haddelenmiş numunenin 1000X büyütmede SEM görüntüsü 64
Şekil 4. 14 AZ31 alaşımının homojenleştirme sonrası nokta EDX analizi 65
Şekil 4. 15 AZ31 + 1 Ti döküm sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü..... 66
Şekil 4. 16 AZ31 + 1 Ti homojenleştirme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü .. 66
Şekil 4. 17 AZ31 + 1 Ti haddeleme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü..... 67
Şekil 4. 18 AZ31 + 1 Ti alaşımının haddeleme sonrası nokta EDX analizi 67
Şekil 4. 19 AZ31 + 1 In homojenleştirme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü .. 68
Şekil 4. 20 AZ31 + 1 In haddeleme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü 68
Şekil 4. 21 AZ31 + 1 In alaşımının haddeleme sonrası nokta EDX analizi..... 69
Şekil 4. 22 AZ31 + 1 Sn döküm sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü 70
Şekil 4. 23 AZ31 + 1 Sn homojenleştirme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü . 70
Şekil 4. 24 AZ31 + 1 Sn haddeleme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü..... 71
Şekil 4. 25 AZ31 + 1 Sn alaşımının haddeleme sonrası nokta EDX analizi..... 71
Şekil 4. 26 %(0,2-0,5-1) Ti ilavesinin sertlik değerleri..... 73
Şekil 4. 27 %(0,2-0,5-1) In ilavesinin sertlik değerleri 74
Şekil 4. 28 %(0,2-0,5-1) Sn ilavesinin sertlik değerleri 75
Şekil 4. 29 AZ31'e Ti ilavesinin (a) Döküm sonrası mekanik özellikleri, (b) Haddeleme sonrası mekanik özellikleri 76
Şekil 4. 30 AZ31'e In ilavesinin (a) Döküm sonrası mekanik özellikleri, (b) Haddeleme sonrası mekanik özellikleri 78
Şekil 4. 31 AZ31'e Sn ilavesinin (a) Döküm sonrası mekanik özellikleri, (b) Haddeleme sonrası mekanik özellikleri 79

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Saf magnezyumun özellikleri..... 4
Çizelge 2. 2 Magnezyum alaşımlarının özelliklerine alaşım elementi ilavesinin etkisi..... 6
Çizelge 2. 3 Magnezyum alaşımlarını tanımlamak için kullanılan ASTM kodları.....6
Çizelge 2. 4 En çok kullanılan Mg-Al esaslı alaşım sistemleri 13
Çizelge 2. 5 Otomobillerde global magnezyum uygulamaları..... 20
Çizelge 2. 6 Alaşım katkılarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi..... 35
Çizelge 4. 1 Deneylerde kullanılan alaşımların spektral analiz sonuçları 48
Çizelge 4. 2 Alaşımların mekanik değerlerine ilişkin veriler 72

ÖZET

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN AZ31 Mg ALAŞIMINA İLAVE EDİLEN Sn, In ve Ti ELEMENTLERİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Derya DOĞAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR

Eş Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yunus TÜREN

Bu çalışmada; otomotiv sektöründe kullanım alanı yaygınlaşan AZ31 magnezyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerini geliştirmek için alaşımlara % 0,2 , % 0,5 ve % 1 oranlarında Kalay (Sn), İndiyum (In) ve Titanyum (Ti) elementleri ilave edilmiştir. Söz konusu alaşımlar yerçekimi döküm tekniği ile Y blok kalıba dökülmüştür. İstenilen boyutlara getirilen numuneler 410 ^{o}C'de 48 saat boyunca homojenleştirme ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak, numuneler tek pasoda haddelenmiştir.

AZ31 Mg alaşımına % 0.2, % 0.5 ve %1 oranlarında Ti, In ve Sn elementleri ilavesi yapılarak 3 mm kalınlığında levha üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan levha malzemenin haddelenme sonrasında ulaşılan optimum mikroyapı-mekanik özellikleri ilişkisi kapsamlı olarak incelenmiştir. AZ31 alaşımına Ti, In ve Sn ilaveleri katkılarının mikroyapıyı incelterek özellikle haddeleme sonrasında çekme dayanımlarını artırdığı tespit edilmiştir. Kayda değer artışlar % 0,2 Sn ve % 1 In'da elde edilmiştir.

Diğer taraftan, alaşım ilavelerinin alaşımların sertlik değerlerinde önemli bir farklılık oluşturmadığı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mg alaşımları, AZ31 levha, haddeleme, mikroyapı, mekanik özellikler

ABSTRACT

MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF Sn, In AND Ti ELEMENTS ADDED TO AZ31 Mg ALLOY USED IN THE AUTOMOTIVE SECTOR

Derya DOĞAN

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Sibel DAĞLILAR

Co-Adviser: Assist. Prof. Yunus TÜREN

In this study; Titanium (Ti), Indium (In) and Tin (Sn) elements were added to the alloys at 0,2 - 0,5% and 1% ratios to improve the microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloys, which are becoming widespread in the automotive sector. Those alloys were casted into Y-die mold with the gravity casting technique. The samples brought to the desired dimensions and heat treated at 410 ° C for 48 hours. Finally, the samples rolled in one pass.

Ti, In and Sn elements at 0.2 %, 0.5% and 1% ratios were added to AZ31 Mg alloy and 3 mm thick sheet produced. The relationship between optimum microstructure-mechanical properties of the produced sheet material after rolling has been extensively investigated. It has been found that additives of Ti, In and Sn additives to the AZ31 alloy increase the tensile strength, especially after rolling, by thinning the microstructure. Considerable increases are obtained at 0.2 % Sn and 1% In.

On the other hand, it is estimated that the alloy additions do not make a significant difference in the hardness values of the alloys.

Keywords: Mg alloys, AZ31 plate, rolling, microstructure, mechanical properties

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Magnezyum alaşımları, sahip oldukları düşük yoğunlukları(1.74 gr/cm^3), iyi işlenebilirlikleri, sönümleme kapasiteleri, yüksek spesifik dayanımları yanı sıra; iyi mekanik, termal ve elektromanyetik özellikleri ile otomotiv, demiryolu ve hava endüstrisi için üstün malzemeler olarak görülmektedir [1], [2]. Özellikle, hafif ağırlıkları ve yüksek spesifik dayanımları sayesinde otomotiv endüstrisinde yapısal bileşen olarak kullanılmaktadırlar [3]. Son zamanlarda, araçlarda enerji verimliliğini artırmak ve CO_2 emisyonunu azaltmak amacıyla çalışmalar yapılmaya başlanmış olup, bu çerçevede araçlardaki parça sayısının azaltılması, kalınlıkların düşürülmesi ve hafif malzemelerin kullanılması suretiyle araç ağırlığının azaltılması gündeme gelmiştir. Bu bağlamda, en önemli yaklaşımlardan biri metalik malzemeler arasında en umut verici ve en hafif malzeme olan Mg alaşımlarının araçlarda kullanılması olmuştur. Böylelikle, Mg alaşımları thixokalıplama ve döküm ürünleri olarak yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Bu alaşımların kullanılabilirliğini arttırmak, dayanımlarını ve şekillenebilirliğini geliştirmek için çalışmalar da yapılmaya başlamıştır. Magnezyum alaşımlarının araçlarda kullanımını arttırmak için plastik işlemenin optimize edilmesi ve değişik şekillerdeki parçaların üretilebilmesi amacıyla alaşımların dayanımlarının arttırılması gerekmektedir[4]. Alaşımsız olarak düşük mukavemet ve tokluk değerlerine sahip olan Magnezyum, alaşımlandırılarak kullanılmaktadır[5]. Birçok ticari Mg alaşımları Al-Zn üçlü faz sisteminden(AZ alaşımları olarak ifade edilen) geliştirilmiş olup, endüstriyel birçok uygulamada yer almaktadırlar. AZ alaşımları içerisinde en yaygın ticari kullanıma sahip olanları AZ31, AZ61 ve AZ91 olup, bu alaşımlar hem döküm

ürünü(basınçlı, kuma ve kalıba döküm ürünleri) hem de ekstrüzyon, dövme ve haddeleme ürünü olarak üretilebilmektedir. Genelde, Al içeren alaşım akma mukavemetini, çekme mukavemetini, korozyon dayanımını ve oksidasyona karşı direnci arttırırken, dökülebilirliği ve kaynaklanabilirliği düşürür[6]. Magnezyum yapılı malzemelerin haddeleme ve diğer şekillendirme prosesleriyle üretimi dökümle üretim yöntemlerine nazaran daha azdır[7]. Magnezyum alaşımları hegzagonal sıkı paket(HCP) kristal yapılı olduklarından yetersiz sayıda oluşan kayma ve ikizlenme sistemleri nedeniyle düşük süneklik, oda sıcaklığında güçlü anizotropik davranış ve düşük plastik şekillenme gösterirler. Bu sebeple, çoğu ürünleri döküm prosesi ile elde edilir; bu da Magnezyum alaşımlarının yaygın kullanımının kısıtlamaktadır[8], [9]. Dökümle üretilen ürünlerde düşük yüzey kalitesi, düşük akma dayanımı görülmesi yanısıra, düşük kalınlıklarda ve geniş ebatlı ürünlerin eldesinde de uygulamada sıkıntılar oluşmaktadır [10]. AZ serisi alaşımlardan döküm AZ31 alaşımı, magnezyum alaşımları içerisinde en ekonomik ve popüler olan alaşımlardandır. Çok iyi dökülebilirlik göstermesi yanı sıra oda sıcaklığında çok iyi mekanik dayanım göstermektedir. Ancak, döküm AZ31 alaşımının termal stabilitesi ve mekanik özellikleri yüksek sıcaklıklarda kullanıldığında yeterli gelmemektedir. Bu nedenle, magnezyum alaşımlarının termal stabiliteleri ve yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir[11]. Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek için alternatif bir yöntem olarak alaşım elementleri ilaveleri yapılabilmektedir[12].

Son yıllarda, Mg alaşımı levha ürünleri ilgi görmeye başlamıştır, özellikle otomotiv uygulamalarında alüminyum ve çelik bileşenlerin yerine ağırlıktan kazanç sağlanması istenen uygulamalarda Magnezyum kullanılmaktadır. Mg-3Al-1Zn alaşımı(AZ31) şu an levha uygulamalarında en çok kullanılan Mg alaşımıdır. Plastik şekillendirmesinin zorluğu, yüksek sıcaklıklarda haddelenme gerektirmesinden ötürü bu alaşımın levha ürünlerini üretmek maliyetli olmaktadır. Dolayısıyla sıcak haddeleme prosesinde yapılacak bir optimizasyon çok önemli olacaktır. Haddelenmiş levhanın özellikleri, haddeleme öncesi levhanın sıcaklığı gibi birçok parametre büyük oranda malzemenin iç durumuna bağlıdır. Haddelenmiş yapının son özelliklerini iyileştirmek için yapılacak olası çözümler haddeleme öncesi malzemenin ön ısıtma durum şartlarının optimize edilmesine oldukça bağlıdır. Çok yüksek ön ısıtma sıcaklıklarına çıkılması, plaka

malzemenin maliyetini arttıracaktır, öte yandan çok düşük sıcaklıklar ise malzemenin başarılı bir şekilde haddelenmesinde sıkıntı yaratacaktır[13].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada döküm metodu ile üretilen AZ31 alaşımı ve AZ31 alaşımına farklı oranlarda (% 0.2, 0.5 ve 1) Sn, In, Ti elementleri ilavesinin mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, akabinde otomotiv uygulamalarında değerlendirilmek üzere haddeleme metodu ile AZ31 levha üretimi proses parametrelerinin (haddeleme sıcaklığı, ısıl işlem şartları)oluşturularak, haddeleme sonrası mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesi ve daha önce yapılan AZ31 alaşımlarına ilişkin çalışmalar esas alınarak alaşım ilaveleri ile yüksek performanslı AZ31 Magnezyum alaşımı geliştirilmesi yönündeki çalışmalara alternatif bir yöntem bulunması amaçlanmaktadır.

1.3 Hipotez

Alaşım elementlerinin AZ31 alaşımı üzerinde tane küçültücü etki yaparak mekanik özelliklerinin artırılabileceği düşünülmüş, ayrıca döküm sonrası oluşan poroziteleri ve segrasyonları gidermek için homojenizasyon ısıl işlemi uygulaması ile mekanik özelliklerin iyileştirilebileceği tahmin edilerek, son aşamada haddeleme prosesi sırasında tek pasolu ve % 40 haddeleme oranı ile haddelenebilirlik özelliklerinin geliştirilebileceği öngörülmüştür.

.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM ve ALAŞIMLARI

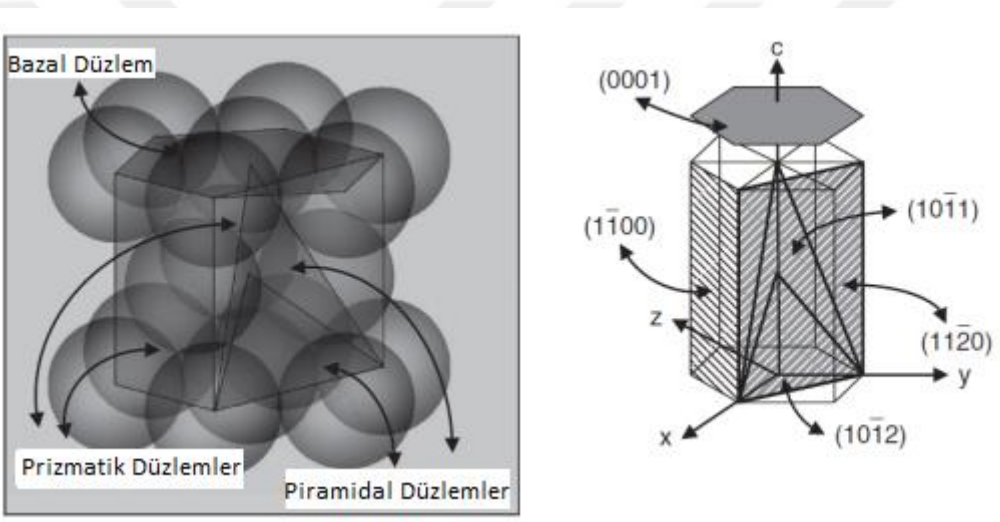
Magnezyum metalik bir elementtir. Periyodik tabloda 2A grubunda olup, atom numarası 12 ve atom ağırlığı 24.31 gr/mol ‘dür. Magnezyum ilk olarak 1808'de Sir Humphrey Davy tarafından tanımlanmış bir metaldir. Dünya kabuğunda en çok bulunan sekiz elementten birisidir ve Dünya'nın okyanus suyunun % 0.13'ünü oluşturur. Magnezyum yaygın kullanılan metallerin en hafifidir. Saf magnezyumun özellikleri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir [14].

Çizelge 2.1 Saf magnezyumun özellikleri [14]

Özellikler	Değerler	Özellikler	Değerler
Atom Numarası	12	Elastisite Modülü (RT)	45 GPa
Atom Ağırlığı	24.0350	Kesme Modülü	17 GPa
Atom Çapı	0.320 nm	Kırılma Uzaması	1-12%
Atom Hacmi	14 cm^3/mol	Maksimum Çekme Dayanımı	80-180 MPa
Yoğunluk (RT:Room Temperature)	1.74 g/cm^3	Normal Potansiyeli	-2.37 V
Ergime Noktası	650°C	Isı İletkenliği (RT)	156 W /(m°C)
Kaynama Noktası	1090°C	Spesifik Isı Kapasitesi	1.05 kJ/(kg°C)
Termal İletkenlik	154.5 W/m°C	Lineer Uzama Katsayısı (RT)	$26*10^{-6}$/°C
Füzyon Isısı	195 kJ/kg	Küçülme (Sıvıdan katı hale geçişte)	4.2 %

Magnezyumun kristalin yapısı hegzagonal sıkı paket (HSP)'tir. Oda sıcaklığında saf magnezyum için birim hücre boyutları a = 0.32092 nm ve c = 0.52105 nm olup; c / a = 1.6236 eksenel oranı ile birlikte neredeyse sıkı paketli bir yapıya sahiptir [15].

Magnezyum kayma ve ikizlenme ile plastik olarak deforme olur. Hegzagonal sıkı paket yapılarda, temel kayma (0001) düzleminde [1120] yönünde meydana gelir. Magnezyum ve alaşımları için plastisite öncelikli olarak sıcaklığa bağlıdır. 225°C'nin altındaki bir sıcaklıkta, kayma kapalı paket içerisinde taban kayması olarak oluşur. İkizlenme bu sıcaklığın hemen altında (1012) düzleminde [1120] yönünde oluşur. 225°C veya üzerindeki sıcaklıkta (1011) düzlemi de [1120] yönünde kayma düzlemi haline gelir [15].



Şekil 2.1 HSP kristal yapının şematik gösterimi ve magnezyumun temel düzlemleri [16]

2.1 Magnezyuma Alaşım İlavesi

Pek çok metal gibi saf magnezyum da alaşımsız halde mühendislik uygulamalarında nadiren kullanılmaktadır. Alaşımlandırma işlenmiş ve döküm ürünleri eldesinde magnezyumun şekillendirilebilirliğini geliştirmek için kullanılır. En yaygın kullanılan alaşım elementleri çinko ve alüminyumdur. Mangan, zirkonyum, silisyum ve nadir toprak metalleri oluşan alaşımın özellikleri üzerinde önemli etkisi olan diğer alaşım elementleridir. Magnezyum alaşımlarının özelliklerine alaşım elementi ilavesinin etkisi Çizelge 2.2'de belirtilmiştir [15].

Çizelge 2.2 Magnezyum alaşımlarının özelliklerine alaşım elementi ilavesinin etkisi[15].

Alaşım Elementleri	Özellikler Üzerindeki Etkisi
Alüminyum (Al)	Çekme dayanımı ve sertliği artırır. İntermetalik faz ($Mg_{17}Al_{12}$) çökeltisini oluşturur. Dökülebilirliği geliştirir. Korozyon dayanımını artırır.
Çinko (Zn)	Çekme dayanımı ve sertliği artırır. Tane yapısını inceltir. Dökülebilirliği geliştirir. Korozyon dayanımını artırır.
Mangan (Mn)	Demirin etkisini azaltarak, korozyon dayanımını artırır. Akma dayanımını artırır.
Silisyum (Si)	Ergiyik metalin viskozitesini artırır. Sürünme dayanımını artırır. Mg_2Si partikülü oluşumunu sağlar. Dökülebilirliği ve korozyon dayanımını düşürür.
Nadir Toprak Elementleri	Donma aralığını azaltır. Çekme dayanımını ve sertliği artırır.

Çizelge 2.3 Magnezyum alaşımlarını tanımlamak için kullanılan ASTM kodları [17]

Kod Harfi	Alaşım Elementi	Kod Harfi	Alaşım Elementi
A	Alüminyum	M	Mangan
B	Bizmut	N	Nikel
C	Bakır	P	Kurşun
D	Kadmiyum	Q	Gümüş
E	Nadir Toprak	R	Krom
F	Demir	S	Silisyum
G	Magnezyum	T	Kalay
H	Toryum	W	İtriyum
K	Zirkonyum	Y	Antimon
L	Lityum	Z	Çinko

Magnezyum alaşımlarını isimlendirmek için, American Society for Testing Materials (ASTM) adlı kuruluş alaşımları tanımlayan bir yöntem geliştirmiştir[17].

İlk iki harf Çizelge 2.3'de listelenen kodlamalara göre oluşturulan temel alaşım elementlerini göstermektedir. Rakamlarla devam eden bir veya iki dijit ise % ağırlığı (en yakın tam sayıya yuvarlanmış) simgelemektedir. Örneğin; AZ91 alaşımı Mg-9Al- 1Zn'yi ifade etmektedir[17].

Magnezyum parçaların üretiminde en yaygın kullanılan yöntem döküm olup, magnezyumun yapısal uygulamalarının yaklaşık % 98'i bu şekilde imal edilmektedir[18]. Magnezyum alaşımların dökümünde genellikle kalıp döküm yöntemleri kullanılmaktadır[19]. Magnezyum alaşımları "mükemmel akışkanlık ve hidrojen porozitesine daha az duyarlılık" gibi katılaşma özelliklerine sahip olup, alüminyum ve bakır gibi döküm metallerinden daha iyi dökülebilmektedir[17]. Öte yandan, ergiyik haldeki magnezyum alaşımlarının yüksek alevlenebilirliği önemli bir döküm problemidir. Ergiyik haldeki metalin uygun curuf veya atmosfer altında korunması gerekmektedir. Günümüzde gaz atmosferi olarak hava, karbondioksit ve sülfür hegzaflorid karışımları çoğunlukla tercih edilmektedir[19].

Döküm magnezyum alaşımları; yüksek verimlilik, boyutsal doğruluk ve net şekil eldesinde yaygın olarak kullanılmakla birlikte, çeşitli döküm kusurlarını barındırması ve döküm malzemenin zayıf mekanik özellikleri sebebiyle artan sanayi ihtiyacını karşılayamamaktadır[20]. Haddeleme, ekstrüzyon, dövme gibi plastik yöntemlerle şekillendirilen magnezyum alaşımları daha yüksek mekanik özellikleri ile dikkat çekmeye başlamıştır[21]. Ayrıca, işlenmiş Mg alaşımlarında; döküm porozitesi ve kavitasyon gibi döküm kusurları önlenerek mekanik özellikler döküm olanlara göre daha üstün hale getirilir[20]. İşlenmiş magnezyum alaşımlarının haddeleme prosesi ile şekillendirilmesi yüksek verimlilik ve dayanım için alternatif bir yöntem olmuştur. Ancak, magnezyum alaşımlarının haddeleme prosesi oda sıcaklığındaki düşük süneklik özelliği nedeniyle kısıtlanmaktadır[21].

Bu çerçevede, magnezyum alaşımlarının normal ve yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanım, iyi süneklik ve makul fiyatlı olması yönünde çalışmalar devam etmekte olup,

söz konusu alaşımların daha geniş kullanımını sağlamak için anılan özellikler belirleyici parametreler olarak görülmektedir.

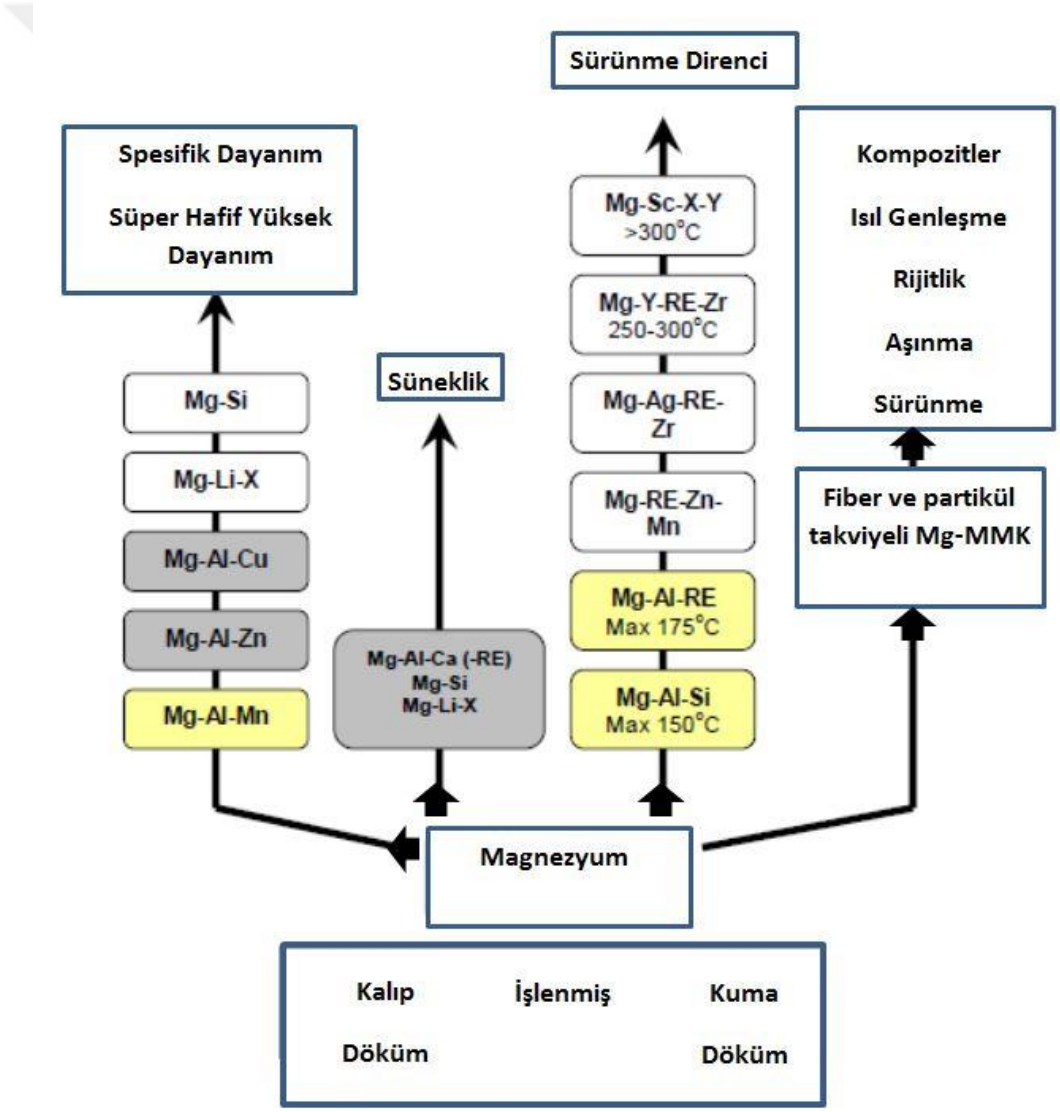
2.2 Magnezyum Alaşımlarının Gelişimi

Magnezyum alaşımlarının gelişimi 1940'lı ve 1950'li yıllarda altın bir dönem yaşamıştır. Magnezyumun askeri uygulamaları çeşitli magnezyum alaşımlarının gelişmesine yol açmış ve savaş sonrası dönemde bu alaşımların bir kısmının sivil uygulamalarda kullanılmasını sağlamıştır. Özellikle, 1970'lerde Volkswagen Beetle ve Mg'nin ilk kullanıcısı olan Super Beetle, hava soğutmalı bir Mg motor bloğuna sahiptir. 1980'lerde otomotiv sanayisi gibi maliyete duyarlı endüstrilerin ilgisi başta çelik ve dökme demir olmak üzere diğer malzemelere kayarken, havacılık endüstrisi ise polimer kompozitlere bakmaya başlamıştır. 1980'ler ve 1990'lar, magnezyuma ilgi açısından uyku dönemi olarak düşünülmektedir.

1990'lı yıllardan bu yana, ağırlığa duyarlı uygulamalarda Mg kullanımı yeniden ilgi görmeye başlamıştır. Ulaşıma dayalı endüstrilerde, yirmi birinci yüzyılın başlaşması ile araçlarda yakıt ekonomisi ve yüksek performans sağlamak için ağırlık azaltma hedefleriyle karşı karşıya kalınmış bu amaçla da hafif malzemeler aranmaya başlamıştır. O dönemin başında, üç ya da dört büyük ticari Mg alaşım sistemi bulunmakta olup bunlar; Mg-Al-Zn, Mg-Al ve Mg-Zn-Nadir toprak (RE) ve Mg-RE'dir. 1990'lı yıllarda, yapısal uygulamalar için magnezyum kullanımının çoğu kalıp dökümünde (36 kt), bunun % 90'ı da bir alaşımda AZ91D (Mg−9wt%Al−1wt%Zn)'de idi. Daha sonra, sünekliklerinin daha yüksek olması nedeniyle, Zn içermeyen Mg-Al (AM) döküm alaşımları kullanılmıştır. RE'yi içeren alaşımlar, havacılık endüstrisinde de olsa, yüksek maliyetlerinden ötürü otomobil üreticileri tarafından kolaylıkla benimsenmemiştir.

2000'li yılların başında, yüksek sürünme direnci ve düşük-orta-maliyetli döküm alaşımlarının geliştirilmesi, güç aktarma organları uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Mg-Al alaşımları RE ile ve alkalin toprak elementleri (RE, Ca, Sr) ile ilk kez kombine edilmeye başlanmıştır. Noranda tarafından geliştirilen magnezyum - alüminyum - stronsiyum alaşımı (AJ62), 2004 yılından 2009 yılına kadar BMW motor bloklarında kullanılmıştır. Bu faaliyetler hem Kuzey Amerika'da hem de Avrupa'da

istikrarlı bir Mg tedarikçisi tabanını geliştirmek için yeterli olmamıştır ve on yılın (2000-2010) ikinci yarısında Çin'de düşük maliyetli Mg üretimine rağmen, ulaştırma endüstrilerinde magnezyumun geniş çapta uygulanması sağlanamamıştır. 2010 yılından itibaren başlayan yeni on yılda, Mg dövme alaşımları otomotiv gövdesinde (kapaklar, ön uç yapısı, çatı direkleri) kullanılması ile ilgi görmektedir. Dövme magnezyum alaşımlarının şekillendirilebilirliğini geliştirmek için ekstrüzyon ve levha alaşımları şu anda geliştirilmektedir. İlginç olarak bu alaşımlar; sürünmeye karşı dirençli döküm alaşımları gibi magnezyum için RE ve Sr ilavelerine de dayanmaktadırlar (Şekil 2.2). Gelişmiş özelliklere sahip magnezyum alaşımları geliştirmek için çok daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır[22].



Şekil 2.2 Magnezyum alaşımlarının gelişme yönleri[23]

2.3 Magnezyum Alaşımları

1.74 gr/cm^3 özkütlesi ile alüminyumdan % 36, çelikten % 78 daha hafif olan magnezyum alaşımları, yapısal metaller arasında en hafif olanıdır [24]. Magnezyum kullanımı 1990'lı yılların başlarından beri önemli ölçüde büyümüştür ve otomotiv endüstrisinde yaygınlaşmaya devam etmektedir [25]. Magnezyumun özelliklerini geliştirmek için alaşım elementleri katılarak döküm ürünler elde edilmektedir. Mg hegzagonal bir kafes yapısına sahiptir ve sahip olduğu tane çapı da çok fazla sayıda elementle katı çözünebilirliğe müsaade eder. Alaşımlandırmadaki esas prensip malzemenin dayanım özelliklerini geliştirmektir. Mg yapısal bir malzeme olarak kullanıldığında Al, Mn, RE, Ag, Th, Ce, Zn ve Zr gibi elementler katılarak alaşımlandırılır. Bu elementlerin biri veya birkaçı ile alaşımlandırıldığı zaman alaşımlar genellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olur. Mg alaşımlarındaki en çok kullanılan alaşım elementi Al'dir [26].

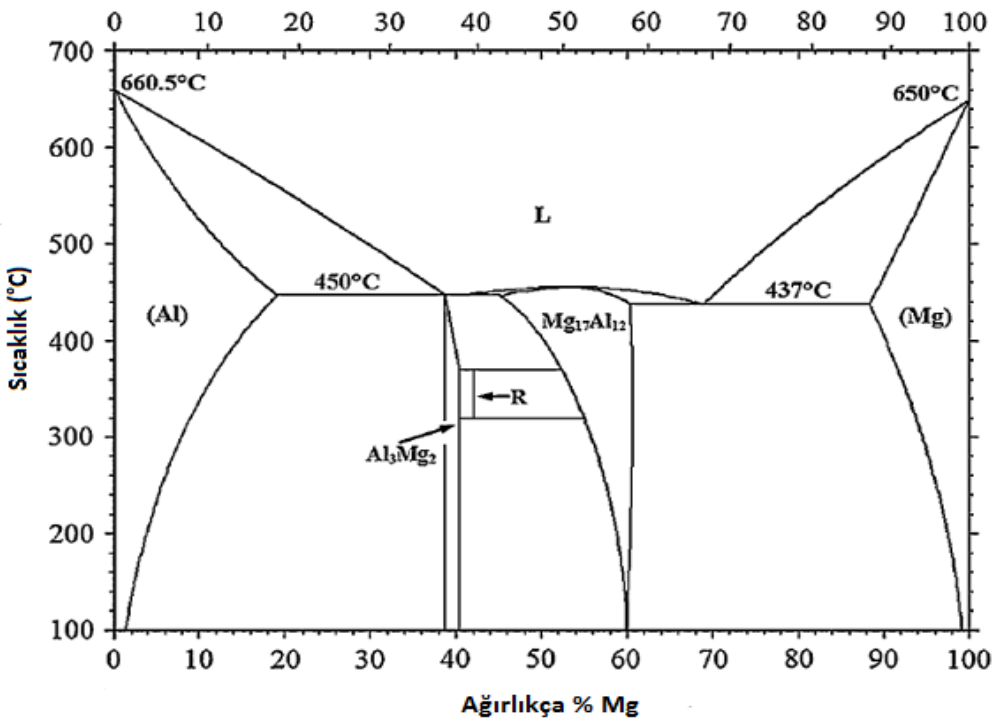
2.3.1 Mg–Al Alaşımları

Mg-Al ikili sistemi, en yaygın ticari Magnezyum alaşımlarının merkezini oluşturmaktadır. Tüm alaşım ilaveleri içerisinde mekanik özelliklerini arttırması ve soğuma aralığını genişleterek alaşımı daha dökülebilir kılması yönünden Al en çok tercih edilendir. Uygun ikili fazlarda, Al; mukavemet, süneklik, dökülebilirlik ve korozyon direnci bakımından iyi bir denge sağlar.

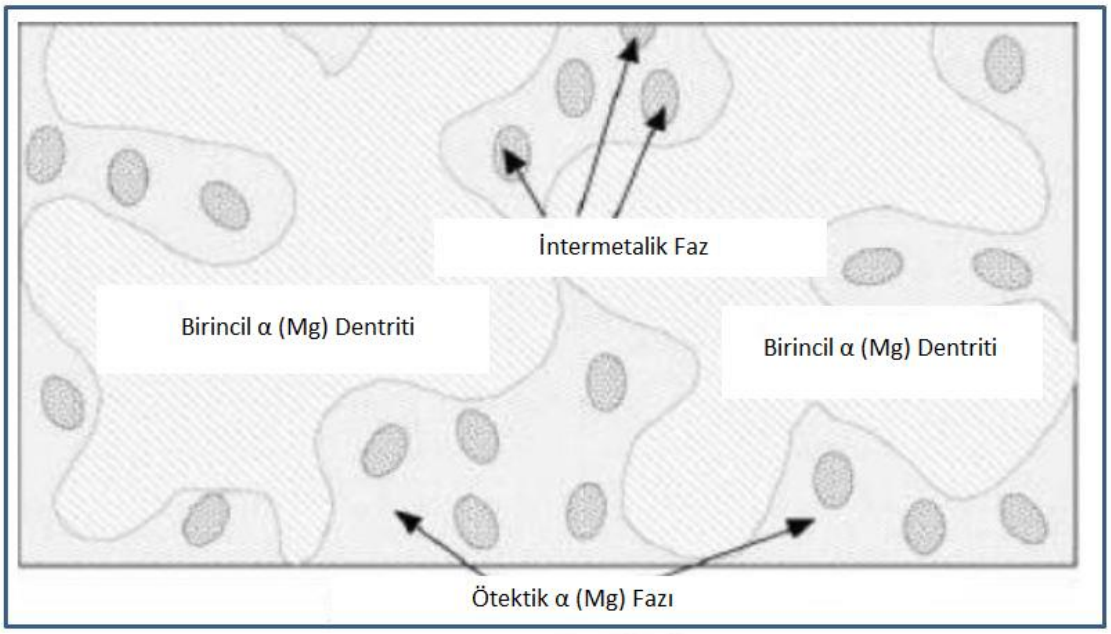
Mg-Al ikili faz diyagramı, döküm magnezyum alaşımlarında en eski ve en yaygın kullanılan diyagramdır. Al'nin Mg içindeki maksimum çözünürlüğü, oda sıcaklığında ağırlıkça yaklaşık % 2.1 ile ötektik noktada (437 °C) ağırlıkça % 12.6 arasındadır.

Şekil 2.3'te magnezyum-alüminyum faz diyagramı verilmiştir. Ayrıca, (2.1)'de yer alan eşitlik, primer magnezyum (α-Mg) ile intermetalik faz β ($Mg_{17}Al_{12}$) arasındaki ötektik reaksiyonu temsil eder. β fazı, ağırlıkça yaklaşık % 33 Al içeriği ile 437 °C'lik bir sıcaklıkta oluşur. Dökümlerde ötektik yapıların gözlenmesi, Şekil 2.4'de görülen yarı-kararlı veya denge-dışı katılaşmayı belirtir. Aksi halde, bu alaşımların dengede katılaşma mikroyapısı % 100 birincil magnezyumdan oluşacaktır. β fazı, dökümün soğutulması sırasında oluşur ve Mg-Al alaşımlarının nihai mikroyapısında görülebilen tane sınırlarında tercihen çökelir.

$$T = 437°C \quad \text{Sıvı} \xrightarrow{\text{katılaşma}} \text{Mg (katı çözeltisi)} + Mg_{17}Al_{12} \qquad (2.1)$$



Şekil 2.3 Magnezyum- alüminyum faz diyagramı[15]



Şekil 2.4 Magnezyum- alüminyum alaşımının ötektik mikroyapısı[15]

Magnezyum alaşımları nihai mikroyapısı ağırlıkça % 2'den fazla Al içerdiği durumda farklı ötektik morfolojiler gözlemlenmektedir. Alüminyum içeriği ve soğutma hızının ötektik morfolojiyi etkilediği bildirilmiştir. Ötektik faz genellikle iki morfoloji gösterir: kısmi ayrık ve tamamen ayrık. Kısmi ayrık durumu β-faz içerisindeki ötektik α-Mg fazı ile karakterize edilir ve tamamen ayrık durumu ise iki ötektik fazın tamamen ayrı olması ile karakterize edilmektedir. Ötektik fazın oluşumu ve morfolojisi, intermetalik β-fazın boyut, şekil ve dağılımında büyük rol oynamaktadır.

İntermetalik β fazı çok kırılgandır ve bu nedenle sünekliği azaltır fakat aynı zamanda alaşımların mukavemetini arttırmaktadır. β-fazının mevcut miktarı, dökümün soğuma hızı ve mevcut alüminyum miktarına bağlıdır. Alüminyum içeriği fazla alaşımlar, daha yüksek maksimum çekme ve akma mukavemeti değerlerine sahiptir. Örneğin; ağırlıkça yaklaşık % 6 Al içeren bir magnezyum alaşımı olan AM60, AZ91'den daha düşük çekme mukavemetine sahiptir ancak kopma uzaması daha fazladır. Bu, AM60 alaşımlarının genellikle AZ91'e kıyasla kırılmadan önce daha fazla enerji absorblayabileceği anlamına gelir[15].

Genellikle AZ serisi alaşımların mikroyapısında iki tipik faz gözlenir; birincil Mg fazı ve ötektik $Mg_{17}Al_{12}$ fazı. Mangan (ağırlıkça <% 0.3), Mg-Al alaşımlarında yaygın olan üçüncü ilavedir ve alüminyum ve demir (Al3 (Fe, Mn)) ile intermetalikler oluşturarak Fe, Ni ve Cu safsızlıklarını ortadan kaldırıp korozyon direncini geliştirir.

$Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik bileşik fazı, yaşlanmayı takiben çözelti işleminden sonra ortaya çıkan tek çökeltidir. Bu çökelti ya sürekli (genel) ya da kesintili olarak (hücresel) meydana gelebilir. Literatürde bu tip çökeltilerin bazal düzleme paralel ince plaka morfolojisinde bulunduğu ve bu bakımdan, bu düzlemde hareketi sağlayan yeterli miktarda dislokasyona sebep olmadığı bildirilmiştir. Dolayısıyla, $Mg_{17}Al_{12}$ fazının mekanik özelliklerin belirlenmesinde etken rol oynadığı öne sürülmüştür. Bununla birlikte, önemli bir dezavantaj Mg-Al sisteminin ötektik morfolojisi ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazından dolayı yüksek sıcaklık özellikleri zayıf kalmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan ticari Mg-alaşımları Mg- Al sisteminden AZ veya AM serisi alaşımlarıdır. Son yıllarda, sürünme ve korozyon direncinin optimal kombinasyonu ile yeni magnezyum alaşımları

geliştirmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. AZ, AM, AS, AE, AX ve AJ gibi çeşitli Mg-Al alaşımları, major ve üçlü alaşım elementlerinin gösterildiği Çizelge 2.4'te verilmektedir.

Çizelge 2.4 En çok kullanılan Mg-Al esaslı alaşım sistemleri[27]

ALAŞIMLAR	
Mg-Al alaşım sistemi	**Kısaltma**
Mg-Al-Zn	AZ
Mg-Al-Mn	AM
Mg-Al-Si	AS
Mg-Al-RE	AE
Mg-Al-Ca	AX, MRI
Mg-Al-Sr	AJ

2.3.2 Mg–Zn Alaşımları

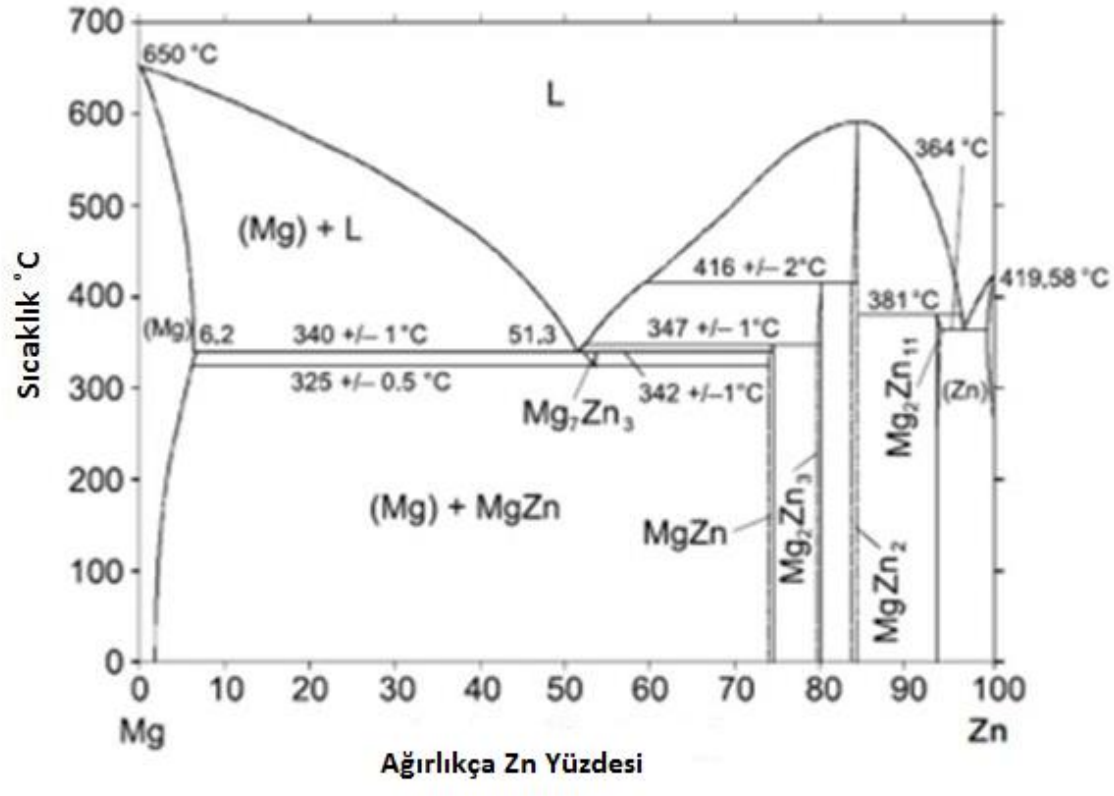
Çinko önemli bir alaşım elementidir ancak nadiren ana element (ZK, ZH, ZM, ZC ve ZE alaşımları serisi) olarak işlev görür. Şekil 2.5'deki ikili faz diyagramı, ağırlıkça % 51.3'lük bir ötektik noktası göstermektedir. Ötektik sıcaklıkta magnezyumda % 6,2 oranında çinko çözünürlüğü vardır. Alüminyumdan sonra ikinci önemli alaşım ilavesi olarak kabul edilir. Bununla birlikte, dökülebilirlik ve dayanım bakımından alüminyum kadar etkilidir.

Çözünen Zn atomları Mg matrisindeki çözünürlüğünü aştığında hem katı ergiyik dayanımı etkisi hem de ikinci faz partikülleri dayanımı etkisi ile Mg matrisini güçlendirir.

Ticari ZK60 alaşımının (Mg-6Zn-0.6Zr) dayanım ve süneklik bakımında iyi bir kombinasyon oluşturduğu görülerek en güçlü ve uygun maliyetli işlenmiş magnezyum alaşımlarından biri olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, bu ikinci faz bileşenleriyle dayanımın arttırılması, beraberinde süneklikte bir azalmaya sebep olmaktadır. Bu nedenle, işlenmiş Mg alaşımları büyük miktarda homojen uzama değerlerine ihtiyaç duymakta olup, genellikle 1-4 % aralığı gibi düşük Zn içerirler. Ayrıca, birçok ticari magnezyum alaşımı yüksek sıcaklıklarda sürünme direnci ve çekme dayanımını

arttırmak için az miktarda nadir toprak elemetleri (RE) ilavesi yapılan Mg-Zn ikili alaşım sistemine dayanılarak oluşturulur.

Buna örnek olarak kuma döküm olarak imal edilen ZE41 alaşımı verilebilir. Söz konusu alaşım ortalama dayanım gerektiren uygulamalar için geliştirilmiş olup, iyi dökülebilirlik özelliğine sahiptir.



Şekil 2.5 Mg-Zn ikili alaşım sistemi faz diyagramı[27]

2.3.3 Mg–RE Alaşımları

Nadir toprak metalleri, mischmetal (karışık metal) veya didimyum olarak Mg alaşımlarına eklenir. Mischmetal, ağırlıkça yaklaşık % 50 seryum içeren nadir toprak elementlerinin doğal bir karışımıdır. Geri kalan kısmı esas olarak lantan ve neodimyumdur. Didimyum ağırlıkça yaklaşık% 85 neodimyum ve ağırlıkça% 15 praseodimyumun doğal bir karışımıdır. Nadir toprak elementlerinin ilaveleri, yüksek sıcaklıklarda magnezyum alaşımlarının dayanımını arttırır. Aynı zamanda alaşımların katılaşma aralığını daralttığı için dökümde kaynak çatlağı ve gözenekliliğini de azaltırlar.

Tüm RE elementleri, magnezyum ile sınırlı çözünürlüğe sahip ötektik sistemleri oluştururlar.

Bu nedenle çökelti sertleşmesi oluşumu mümkündür ve olması istenir. Çünkü, RE içeren çökeltiler çok kararlıdır ve sürünme direncini, korozyon direncini ve yüksek sıcaklık dayanımını arttırır.

RE elementleri ilavesi genel olarak Mg matrisinden daha sert olan ikinci fazın oluşumuna neden olur. Potansiyel olarak Mg-RE alaşımlarında; $Mg_{12}RE$, $Mg_{17}RE_2$, Mg_3RE veya Mg_2RE fazları gibi RE elementlerinin tümünde yaygın olan birçok farklı faz oluşur. Çökelme morfolojisinin mukavemet ve sürünme direnci üzerindeki etkisi, çökeltiler ve dislokasyonlar arasındaki etkileşimlerin bilinememesi nedeniyle yeterince anlaşılamamıştır. Mg-RE alaşımlarında geçici ya da dengeli fazlar şeklinde çökelen esasen küresel olmayan parçacıklar genellikle Mg matriksinde rasyonel olarak yönlenir. Alaşım elementleri ilavesi sadece katı eriyikteki çözünen maddenin miktarını arttırmakla kalmaz aynı zamanda tane boyutunu da düşürebilir. Bu da her ikisinin de dayanımı arttırmasını sağlar. Öte yandan ikinci faz miktarının artışının, genellikle boşluk ve mikro çatlaklar için çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak kırılma uzamasını azaltması beklenir.

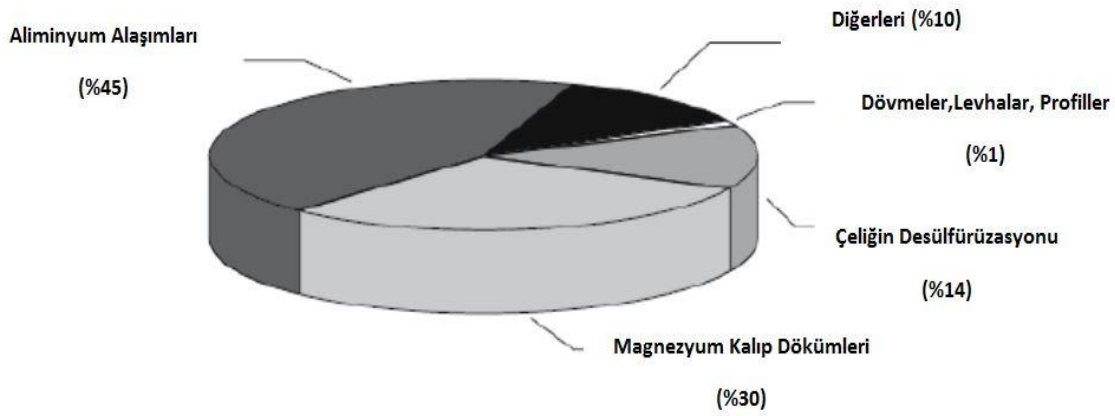
Bununla birlikte, bu fazların katılaşma koşulları altında hangi tür veya formda çekirdekleneceği belli değildir. Örneğin, Mg-Nd sisteminde, $Mg_{12}Nd$ fazının bir denge ya da metastabil bir faz olup olmadığı hakkında tahminler vardır. Mg-La sisteminde de $Mg_{17}La_2$'nin aksine $Mg_{12}La$'nın oluşumu ile ilgili benzer bir tartışma vardır[27].

2.4 Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum öncelikli olarak alüminyum alaşımlarında bileşen olarak kullanılır. Magnezyum alaşımlarının % 30'u basınçlı döküm için kullanılır ve yalnızca % 1'i levha gibi şekillendirilmiş ürünler için de kullanılır (Şekil 2.6). Ticari magnezyum alaşımları arasında levha üretiminde en yaygın kullanılan alaşım AZ31'dir.

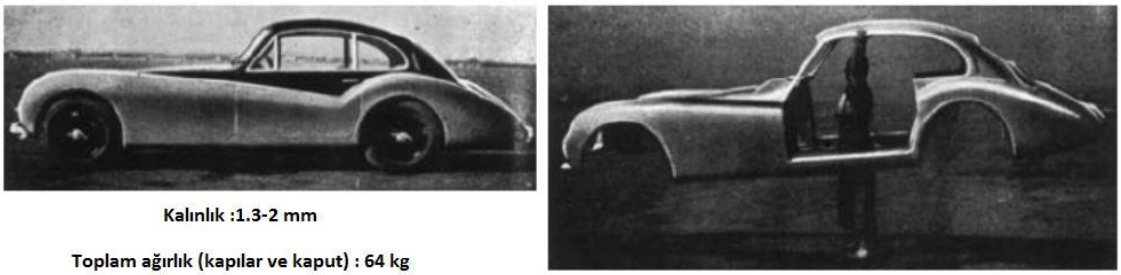
Magnezyum alaşımı levhaların kullanımının az olmasının temel nedeni, oda sıcaklığında zayıf şekillendirilebilirlik göstermesidir. Bununla birlikte, 200°C'nin üzerindeki

sıcaklıklarda süneklikleri önemli ölçüde artar. Bu nedenle şekillendirilebilmekte ancak yüksek sıcaklıklarda şekillendirme işlemi üretim maliyetini arttırmaktadır.

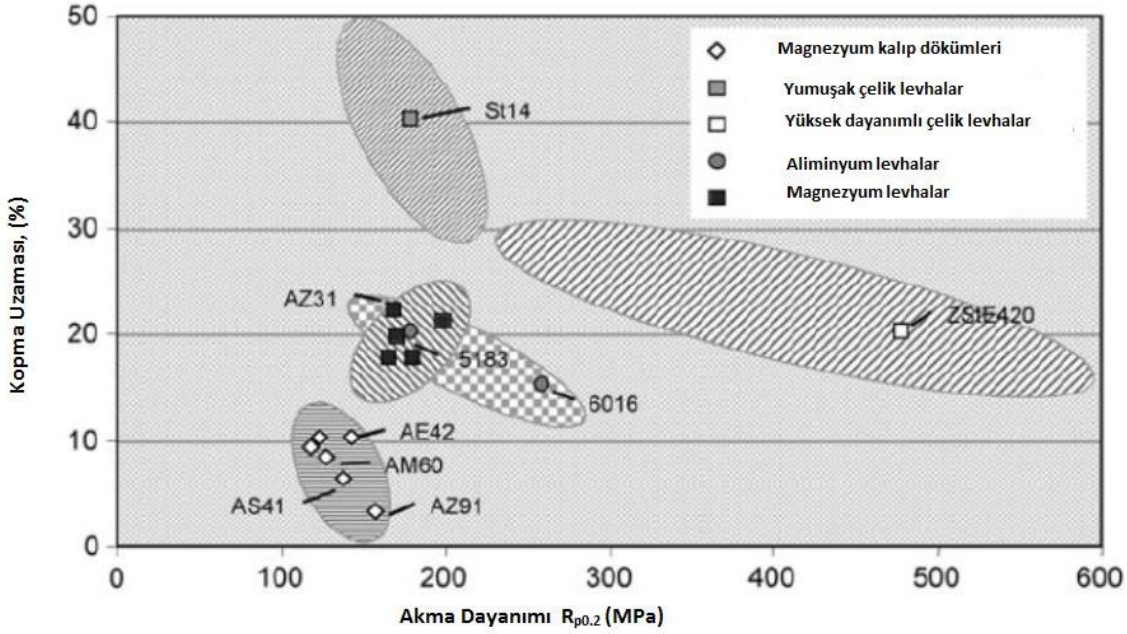


Şekil 2.6 Magnezyumun temel kullanım alanları

Araç gövdelerinde magnezyum levha kullanılması amacıyla çeşitli girişimler başlatılıp Allard tarafından 1952'de çok hafif magnezyum gövde prototipi sadece 64 kg'lık bir toplam ağırlıkla geliştirilmiştir (Şekil 2.7). Fakat düşük maliyetli ve iyi şekillendirilebilir olan çelik, son 50 yıldır magnezyumu kenara çekilmeye zorlamıştır. Artan çevresel endişelerle birlikte, otomotiv endüstrisi magnezyum alaşımlarına tekrar ilgi göstermeye başlamıştır. Magnezyum alaşımlı levhanın otomotiv gövde uygulamalarında kullanılan geleneksel alüminyum alaşımlı levha ile benzer çekme dayanımı özellikleri Şekil 2.8'de gösterilmektedir[28].



Şekil 2.7 Allard tarafından 1952'de geliştirilen magnezyum plakadan yapılmış otomotiv gövdesi [28]



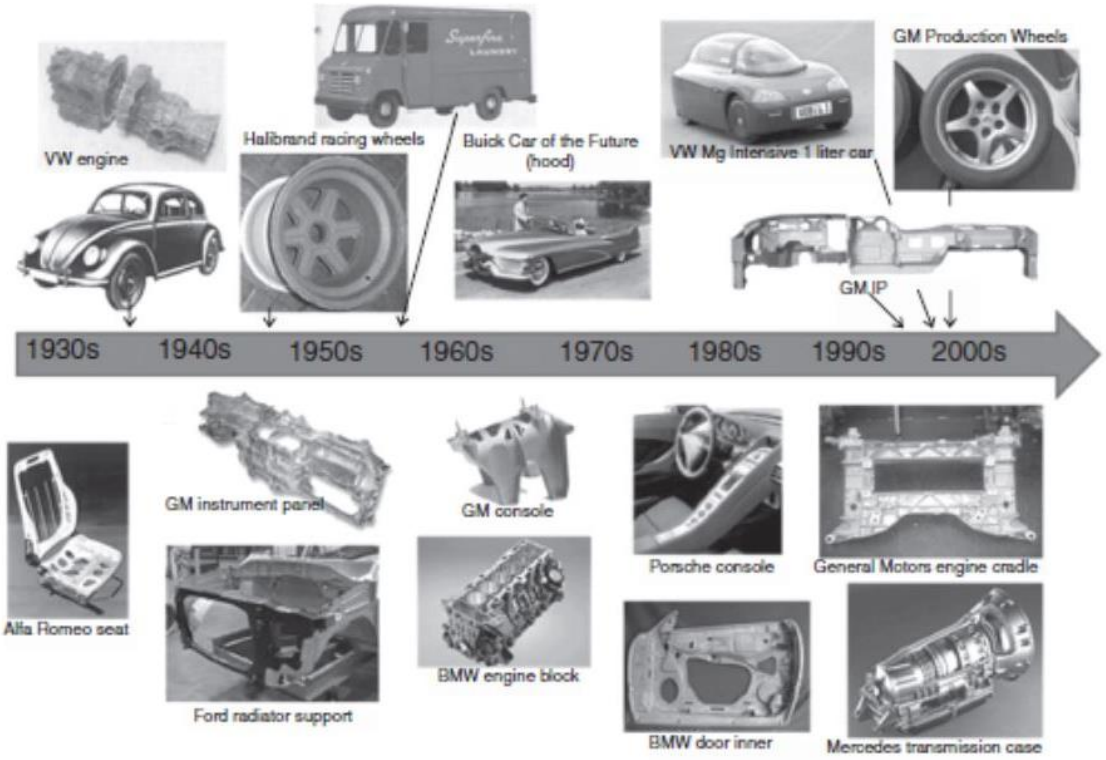
Şekil 2.8 Otomotiv gövde konstrüksiyonunda kullanılan farklı malzemelerin mekanik özellikleri [28]

2.5 Magnezyumun Otomotiv Alanındaki Uygulamaları

2.5.1 Tarihsel Uygulamaları:

Otomotiv sektöründe magnezyum kullanımının uzun bir geçmişi vardır. Geçmiş ve güncel uygulamaların resimli bir özeti Şekil 2.9'da verilmiştir. Magnezyum'un otomotiv alanında ilk kullanımı 1918 yılında Indy 500 için yapılan yarış motoru pistonlarıdır. Magnezyum'un otomotiv malzemesi olarak kullanımının başka bir erken dönem örneği de 1931 Chevrolair de kuma döküm krank yuvalarıdır. Magnezyum kuma dökümün ticari uygulama örneklerine İngilitere'de 1930'larda şehir otobüslerinin karterleri ve traktörlerin şanzıman gövdelerinde rastlanmaktadır.

Almanya'da da yüksek basınç döküm işlemiyle krank yuvaları ve gövdeler üretilmiştir. Magnezyum kullanımı 1930'lar boyunca artmış, sonrasında ikinci dünya savaşında ise katlanarak devam etmiştir. Volkswagen Beetle'ın girişiyle magnezyumun otomotiv alanında tekrar tüketimi hızlanmış ve 1971 yılında zirveye ulaşmıştır, ana uygulamaları hava soğutmalı motor ve vites kutusu olup ikisi birlikte yaklaşık 20 kg ağırlığındaydı.



Şekil 2.9 Magnezyumun otomotiv alanındaki uygulamaları [29]

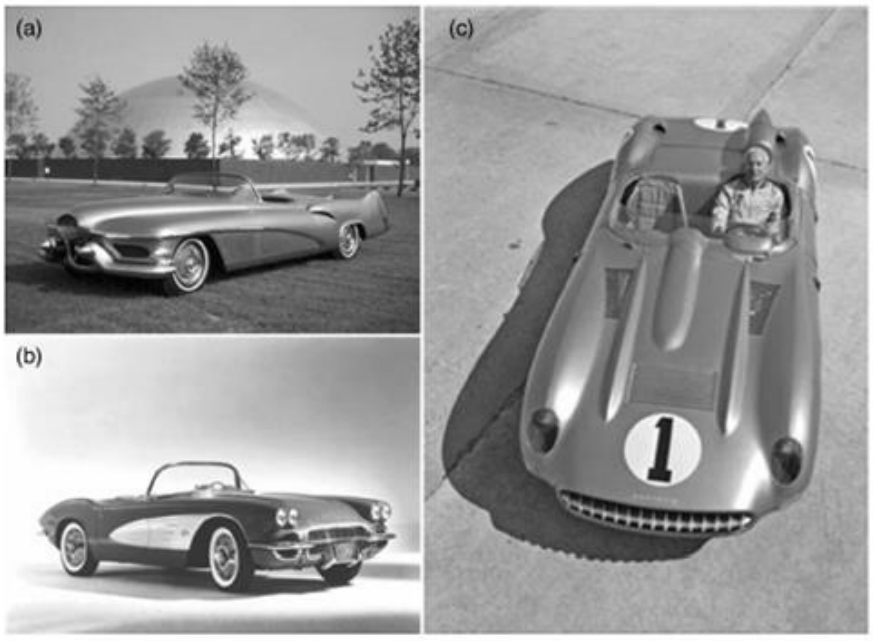
Fakat birden çok faktörün ortaya çıkması ve biraraya gelmesi yapısal güç aktarım bileşenlerinde magnezyum kullanımının azalmasına ve nihayetinde 1970'lerden sonra tasfiyesine neden olmuştur. Bu faktörlerden biri de motorda çok daha fazla güç isteği olmuş motorun hem çalışma sıcaklığını hem de yükünü de artırmıştır. Sonucunda motorun hava soğutmalıdan su soğutmalıya dönüşümüne neden olmuş; AZ81 alaşımı ve sonraki AS41 veya AS21 alaşımları istenen çalışma koşullarına uyum gösterememişlerdir.

Su soğutma sistemi magnezyumu zayıf korozyon direnci nedeniyle diğer motor malzemelerine kıyasla dezavantajlı duruma düşürmüştür. O zamanlarda demir, bakır ve nikel empüritelerinin (ppm düzeyinde) magnezyumun korozyonunun artmasına etkisi farkedilmemişti. 1980'lerde AZ91C ve AM60A alaşımlarının sırasıyla yerini alan yüksek saflıktaki AZ91D ve AM60B alaşımları geliştirilene kadar otomotiv uygulamalarında magnezyum kullanımı azalmış, magnezyum alaşımlarının maliyeti artmış ve magnezyumun otomotiv uygulamalarında kullanımı azalmıştır, ancak yine de bazı uygulamalar geriye kalmıştır.

Ford radyator desteği, BMW motor bloğu, BMW kapı içi, Mercedes şanzıman gövdesi, Porsche konsol, General Motors (GM) motor beşiği, GM gösterge paneli, GM konsol 1930, 1940, 1950, 1960 ve 1970'lerin magnezyum otomotiv uygulamalarıdır.

Magnezyumun karmaşık ve düşük kalınlıkta dökülebilirliği ve mükemmel akışkanlık yeteneğinin avantajıyla tarihteki magnezyum uygulamalarının büyük çoğunluğu döküm bileşenler olmuştur ancak levha ve işlenmiş bileşenler olarak da magnezyumun birçok otomotiv uygulamaları vardır. İlk ticari kara taşımacılığı uygulamaları 1950'lerin başında gelişmiştir. Magnezyum levha ve ekstrüzyonlarından yapılan uygulamalarla birlikte magnezyum sac levhalar içeren özellikte olan MetroLite kamyonları 1955 ve 1965 yılları arasında üretildi.

Bu kamyonlar yükleme kapasitesini artırdılar ve aşırı şekillendirme gerektirmediklerinden magnezyum uygulamaları için mükemmeldiler. GM, 1951'de Buick LeSabre motor kaputu prototipleri (magnezyum ve alüminyum gövde panelli konsepte sahip araba), 1957'de Chevrolet Corvette SS Race Car için çeşitli gövde panelleri üretti (magnezyum sacdan yapılan) (Şekil 2.10). Fakat, otomobil endüstrisinin genel akımında, yüksek miktarlardaki üretimlerde magnezyum sac/levha kullanılmamıştır [29].



Şekil 2.10 GM ve Chevrolet Corvette magnezyum uygulamaları (a) Buick LeSabre (b) Chevrolet Corvette ve (c) Chevrolet Corvette SS Yarış Arabası [29]

2.5.2 Güncel ve Gelecek Uygulamalar

Geleneksel içten yanmalı benzinli motorlu veya alternatif enerjili çekiş sistemine sahip araçlarda yakıt ekonomisini geliştirme stratejilerinden biri de aracı hafifletmektir. Magnezyum, en hafif yapısal metal olarak araçların ağırlığının azaltılması konusunda umut vadeden bir malzeme olarak ortaya çıkmış ve dünyadaki birçok ülkede araştırma ve geliştirme odağı olmuştur.

Çizelge 2.5'de otomotiv endüstrisindeki magnezyum alaşımları uygulamalarının özeti verilmiştir.

Çizelge 2.5 Otomobillerde Global Magnezyum Uygulamaları [18]

Sistem	Bileşeni	Kuzey Amerika	Avrupa	Asya
İç	iç gösterge paneli	Evet	Evet	Evet
İç	torpido	Evet		
İç	koltuk iskeleti	Evet	Evet	Evet
İç	koltuk yükseltici	Evet	Evet	Evet
İç	koltuk teknesi (altı)	Evet	Evet	
İç	konsol bağlantısı	Evet		
İç	airbag yuvası	Evet		
İç	orta konsol kapağı	Evet	Evet	
İç	direksiyon simidi	Evet	Evet	Evet
İç	kilit yuvası	Evet		
İç	direksiyon mili parçaları	Evet	Evet	Evet
İç	radyo muhafazası	Evet	Evet	
İç	torpido kutusu kapağı	Evet		
İç	cam motoru yuvası	Evet	Evet	
Gövde	kapı iç paneli		Evet	
Gövde	arka bagaj kapağı iç paneli	Evet	Evet	

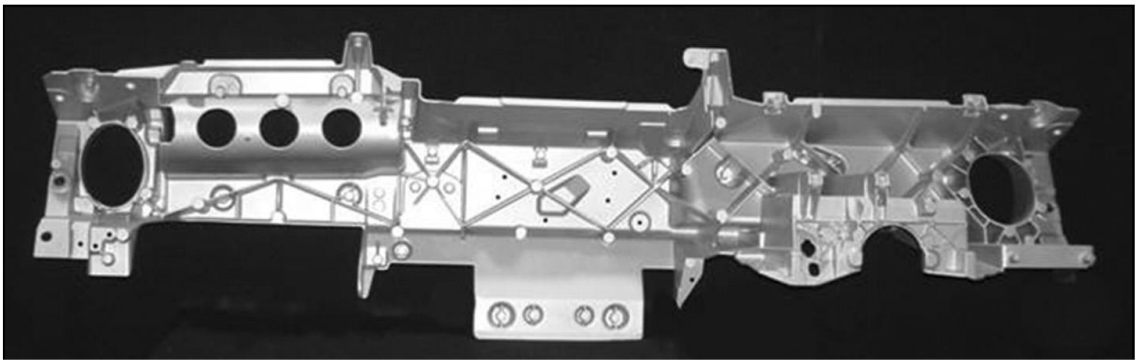
Gövde	çatı iskeleti	Evet	Evet	
Gövde	güneş tavan paneli	Evet	Evet	
Gövde	ayna bağlantısı	Evet	Evet	
Gövde	yakıt doldurma kapağı	Evet	Evet	
Gövde	kapı tutamağı		Evet	Evet
Gövde	yedek lastik taşıyıcı	Evet		
Şase	direksiyon (yarış)	Evet	Evet	Evet
Şase	ABS montaj bağlantısı	Evet		
Şase	fren pedalı montaj bağlantısı	Evet		Evet
Şase	fren / gaz bağlantısı	Evet		
Şase	fen / debriyaj bağlantısı	Evet		
Şase	fren pedalı kolu	Evet		
Çekiş	motor bloğu		Evet	
Çekiş	valf kapağı/ kap kapağı	Evet	Evet	Evet
Çekiş	4WD şanzıman kutusu	Evet		
Çekiş	şanzıman kutusu		Evet	Evet
Çekiş	debriyaj yuvası & pistonu	Evet		
Çekiş	emme manifoldu	Evet	Evet	
Çekiş	motor yağı haznesi		Evet	Evet
Çekiş	alternatör AC bağlantısı	Evet		
Çekiş	şanzıman statörü	Evet		
Çekiş	yağ filtresi adaptörü	Evet		Evet
Çekiş	elektrik motoru yuvası	Evet		

Magnezyum; direksiyon, direksiyon mili parçalarında ve gösterge panelinde preslenmiş çeliğin yerini alarak iç uygulamalarda dünya çapında önemli ilerlemeler elde etmiştir. Güç aktarım mekanizması alanında, Kuzey Amerika yüksek hacimli kamyon üretimindeki magnezyum 4WD (4 çeker) şanzıman muhafazası uygulamalarında liderdir; Avrupa ise yeni geliştirilen sürünmeye dayanıklı magnezyum alaşımlar kullanarak motor blokları ve şanzıman kutularında magnezyum kullanımını genişletmektedir. Sınırlı bir miktar gövde ve şasi bileşenleri günümüzde magnezyumdan yapılmaktadır. Bu da magnezyumun hafif araç yapımı uygulamalarının genişlemesinde büyük fırsat sunmaktadır.

2.5.2.1 İç kısım

İç kısımda korozyon daha az sorun olduğundan, gösterge paneli (IP) ve direksiyon yapılarındaki en büyük gelişme ile magnezyum uygulamalarının en çok görüldüğü alan olmuştur. 1961 yılında GM tarafından aynı parçanın çinko dökümüne oranla 4 kg gibi oldukça büyük bir ağırlık tasarrufu sağlayan ilk gösterge panelinin kalıp dökümü yapılmıştır.

Son on yılda magnezyum gösterge panellerinin tasarım ve kalıp dökümü müthiş bir şekilde gelişmiştir. Örneğin şu anki gösterge panellerinin kalınlığı 2-2,5 mm (önceki 4-5 mm olan gösterge panellerine oranla) olup daha fazla parça bileşiminden ve kütleden tasarruf sağlanmıştır. Şekil 2.11, GM'nin güncel Buick LaCrosse üretimindeki magnezyum kalıp döküm gösterge panelini (6.9 kg) göstermektedir.



Şekil 2.11 Magnezyum kalıp döküm gösterge paneli(Buick LaCrosse için) [18]

Yine de magnezyum gösterge paneli dökümü şimdilerde güçlü bir rekabetle karşılaşmaktadır. Alüminyum ektrüzyon gösterge panelleri Avrupa'da Mercedes

tarafından kullanılmaktadır (hidrolik presleme kullanılarak ya da kullanılmadan). Bükülmüş çelik borular kullanılarak yapılan gösterge panel tasarımları magnezyum kalıp döküm panellerden az bir miktar daha ağır fakat çok büyük ölçüde daha ucuzdur. Gösterge paneli üretimindeki kullanımının devamı ve genişletilmesi için magnezyum ince cidarlı döküm teknolojisi maliyet ve ağırlığı daha da azaltacak şekilde gelişmeye devam etmelidir. Ekstrüzyon magnezyum ve magnezyum sac bileşenler kullanılan borulu tasarımlar da araştırılmalıdır.

Magnezyum koltuk iskeleti kullanımı Almanya'da Mercedes'in üç noktalı emniyet kemerli, magnezyum kalıp döküm tümleşik koltuk yapısı kullandığı SL Roadster modelinde 1990'lar da başladı. Bu koltuk iskeleti 5 parçadan oluşmaktaydı (koltuk sırtlığı için 2 parça ve minder iskeleti için 3 parça) ve toplam 8.5 kg ağırlığa ve 2-20 mm arasında değişen cidar kalınlığına sahipti. Koltuk programı için malzeme seçiminde magnezyum; plastik, çelik sac ve alüminyum kökil döküm tasarımlara tercih edilmişti.

Magnezyum kalıp dökümler; yüksek dayanım, aşırı rijitlik, düşük ağırlık ve maliyeti en iyi kombinasyonda sunan AM50 ve AM20 yüksek sünekliğe sahip alaşımlarıyla yapılır. Gösterge paneli gelişimine benzer bir şekilde magnezyum koltuk tasarımı ve üretimi de son yıllarda önemli gelişmeler geçirmiştir. En son örneği Alfa Romeo 156'da kullanılan iki parçalı (sırt dayama ve minder) tasarımıdır.

Bugün koltuk iskeletlerinde kullanılan magnezyum kalıp dökümler 2 mm kadar inceliğe sahip olup, çok daha büyük ağırlık tasarrufu sağlamaktadırlar. Kuzey Amerika'da Chrysler firması minivanlarında "Stow-n-Go" koltuk ve bagaj sistemlerini yakın zamanda piyasada tanıtmıştır. Söz konusu sistemlerin kolay kullanılabilmesi için katlama mekanizmalarının hafif olması gerektiğinden; ikinci sıra koltuklarda az miktarda alüminyum kullanılmış ve üçüncü sıra katlanan koltukların arka çerçeveleri de magnezyum dökümden yapılmıştır.

Bununla birlikte, gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) ve alüminyum da bu uygulamalarda kullanılmaktadır. Magnezyumun hafif ve maliyet-etkin bir çözüm olarak koltuk bileşenlerinin üretiminde önemli ilerlemeler kaydedeceği tahmin edilmektedir.

2.5.2.2 Gövde

Gövde de magnezyum uygulamaları otomotivde kısıtlıdır fakat son yıllarda artmaktadır. 1997 yılındaki C-5 Corvette'in başlangıcından bu yana GM tek parça kalıp döküm tavan iskeleti kullanmaktadır. Magnezyum aynı zamanda Cadillac XLR roadster'ın açılan geri toplanabilir sert tavanında da kullanılmıştır. Ford F_150 kamyonları ve SUV'ların da radyatör desteği olarak kaplamalı magnezyum dökümleri ve Dodge Viper'ın da gösterge panelinin ön kısmı tek parça magnezyum kalıp döküm olarak imal edilmiştir.

Avrupa'da ince cidarlı magnezyum kalıp döküm gövde paneli uygulamalarına Volkswagen ve Mercedes öncülük etmişlerdir. Mercedes SClass Coupe'nin tek parça kalıp döküm kapı içi sadece 4.56 kg idi. 2010 Lincoln MKT arka bagaj kapı içi paneli 55 mph çarpma testi gereksinimlerini karşılayan ilk magnezyum kapaktır. Şekil 2.12'de görüldüğü üzere 8 kg'lık iç döküm muhtemelen ebat olarak dünyanın en geniş magnezyum dökümüdür (1379- 1316 mm).

Bu ince cidarlı dökümlü (yaklaşık 2mm) üretimlerin anahtarı, düzgün kalıp dolumu ve sertleştirme sağlayacak uygun yarıçap ve çubuk kullanılan tasarımda yatmaktadır. Kapak içleri gibi bu ince cidarlı kalıp dökümler malzeme maliyetini aşarak parça bütünlüğü bakımından magnezyumu çelik sac metal yapıya karşı dezavantajlı duruma düşürmektedir.



Şekil 2.12 HPDC magnezyum dökümü Lincoln MKT arka bagaj iç paneli [18]

2.5.2.3 Şasi

Döküm veya dövme magnezyum tekerlekler birçok yüksek fiyatlı yarış arabalarında yada yüksek performanslı roadster'larda kullanılmaktadır. Şekil 13, GM'nin Corvette'inde LPDC magnezyum alaşımlı tekerleği göstermektedir. Yine de, nispeten yüksek maliyeti ve olası korozyon sorunları magnezyumlu tekerleklerin yüksek miktarlı araç üretiminde kullanımını engellemektedir. Endüstriyel kullanımda ilk olan Chevrolet Corvette Z06'nın HPDC magnezyum beşiği (cradle) sadece 10,5 kg olup yerini aldığı alüminyum beşiğe (cradle) oranla % 35 kütle tasarrufu göstermektedir.

Bu beşik oda sıcaklığında ve yükseltilmiş sıcaklıklarda yüksek dayanım ve süneklik gösteren yeni AE44 (Mg-4Al-4RE) alaşımını kullanmaktadır. Tekerlekler, motor beşikleri ve kontrol kolları gibi ağırlıkta hafif ve düşük maliyetli magnezyum şasi bileşenlerinin üretimi magnezyum döküm işlemlerinin gelişimine bağlıdır. Alüminyum tekerler ve gövde parçalarının üretimi için çeşitli döküm işlemleri geliştirilmiştir. Bu işlemler, sabit kalıp döküm, düşük basınçlı kalıp döküm, sıkıştırma (squeeze)kalıp döküm ve yarı katı metal (SSM) döküm işlemlerini içerir.

Bu süreçlerin magnezyum alaşımlara başarılı bir şekilde uyarlanması magnezyum dökümleri bu alanda alüminyuma karşı daha rekabetçi yapacaktır. Örneğin; düşük basınçlı kalıp döküm ve sıkıştırma dökümde son zamanlardaki gelişmeler hafif ağırlıklı magnezyum kalıp döküm tekerlekler, kontrol kolları ve mafsallarını dövme alüminyum bileşenlere oranla rekabette daha maliyet–etkin yapacaktır. Düşük maliyetli, korozyondan etkilenmeyen kaplamalar, yorulma ve darbe dayanımı artırılmış magnezyum alaşımların geliştirilmesi ile şasi uygulamalarında magnezyumun daha yaygın kullanımını sağlayacaktır.

Günümüzde alüminyum dökümler ve ekstrüzyonlardaki içi boş yapılar, GM'nin orta ebatlı kaynaklı yapıdaki otomobillerinde; BMW 5 ve 7 serilerinin hidrolik presli borusal alt çerçevesi(şasi) gibi yüksek miktardaki beşik üretiminde kullanılmaktadır. İçi boşluklu tasarımlar katı dökümlere göre oldukça kütlesel tasarrufludur. Bu tür hafif ve yeterli/etkin şasi uygulamaları için içi boşluklu magnezyum döküm süreçlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.



Şekil 2.13. Chevrolet Corvette için LPDC magnezyum alaşımlı teker [18].

2.5.2.4 Çekiş sistemi

Çekiş sistemlerine ait dökümlerin çoğunluğu (motor bloğu, silindir kafası, transmisyon kutusu ve yağ karteri gibi) günümüzde alüminyum alaşımlarından yapılmaktadır. Magnezyum ile birlikte magnezyum alaşımlarının mükemmel dökülebilirlik özelliği sayesinde hafiflik en önemli kazanımlardandır. Şu anda, Kuzey Amerika'da üretilen milyonlarca pikap kamyonu ve spor araçlarının (SUV'lar) magnezyum transfer kutuları bulunmaktadır. VW ve Audi, Avrupa ve Çin'de yüksek miktarda magnezyumdan yapılan manuel şanzıman kasalarının üretimini yapmaktadır. Magnezyum vana kapakları, Kuzey Amerika, Avrupa ve Asya'daki birçok araç tarafından kullanılmaktadır.

Bu uygulamaların çalışma sıcaklıkları 120°C derecenin altındadır ve AZ91 mekanik özellikleri, korozyon direnci ve dökülebilirlik özelliklerinin mükemmel bileşimi ile tercih edilen alaşımdır.

Otomatik şanzımanlar; motor blokları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında sürünme dirençli magnezyum alaşımlar gerektirir. Mercedes'in 7 vitesli otomatik şanzıman yuvasında AZ91 alaşımı yerine sürünme direnci daha iyi olan AS31 alaşımı kullanılmaktadır. Honda ise Insight modelinde (düşük miktarlı hibrid benzin/elektrik)

karterinde (yağ deposu) ACM522 (Mg-5%Al-2%Ca-2%RE) olarak anılan yeni bir alaşımı uygulayarak alüminyum tasarımlara oranla % 35 ağırlık tasarrufu sağlamaktadır.

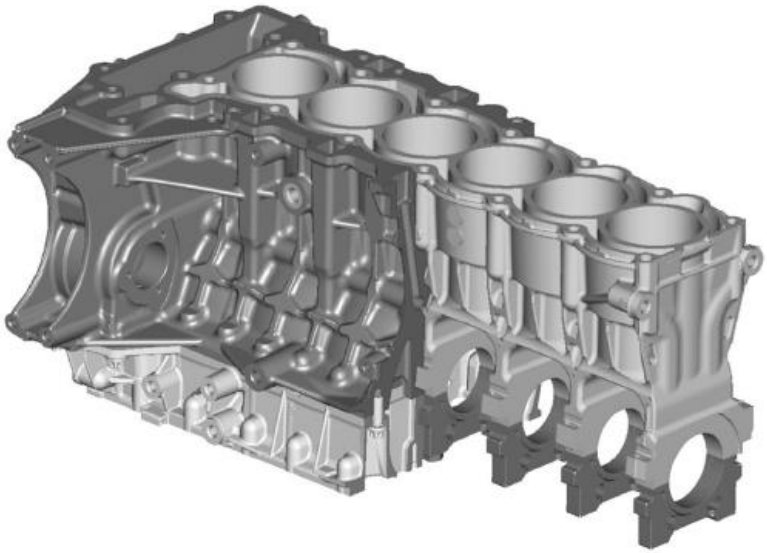
Diğer bir önemli gelişme de BMW Mg/Al kompozit motor bloğudur (Şekil 14). Kompozit blok; içerde alüminyumdan (toplam blok ağırlığının yaklaşık 2/3 ü) ve onu silindir gömleklerinin ve su soğutma katmanının üst bölümünde saran AJ62 (Mg-6%Al-2% Sr) magnezyum alaşımından (toplam ağırlığın 1/3 ü) oluşmaktadır. Hiperötektik alüminyum alaşım iç kısımda ilave gömlek teknolojisi kullanımından tasarruf sağlayarak, hem silindir kapağı hem de krank mili yatağı için cıvata bağlantılarını kolaylaştırmaktadır. İç kısım aynı zamanda su soğutma katmanını da içermekte olup magnezyumla birlikte ortaya çıkan soğutucu korozyonu sorunu potansiyelini de önlemektedir.

İç kısmı alüminyumla kaplı olan magnezyum yuva, sırası ile ilk olarak yağ kanallarına ve yardımcı/tahliye birimlerinin bağlantılarına yataklık etmektedir. Vites kutusu kapağı, hem alternatör hem de vakum pompası yuvası ile entegredir. Krank yatağının alt kısmı da aynı şekilde AJ62 magnezyum alaşımından kalıp döküm yöntemi ile üretilmiş olup içerisinde krank mili için sinterlenmiş döküm çelik parçalar bulunmaktadır. Bu kompozit tasarımı alüminyum bloktan 10 kg daha hafif olup 2000'den itibaren BMW tarafından üretilmektedir.

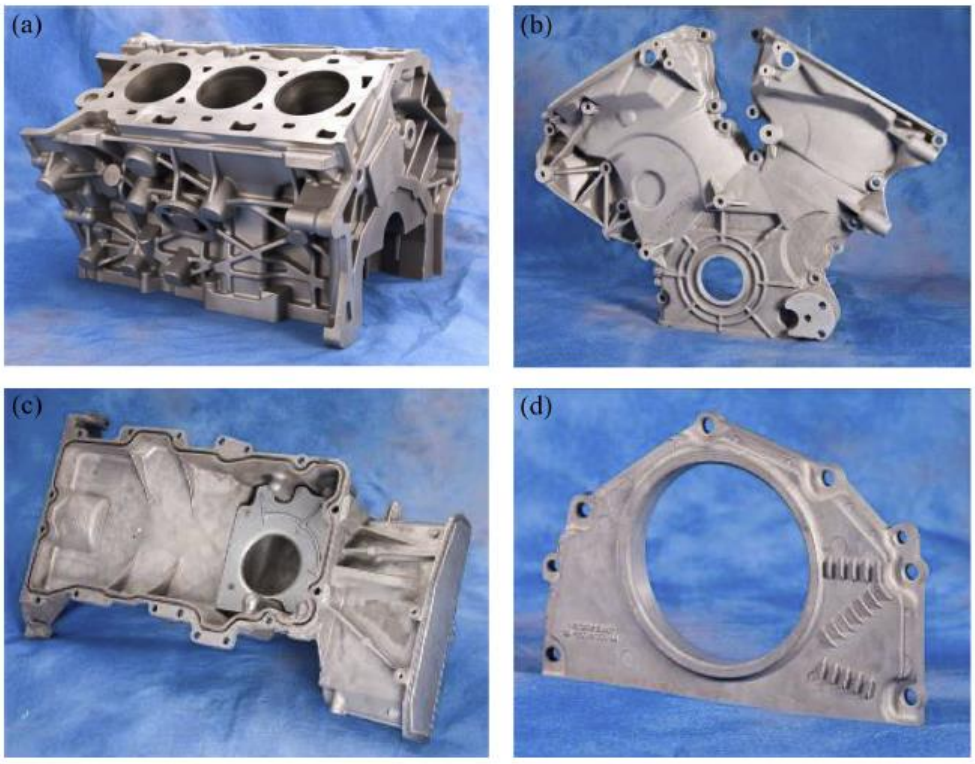
ABD'de Mg esaslı ürün gelişimi ABD Enerji Bakanlığı (DOE) ve ABD Otomotiv Malzemeleri Ortaklığının (USAMP) desteği ile Orjinal Ürün Üreticileri (GM, Ford ve Chrysler) liderliğinde gerçekleşmektedir. Bu amaçla USAMP'ın geliştirdiği "Magnezyum Döküm Çekiş Sistemi (aktarma organları) Projesi (MPCC)", V blok motorlarda magnezyum alaşımlarının alüminyum bileşenlerin yerini almasını hedeflemektedir. Üretilen MPCC silindir bloğunda % 25, tüm alüminyum dökümler magnezyumla değiştirildiğinde ise % 29'luk bir kütle tasarrufu sağlabildiği görülmüştür.

USCAR tarafından dökümle imal edilen magnezyum esaslı LPDC silindir bloğu, thixo kalıp döküm arka kapak taşıyıcı, HPDC yağ haznesi (karter) ve ön kapak ile diğer tüm parçaların temel alüminyum motordan alındığı prototip bir motor oluşturulmuştur (Şekil 2.15). Magnezyum yoğunluklu bu motorun dinamometre ile kumandalı

testlerinde çok önemli çıktılar elde edilmiş olup bu durum magnezyum çekiş sistemleri uygulamalarının geleceğine dair umut vaat etmektedir [18].



Şekil 2.14 BMW kompozit motor bloğu (alüminyum iç bölümünü açığa çıkaran, magnezyum dış görünümünü gösteren) [18]



Şekil 2.15 USCAR magnezyum çekiş sistemine ait döküm bileşenleri a) LPDC silindir bloğu, (b) Thixokalıplanmış cephe motor kapağı, (c) HPDC yağ karteri ve (d) HPDC arka conta taşıyıcısı [18]

2.6 Magnezyum Levha Alaşımları

Hafif ağırlıktaki magnezyum levha ürünleri; otomotiv, hafif-raylı (sistemler), yüksek hızlı trenler ve tüketici elektroniği uygulamalarında önemli oranda ilgi çekmiştir. Bu nedenle yeterli şekillenebilirlik ve mekanik özelliklere sahip magnezyum levhasını geliştirmek magnezyum alanındaki araştırmaların en önemli konularından biri olmuştur. Magnezyum levha imalatının geniş uygulamasını kısıtlayan teknik konulardan biri de; şekillenebilirlik, süneklik ve dayanımı birarada barındıran levha alaşımlarının eksikliğidir.

Haddeleme sürecinde gelişen sert yapı, levha alaşımın oda sıcaklıklarında şekillendirilmesinde de yapısal zorluğa neden olmaktadır. Geçen 15 yılda magnezyum alaşımlı levhaların yapısal zayıflatılması ve şekillendirilebilirliğine yönelik önemli çalışmalar yapılmıştır. Seyreltilmiş Ca veya Nd, Gd, Ce gibi rare-earth (RE)(nadir toprak elementleri) elementlerinin magnezyum alaşımlı levhalara eklenmesiyle, temel yapıyı önemli oranda zayıflattığı, böylece süneklik ve şekillendirilebilirliğin geliştirildiği bilinmektedir. Ayrıca RE ve Zn'nin ya da Ca ve Zn birlikte ilave edilmesi RE ve Zn' nin veya Ca ve Zn' nin tek başlarına ilave edilmesine oranla temel yapıyı daha da zayıflatmakta, daha iyi süneklik sağlamaktadır. Fakat, Mg-Zn-RE ve Mg-Zn-Ca levha alaşımları hala Al-1.2Si-0.4Mg (6016) gibi alüminyum levha alaşımlarına oranla daha az süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahiptir.

Mg levha alaşımlarının sünekliği üzerinde yapının önemli etkisi vardır. Haddeleme sırasında rastgele yönlenmiş olan Mg tanelerinin temel düzlemleri levhanın haddelenen yüzeyine paralele yakın sıralanacak şekilde yani sert temel yapı oluşturacak şekilde tercihli yeniden yönlenir.

Sert temel yapısı olan alaşımlı levhalarda temel kayma düzlemi, nadiren levhanın normal yönde (ND) plastik deformasyonuna (şekil değiştirme) izin verip, küçük bir gerilme sonrası kırılmaya, dolayısıyla da zayıf sünekliğe neden olur. Ca veya RE elementlerinin seyreltilmiş olarak Mg levha alaşıma ilave edilmesi temel yapıyı büyük oranda zayıflatabilmekte, RE ve Zn veya Ca ve Zn elementlerinin birlikte ilave edilmesi yeniden kristalleşme dokusunu oluşturabilmekte hatta RE elementinin tek olarak ilavesinden daha fazla yapıyı zayıflatabilmektedir.

Bu konuda yapılan önceki çalışmalarda Mg-Zn-Ca ve Mg-Zn-RE levha alaşımlarının gelişmiş sünekliğinin zayıflatılmış temel yapıdan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Ancak, yapıya ilave olarak metallerin ve alaşımların sünekliğini etkileyen başka faktörler de vardır (deformasyon biçimi, tane sınırı birleşimi, tane büyüklüğü, pekleşme üsteli, gerinim oranı duyarlılığı gibi). Bu etkenlerin alaşım sünekliğine olan etkileri çelikler, Al ve Cu alaşımlarında genişçe çalışılmış olmasına rağmen Mg araştırmalarında çok daha az ilgi çekmiştir. Halihazırda bu faktörlerin Mg levha alaşımlarının sünekliğinde önemli etkiye sahip olup olmadıkları da belirsizdir. Bundan dolayı Mg-Zn-Ca ve Mg-Zn-RE levha alaşımlarının gelişmiş sünekliklerinin nedenleri hala açıkça belirlenmeyi beklemektedir.

Ca ve Re elementlerinin seyreltilmiş ilavelerinin yeniden kristalleşmeden sonra temel yapıyı zayıflattığı kesinlik kazanmasına rağmen bu tür alaşım katkılarının soğuk haddeleme durumunda yapısal zayıflığa neden olup olmayacakları hala belirsizdir. Dahası, Ca ve RE alaşım katkılarının soğuk haddeleme sürecinde yapısal gelişimi (dokuyu) nasıl etkiledikleri, özellikle de yapısal gelişime ilişkin doğrudan gözlemlerin yetersizliği nedeniyle belli değildir. Ayrıca PSN partikül kaynaklı çekirdeklenme SBIN kesme bandı kaynaklı çekirdeklenme, DTIN ikiz deformasyon kaynaklı çekirdeklenme daha önce yapılan çalışmalarda yapısal zayıflamanın nedeni olarak gösterilirken yapısal zayıflamada hangisinin daha önemli olduğu hala tartışmalı bir konudur. Ayrıca, yapısal zayıflamanın tane büyüme davranışlarından etkilenip etkilenmediği de belirsizdir.

2.6.1 Magnezyum Alaşımlı Levhalarda Son Gelişmeler

1990'lardan bu yana "unutulmuş malzeme" magnezyum ve alaşımları metal endüstrisinde artan bir ilgi çekmektedir. En büyük teşvik edici güç küresel enerji tasarrufu ve egzos emisyonları konusunun üstesinden gelebilmek için, otomobilleri hafifletme talebindeki artıştır. Yapısal metallerin en hafifi olması avantajıyla otomobil endüstrisinde Mg uygulamalarının yaygınlaştırılması öngörülmekte, ancak otomobillerde gerçek uygulamaları oldukça sınırlı kalmakta ve yaklaşık olarak ortalama bir otomobilin ağırlığının % 1'i seviyesindedir.

Magnezyumun çok sınırlı otomobil uygulamaları arasında direksiyon bileşenleri, motor bloğu, şanzıman yuvası, radyatör desteği gibi döküm bileşenler en hakim olanlardır. Karşılaştırma yapıldığında Mg sac alaşımlar otomobillerdeki geleneksel düşük karbon

çelik gövde panellerinin yerini alma potansiyeline sahip olmalarına rağmen döküm alaşımlardan çok daha kısıtlı uygulama alanına sahiptirler. Mg levha alaşımların endüstride yetersiz kabulü büyük ölçüde karmaşık üretim yöntemleri, yüksek maliyet ve yetersiz süneklik ve şekillenebilirlikten kaynaklanmaktadır.

Ticari AZ31 levha alaşımı geleneksel haddeleme prosesiyle elde edilir, diğer metal ve alaşımların haddelenme prosesiyle aynı yönteme sahiptir. Geleneksel Mg levha alaşım üretiminde kullanılan hammadde döküm slablardır, tercihen doğrudan soğutmalı döküm yöntemiyle yapılır, bu da yerçekimsel döküme göre daha homojen mikroyapı eldesi sağlar.

Döküm slabları genellikle haddeleme öncesinde homojenizasyon işlemine tabi tutulur. Homojenizasyon sıcaklığı ile döküm sırasında oluşan ikincil fazların çözülmesi ve alaşım elementlerinin homojen bir şekilde dağıtılması için bekleme süresinin, bölgesel erime olmadan dikkatle seçilmesi gerekir. Homojenizasyon işlemi sonrasında Mg alaşımlı slab, çift yağlanmış silindir arasından geçirilir, burada silindirlerin aralığı slabın orijinal kalınlığından daha küçüktür, böylece slaba plastik deformasyon uygulanır.

İlk pasolarda kalınlık azalması genellikle % 10'dan fazla değildir, çünkü homojenize edilen döküm slabın mikro yapısı çatlamaya karşı duyarlıdır. Sıcak haddeleme ve ara tavlama işlemi esnasında orijinal döküm mikroyapısı daha ince tane boyutuna sahip yeniden kristallenmiş mikroyapı ile değişir. Sonuç olarak, her bir pasodaki azalma oranı % 30'un üstüne çıkarılabilir. Geleneksel yöntemle Mg sac levha üretmek için DC (soğutmalı döküm yöntemi), homojenizasyon, yaklaşık 12-18 kez sıcak haddeleme pasoları ve her bir haddeleme pasosu için tekrarlanan ara tavlama işlemi gereklidir.

Levha imalatındaki karmaşık termomekanik işlem süreci yüksek maliyete neden olur, bu da Mg sacları benzeri olan çelik ve Al sac alaşımlardan daha az rekabetçi yapar. İşlem sürecinin maliyetini azaltmak için ikiz hadde (TRC) uygulanabilir, bu yöntem ile doğrudan ergiyikten ince sac (2-6mm) levha ürünler üretilir. TRC yöntemi ile üretilen sac levha alaşımlarının çekme dayanımı ve sünekliği, ingot döküm ve çok pasolu sıcak haddeleme yöntemleri gibi geleneksel yöntemlerle elde edilen levhalar ile yarışabilir düzeydedir. Sac levha üretim maliyetini önemli ölçüde azaltabilecek diğer bir yöntem ise yüksek hızlı haddelemedir. Bu metod kullanılarak yükse hızda haddeleme, dakikada

en fazla 2000 metre olarak, sadece yüksek verimlilikte değil, aynı zamanda her haddeleme pasosunda % 60'dan fazla gerinim sağlar. Bu nedenle yüksek hızda haddeleme metodu Mg sac levha üretimini çarpıcı bir şekilde kolaylaştırır ve maliyette önemli bir düşüş getirir.

Yüksek maliyet aynı zamanda RE elementleri gibi pahalı ham maddelerle de ilişkilidir. Mg'un fiyatı yaklaşık olarak 2200 US$ /ton iken Al yaklaşık olarak 1800 US$/ton'dur. Ayrıca, RE elementler izotropi, süneklik ve şekillendirilebilirliği artırmak için Mg alaşımlarına ilave edilir. RE elementler az kullanılan alaşım elementleri olmalarına rağmen Mg alaşımlarında genellikle % 1-3 arasında değişen oranlarda ilave edilir ve yaklaşık 60.000 US$ olan Nd, 40.000 US$/ton olan Y, 60.000 US$/ton olan Gd, yüksek fiyatları nedeniyle alaşımların fiyatını artıracaklardır. Bu nedenle ham maddelerin maliyetini azaltmak için RE elementler daha da seyreltilmeli veya daha ucuz ikame (yerini alabilecek) elementlerle, örneğin 2.800 US$/ton olan Ca gibi elementlerle yer değiştirilmelidir. Tüm bu metallerin fiyatlarına ilişkin veriler Şanghay Metal Borsası (2015 yılı)'ndan alınmıştır.

Mg levhasının sınırlı kullanımının bir nedeni de Mg alaşımlı levhaların oda sıcaklıklarında şekillendirilebilirliğinin yetersiz olmasıdır. Bundan dolayı, Mg levhasını başarılı bir şekilde bir komponent haline getirmek için, örneğin otomobiller için gövde paneli, şekillendirme işleminin yüksek sıcaklıklarda yapılması gerekmektedir. Sonuç olarak da yüksek sıcaklıkta şekillendirme yapılması işlemi de kaçınılmaz olarak enerji tüketimini artıracak, yüzey kalitesini düşürecek ve üretim maliyetini artıracaktır. Bu nedenlerden ötürü, otomobil uygulamalarında Mg levha alaşımları cazip gelmemiştir. Geçen yıllarda RE ve Ca içeren Mg alaşımlı levhalar geliştirilmiştir. Bu levha alaşımları 5xxx Al-Mg tabanlı alüminyum alaşımlara yakın şekillendirilebilirlik göstermiştir. Fakat bu RE ve Ca içeren Mg levha alaşımları uygulamalarını sınırlandıran düşük akma dayanımına sahip olmalarıdır.

Ayrıca, Mg alaşımları düşük karbonlu çeliklerden ve Al alaşımlardan daha kötü korozyon direncine sahiptirler. Mg bileşen diğer metallerle temas içinde olduğunda yüksek redüksiyon potansiyeli nedeniyle galvanik korozyona hassastır. Bu durum otomobillerde çelik ve alüminyum alaşımların bulunduğu yerlerde Mg levha alaşımları

kullanıldığında ciddi soruna neden olur. Bu nedenle, endüstride kullanılmadan önce Mg levha alaşımın korozyondan korunması için dikkatli yüzey işlemi ve özenli mühendislik tasarımı gerektirmektedir.

2.6.2 Proses Şartlarının Levha Özellikleri Üzerinde Etkisi

Haddeleme sıcaklığının levhanın haddelenebilirliği ve şekillendirilebilirliği üzerinde önemli etkisi vardır. Haddeleme sıcaklığındaki artış AZ31 levhanın haddelenebilirliğini önemli ölçüde artıracaktır, çünkü yüksek haddeleme sıcaklığı dinamik yeniden kristalleşmeyi ve taban dışındaki kayma işlemini güçlendirecektir. Ayrıca yüksek haddeleme sıcaklığı daha zayıf levha tekstürüne (dokusuna) neden olmaktadır. Zayıflayan taban tekstürünün haddeleme sonrası tavlama esnasında oluşan rastgele çekirdeklenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir, bu tür bir çekirdeklenme davranışı, yüksek haddeleme sıcaklığında taban dışındaki kayma faaliyetinin daha fazla olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Sonuç olarak yüksek haddeleme sıcaklığı AZ31 levhanın daha iyi şekillenmesini ve daha düşük anizotopri göstermesini sağlamaktadır.

Genellikle, daha fazla haddeleme gerinimi daha ince tane boyutuna, tanelerin daha homojen dağılımına ve yeniden kristalleşme sonrasında daha zayıf tekstür (doku) oluşumuna sebep olmaktadır. Daha ince tane boyutu muhtemelen daha fazla haddeleme gerinimine maruz bırakılan örneğin yeniden kristalleşmiş tanelerdeki daha çok miktardaki çekirdeklenme bölgelerinden kaynaklanmaktadır. Zayıf tekstür (doku) yapısının ise yüksek haddeleme gerinimi kaynaklı kesme bandlarından kaynaklandığı öngörülmektedir. Tavlama sonrası zayıf tekstür oluşması ve tane küçültülmesi haddelemedeki toplam kalınlık azaltılmasından kaynaklı olsa da son haddeleme pasosu ile elde edilen kalınlık azalması daha önemlidir. Bunun nedeni ara tavlamanın sıcak haddelenen numunede ciddi miktarda yeniden kristalleşmeye neden olması ve toplam haddeleme geriniminin aslen son haddeleme pasosunda belirlenmesidir.

Daha yüksek gerilim oranı, DRX (dinamik yeniden kristalleşme) oluşumunu artırdığı için haddeleme hızının artırılması haddelenebilirliği önemli ölçüde artırmaktadır. DRX'lenen tanelerin boyutu yaklaşık olarak 500 nm'dir. Yüksek hızda haddeleme ile DRX'lenen tanelerin oluşumu gerinim enerjisini tüketir, gerilim yoğunluğunu düşürür ve böylece de çatlak oluşumunu önler. Ayrıca, yüksek hızda haddelenen levhanın mekanik

özellikleri çok iyi olup 308 MPa akma dayanımı ve % 28 uzama değerine sahiptir. Böyle bir süneklik özelliğinin geleneksel haddeleme hızında üretilen Mg alaşımlı levhalar için olması mümkün değildir.

Haddeleme yönü ve yağlama metodu gibi diğer faktörler de özellikler üzerinde etkilidir. AZ31 levhanın çapraz haddelenmesinin tek yönlü haddelemeye oranla daha zayıf bazal tekstür (taban dokusu) ve daha iyi şekillendirilebilirliğe neden olduğu belirtilmiştir. Ancak, çapraz haddeleme de yapısal yoğunluk düşük olmasına rağmen bazal tekstürü (taban dokusu) hala zayıflamış bir dokudur. Yağlayıcının düzgün kullanılması (hadde artıklarını en aza indireceğinden) levha üretiminde çok önemlidir. Sıcak haddeleme esnasında, magnezyum oksit ve levha yüzeyinden ayrılan metal merdanelere yapışır. Sonraki haddelemede haddeleme artıkları levha üzerine tekrar yerleşebilir ve bu nedenle, haddeleme sonrasında maliyet artışı getiren dikkatli bir temizlik yapılması ihtiyacını doğurur. Ancak, bugüne kadar halihazırda kullanılan en iyi yağlayıcı bile bu sorunu bütünüyle çözememektedir.

2.6.3 Alaşım İlavelerinin Levha Özellikleri Üzerine Etkisi

Alaşım katkıları Mg levhasının özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Mg alaşımlı levhalarda yaygın kullanılan alaşım elementleri Çizelge 2.6'da verilmiştir. Çizelge 2.6 aynı zamanda bu elementlerin eklenmesinin Mg alaşımlarının mikroyapısı ve özelliklerine olan temel etkilerini de özetlemektedir.

Şimdiye kadar endüstride en yaygın kullanılan Mg alaşımlı levha AZ31'dir. AZ31 levha iyi haddelenebilme ve iyi dengelenmiş mekanik özelliklere sahiptir. Ticari amaçlı, tavlanan AZ31 levhası oda sıcaklığında yaklaşık olarak 145-150 MPa akma dayanımına sahiptir, çekme dayanımı yaklaşık 250-255 MPa ve uzaması da yaklaşık olarak % 15~20'dir. Öte yandan, ticari amaçlı AZ31 levhasının, tane boyutu ve çekme yönüne bağlı olarak yaklaşık % 29'a kadar varan uzama değerleri de elde edilmiştir.

AZ31 alaşımının Erichsen testine tabi tutulduğunda tepe yüksekliği, oda sıcaklığında 2-5 mm arasında değişmektedir. Örn AZ61 gibi Al konsantrasyonu artışı $Mg_{12}Al_{17}$ fazı oluşumuna neden olur ve uzamayı yaklaşık % 15 azaltır. AZ serisi levhalarda, ciddi miktarda plastik deformasyon neden olan asimetrik haddeleme gibi, geleneksel olmayan bir yöntem üretilmedikçe daha yüksek süneklik olası değildir. ZM61 gibi Mg-

Zn esaslı RE – veya Ca içermeyen levha alaşımları yaklaşık % 16 uzama ve Erichsen testinde 2-4 mm tepe yüksekliği ile nispeten düşük süneklik ve şekillendirilebilirlik göstermektedirler.

Çizelge 2.6 Alaşım katkılarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi [14]

Element	Mikroyapı üzerindeki ana etkisi	Mekanik özellikler üzerindeki ana etkileri
Al	Tane küçültme (inceltme)	Dayanımı ve sünekliği artırır
	Yüksek Al konsatrasyonunda $Mg_{12}Al_{17}$ fazını oluşturur	
Zn	Yüksek konsantrasyonda Mg-Zn çökeltisi oluşturur	Düşük konsantrasyonla sünekliği artırır
		Yüksek konsantrasyonda dayanımı artırır
Mn	Döküm esnasında Fe gibi katışkıları ortadan kaldırır	Korozyon dayanımını artırır
Zr	Tane küçültme (inceltme)	Mg ve Mg-Zn alaşımlarında düşük konsantrasyonlarda süneklik ve akma dayanımını artırır
Li	Yüksek konsantrasyonda BCC fazını oluşturur	Süneklik ve şekillendirilebilirliği önemli ölçüde artırır
Ca	Tane küçültme (inceltme)	Düşük konsantrasyondaki Ca ile Mg-Zn alaşım sistemlerinde süneklik ve şekillenebilirliği artırır
	Tekstürü (doku) zayıflatma	
	Yüksek konsantrasyonda çökelti oluşumu	
Ce	Tekstürü (doku) zayıflatma	Süneklik ve şekillenebilirliği artırır
Gd	Tekstürü (doku) zayıflatma	Süneklik ve şekillenebilirliği artırır
	Yüksek konsantrasyonda çökelti oluşturur	Yüksek konsantrasyonda malzemelerin dayanımını artırır.
Nd	Tekstürü (doku) zayıflatma	Süneklik ve şekillenebilirliği artırır
	Yüksek konsantrasyonda çökelti oluşturur	Yüksek konsantrasyonda malzemelerin dayanımını artırır.
Y	Tekstürü (doku) zayıflatma	Süneklik ve şekillenebilirliği artırır
	Yüksek konsantrasyonda çökelti oluşturur	Yüksek konsantrasyonda malzemelerin dayanımını artırır.

1956 yılında Mg'a Li eklenmesiyle ilk defa Mg alaşımlarının sünekliği ve şekillendirilebilirliğinin artırıldığı belirtilmiştir. O zamandan beri Mg-Li alaşımlarının sünekliğinin artırıldığını çok sayıda çalışma göstermiştir. Mg –Li alaşımları % 5 ila 11 Li eklenmesiyle iki fazlı mikroyapı sergilemiştir. Birinci faz α-Mg'dir, diğer faz ise BCC yapıdaki Lityum olarak zengin fazdır. Yumuşak BCC fazı, oda sıcaklığında yaklaşık % 50'ye varan oranda oldukça yüksek süneklik sağlamaktadır, Erichson test değerleri iki

fazlı Mg-Li alaşımlı levhalarda, RE ve Ca içeren alaşımlı levhalara benzer şekilde, 8.4 ila 9.0 mm arasında değişmektedir.

Yalnız α-Mg fazlı Mg-Li alaşımlarda, ağırlıklı olarak <c+a> kayması nedeniyle, sünekliğin fazla olduğu görülmektedir. Mg-Li alaşımları cazip mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen, Li atmosferde çok aktiftir, bu nedenle de Mg-Li esaslı alaşımlarının dökümü zor ve tehlikelidir. Ayrıca, Mg-Li esaslı alaşımların aşırı düşük korozyon direnci endüstriyel uygulamalarını kısıtlamaktadır. RE ve Ca alaşım katkısı ise Mg alaşımlı levhaların yapısını (dokusunu) önemli ölçüde zayıflatmakta ve süneklik ve şekillendirilebilirliğini artırmaktadır. Bu sebepten, bu tür alaşım levhalarının endüstriyel uygulamaları büyük umut vaat etmekte, gelecek nesil Mg alaşımlı levhaların AZ31 ve hatta bazı Al alaşımlı levhaların yerini alabileceği düşünülmektedir.

ZE10 (Mg-1.3Zn-0.1Ce), ZEK100 (Mg-1.3Zn-0.2Ce-0.1La-0.5Zr), ZX10 (Mg-1.5Zn-0.1Ca), GZ31(Mg-2.74Gd-1.06Zn), ZG21 (Mg-2.26Zn-0.74Gd) gibi RE ve Ca içeren alaşımlı levhaların uzaması % 25-35 arasında değişmekte olup AZ31 alaşımlı levhalardan genellikle daha yüksektir. Bu alaşımların, şekillendirilebilirlik göstergesi olan tepe yükseklikleri Erichsen testlerinde 7-8 mm arasında değişir, bu değerler de ticari amaçlı AZ31 levhasından çok daha yüksektir. RE ve Ca içeren alaşımlı levhaların artırılmış süneklik ve şekillendirilebilirlik değerleri ağırlıklı olarak bazal tekstürün (taban dokusu) zayıflatılmasından (yumuşatılmasından) kaynaklanmaktadır.

Buna rağmen RE ve Ca içeren levha alaşımları Al alaşımlı levhalara oranla daha düşük süneklik ve şeklillendirilebilirliğe sahiptir. Al alaşımlı levhaların süneklik ve şekillendirilebilirliği, örn. Al-1.2Si-0.4Mg (6016 olarak tasarlanan), yaklaşık % 29-35 toplam uzama ve 9-10 mm arasında tepe yüksekliğine sahiptir. WE43 gibi daha yüksek RE konsantrasyonuna sahip levha alaşımları da zayıflamış bazal tekstüre (taban dokusu) sahiptir, fakat süneklik ve şekillendirilebilirlikleri esasen termomekanik işlem esnasında ortaya çıkan ikinci faz nedeniyle oldukça düşüktür.

Mg alaşımlı levhaların süneklik ve şekillendirilebilirliğini artırmak, deformasyon türlerini, yapısal gelişimi ve zayıflamayı anlamayı geliştirmek için son 15 yılda önemli çalışmalar yapılmıştır. RE ve Ca elementlerinin Mg alaşımlı levhalara eklenmesinin süneklik ve şekillendirilebilirliği artırabildiği bulunmuştur, ancak RE ve Ca içeren Mg

alaşımlı levhalar 6016 gibi Al alaşımlı levhalara oranla hala daha düşük süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahiptir.

Önceden, RE ve Ca içeren Mg alaşımlı levhaların artırılmış süneklik ve şekillendirilebilirliğinin en önemli nedeninin zayıflamış yapısal doku olduğu düşünülmesine rağmen artan sünekliğin aynı zamanda artan taban dışındaki kaymadan kaynaklanıp kaynaklanmadığı da belirsizdir. Ayrıca, seyreltilmiş Ca ilavesinin yeniden kristalleşme sonrası zayıflamış dokusal yapıya neden olduğu tespit edilmiş olmasına rağmen bunun gibi alaşım ilavelerinin soğuk haddeleme durumunda tekstür (dokusal) yapısında zayıflamaya neden olup olmayacağı hala belirsizdir [14].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, AZ31 alaşımı ile AZ31 alaşımına % 0,2, % 0,5 ve % 1 oranlarında Ti, In ve Sn ilaveleri yapılarak elde edilen alaşımların döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemleri sonrasındaki mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

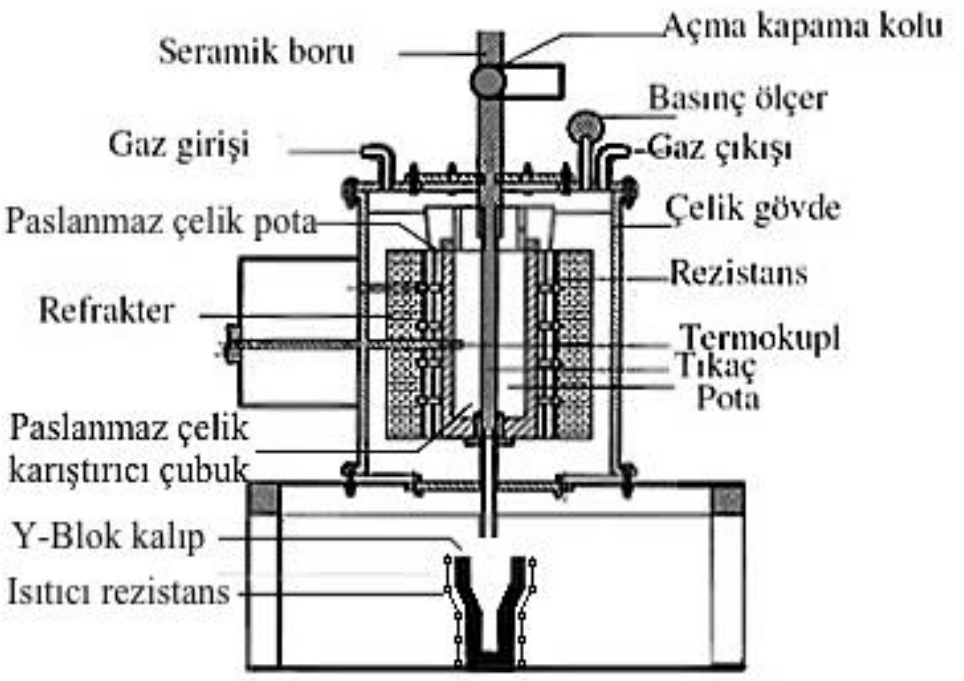
AZ31 magnezyum alaşımlarının hazırlanmasında %99,9 saflıkta Mg, Al, Zn, In ve Sn kullanılmıştır. Mg, Zn ve Sn elementleri Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Lab'dan, Al malzeme Seykoç Alüminyum'dan, In ve Ti malzemeler ise Bağ- San Titanyum Metal firmasından temin edilmiştir.

3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Magnezyum alaşımlarının ergitmesinde ve dökümünde Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Lab.'da bulunan ve Şekil 3.1'de görseli ve Şekil 3.2'de ise kesit şekli verilen atmosfer kontrollü ergitme ünitesi kullanılmıştır.



Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan atmosfer kontrollü ergitme ünitesi



Şekil 3.2 Deneylerde kullanılan atmosfer kontrollü ergitme ünitesi kesiti

Döküm işleminin yapıldığı atmosfer kontrollü ergitme ünitesi yerçekimi ile döküm yöntemi prensibine dayanararak tasarımlanmıştır. Kalıp potanın altında yer almaktadır. Ergitme ocağının dış gövdesi 340 mm çapında çelik malzeme, iç kısmı ise 170 mm çapında refrakter tuğla ile kaplıdır. Ocak içi sıcaklığı ölçmek için termokupl (ısıl çift) yerleştirilmiş olup ocak üst kapağına ise sızdırmazlık sağlamak için O-ring konulmuştur. Yapılan ocak bir tezgâh üzerine monte edilmiştir.

Hazırlanan alaşımlara homojenleştirme işlemi Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Lab.da bulunan Protherm markalı ısıl işlem fırınında yapılmış olup; benzer bir örneği haddeleme öncesi ön ısıtma ve homojenleştirme amacıyla kullanılan ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Lab.'da da bulunan ısıl işlem fırını Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Deneylerde kullanılan Protherm markalı ısıl işlem fırını

Haddeleme aşamasında ikiz hadde yöntemi esasına göre dizayn edilmiş TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Lab.'da bulunan haddeleme ünitesinden yararlanmıştır.



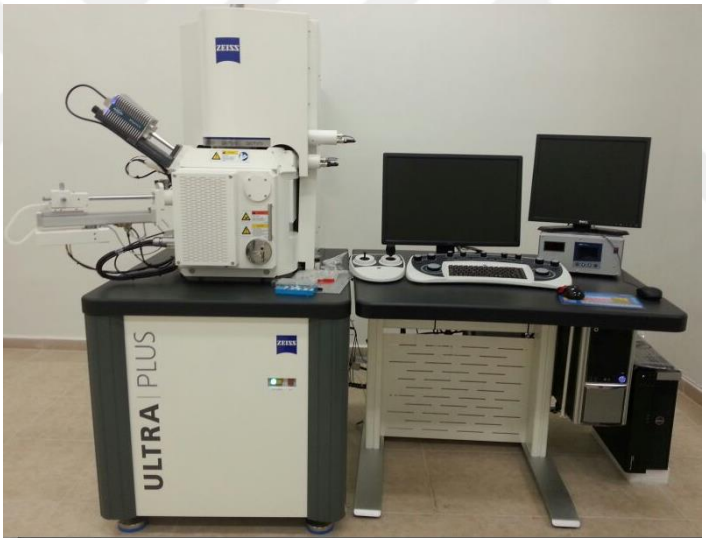
Şekil 3.4 Deneylerde kullanılan haddeleme cihazı

Mikroyapı analizleri için Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi bünyesinde bulunan Malzeme laboratuvarındaki Nikon Epiphot marka Şekil 3.5'te görülen optik mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 3.5 Nikon Epiphot marka optik mikroskop

Numunelerin mikroyapı karakterizasyonuna ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ise Şekil 3.6'da belirtilen KBÜ Demir Çelik Enstitüsü SEM Laboratuvarındaki Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka cihazda yapılmıştır.



Şekil 3.6 Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka taramalı elektron mikroskobu

Mekanik özelliklerin tayininde çekme deneyleri için Karabük Üniversitesi Malzeme Laboratuvarındaki SHIMADZU AG-IS marka 5 ton (50 kN) çekme kapasitesine ayarlanabilen çekme cihazı kullanılmıştır.

Sertlik ölçümlerinde Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Laboratuvarındaki FV-700 model FUTURE-TECHCOPP marka dijital VICKERS sertlik ölçme cihazından yararlanılmıştır.

3.3 Deneylerin Yapılışı

Deneyler AZ31 alaşımlarının döküm yöntemiyle üretilmesi ile başlamıştır. Döküm sonrasında numuneler homojenizasyon işlemine tabi tutulmuş, akabinde ise numuneler haddelenmiştir. Ardından, döküm, homojenizasyon ve haddeleme süreçlerine ait elde edilen numunelerin optik mikroskop ile mikroyapı görüntüleri alınmış, sertlik ölçümleri yapılmış; döküm ve haddeleme sonrasındaki akma-çekme dayanımları ve % uzama değerleri incelenerek son aşamada ise % 1'lik alaşımların mikroyapı karakterizasyonu (SEM, EDS) gerçekleştirilmiştir.

3.3.1 Ergitme ve Alaşımlama Esasları

Alaşım yapımında %99,9 saflıktaki Mg, Al, Zn, In ve Sn elementleri kullanılmış; ayrıca Mg alaşımları içerisinde çözünmesi az olan Ti elementi için Al-Ti (% 10) alaşımı şeklinde ön alaşımlar hazırlanmıştır. Magnezyum alaşımlarının ergitme işlemi, ocak içerisine yerleştirilen 2 kg alaşım ergitme kapasiteli paslanmaz çelik potada yapılmıştır. Pota içerisindeki ergiyiğin karıştırılma işlemi için uç kısmı pervane şeklinde olan paslanmaz çelikten bir mil kullanılmıştır. Ergitme işlemi esnasında ortamın atmosferle temasını kesmek için ocağa koruyucu Ar gazı verilmiştir. Alaşımların dökümünün uygulanmasında ocak ve metal sıcaklığı 750 ^{o}C olarak seçilmiştir. Ocak istenilen sıcaklığa çıktıktan sonra yaklaşık 60 dakika bekletilerek alaşımın döküm sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Uygulamada kalibrasyonu sağlanmış ocak kullanılmıştır. Zn, In ve Sn elementlerinin buharlaşma dereceleri düşük olduğundan kayıplardan kaçınmak için dökümden 5 dk. önce ilave edilerek karışım sağlanmıştır. Ergitme tamamlandıktan sonra kalıba döküm işlemi açma-kapama kolu ile yapılmıştır.

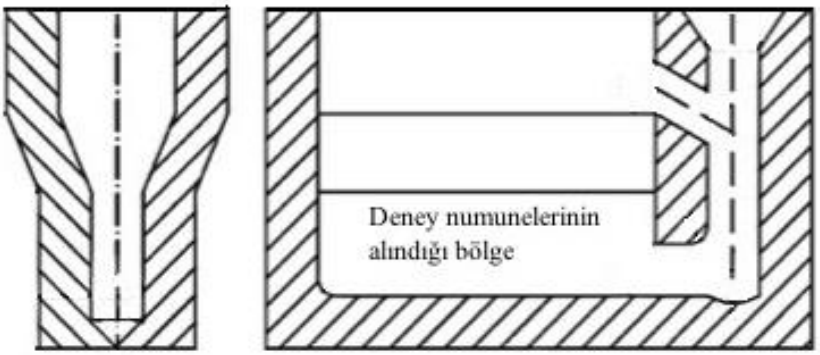
Ergitme işleminde kullanılan paslanmaz çelik potanın tabanına, açma kapama kolu ile kontrol edilebilen ve sıvı metalin akacağı 15 mm çapında delikli sistem entegre edilmiştir. Alaşım döküm sıcaklığına ulaştıktan sonra, ergitme ocağı açma kapama kolu vasıtası ile kontrollü olarak ergitme potasının tabanı açılarak sıvı metalin kalıba akması sağlanmıştır (Geleneksel devirme metoduna karşılık bu yöntemle sıvı metalin türbülansını ve dolayısıyla oksitlenmesini engellemek için kalıba pota altından döküm yapılmıştır). Deneysel çalışmalarda kullanılan kalıp sıcaklığı 250 ^{o}C olarak seçilmiştir. Döküm işlemi kalıba gaz verilerek gerçekleştirilmiştir. Ocak ortamında %99,9 saflıkta Ar

gazı, kalıp ortamında ise CO_2+%0,8 SF_6 gazı kullanılmıştır. Kullanılan paslanmaz çelik pota Şekil 3.7'de görülmektedir.



Şekil 3.7 Ergitme işleminde kullanılan çelik pota resmi

Deneysel çalışmalarda 250 ^oC'ye ısıtılan ve Şekil 3.8'de kesit resmi verilen Y-Blok döküm kalıbı kullanılmıştır. Her bir parametre için Y-Blok dökümleri yapılarak üçer adet numune çıkartılmıştır.



Şekil 3.8 Y-Blok kalıbı kesit resmi

3.3.2 Homojenleştirme Isıl işlemi

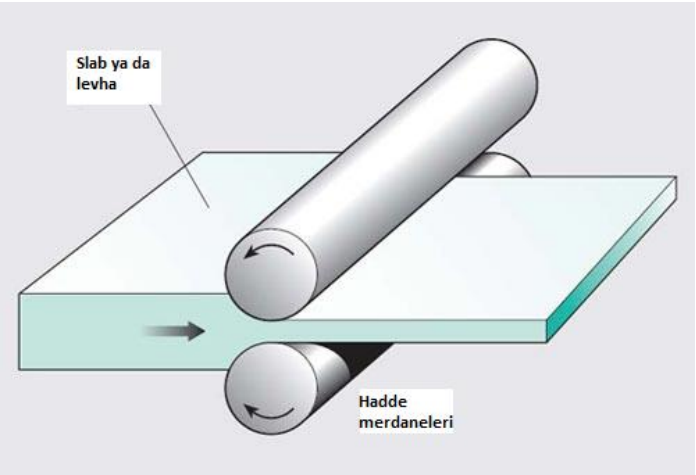
Döküm sonrası freze tezgahında 5x30x130 mm boyutlarına getirilmiş bütün numunelere, döküm sırasında oluşan termal kararlılığı düşük olan intermetalik bileşikleri (Al_2Mg_3, $Mg_{17}Al_{12}$, vs.) matris içinde çözdürmek için 410 ^oC'de 48 saat boyunca homojenleştirme tavlaması uygulanmıştır. Freze tezgahında haddeleme işlemi amacıyla 5x30x130 mm boyutlarına getirilmiş numuneler Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 5x30x130 mm boyutlarına getirilen numuneler

3.3.3 Haddeleme İşlemi

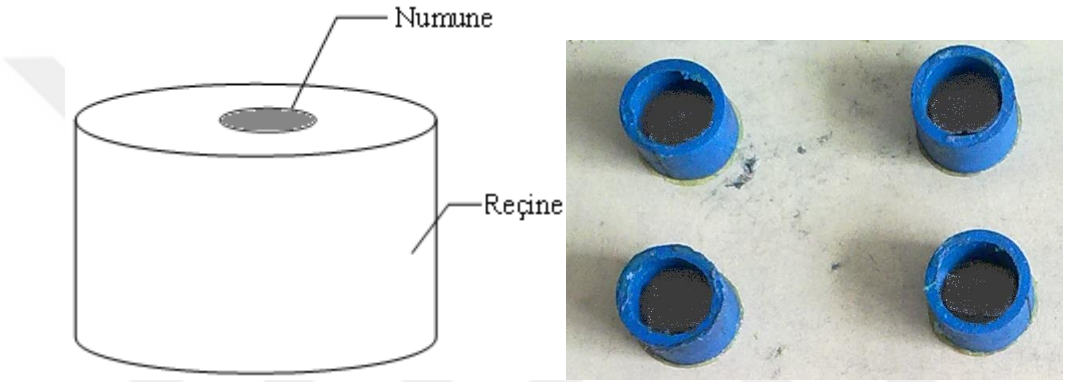
Homojenleştirme tavlamasından sonra numuneler Şekil 3.10'da şematik olarak gösterildiği gibi haddeleme ünitesinde haddelenmiştir. 5x30x130 mm boyutlarına getirilmiş numunelerin haddeleme işlemi bütün alaşımlar için 350 ^{o}C'de sabit sıcaklıkta yapılmıştır. Numuneler haddeleme işleminden hemen önce 350 ^{o}C'de 30 dk. boyunca ön ısıtmaya tabi tutulmuş ve bekletilmeden haddeleme ünitesine yerleştirilmiştir. Haddeleme işlemi tek pasoda % 40 haddeleme oranında, kalınlık 5 mm'den 3 mm'ye indirme oranında yapılmıştır. Numunelerin eşit koşullarda karşılaştırılabilmesi için tek paso haddeleme işlemi uygun görülmüştür.



Şekil 3.10 Numunelerin haddelenmesi

3.3.4 Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri İçin Hazırlanması

Döküm, homojenleştirme ve haddeleme aşamaları sonucunda alaşımların mikroyapı numuneleri alaşımların merkez bölgelerinden olacak şekilde çıkartılmıştır. Metalografik incelemeleri için reçine yardımıyla kalıba alınan (Şekil 3.11) numunelerin yüzeyleri sırası ile 240, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 mesh zımparalar ve saf su kullanılarak zımparalanmış, akabinde ise 0,3µm alümina pasta solüsyon kullanılarak polisaj keçesinde parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelerin yüzeyi saf su ve alkol ile yıkanıp kurutulmuştur. Ardından, 6 gr pikrik asit (toz halinde), 5 mL asetik asit, 10 mL saf su, 100 mL etil alkol karışımı ile numuneler dağlanmıştır.



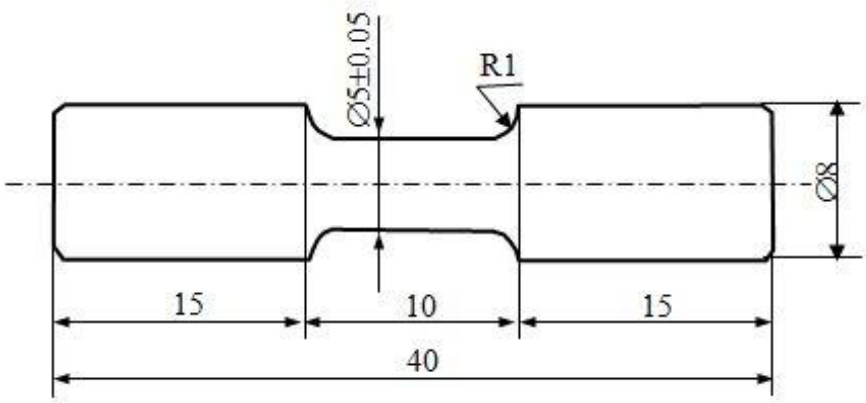
Şekil 3.11 Numunelerin mikroyapı incelemeleri için hazırlanması

3.3.5 Optik Mikroskop ve SEM-EDS İncelemeleri

Deneysel çalışmalarda her bir alaşım için mikroyapı resimleri 200X büyütmede optik mikroskopla alınmıştır. SEM-EDS mikroyapı karakterizasyonu incelemelerinde % 1' lik alaşım katkıları incelenmiştir.

3.3.6 Çekme Deneyi Yapılışı

Şekil 3.8'de görülen metal kalıptan her bir alaşım için 3'er adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme deneyleri 0,5 mm/dk. çekme hızında yapılmıştır. Şekil 3.12'de ASTM E 8M-99 standardına göre hazırlanan çekme deney numunesi görülmektedir.



Şekil 3.12 Çekme deney numunesi (ASTM E 8M-99)

3.3.7 Sertlik Deneyi Yapılışı

Döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemleri sonrasında hazırlanan numunelere sertlik deneyi uygulanmıştır. Deney sırasında numune yüzeylerine 1 mm çaplı elmas kare piramit uç ile 5 N'luk yük uygulanarak Vickers cinsinden sertlik değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, sertlik deneyi uygulanırken numunenin ölçüm yapılabilecek en dış noktasından merkezine kadar eşit aralıklarda en az 5 farklı nokta belirlenmiş ve belirlenen bu noktalardan sertlik ölçümü yapılıp değerlerin ortalamaları alınmıştır.

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARI VE İRDELEME

Bu bölümde AZ31 alaşımına Ti, In ve Sn elementleri ilavesi ile hazırlanan alaşımların döküm sonrasındaki kimyasal analiz değerleri, devamında döküm, homojenleştirme ve haddeleme aşamalarına ait optik miksroskop ile elde edilen mikroyapı görüntüleri, ayrıca % 1'lik alaşım ilavelerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve EDS analizleri, son olarak ise alaşımların mekanik özellikleri (sertlik, akma-çekme dayanımı ve % uzama değerleri) incelenmiştir.

4.1 Kimyasal Bileşim

Deneysel çalışmalarda kullanılan AZ31 Mg alaşımı ve ilave edilen alaşım elementleri % miktarları ile birlikte Çizelge 4.1'de verilmiştir.

4.2 Mikroyapı Sonuçları

Mikroyapı karakterizasyonu için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile elde edilmiş mikroyapılar değerlendirilmiştir.

4.2.1 Döküm, Homojenleştirme ve Haddeleme İşlemi Sonrası Optik Mikroskop (OM) Sonuçları

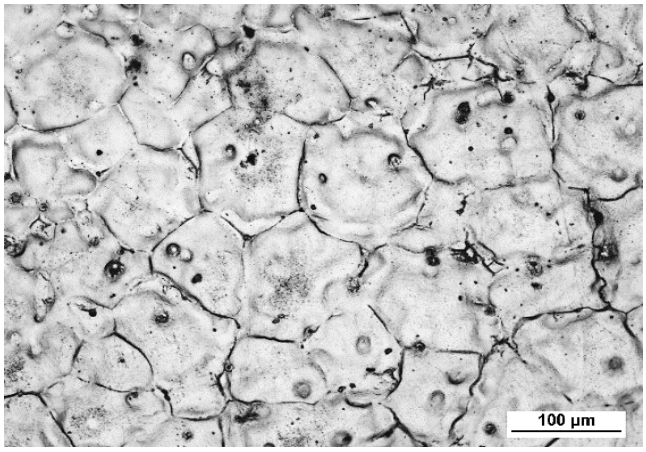
Mikroyapı incelemeleri için AZ31 alaşımı ve Ti, In ve Sn ilavesi yapılmış AZ31 alaşımlarına ait numuneler optik mikroskop (OM) ile incelenmiştir.

Çizelge 4.1 Deneylerde kullanılan alaşımların spektral analiz sonuçları

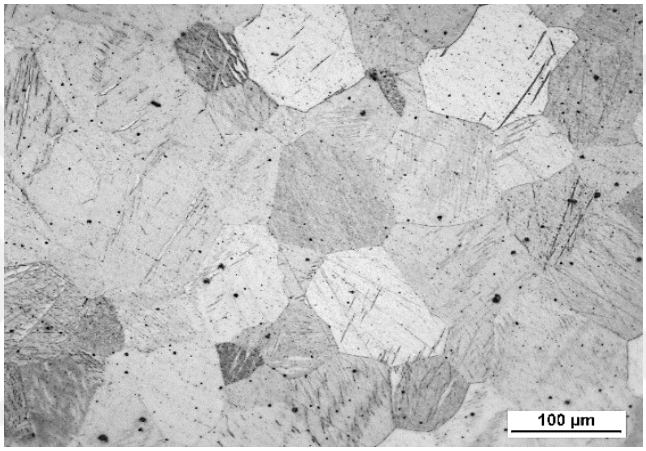
Alaşım	% Element Miktarları							
	Al	Zn	Mn	**In**	**Ti**	**Sn**	**Diğer**	**Mg**
AZ31	3.18	1.26	0.15	-	-	-	0.019	Kalan
AZ31 + 0,2 In	3.1	1.2	0.15	0.21	-	-	0.034	Kalan
AZ31 + 0,5 In	3.0	1.15	0.11	0.58	-	-	0.025	Kalan
AZ31 + 1 In	3.12	1.23	0.17	1.02	-	-	0.021	Kalan
AZ31 + 0,2 Ti	3.05	1.21	0.13	-	0.27	-	0.029	Kalan
AZ31 + 0,5 Ti	3.24	1.17	0.16	-	0.61	-	0.030	Kalan
AZ31 + 1 Ti	3.27	1.22	0.19	-	1.32	-	0.018	Kalan
AZ31 + 0,2 Sn	3.15	1.3	0.17	-	-	0.19	0.023	Kalan
AZ31 + 0,5 Sn	3.21	1.28	0.23	-	-	0.52	0.022	Kalan
AZ31 + 1 Sn	3.17	1.25	0.21	-	-	1.04	0.027	Kalan

4.2.1.1 AZ31 Alaşımı Mikroyapı (OM) Sonuçları

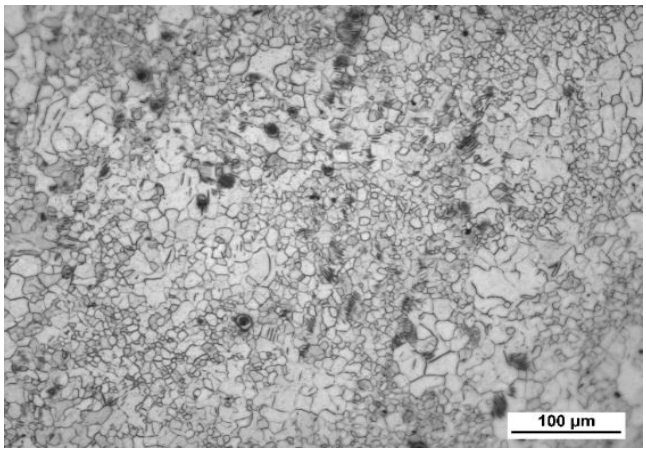
AZ31 alaşımının döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası mikroyapı (OM) görüntüleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1 (a)'da döküm sonrası AZ31 alaşımının mikroyapısının ana matrisinin α-Mg fazı ve tane sınırları boyunca uzanan β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazından oluştuğu öngörülmektedir. β-$Mg_{17}Al_{12}$ ikinci faz yapısı oldukça kaba olup, tane sınırlarında bir ağ şeklinde çökelir ve kırılmaya eğilimlidir. Bundan dolayı, homojenleştirme işlemi ile tane sınırlarındaki intermetalik β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazının α-Mg matrisi içinde çözündürülmüş ve yapı daha sade bir forma getirilmiştir. Bu durum Şekil 4.1 (b)' de, haddeleme sonrası tane yapısında çok sayıda yeni taneler oluştuğu ve yapının inceldiği ise Şekil 4.1 (c)'de görülmektedir.



(a)



(b)



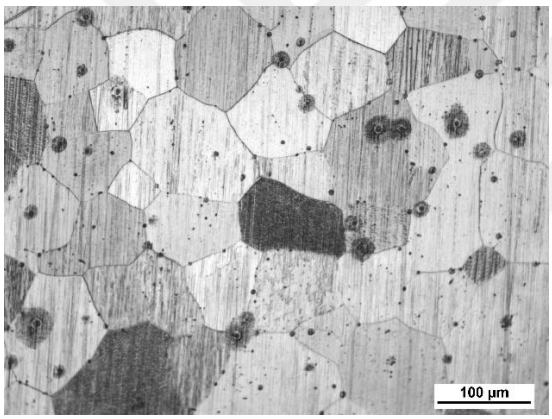
(c)

Şekil 4.1 (a) AZ31 döküm, (b) AZ31 homojenleştirilmiş ve (c) AZ31 haddelenmiş numunelerin 200X büyütmede OM görüntüleri.

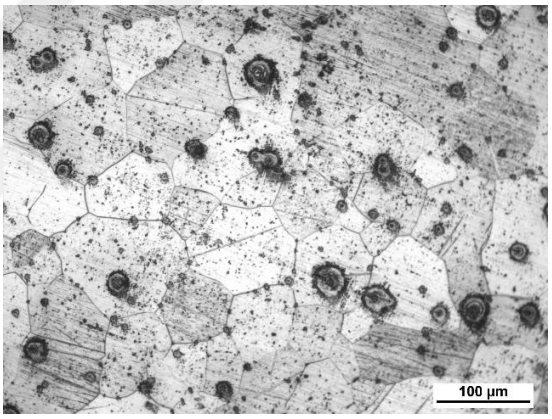
Benzer şekilde, AZ31'in kaba taneli döküm mikroyapısının Guo ve arkadaşlarının [30], Tahreen ve ekibinin [31] döküm sonrası elde ettikleri AZ31 mikroyapısı ile aynı olduğu belirlenmiştir. Döküm yapısının homojenize edildiği ve dentritik yapının matris içerisinde çözündürülerek sadeleştirildiği yapı Habibnejad-Korayem ve arkadaşları [32] ile Zimina ve arkadaşlarının [33] yaptığı çalışmalarda da benzer şekilde oluşmuştur. Haddelenmiş AZ31 alaşımının mikroyapısının yeniden kristalleşmiş tanelerden oluşması ve yapının incelmesi Guo ve arkadaşları [34] tarafından yapılan çalışma ile uyumludur.

4.2.1.2 AZ31 Alaşımına Ti İlavesinin Mikroyapı (OM) Sonuçları

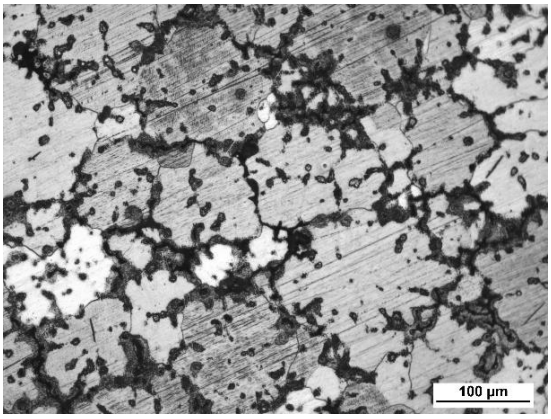
AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Ti alaşımının döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası mikroyapı OM görüntüleri Şekil 4.2 - 4.4'de verilmiştir.



(a)

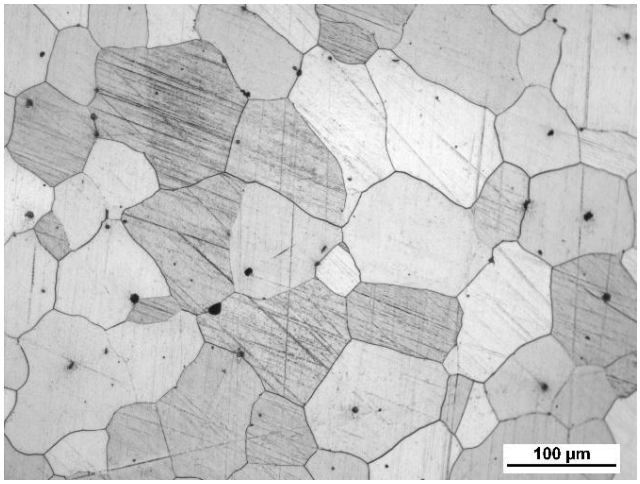


(b)

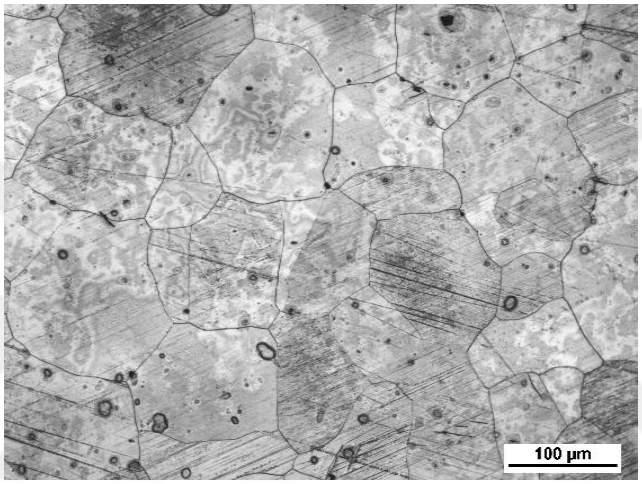


(c)

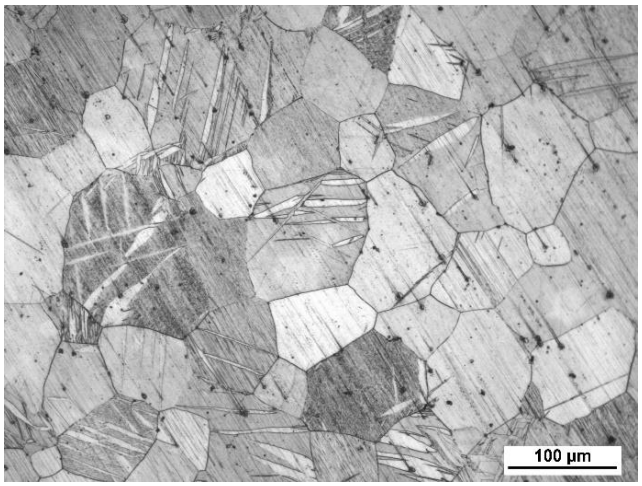
Şekil 4.2 (a) AZ31 + 0,2 Ti, (b) AZ31 + 0,5 Ti, (c) AZ31 + 1 Ti döküm sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri



(a)

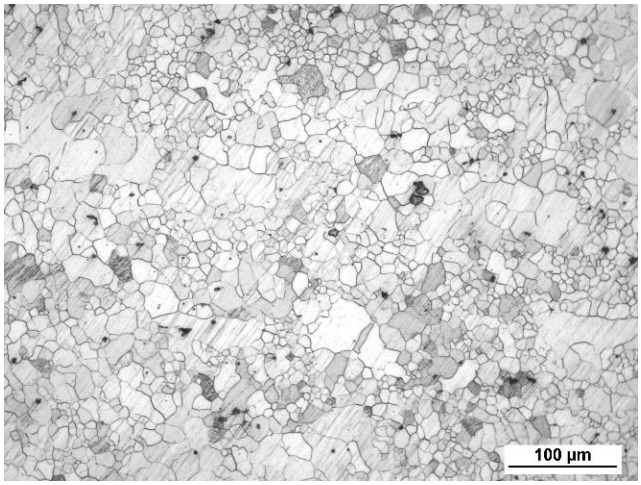


(b)

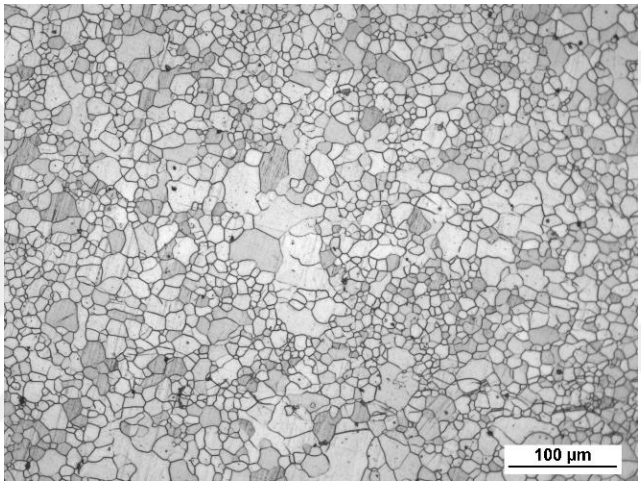


(c)

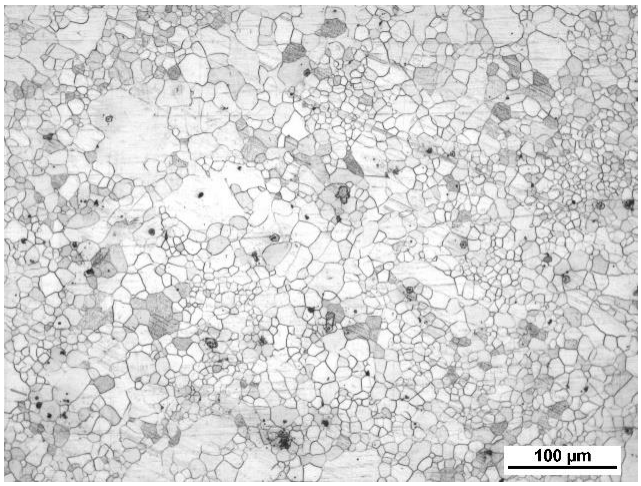
Şekil 4.3 (a) AZ31 + 0,2 Ti, (b) AZ31 + 0,5 Ti, (c) AZ31 + 1 Ti homojenleştirme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.4 (a) AZ31 + 0,2 Ti, (b) AZ31 + 0,5 Ti, (c) AZ31 + 1 Ti haddeleme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri

Şekil 4.2'de farklı oranlarda Ti içeren AZ31 alaşımlarının döküm sonrası mikroyapıları görülmektedir. Ti'nin özellikle alüminyum alaşımları üzerinde tane küçültücü etkisi kanıtlanmış olmasına rağmen, Mg alaşımlarında Ti'nin çözünürlüğünün düşük olması nedeniyle birtakım endişeler oluşmakta ve tane küçültücü olarak etkisi araştırılmaya devam etmektedir. Halihazırda elde edilen döküm sonrası mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde açık renkli bölgeler α- Mg ve koyu renkli alanlar β- $Mg_{17}Al_{12}$ fazı olarak anlaşılmaktadır. Döküm sonrası yapının kaba tanelerden oluştuğu görülmektedir. Şekil 4.1'deki AZ31'in Ti ilavesiz döküm sonrası haliyle kıyaslama yapıldığında Ti ilavesi sonrası oluşan döküm mikroyapılarında β- $Mg_{17}Al_{12}$'nin şekli ve dağılımında farklılıklar gözlemlenmekte, % 0,2 ve % 0,5 Ti ilavelerinde yapının daha sade olduğu, ancak %1 Ti ilavesi sonrasında oluşan mikroyapıda β- $Mg_{17}Al_{12}$'nin tane sınırlarında dağınık ve yoğun bir şekilde bulunduğu göze çarpmaktadır. Şekil 4.3'e bakıldığında, homojenleştirme işleminin mikroyapıya etkisi belirgin bir şekilde gözükmekte olup β- $Mg_{17}Al_{12}$ fazının homojenleştirme ile birlikte yapı içerisinde büyük ölçüde çözündüğü anlaşılmaktadır. Kayma sistemi sayısının az olduğu ve kaymanın zor olduğu Mg ve Ti gibi metallerde sıklıkla rastlanan deformasyon türlerinden olan ve tavlama(sıcaklık değişimi) ile birlikte de oluşabilen ikizlenmeler özellikle % 1'lik Ti ilavesinde yapıda görülmektedir. Şekil 4.4'de Ti içeren AZ31 alaşımının haddeleme sonrası mikroyapı resimleri verilmiştir. Haddelenmiş numunelerde artan Ti ilavesi ile birlikte daha ince tanelerin bulunduğu gözlemlenmiştir.

AZ31'e Ti ilavesi yapılmasına ilişkin literatür çalışmalarına bakıldığında haddelenmesine ilişkin literatürün oldukça kısıtlı olduğu; ancak döküm hali üzerinde özellikle Ti'nin tane küçültücü etkisi araştırılmaya çalışılmıştır.

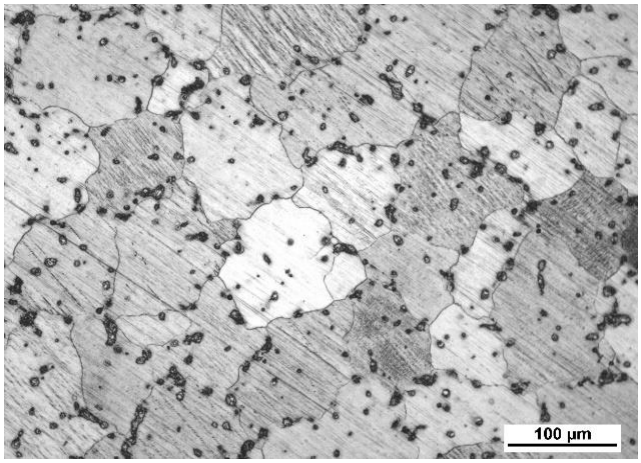
Raghad Zaid ve arkadaşları [35], AZ31 Mg alaşımına Ti ilave edilmesinin döküm ve direkt ekstrüzyon prosesleri sonrası tane boyutu ve mekanik davranışlar üzerindeki etkisi üzerinde çalışmışlardır. Ağırlıkça % 0,15 Ti ilavesinin alaşımın hem döküm koşullarını hem de ekstrüzyon sonrası tane boyutunu küçülterek yapıyı incelttiği tespit edilmiştir. Döküm yapısındaki tane boyutu 22 µm iken Ti ilavesi sonrası tane boyutunun 19 µm olduğu belirlenmiştir.

Ai ve çalışma arkadaşları [36], AZ91 alaşımına Ti ilavesinin geleneksel döküm yöntemi ile üretip, mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Sonuçlar, ağırlıkça % 0,1 ila % 0,5 oranındaki Ti ilavesinin, döküm mikroyapısının iyileştirilmesini sağladığını göstermiştir. Yapıdaki β fazının morfolojisi Ti ilavesi ile kaba, düzensiz, yarı-sürekli iskelet ağ formundan küçük, üniform, kısa çubuk benzeri veya granül hale dönüşmüştür. AZ91 alaşımına % 0,2 ağırlıkta Ti eklenmesi, ağırlıklı olarak, tane sınırlarındaki β fazı üzerinde $TiAl_3$ fazını oluşturmuştur. Ayrıca, alaşıma Ti elementi eklemesinden sonra, β- $Mg_{17}Al_{12}$ fazlarının inceldiği gözlemlenmiştir.

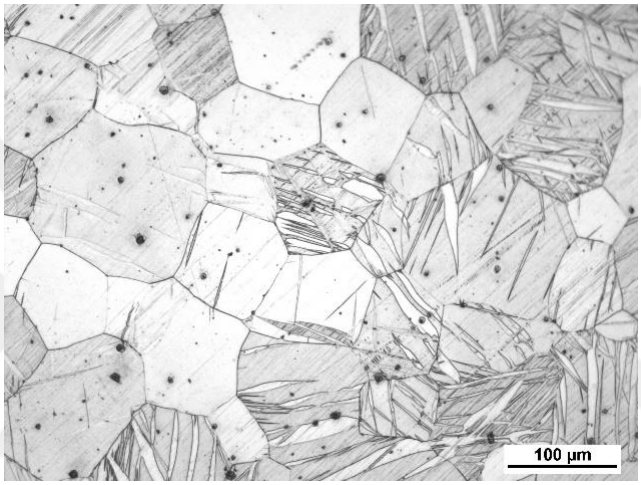
Candan ve ekibi [37], AZ91 magnezyum alaşımına ağırlıkça % 0.2-0.5 oranlarında Ti ilavesinin mekanik özelliklere ve korozyon davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yerçekimi döküm tekniği sonucu elde edilen numuneler incelendiğinde Ti ilavesinin β ötektik fazının miktarını azalttığı ve yapıyı incelttiği tespit edilmiştir. Literatürle uyumlu bir şekilde Ti katkısının mikroyapıyı incelttiği görülmüştür.

4.2.1.3 AZ31 Alaşımına In İlavesinin Mikroyapı (OM) Sonuçları

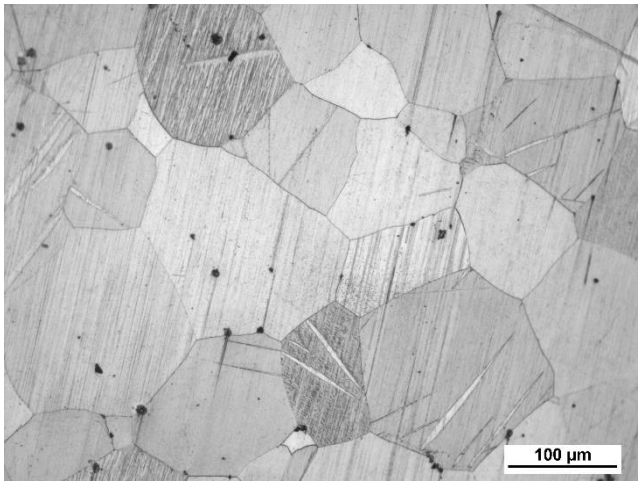
AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen In alaşımının döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası mikroyapı (OM) görüntüleri Şekil 4.5-4.7'de sırasıyla verilmiştir.



(a)

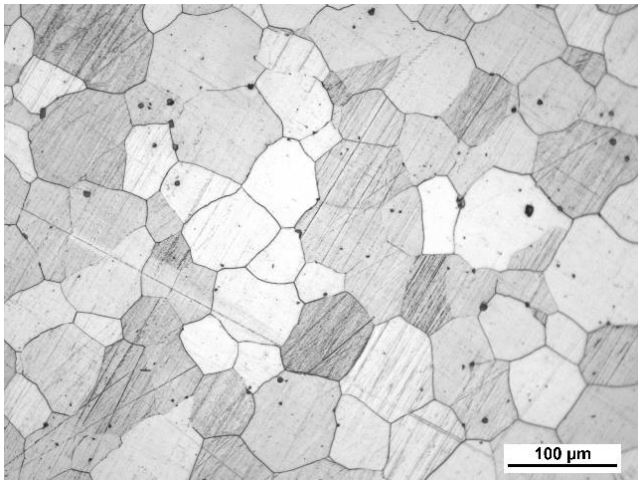


(b)

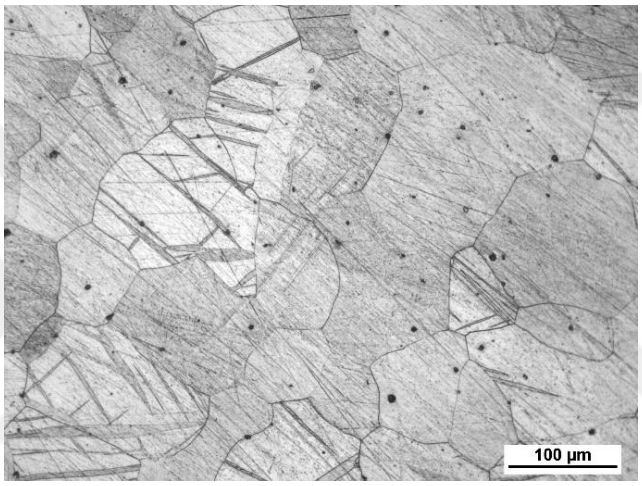


(c)

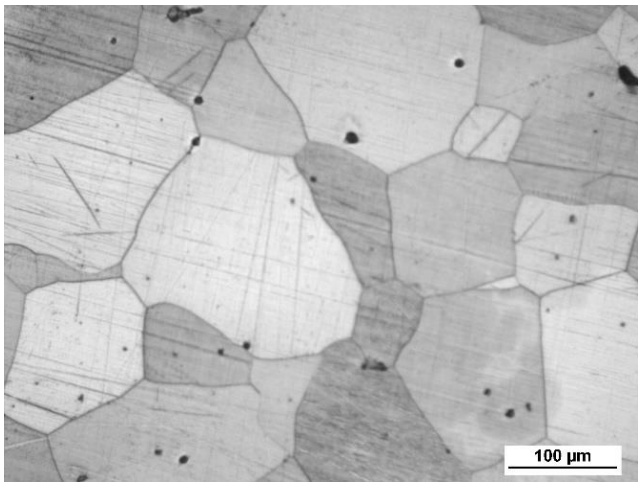
Şekil 4.5 (a) AZ31 + 0,2 In, (b) AZ31 + 0,5 In, (c) AZ31 + 1 In döküm sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri



(a)

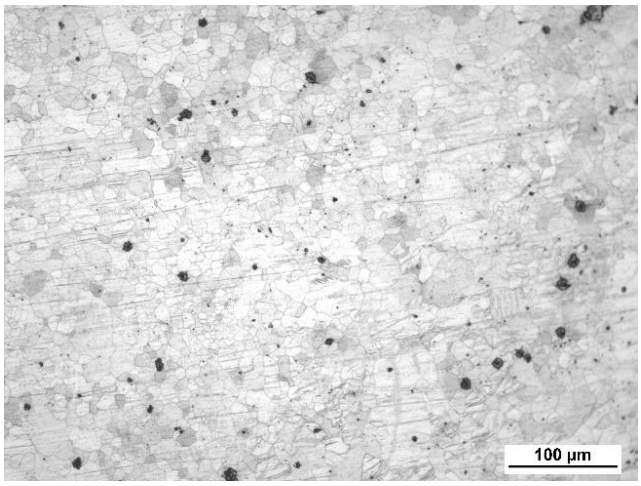


(b)

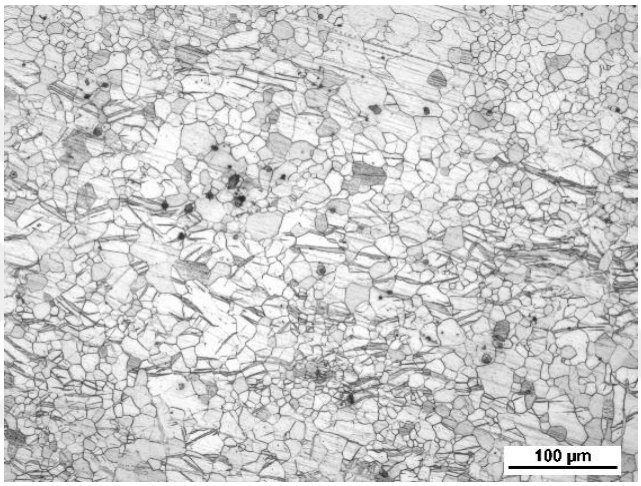


(c)

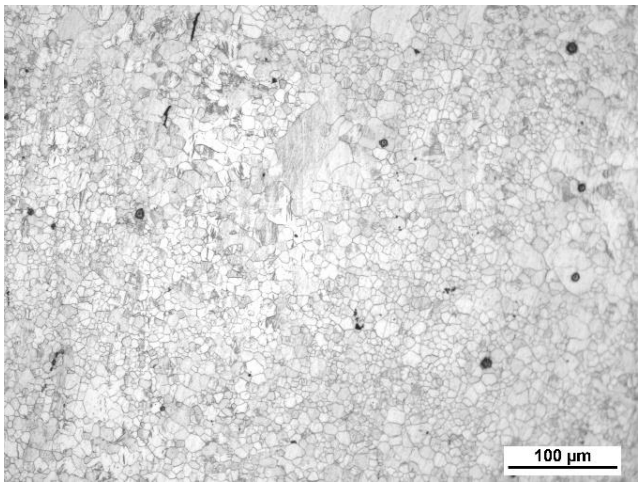
Şekil 4.6 (a) AZ31 + 0,2 In, (b) AZ31 + 0,5 In, (c) AZ31 + 1 In homojenleştirme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri



(a)



(b)



(c)

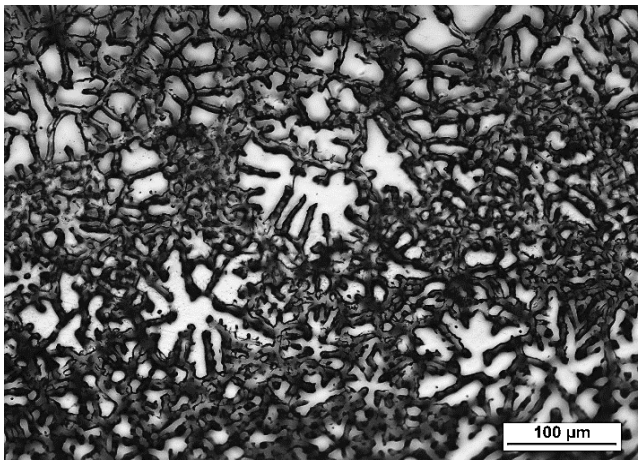
Şekil 4.7 (a) AZ31 + 0,2 In, (b) AZ31 + 0,5 In, (c) AZ31 + 1 In haddeleme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri

Şekil 4.1 (a)'daki AZ31 döküm alaşımına ait mikroyapı ile Şekil 4.5 (a)'daki AZ31 alaşımına % 0,2'lik In ilavesi sonrası elde edilen döküme ait mikroyapı kıyaslandığında belirgin bir farklılık gözükmektedir. % 0,2'lik In ilavesinin ardından tane sınırlarında oluşan fazların parçalanarak daha kaba bir şekilde yapıda yer aldığı görülmektedir. Bu durumun, In katkısının α-Mg içerisinde β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazının çökelmesini teşvik ederek, yapıyı inceltmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte, In ilavelerinde α-Mg, β-$Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazına ilaveten yapıda Mg_3In_2 fazı da ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.5 (b)'deki mikroyapıda ise % 0,5 In ilavesi yapıldığında tane sınırlarındaki fazlarda değişim görülmekte ve yapıda çok sayıda ikizlenme oluşumları göze çarpmaktadır. Şekil 4.6 (c)'de % 1 In ilavesi yapıldığında yine yer yer ikizlenme oluşumları ve kaba taneli bir yapı gözükmektedir. Şekil 4.6 (a-b-c) incelendiğinde homojenleştirme sonucunda alaşımlarda ince taneli bir yapı elde edilmiş ve ikincil fazların büyük çoğunluğu yapı içerisinde çözünmüştür. % 0,5 In'li alaşımda yine ikizlenmelere rastlanmaktadır. Şekil 4.7 (a-b-c)'ye bakıldığında haddeleme sonrası yeniden kristalleşmiş ince taneli yapılar gözükmektedir, ayrıca % 0,5'lik In'li alaşımın mikroyapısında haddeleme sonrasında yeniden kristallenme ile birlikte ikizlenme oluşumları gözlemlenmiştir.

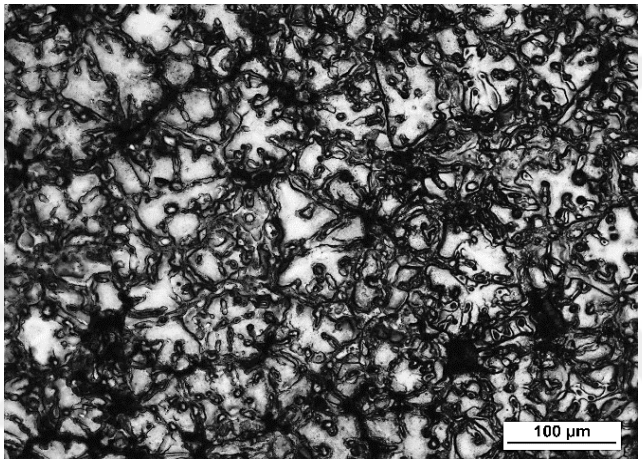
İndiyum ile ilgili literatür çalışmaları oldukça kısıtlı olup, daha çok indiyumun korozyon davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Becerra ve arkadaşları [38], magnezyumun tane boyutu üzerine indiyumun etkisini araştırmış olup elde edilen sonuçlara göre, indiyumun tane boyutunu azalttığı tespit edilmiştir. In'nin tane küçültücü etkisinin mekanik değerlere çok bir yansıması olmadığı; ancak tane inceltici özelliği de olması literatürle benzerlik göstermektedir.

4.2.1.4 AZ31 Alaşımına Sn İlavesinin Mikroyapı (OM) Sonuçları

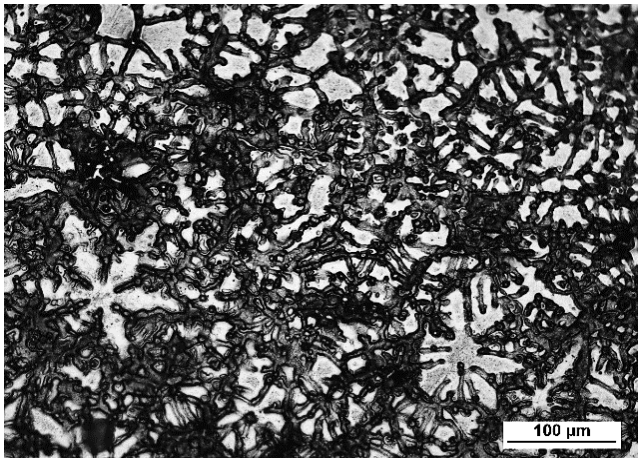
AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Sn elementinin döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası mikroyapı (OM) görüntüleri sırasıyla Şekil 4.8-4.10'da verilmiştir.



(a)

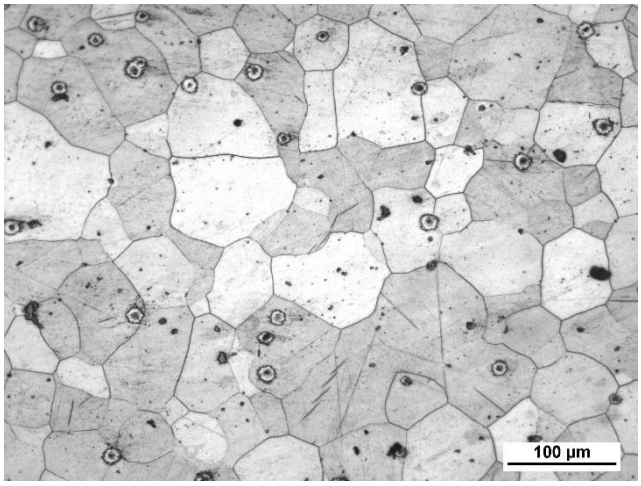


(b)

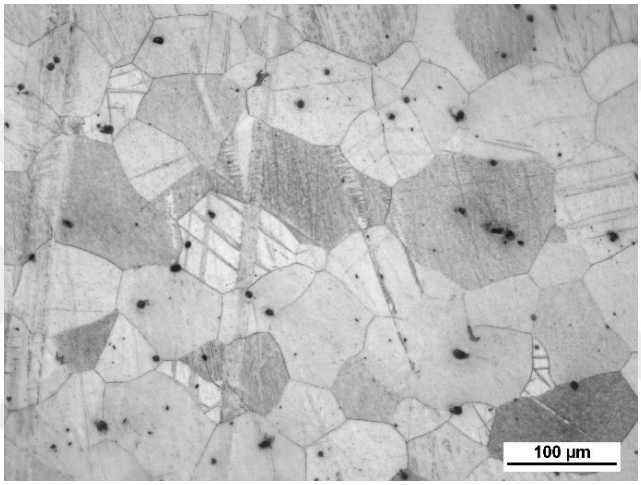


(c)

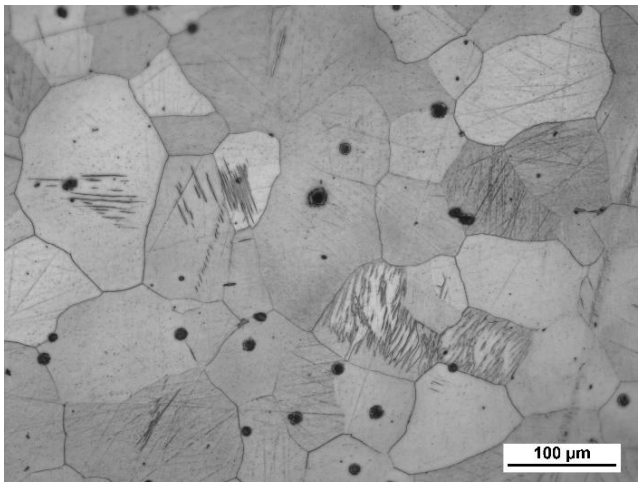
Şekil 4.8 (a) AZ31 + 0,2 Sn, (b) AZ31 + 0,5 Sn, (c) AZ31 + 1 Sn döküm sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri



(a)

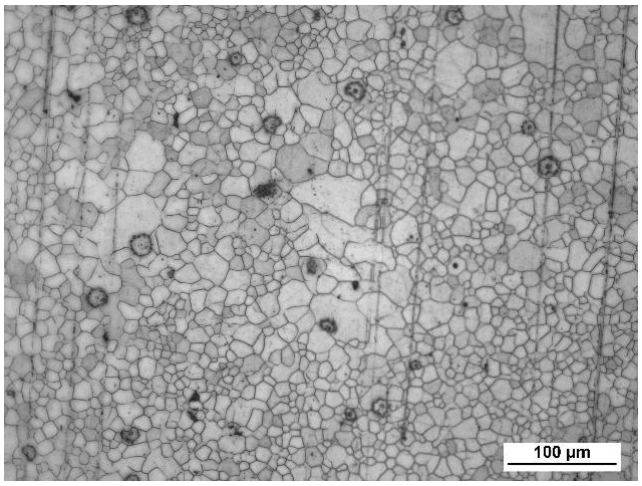


(b)

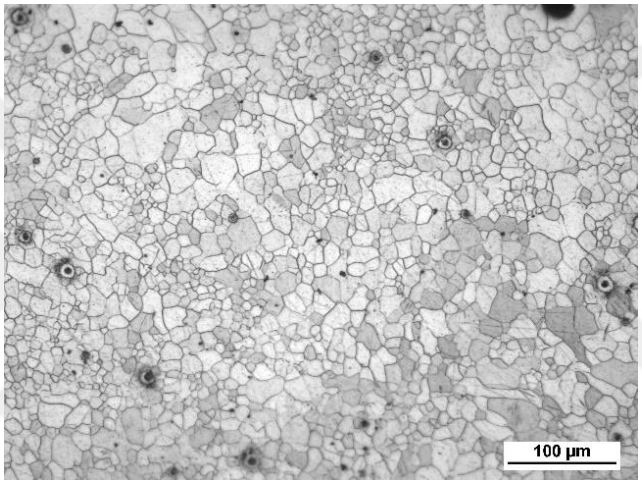


(c)

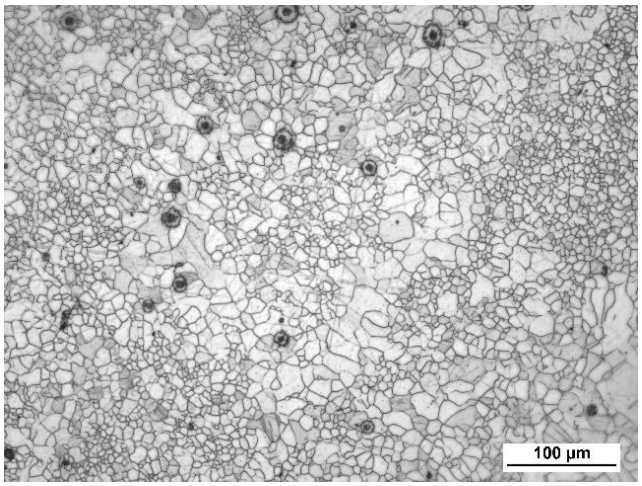
Şekil 4.9 (a) AZ31 + 0,2 Sn, (b) AZ31 + 0,5 Sn, (c) AZ31 + 1 Sn homojenleştirme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.10 (a) AZ31 + 0,2 Sn, (b) A + 0,5 Sn, (c) AZ31 + 1 Sn haddeleme sonrası 200X büyütmede OM görüntüleri

Şekil 4.8 (a-b-c)'de AZ31 alaşımına farklı oranlarda Sn ilavesi yapılarak elde edilen döküm mikroyapıları yer almaktadır. Buna göre döküm mikroyapılarının beyaz matris ve gri ikinci fazlardan oluştuğu, Şekil 4.1 (a)'daki Sn ilavesi yapılmamış döküm AZ31 yapısı ile kıyaslama yapıldığında yapıdaki ikincil fazların miktarının arttığı ve çoğunun ağ şeklindeki tane sınırları üzerinde olduğu değerlendirilmektedir. Mg-Al ikili sisteme ait faz diyagramından, AZ31 magnezyum alaşımının döküm mikroyapısının α-Mg katı eriyik ve ağ örgüsü şeklindeki β-$Mg_{17}Al_{12}$'den oluştuğu bilinmektedir. Bu nedenle beyaz matris fazının α-Mg, ağ fazının ise β-$Mg_{17}Al_{12}$ olduğu öngörülmüştür. Diğer taraftan, Sn ilavesi ile yapıda oluşması beklenen Mg_2Sn fazının dağınık olarak tane sınırlarına dağıldığı ve bu fazın, β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazının morfolojisini de etkilediği düşünülmektedir. Nitekim, döküm görüntülerinde Sn ilavesinin miktarı arttıkça yapının inceldiği görülmektedir. Mg_2Sn fazının yapıyı inceltmesi ve β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazına göre termal kararlığının yüksek olmasının Sn ilave edilmiş AZ31 alaşımlarının yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerini iyileştirmesi beklenmektedir. Şekil 4.9 (a-b-c)'de homojenleştirme işlemi sonucunda Sn katkısı yapılan alaşımlarda homojen taneli bir yapı elde edilmiş, ayrıca mikroyapılarda az miktarda kayma ve ikizlenme oluşumlarına rastlanmıştır. Şekil 4.10 (a-b-c)'deki haddeleme sonrası elde edilen mikroyapılarda ise artan Sn ilavesinin yeniden kristalleşmiş tane yapısında incelme meydana getirdiği anlaşılmaktadır.

Literatür örnekleri incelendiğinde; Jun ve arkadaşı [39] tarafından, AZ61 alaşımına %1 Sn ilave ederek mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelendiği araştırma sonucunda %1 Sn katkısının tane boyutunu küçülttüğü ve β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazının mikroyapı morfolojisini geliştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, Sn ilavesi AZ61 alaşımında Mg_2Sn fazının oluşmasına ve oda sıcaklığında ve 150 °C'deki AZ61 magnezyum alaşımının mekanik özelliklerini etkin şekilde artırmıştır.

Qi ve arkadaşlarının [40] yaptıkları çalışmada; farklı Sn içerikleri olan (0, 1, 2, 4, 6, 8 ve 10 % ağırlıkça) Mg-6Zn-1Mn alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılmış ve döküm mikroyapısının α-Mg, Mg_7Zn_3, Mn ve Mg_2Sn fazlarından oluştuğu saptanmıştır. Sn miktarının artması ile yapıdaki Mg_2Sn fazının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Sn ilavesi ile kaba taneli dendritik döküm yapısının inceldiği görülmüştür. Bununla birlikte, Sn ilavesinin tane küçültmesi ile birlikte mekanik özellikler de iyileşme

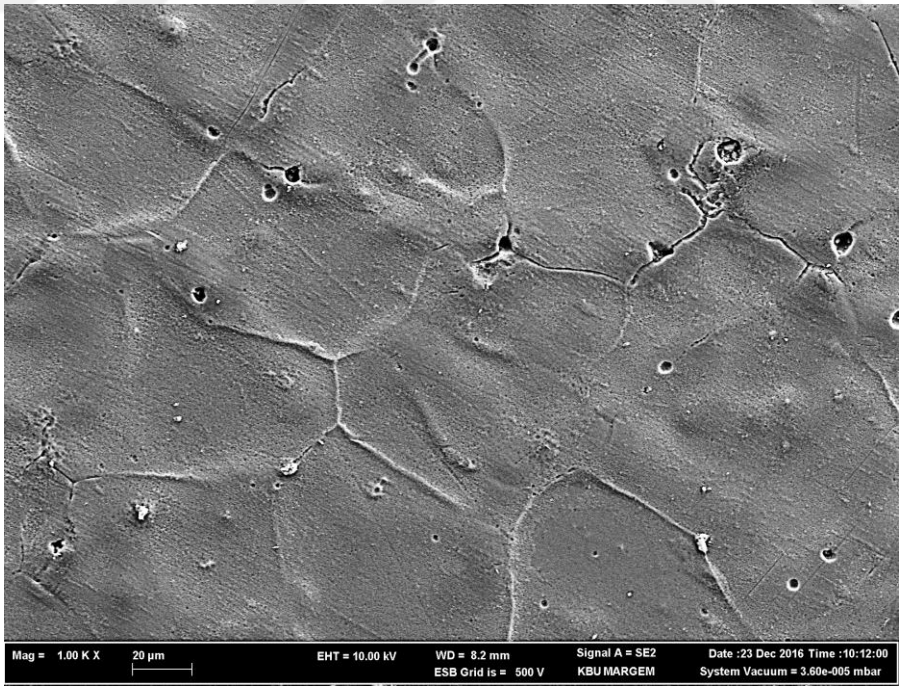
sağladığı belirlenmiştir. Sn katkısı sonrası elde edilen mikroyapı ve tane küçültücü etkilerin literatürle tamamen uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

4.2.2 Döküm, Homojenleştirme ve Haddeleme İşlemi Sonrası Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS Sonuçları

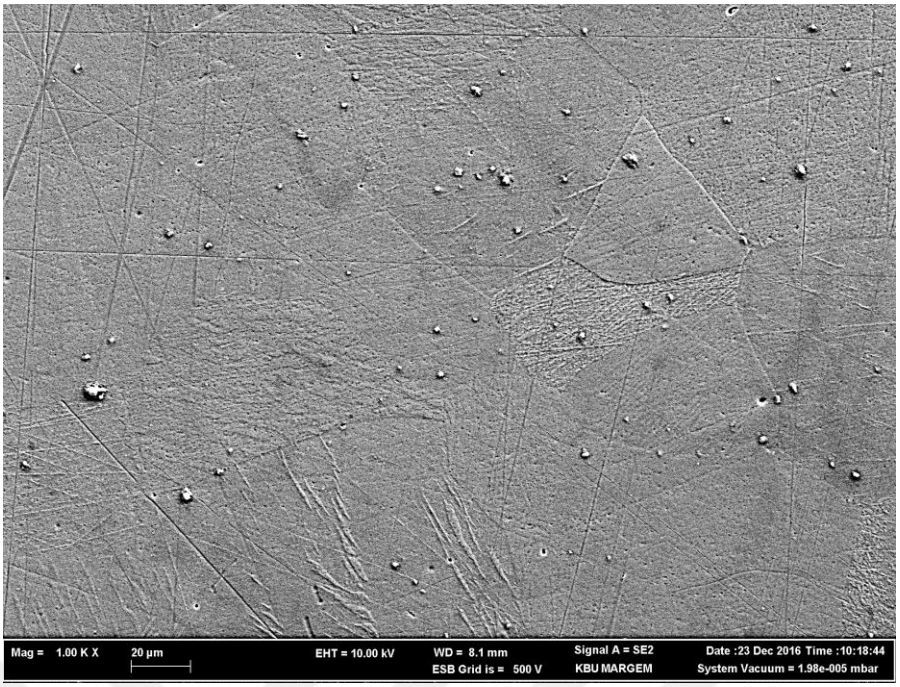
Bu kısımda AZ31 alaşımının ve % 1'lik ilave edilen Ti, In ve Sn katkılarının döküm, homojenleştirme ve haddeleme sonrası mikroyapı karakterizasyonu SEM ve EDS görüntüleri incelenmiştir. Genel olarak, SEM görüntülerinde de haddeleme ile birlikte yapının inceldiği görülmüştür. EDS (EDX) görüntülerinde ise elementel analizler gösterilmiş olup tespit yapılan noktaların oluşan spektrum ve kütle yüzdelerine ilişkin veriler doğrultusunda hangi elementlerce daha zengin olduğu belirlenmiştir.

4.2.2.1 AZ31 Alaşımına Ait SEM ve EDS Sonuçları

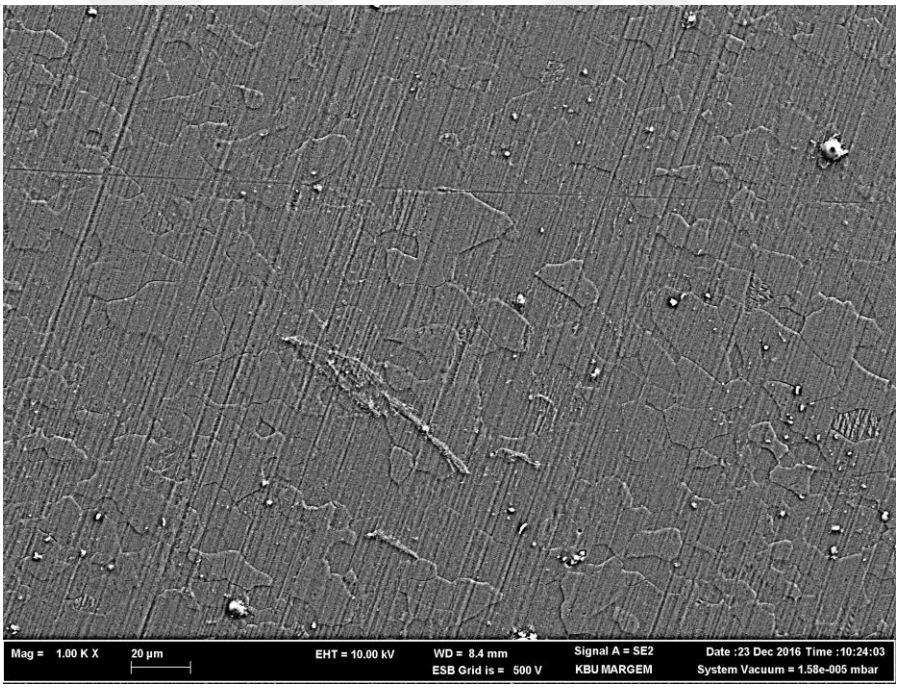
AZ31 alaşımının döküm, homojenleştirme ve haddeleme sonrası SEM görüntüleri ile homojenleştirme ısıl işlemi sonrası incelenen EDS görüntüleri Şekil 4.11-13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir.



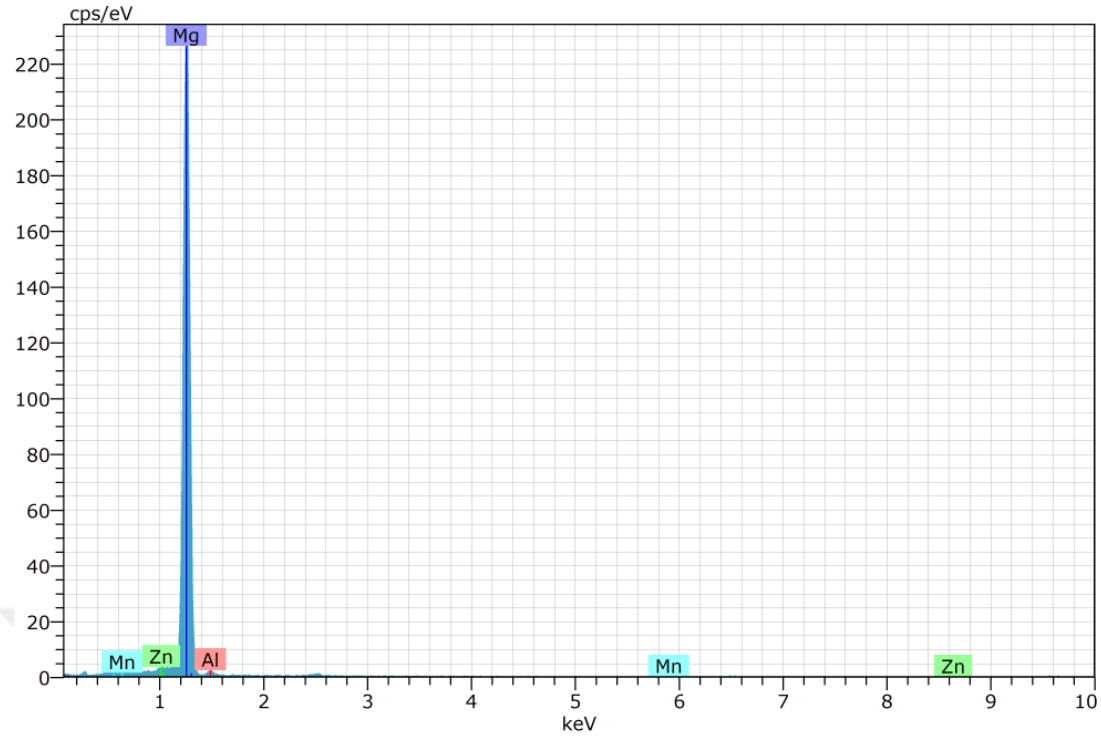
Şekil 4.11 AZ31 döküm numunenin 1000X büyütmede SEM görüntüsü

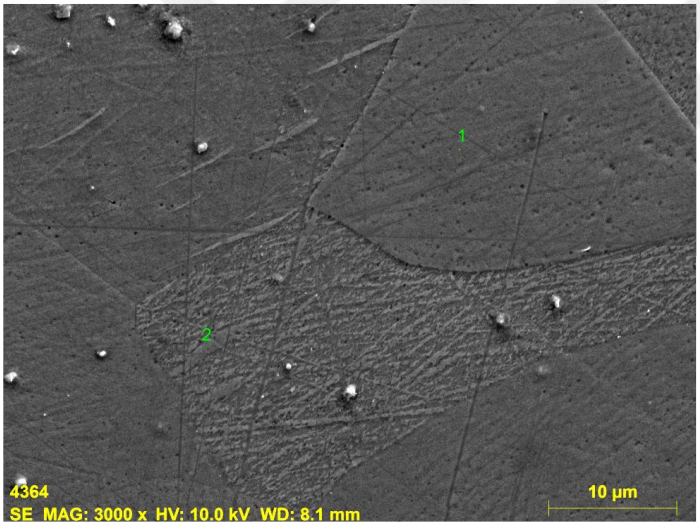


Şekil 4.12 AZ31 homojenleştirilmiş numunenin 1000X büyütmede SEM görüntüsü



Şekil 4.13 AZ31 haddelenmiş numunenin 1000X büyütmede SEM görüntüsü





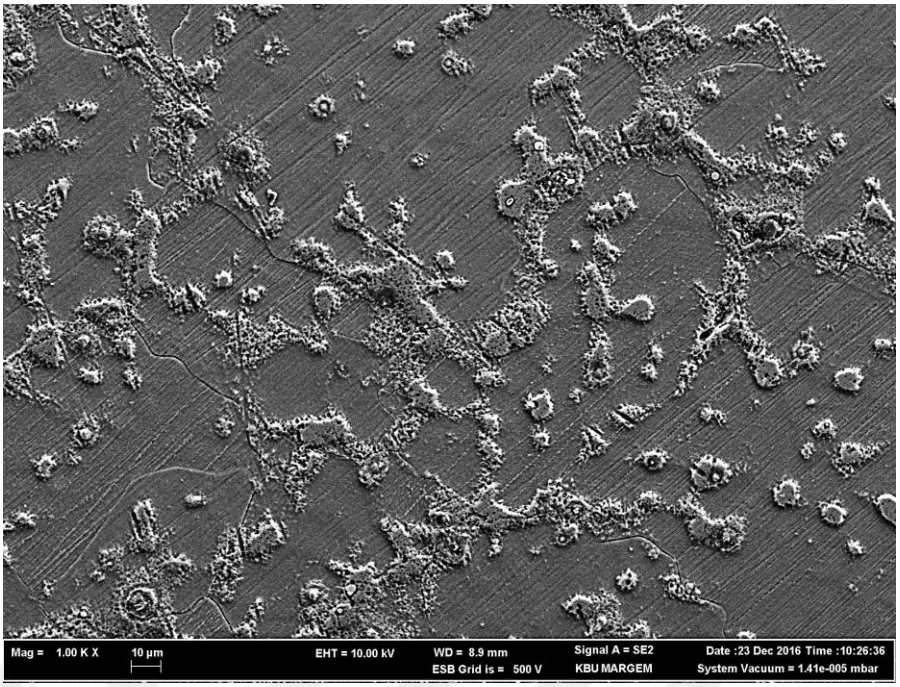
Atomic percent (%)

Spectrum	Mg	Al	Mn	Zn
1	98.00	1.18	0.02	0.79
2	97.88	1.21	0.08	0.82
Mean value:	97.94	1.20	0.05	0.81
Sigma:	0.09	0.02	0.04	0.02
Sigma mean:	0.06	0.01	0.03	0.02

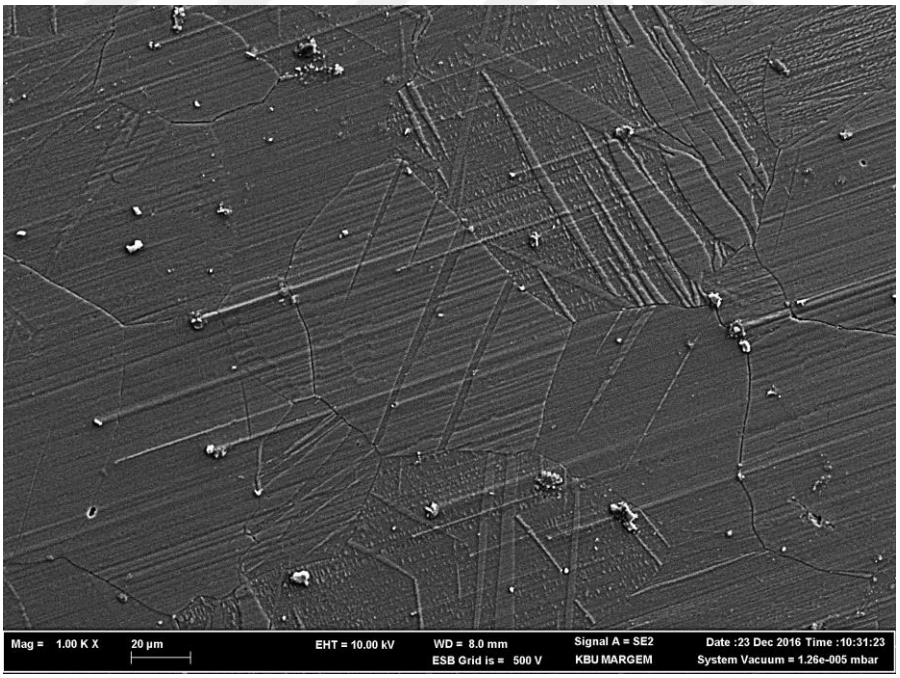
Şekil 4.14 AZ31 alaşımının homojenleştirme sonrası nokta EDX analizi

4.2.2.2 AZ31 Alaşımına Ti İlavesinin SEM ve EDS Sonuçları

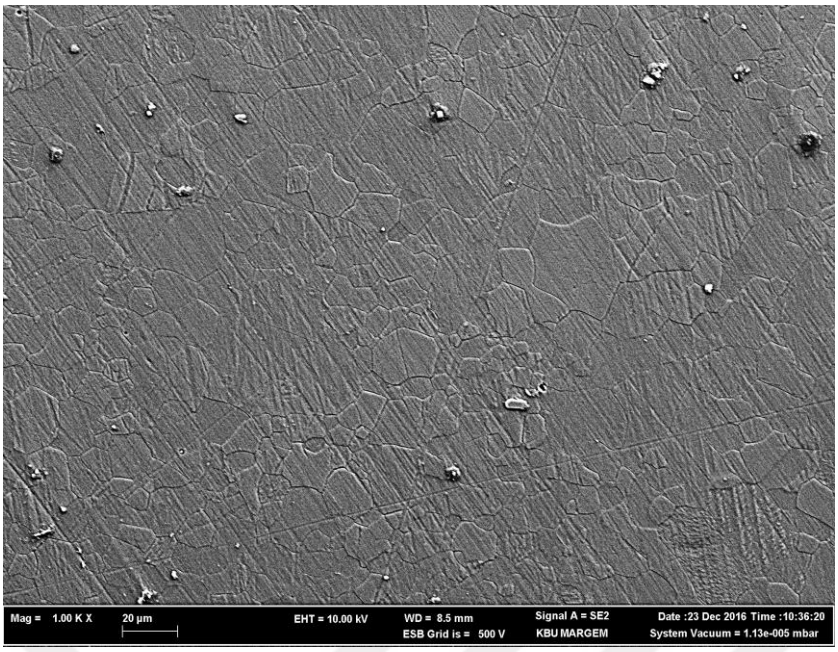
AZ31 alaşımına %1 Ti ilavesi yapılarak elde edilen döküm, homojenleştirme ve haddeleme sonrası SEM görüntüleri ile haddeleme işlemi sonrası incelenen EDS görüntüleri Şekil 4.15-17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir.



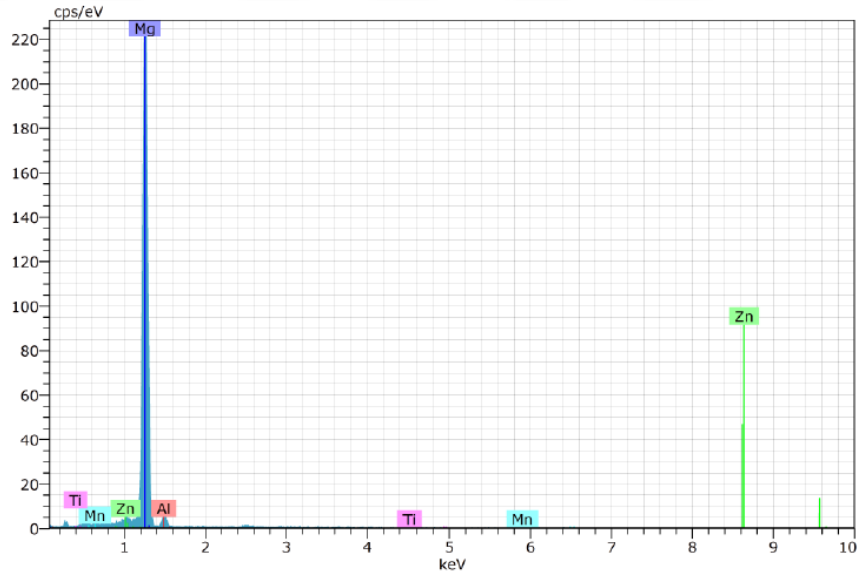
Şekil 4.15 AZ31 + 1 Ti döküm sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü

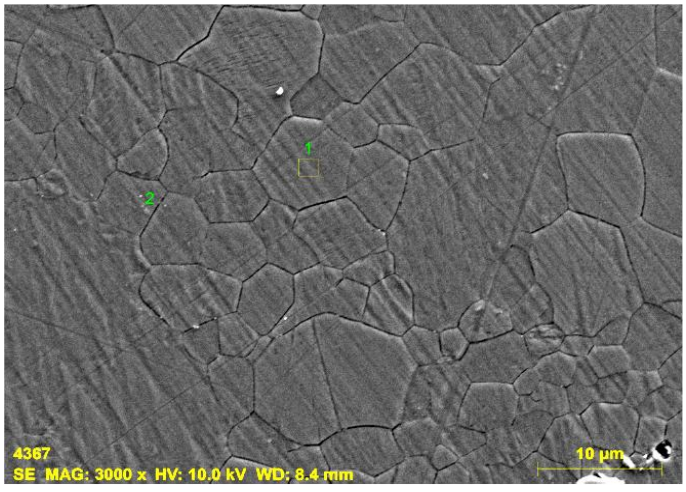


Şekil 4.16 AZ31 + 1 Ti homojenleştirme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü



Şekil 4.17 AZ31 + 1 Ti haddeleme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü





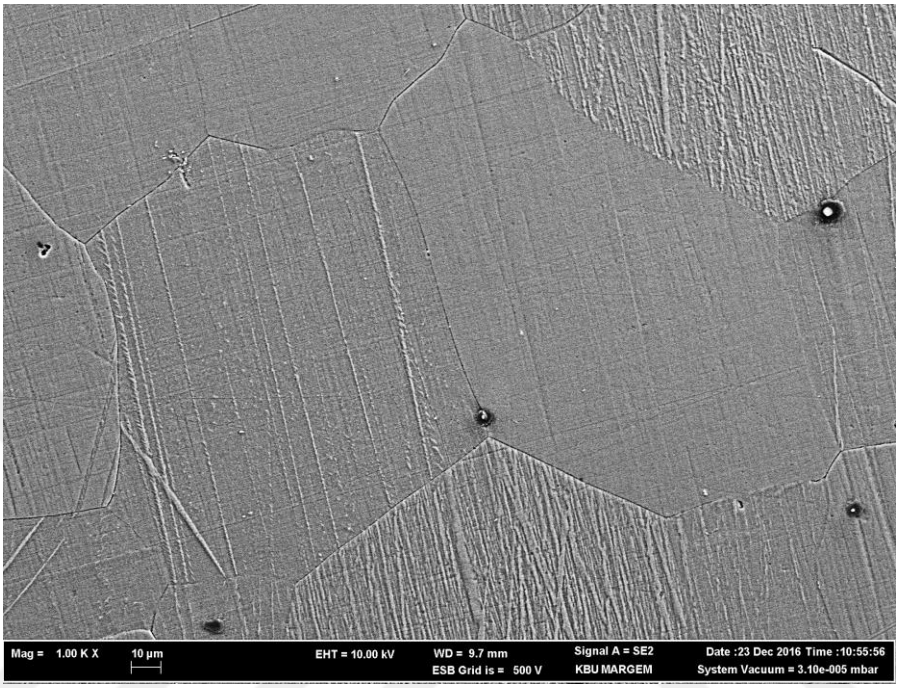
Mass percent (%)

Spectrum	Mg	Al	Ti	Mn	Zn
1	93.74	3.23	0.24	0.00	2.78
2	93.74	3.40	0.10	0.00	2.76
Mean value:	93.74	3.32	0.17	0.00	2.77
Sigma:	0.00	0.12	0.10	0.00	0.01
Sigma mean:	0.00	0.08	0.07	0.00	0.01

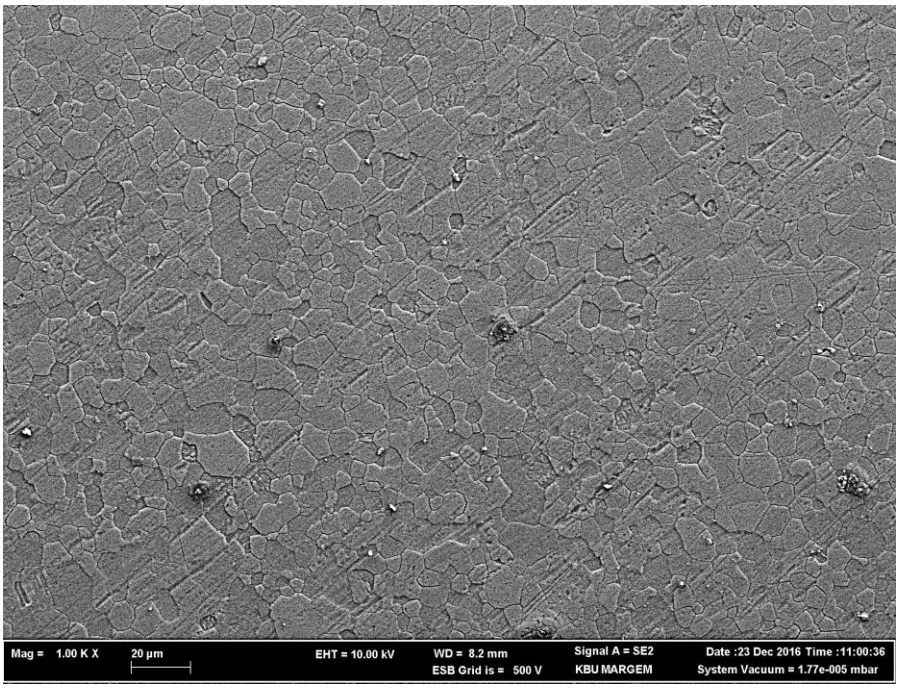
Şekil 4.18 AZ31 + 1 Ti alaşımının haddeleme sonrası nokta EDX analizi

4.2.2.3 AZ31 Alaşımına In İlavesinin SEM ve EDS Sonuçları

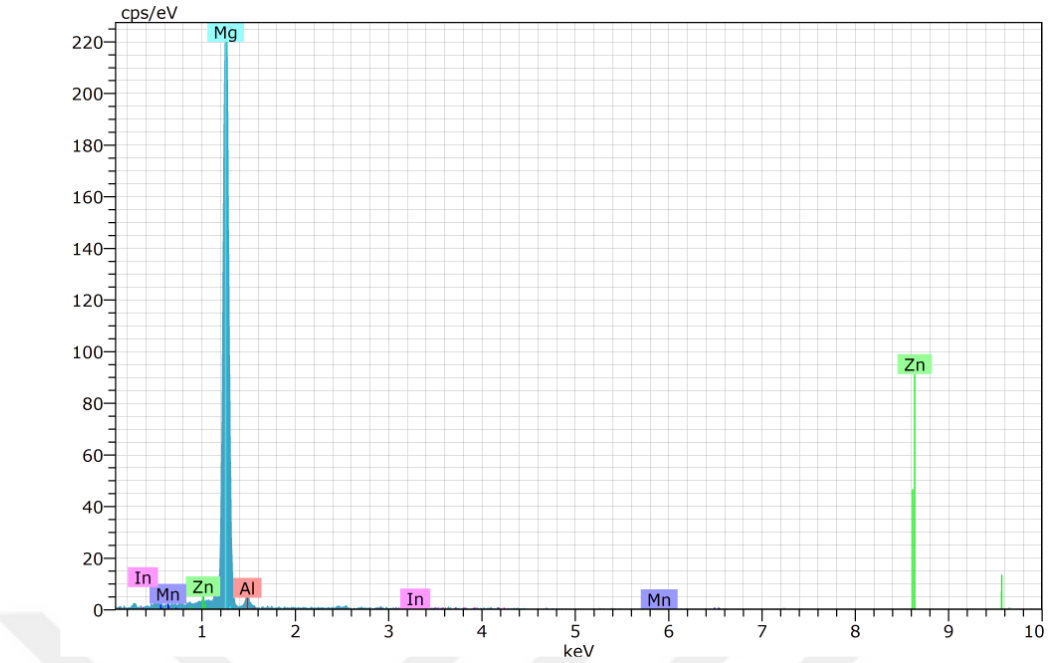
AZ31 alaşımına %1 In ilavesi yapılarak elde edilen homojenleştirme ve haddeleme sonrası çekilen SEM görüntüleri ile haddeleme sonrası incelenen EDS görüntüleri Şekil 4.19-20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.

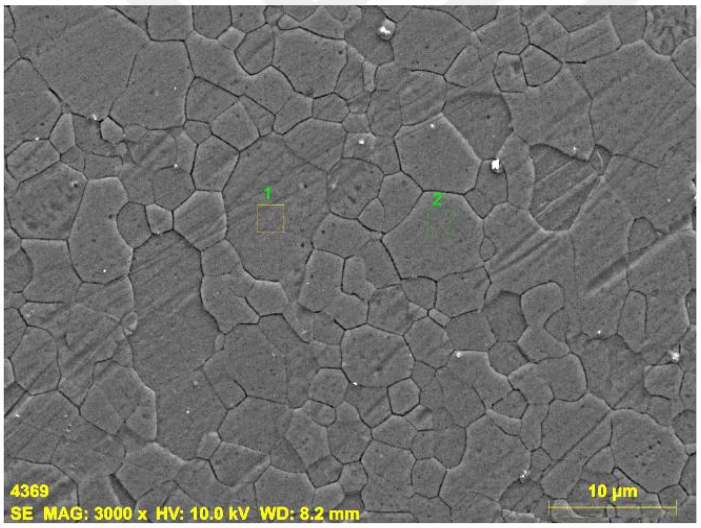


Şekil 4.19 AZ31 + 1 In homojenleştirme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü



Şekil 4.20 AZ31 + 1 In haddeleme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü





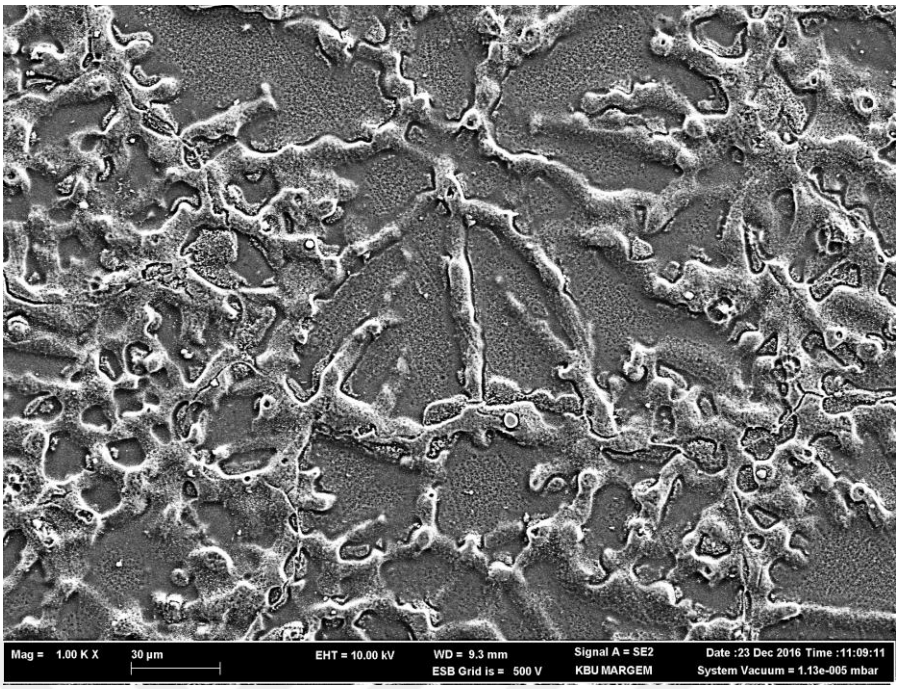
Mass percent (%)

Spectrum	Mg	Al	Mn	Zn	In
1	94.98	2.70	0.00	2.13	0.20
2	94.89	2.20	0.48	2.34	0.10
Mean value:	94.93	2.45	0.24	2.23	0.15
Sigma:	0.06	0.35	0.34	0.15	0.07
Sigma mean:	0.04	0.25	0.24	0.11	0.05

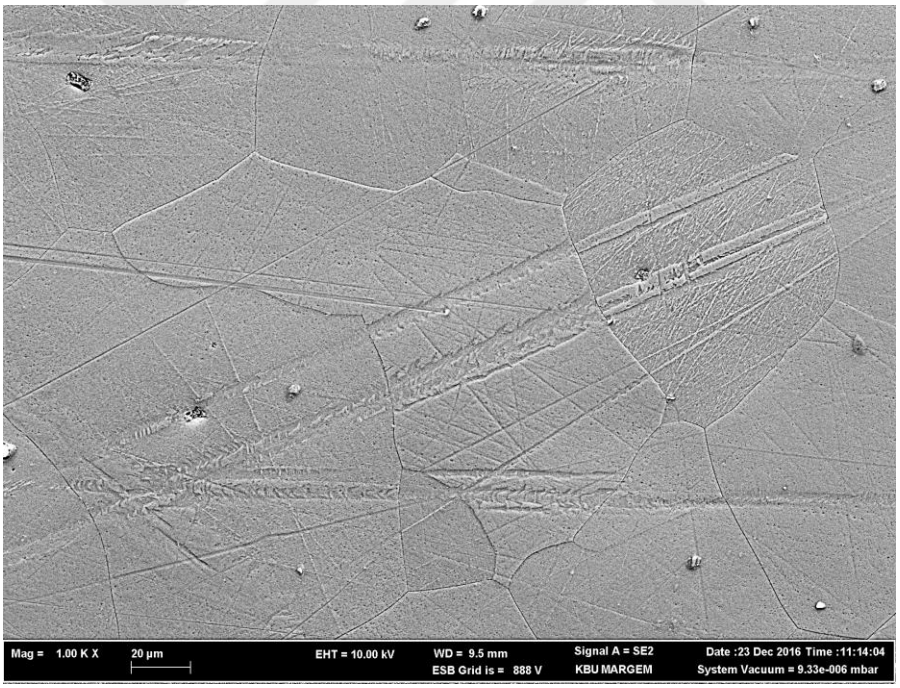
Şekil 4.21 AZ31 + 1 In alaşımın haddeleme sonrası nokta EDX analizi

4.2.2.4 AZ31 Alaşımına Sn İlavesinin SEM ve EDS Sonuçları

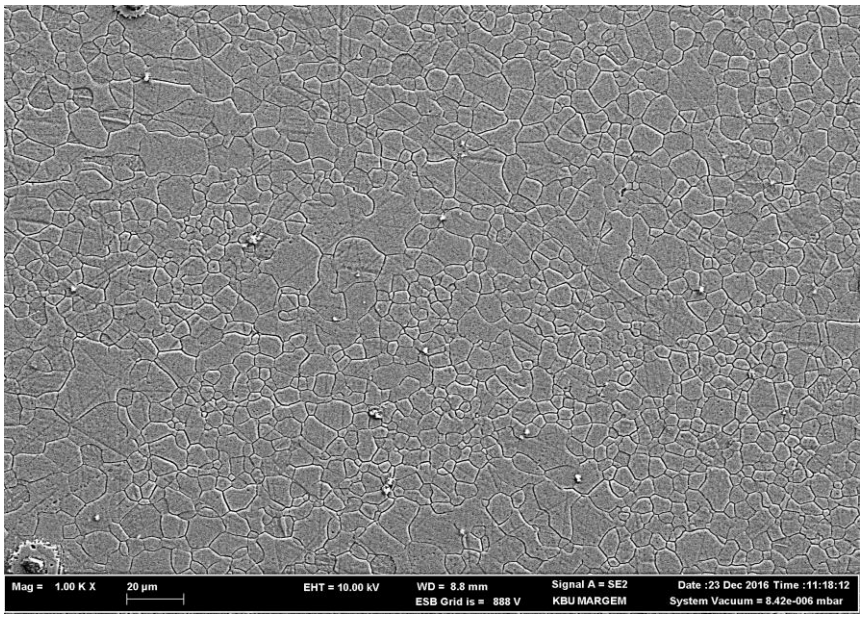
AZ31 alaşımına %1 Sn ilavesi yapılarak elde edilen döküm, homojenleştirme ve haddeleme sonrası çekilen SEM görüntüleri ile haddeleme sonrası incelenen EDS görüntüleri Şekil 4.22-24 ve Şekil 4.25'de verilmiştir.



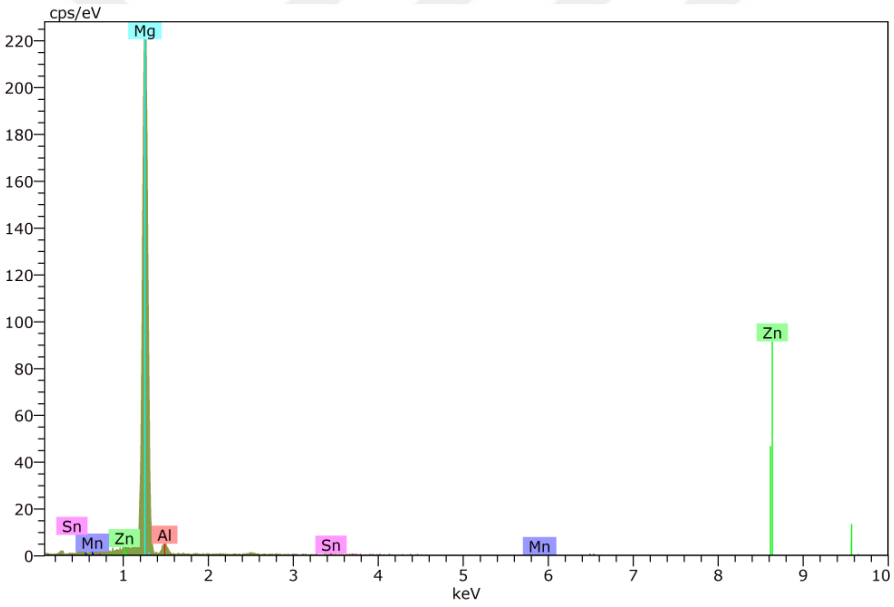
Şekil 4.22 AZ31 + 1 Sn döküm sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü

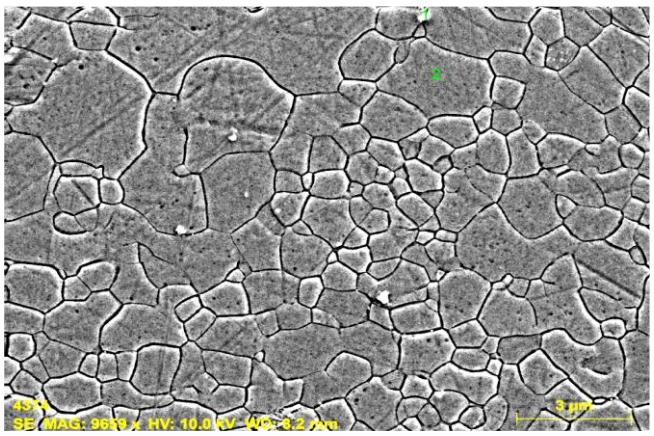


Şekil 4.23 AZ31 + 1 Sn homojenleştirme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü



Şekil 4.24 AZ31 + 1 Sn haddeleme sonrası 1000X büyütmede SEM görüntüsü





Mass percent (%)

Spectrum	Mg	Al	Mn	Zn	Sn
1	94.29	2.97	0.00	2.15	0.59
2	93.68	3.31	0.20	2.30	0.51
Mean value:	93.99	3.14	0.10	2.23	0.55
Sigma:	0.43	0.24	0.14	0.11	0.06
Sigma mean:	0.31	0.17	0.10	0.08	0.04

Şekil 4.25 AZ31 + 1 Sn alaşımının haddeleme sonrası nokta EDX analizi

4.3 Mekanik Deney Sonuçları

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Ti, In ve Sn elementlerinin döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası elde edilen mekanik özelliklerin genel dökümü Çizelge 4.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.2 Alaşımların mekanik değerlerine ilişkin veriler

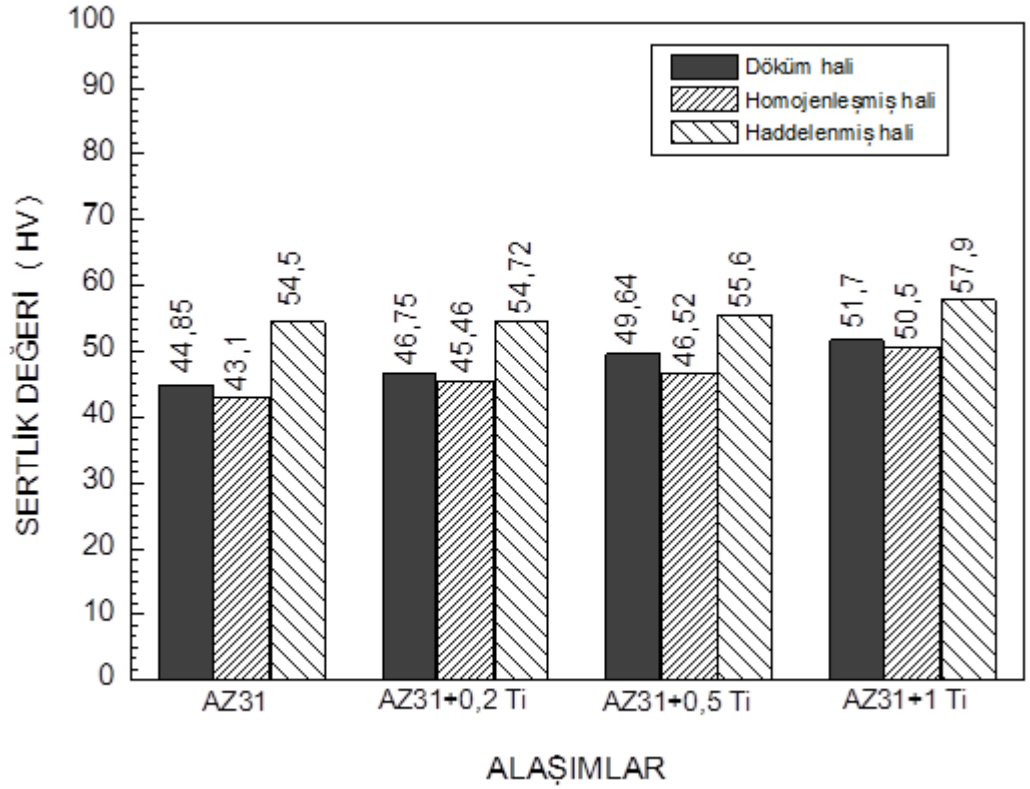
Alaşım Adı	Döküm				Homojenleştirme	Haddeleme			
	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Sertlik (HV)	Sertlik (HV)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Sertlik (HV)
AZ31	138,6	153	19,3	44,85	43,1	140,5	236	17,95	54,5
AZ31+0.2Ti	122,5	147,9	13	46,75	45,46	135	251	18,3	54,72
AZ31+0.5Ti	148,3	161,1	10	49,64	46,52	134	255,7	16,9	55,6
AZ31+1Ti	149,6	173,2	12,6	51,7	50,5	134	255	14,3	57,9
AZ31+0.2In	119,5	138,81	9,5	45,48	43,51	140	254,7	15,5	58,17
AZ31+0.5In	120,5	139,13	14,5	45,85	44,6	137,7	246,3	17,6	49,61
AZ31+1In	125,5	136,3	8,5	51,9	45,4	136	260	15,6	58,4
AZ31+0.2Sn	128	147	15,5	49,7	48,57	140	260	17,36	54,85
AZ31+0.5Sn	147,5	182,6	14	50,58	47,62	139,5	258	19,2	53,5
AZ31+1Sn	134,3	158,7	13,3	53,5	49,63	142,5	249,5	18,8	59,83

4.3.1 Döküm, Homojenleştirme ve Haddeleme İşlemi Sonrası Sertlik Deney Sonuçları

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Ti, In ve Sn elementlerinin döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası sertlik deney sonuçları sırasıyla Şekil 4.26 – 4.29'da verilmiştir.

4.3.1.1 Titanyum (Ti) Etkisi

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Ti elementinin döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası sertlik deney sonuçları Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

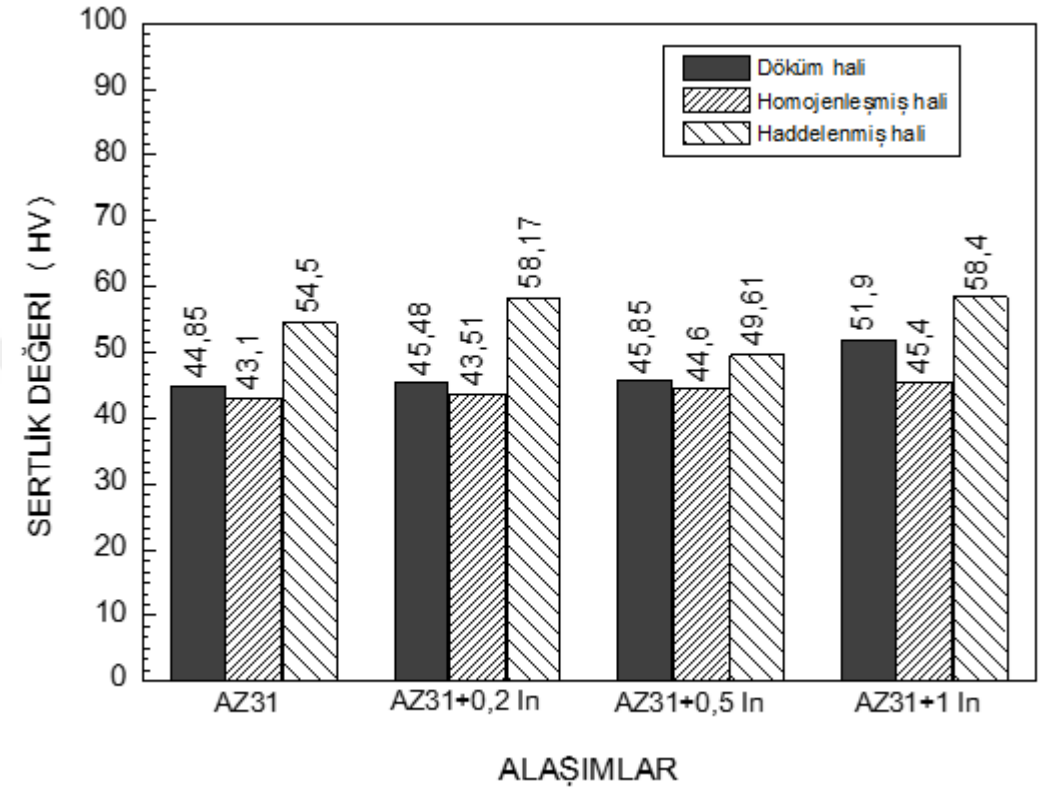


Şekil 4.26 %(0,2-0,5-1) Ti ilavesinin sertlik değerleri

Sertlik grafiği incelendiğinde, AZ31 alaşımı ile farklı oranlarda Ti ilavesi yapılmış AZ31 alaşımları kıyaslandığında Ti katkısının alaşımların sertlik değerlerini artırdığı, ancak artış miktarının belirgin bir farklılık oluşturmadığı değerlendirilmektedir. En yüksek sertlik değeri haddeleme sonrasında % 1 Ti ilavesi yapılmış AZ31 alaşımında 57,9 HV olarak elde edilmiştir. Genel olarak homojenleşme işlemi ile döküm sonrası elde edilen sertlik değerlerinin azaldığı, haddeleme sonrasında ise daha yüksek değerlere ulaştığı anlaşılmaktadır. Bu durumun homojenizasyon sırasında ikincil fazların yapı içerisinde çözünmesi ve tanelerin kabalaşmasından kaynaklandığı; haddeleme sonrası sertlik değerlerindeki artışın ise yeniden kristalleşmenin etkisi ile tanelerin sayısının artması ve tanelerin küçülmesinden olduğu düşünülmektedir. Döküm aşamasında ulaşılan en yüksek sertlik 51,7 HV, homojenizasyon aşamasındaki en yüksek elde edilen sertlik değeri 50,5 HV ile yine % 1 Ti ilavesi yapılmış AZ31 alaşımında tespit edilmiştir. Ayrıca, % 0,5 Ti içeren AZ31 alaşımının % 0,2 Ti içeren alaşıma göre sertlik değerlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir.

4.3.1.2 Indiyum (In) Etkisi

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen In elementinin döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası sertlik deney sonuçları Şekil 4.27'de gösterilmiştir.

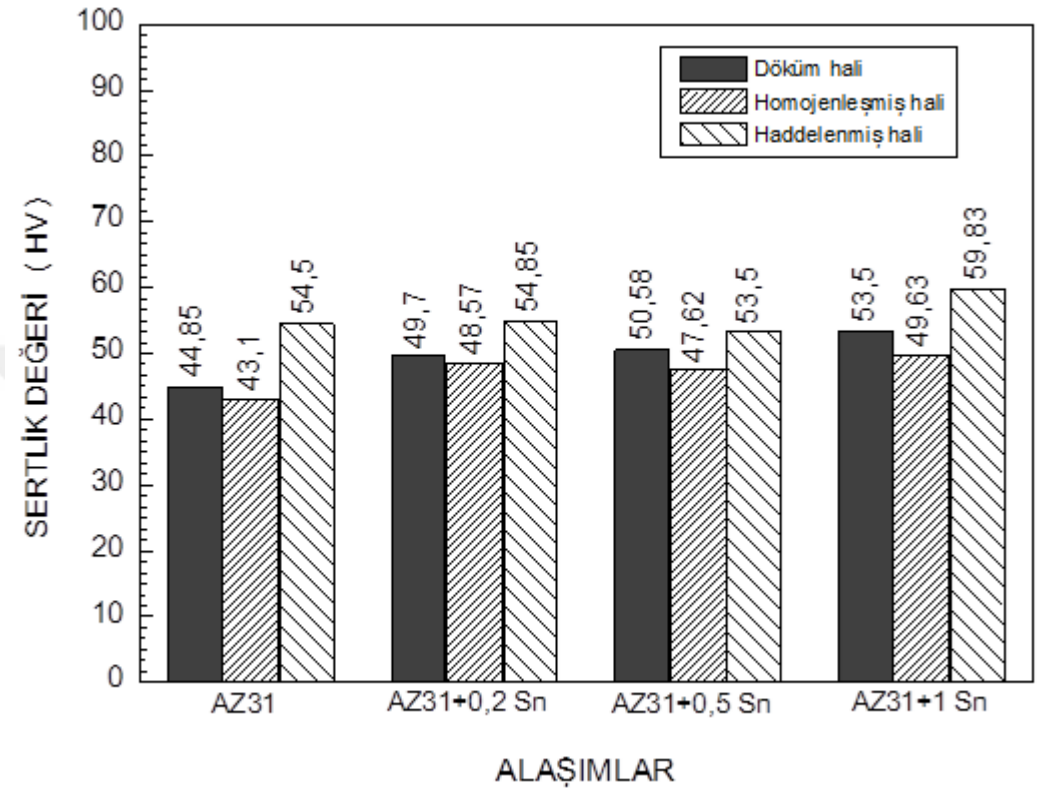


Şekil 4.27 %(0,2-0,5-1) In ilavesinin sertlik değerleri

Söz konusu grafikte, farklı oranlardaki In ilavelerinin AZ31 alaşımının sertliğine genel olarak olumlu katkı yaptığı görülmekle birlikte, haddeleme sonrasında elde edilen % 0,5 In katkılı alaşımda sertliğin bir miktar düştüğü gözlemlenmiştir. Ulaşılan en yüksek sertlik değerleri haddeleme işlemi sonrası 58,4 HV ile % 1 In ilavesi yapılmış AZ31 alaşımında elde edilmiştir. Diğer taraftan % 0,2 In ilaveli AZ31 alaşımının sertliği de %1 In ilavesi yapılmış AZ31 alaşımıyla neredeyse aynı değerlerde olup 58,17 HV olarak ölçülmüştür. Ayrıca, döküm ve homojenizasyon sonrası sertlik değerlerinin bütün alaşımlarda benzer olduğu, sadece 51,9 HV ile dökümdeki en yüksek sertliğin yine % 1 In katkılı AZ31'de elde edildiği tespit edilmiştir. In ilavesinin AZ31 alaşımının sertlik özelliklerinde belirgin bir değişikliğe sebebiyet vermediği değerlendirilmektedir.

4.3.1.3 Kalay (Sn) Etkisi

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Sn elementinin döküm, homojenleştirme ve haddeleme işlemi sonrası sertlik deney sonuçları Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28 %(0,2-0,5-1) Sn ilavesinin sertlik değerleri

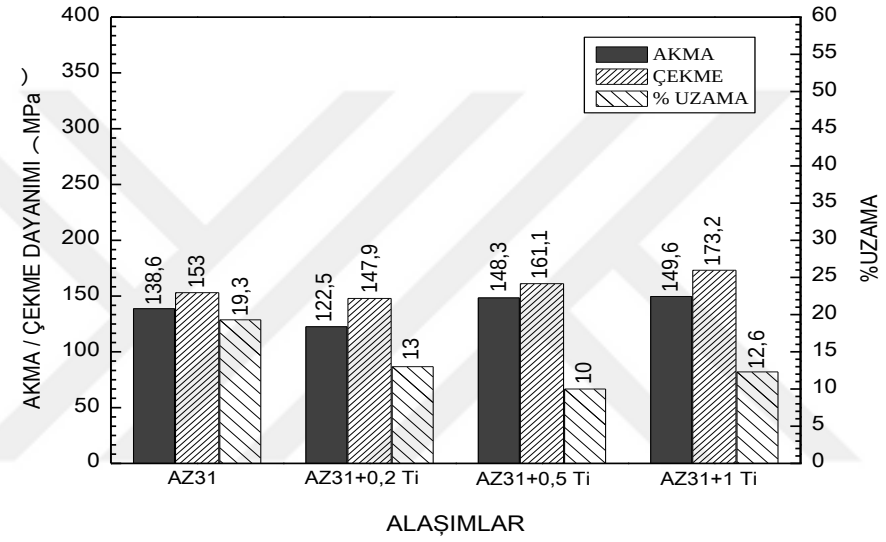
Grafikte, öncelikle döküm sonrası ölçülen sertlik değerleri kıyaslandığında Sn ilavelerinin belirgin bir şekilde sertliği artırdığı anlaşılmaktadır. Homojenizasyon işlemi ile az miktarda sertlik düşüşleri görülmekte olup, haddeleme sonrası sertlik değerlerinin yine artış gösterdiği belirlenmiştir. Sadece haddelenmiş AZ31 alaşımı sertlik değeri 54,5 HV bulunurken, % 0,5 Sn katkılı AZ31 alaşımında haddeleme sonrası elde edilen değer 53,5 HV ölçülmüştür. En yüksek sertlik değeri ise % 1 Sn ilavesi yapılmış AZ31 alaşımında 59,83 HV olarak tespit edilmiştir. Genel olarak sertlik ölçümleri incelendiğinde Sn ilavesinin sertliği artırdığı değerlendirilmektedir.

4.3.2 Döküm ve Haddeleme İşlemi Sonrası Çekme Deney Sonuçları

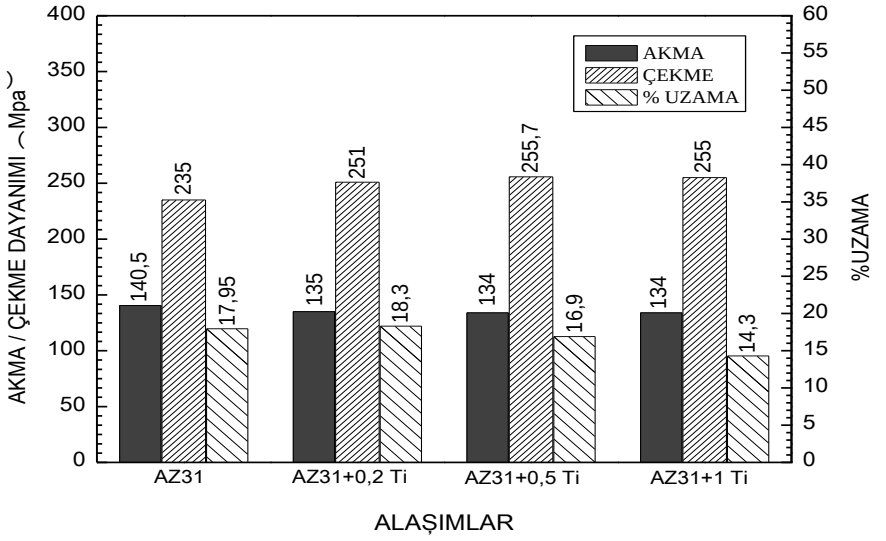
Döküm ve haddeleme işlemleri sonrasında elde edilecek mekanik özelliklerin belirlenmesi üzerinde yoğunlaşılmış olup homojenleştirme aşamasındaki mekanik değerlerin tayinine yönelik bir çalışma yürütülmemiştir.

4.3.2.1 % (0,2-0,5-1) Oranlarda Ti İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Ti elementinin döküm ve haddeleme işlemi sonrası mekanik özellikleri Şekil 4.29'da verilmiştir.



(a)



(b)

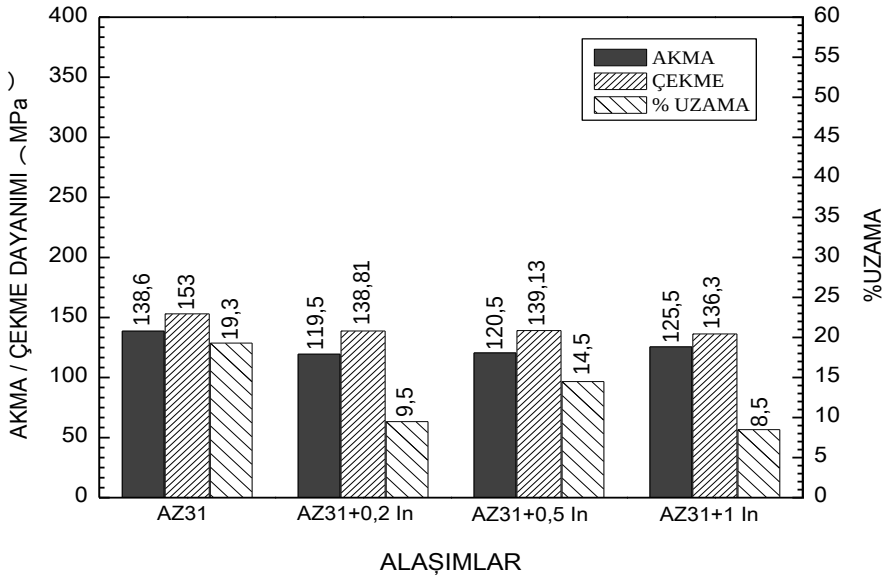
Şekil 4.29 AZ31'e Ti ilavesinin (a) Döküm sonrası mekanik özellikleri, (b) Haddeleme sonrası mekanik özellikleri

AZ31 alaşımına Ti ilavesi yapıldığında hem döküm hem de haddeleme sonrasındaki mekanik özelliklerde artış olduğu tespit edilmiştir. Döküm sonrası ölçülen mekanik değerlere göre en yüksek çekme dayanımı 173,2 MPa ve en yüksek akma değeri 149,6 MPa olarak % 1 Ti katkısı yapılmış AZ31 alaşımında elde edilmiştir. Haddeleme sonucunda ulaşılan mekanik değerler kıyaslandığında % 0,5 Ti ve % 1 Ti ilavesi yapılmış AZ31 alaşımlarının akma ve çekme dayanımlarının oldukça benzer olduğu görülmekte olup çekme değerlerinin 255 MPa ve akma değerlerinin 134 MPa olarak ölçüldüğü değerlendirilmektedir. % uzama olarak hem döküm hem de haddeleme sonrasındaki değerler incelendiğinde Ti ilavesinin % uzamayı olumsuz yönde etkilediği ve Ti miktarı arttıkça da % uzamanın genel olarak azaldığı belirlenmiştir. En yüksek % uzama değerleri dökümde % 19,3 katkı yapılmamış AZ31 alaşımında saptanmıştır.

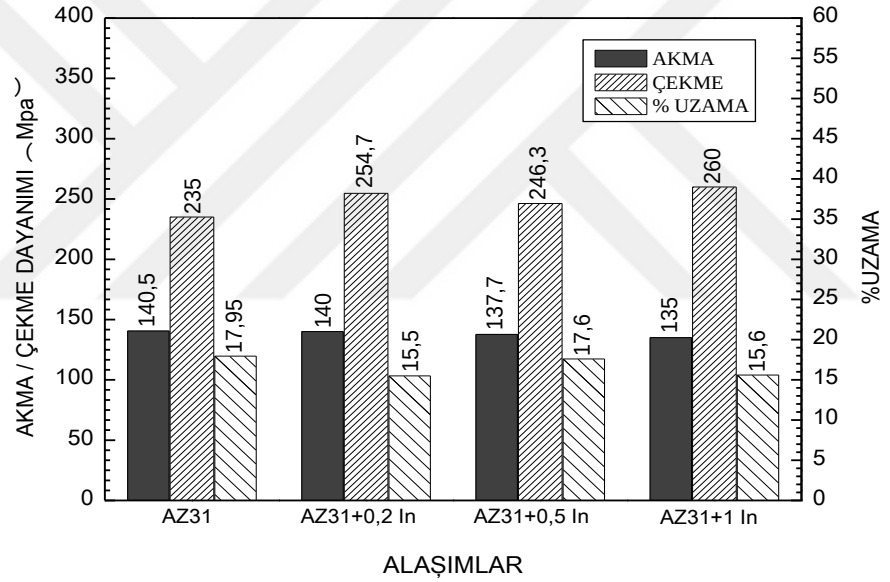
4.3.2.2 % (0,2-0,5-1) Oranlarda In İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen In elementinin döküm ve haddeleme sonrası mekanik özellikleri Şekil 4.30'da sırasıyla verilmiştir.

Döküm sonrasında ölçülen mekanik değerler incelendiğinde In ilavesinin döküm sonrasındaki mekanik özellikleri olumsuz etkilediği anlaşılmaktadır. In ilavesi yapılmış AZ31 alaşımlarının tamamının AZ31 alaşımına göre döküm sonrasında mekanik değerlerinin düştüğü belirlenmiş ve dökümdeki akma ve çekme dayanımında olduğu gibi % uzama değerinde de en yüksek değer In ilavesi yapılmamış AZ31 alaşımında % 19,3 olarak elde edilmiştir. Öte yandan, haddeleme aşamasındaki mekanik değerlerde ise In ilavesinin mekanik özellikleri artırdığı görülmektedir. En yüksek çekme dayanımı değeri % 1 In katkısı yapılmış AZ31 alaşımında 260 MPa olarak ölçülmüştür. Ardından, en yüksek çekme değeri % 0,2 In ilavesi yapılmış alaşımda 254,7 MPa bulunmuştur. En yüksek % uzama değeri 17,95 olarak In içermeyen AZ31 alaşımında haddeleme sonrasında saptanmıştır.



(a)

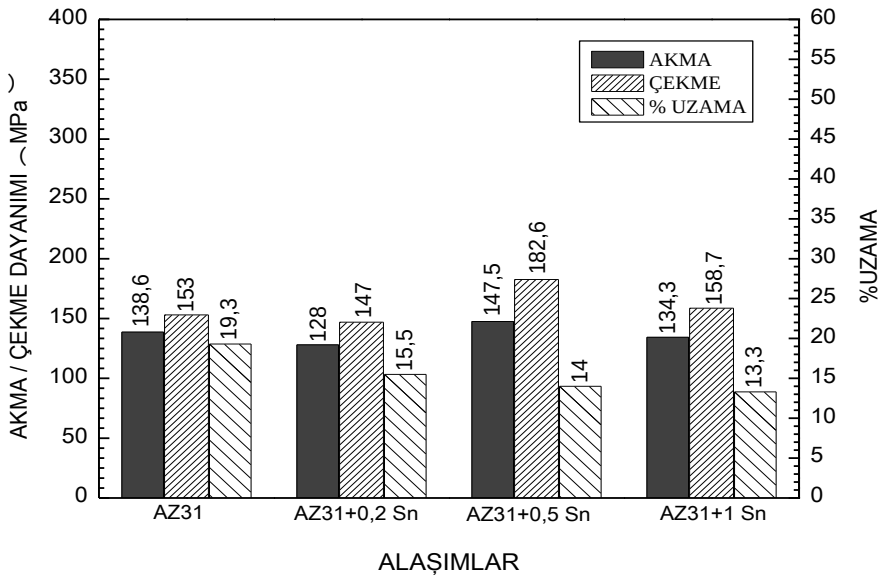


(b)

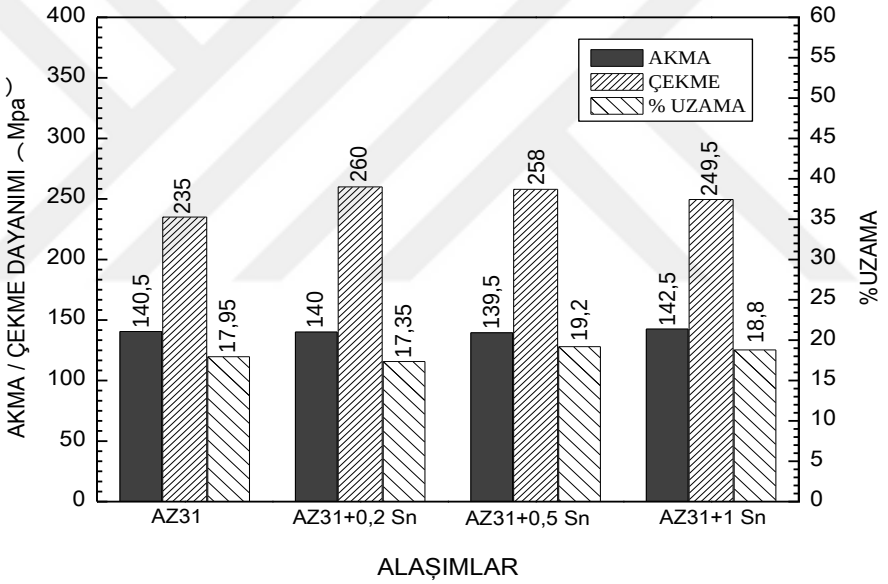
Şekil 4.30 AZ31'e In ilavesinin (a) Döküm sonrası mekanik özellikleri, (b) Haddeleme sonrası mekanik özellikleri

4.3.2.3 % (0,2-0,5-1) Oranlarda Sn İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi

AZ31 alaşımına farklı oranlarda (%0,2, %0,5 ve %1) ilave edilen Sn elementinin döküm ve haddeleme sonrası mekanik özellikleri Şekil 4.31'de sırasıyla verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.31 AZ31'e Sn ilavesinin (a) Döküm sonrası mekanik özellikleri, (b) Haddeleme sonrası mekanik özellikleri

Grafikler incelendiğinde, döküm sonrasında farklı oranlarda Sn ilavesi yapılmış AZ31 alaşımlarının genel olarak çekme dayanımı değerlerinin arttığı görülmekte olup, akma dayanımı değerlerinde belirgin bir farklılık saptanmamıştır. En yüksek çekme dayanımı değerine 182,6 MPa olarak % 0,5 Sn katkılı AZ31 alaşımında ulaşılmıştır. Ayrıca, Sn ilavesinin % uzama değerlerini olumsuz etkilediği anlaşılmakta olup en yüksek değer Sn ilavesi yapılmamış AZ31 döküm alaşımında % 19,3 olarak elde edilmiştir. Haddeleme

sonrası değerlere bakıldığında, Sn ilavesinin özellikle çekme dayanımı değerlerini kayda değer bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanım değeri % 0,2 Sn ilavesi yapılmış AZ31 alaşımına 260 MPa olarak ölçülmüştür. % 0,5 Sn ilavesinde 258 MPa ve %1 Sn ilavesinde ulaşılan çekme dayanımı değeri 249,5 MPa olarak belirlenmiştir. Haddeleme sonrası % uzama değerlerinin ise benzer olduğu değerlendirilmiştir.

Mekanik değerler hakkında literatür çalışmaları incelendiğinde; Song ve arkadaşları [41], AZ31 magnezyum alaşımlı levhanın mekanik özelliklerini geliştirmek için, kütük döküm, ekstrüzyon ve haddeleme süreçlerini içeren entegre levha prosesi üzerinde çalışmışlardır. Mekanik özelliklerle ilgili olarak, kütük döküm, ekstrüze ince slab ve haddelenmiş levhanın çekme dayanımı ve uzama değerleri sırasıyla 189, 258 ve 234 MPa ile % 13, % 16.5 ve % 23 olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın AZ31 alaşımın özellikleri kıyaslandığında literatürde elde edilen değerler ile genel olarak uyumlu olduğu özellikle haddeleme sonucu oluşan çekme dayanımı değerlerinin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür.

Miao ve arkadaşları [42], AZ31 alaşımının haddeleme prosesi ile mikroyapı ve mekanik özelliklerini araştırmış, bu amaçla 20 mm kalınlığa sahip AZ31 ingot slab malzemeyi 400°C'de 10 saat boyunca homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutmuş, akabinde 5 m/dk haddeleme hızında 6 paso olacak şekilde haddeleme işlemi uygulayarak slab yaklaşık 2 mm kalınlığa haddelenmiştir. Mekanik özelliklere bakıldığında enine doğrultuda akma dayanımı, çekme dayanımı 206MPa, 338 MPa ve % uzama 26.4 oranında tespit edilmiş, haddeleme doğrultusunda ise 196 MPa, 330 MPa ve 27.6 oranında % uzama değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan çalışmanın haddeleme yönünde elde edilen dayanım değerleri ile kıyaslama yapıldığında literatürde ulaşılan değerlerden daha düşük olduğu görülmekle birlikte, dayanım değerlerinin yüksek olmasının haddeleme parametrelerindeki farklılıktan ve yapının daha ince olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Üçüncüoğlu ve diğerleri [43], ikiz hadde döküm tekniği ile üretilmiş 6 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşım levhaya simetrik haddeleme ve asimetrik haddeleme uygulamışlardır. Haddeleme aşamasından önce levhalar homojenize mikroyapıya sahip

olmaları için 6 saat boyunca 425°C'de ısıl işleme tabi tutulmuştur. Homojenizasyon sonrasında haddeleme öncesinde levhalar ilk olarak 350°C'de 30 dakika ısıl işlem görmüşlerdir. Ardından, levhalar 300°C sıcaklıkta simetrik ve asimetrik olarak haddelenmişlerdir. Çalışmada asimetrik haddeleme işleminde üst merdane ve alt merdane arasındaki dönüş hızı oranı 1.25 olarak seçilmiştir. Haddelenen AZ31 levhaların mikroyapıları, dokusu ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Homojenize edilen AZ31 alaşım levhanın ortalama tane boyutu 19 µm olarak hesaplanmıştır, öte yandan simetrik haddelenen numunede tane boyutu 10 µm olarak, asimetrik haddelenen numunede ise 0.7 µm olarak belirlenmiştir. Ancak, mekanik özellikler değerlendirildiğinde asimetrik haddeleme ile elde edilen tane boyutundaki incelmenin mekanik özelliklere çok fazla katkı yapmadığı anlaşılmıştır. Simetrik haddeleme sonucu akma dayanımı 188 MPa, çekme dayanımı 267 MPa ve % uzama 21 olarak tespit edilmiş olup literatürde ulaşılan bu değerlerin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Nakaura ve arkadaşları [44], AZ31 slab elde etmek için ikiz hadde döküm tekniğini kullanmışlardır. AZ31 slab döküm işlemi yapılan çalışma ile benzer bir şekilde koruyucu gaz atmosferi altında (% 1 SF_6 ve CO_2) ergitme ile yapılmıştır. Döküm slab 5mm kalınlığında ve 250 mm genişliğinde elde edilmiştir. Ergimiş metal 720-740°C'de fırından tandişe pompa vasıtasıyla transfer edilmiş ardından hadde merdaneleri arasındaki boşluğa besleme yapılmıştır. Hadde merdaneleri arasındaki boşluk 5 mm olup 0.6 ile 1.7 m/dakika arasındaki değişen haddeleme hızlarında ikiz hadde döküm yöntemiyle üretilen AZ31 alaşımlı slabın mikroyapısal ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Homojenizasyon işleminin mekanik özellikler üzerindeki etkisini öğrenmek için bazı slablar 450 °C 24 saat ısıl işleme tabi tutulmuştur. Bununla birlikte, çekme özellikleri oda sıcaklığından 400 °C'ye kadar değişen bir sıcaklıkta araştırılmıştır. Oda sıcaklığı ile 400 °C arasında değişen bir sıcaklıkta ikiz hadde döküm levha (homojenleştirilmiş ve homojenleştirilmemiş) slabların ingota göre çekme mukavemeti değerlerinin özellikle oda sıcaklığı gibi düşük sıcaklıklarda daha yüksek ve 230 MPa civarında olduğu, uzama değerlerinin ise sıcaklık arttıkça arttığı, 400 dereceye yakın sıcaklıklarda ve homojenleştirme işleminden geçmiş levhalarda % 45'lere yaklaştığı, oda sıcaklıklarında yaklaşık % 13 olarak tespit edilmiştir. Yapılan değerlendirmede homojenizasyon ısıl işleminin etkisinin fazla olduğu, mikroyapıdaki dentrit hücre

sınırlarındaki Al ve Zn atomları segregasyonlarının yapıya alınmasını sağladığı düşünülmüştür. Haddeleme sonrası homojenizasyon uygulanan levhaya ait değerler yapılan çalışma ile benzer olmakla birlikte oda sıcaklıklarındaki çekme mukavemeti ve % uzama değerlerimizin bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Farklılıkların haddeleme ve ısıl işlem parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Qing ve arkadaşları [45], çalışmalarında haddelenmiş 4 mm kalınlıkta AZ31 Mg alaşımı levhanın 433-523 K sıcaklıklarında daha düşük kalınlığa haddelenmesi ve akabinde 473 K sıcaklığında 1 saat ısıl işlem uygulanması sonrasında ulaşılan mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Haddeleme işlemi sırasında, 4 mm kalınlığındaki levha 0.7 mm'ye kadar haddelenmiştir. Başlangıç malzemesine (sıcak haddelenmiş, akma dayanımı: 125 MPa, çekme dayanımı: 237 MPa, % uzama: 20, iki yönde ortalama) kıyasla, 433-493 K sıcaklık aralığında haddeleme ve ardından tavlama yapılmasının mekanik özellikleri önemli ölçüde geliştirdiği anlaşılmıştır. 473 K'de haddelenen sacın akma dayanımı, başlangıçtaki malzemenin akma dayanımına göre yaklaşık 2.3 kat daha yüksektir. 433 K'de haddelenirken, akma dayanımı haddeleme yönüne ters doğrultuda 350 MPa olarak saptanmıştır. Bu, AZ31 Mg alaşımının işlenmesi çalışmaları için heyecan verici bir sonuç olup, mekanik değerlerin bu seviyelere ulaşmasının haddeleme paso sayısının fazla olması sebebiyle sağlanan mikroyapısal homojenite ve tane boyutu incelmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Dolayısıyla proses parametrelerinin kontrol edilmesi ile AZ31 Mg alaşımlı levha üretiminin yaygınlaştırılabileceği düşünülmüştür. Yapılan çalışmanın literatürle uyumlu olduğu özellikle haddelenmiş başlangıç malzeme ile mekanik değerlerin örtüştüğü; ancak haddeleme proses şartlarındaki farklılıklar ve ilave yapılan ısıl işlem süreçleri sebebiyle yeni ulaşılan değerler arasında farklılıklar oluştuğu değerlendirilmiştir.

Raghad Zaid ve arkadaşları [35], AZ31 Mg alaşımına Ti ilave edilmesinin mekanik özelliklerini incelemiş olup yüksek miktarda olmasa da sertlikte bir miktar artışa sebep olduğu döküm sonrasındaki mikrosertlik değeri 94 HV iken Ti ilavesi sonrası bu değerin 98 HV olduğu saptanmıştır. Diğer taraftan, mekanik dayanım değerlerinin Ti ilavesi ile bir miktar arttığı gözlemlenmiş olup % uzamaya ise belirgin bir etki yapmadığı anlaşılmıştır. Sonuçların yapılan çalışma ile uyum içinde olduğu görülmüş olup sertlik

değerlerindeki farklılığın proses şartlarındaki (döküm, tane boyutu, vd.) farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ai ve çalışma arkadaşları [36], AZ91 alaşımına Ti ilavesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiş olup ağırlıkça % 0,1 ila % 0,5 oranındaki Ti ilavesinin, döküm mikroyapısının iyileştirilmesini sağladığını göstermiştir. Ti içeriği ağırlıkça % 0.4 iken çekme mukavemeti ve uzama sırasıyla maksimum 197 MPa ve % 6.9 maksimum değere yükseldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Ti elementi katkısının döküm yapısının tane boyutunu azalmakta, tane sınırları artmakta, çatlak eğilimi azalmakta ve çekme dayanımı artmaktadır. Ayrıca, alaşıma Ti elementi eklemesinden sonra mekanik özelliklerin geliştiği değerlendirilmiştir. AZ31'e Ti ilavesi, AZ91'e Ti katkısı yapılması çalışmalarına benzer şekilde mekanik değerleri artırdığı ve yapıyı incelttiği belirlenmiştir.

Son zamanlarda, Sn'nin magnezyum alaşımları özellikleri üzerindeki etkisini anlamak için birçok araştırma yapılmıştır ve Sn ilavesinin, Mg_2Sn fazının oluşması nedeniyle alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirebileceği bulunmuştur [46-50]. Sn ucuz bir metal olup magnezyum alaşımlarının dökülebilirliğini, dayanımını ve sürünme direncini artırmaktadır [51].

Fang ve ekibi [52], AZ31 alaşımına ingot ve nanopartikül seviyesinde Sn ilave ederek (ağırlıkça %1 ve % 3 oranlarında) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, ilavenin ingot veya partikül seviyede olup olmadığına bakılmaksızın Sn ilavesi yapıldıkça yapı içerisinde bulunan Mg_2Sn faz miktarında artış olduğu saptanmıştır. Ayrıca, nanopartikül olarak Sn ilavesinde nanopartikül olarak, ingot olarak ilave edilen Sn'de ise makro boyutta Mg_2Sn fazlarının arttığı anlaşılmıştır. Sn ilavesinin dayanım ve süneklik özelliklerini geliştirdiği tespit edilmiştir. Süneklik özelliklerinden ziyade dayanım olarak değerlendirme yapıldığında yapılan çalışmanın literatür ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Kubasek ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise [53], %1 ila %7 oranlarında In içeren Mg'ye ilave edilerek oluşturulan alaşımların mekanik özellikleri ve yapısı incelenmiştir. İndiyumun magnezyum üzerinde büyük miktarda olmasa da sertleştirme ve güçlendirme etkileri gösterdiği belirlenmiştir. Bu bakımdan, yapılan çalışmanın literatür

ile kıyaslandığında döküm yapısında belirgin bir farklılık oluşturmadığı gözlemlenmekle birlikte, haddeleme özelliklerinde In'nin AZ31 alaşımının mekanik özelliklerinde iyileşme sağladığı görülmüştür.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanımı giderek artmakta olan AZ31 Mg alaşımına % 0,2, % 0,5 ve % 1 oranlarında Ti, In ve Sn katkılarının yerçekimi döküm tekniği ile atmosfer kontrollü olarak öncelikle dökümleri gerçekleştirilmiş, ardından homojenizasyon ısıl işlemi uygulanmış ve son olarak ise alaşımlar haddelenmiş olup döküm ve haddeleme sonrasındaki mekanik özellikler belirlenerek, metalografik inceleme yapılmıştır. Yürütülen çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar ve öneriler ise şöyledir;

Sonuçlar;

1) AZ31 Mg alaşımının mikroyapısının α-Mg ana matrisinden ve tane sınırlarında β-$Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazından oluştuğu gözlemlenmiştir.
2) Homojenleştirme işlemi ile tane sınırlarındaki intermetalik β-$Mg_{17}Al_{12}$ fazı α-Mg matrisi içinde çözündürülmüş ve alaşımlar daha sade yapılı bir forma dönüşmüştür.
3) AZ31 alaşımına Ti, Sn ve In elementleri katkısı ile mikroyapı morfolojisi değişerek α-Mg taneleri küçülmüştür. Ayrıca mikroyapıdaki β- $Mg_{17}Al_{12}$ fazının inceldiği belirlenmiştir.
4) AZ31'e farklı oranlarda Ti ilavesi ile döküm, homojenleştirilmiş ve haddelenmiş haldeki alaşımlarda sertlikte lineer bir artış görülmüştür. En yüksek sertlik değeri % 1 Ti ilavesinde ölçülmüştür.

5) AZ31'e In ilavesi sonrasında en çok sertlikte değişim % 1 katkılı In alaşımında döküm sonrası elde edilmiş olup, en yüksek sertlik değerine yine haddeleme sonrasında % 1 In ilavesinde erişilmiştir. Ancak, sertlikte In ilaveleri sonrası genel anlamda kayda değer bir değişiklik olmamakla birlikte, In ilavesi ile sertliğin bir miktar arttığı tespit edilmiştir.

6) AZ31'e Sn ilavesi ile döküm sonrası sertlikte lineer bir artış, homojenleştirilmiş ve haddelenmiş haldeki alaşımlarda ise; artan Sn miktarına bağlı sertlikte genel olarak artış görülmüştür. En yüksek sertliğe % 1 Sn katkısında ulaşılmıştır.

7) AZ31 alaşımına Ti ilavesi ile hem döküm hem de haddeleme işlemi sonrasında mekanik özelliklerinde genel anlamda bir artış meydana geldiği görülmektedir. %0,5 Ti ilavesi ile maksimum çekme dayanımı elde edilmiştir. En fazla % uzama döküm sonrası katkı yapılmamış AZ31 alaşımında gözlemlenmiştir.

8) AZ31 alaşımına In ilavesinin döküm alaşımların mekanik özelliklerini olumsuz etkilediği; ancak haddeleme işlemi sonrasında ise mekanik özelliklerde artış sağladığı görülmüştür. En yüksek çekme dayanımı %1 In ilavesinde ölçülmüştür. Diğer taraftan, akma dayanımı değerlerinin hem döküm hem haddeleme işlemleri sonucunda düşük olduğu tespit edilmiştir. % uzama değerleri haddeleme aşamasında artma eğiliminde olsa da, en fazla % uzamanın yine döküm sonrasındaki katkı ilavesi yapılmamış AZ31 alaşımında ulaşılmıştır.

9) AZ31 alaşımına Sn ilavesi ile hem döküm hem de haddeleme işlemi sonrasında genel anlamda mekanik özelliklerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Özellikle haddeleme sonrasındaki çekme dayanımı değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. % 0,2 Sn ilavesi ile haddeleme sonrası maksimum çekme dayanımı, % 0,5 Sn ilavesinde ise haddeleme sonrasında en büyük % uzama değeri elde edilmiştir.

Daha sonra yapılacak çalışmalarda;

- AZ31 alaşımına İndiyum(İn), Titanyum(Ti) ve Kalay (Sn) elementleri ikili ve üçlü farklı kombinasyonlar ile birlikte ilave edilerek mikroyapı ve mekanik testlerin sonuçlarının araştırılabileceği düşünülmektedir.

- Haddeleme parametrelerinin haddeleme hızı, haddeleme yönü, haddeleme sıcaklığı, haddeleme oranlarının geliştirilerek, haddelemede yakalanan mukavemet değerlerinin üzerine çıkılabileceği öngörülmektedir.
- Haddeleme sonrası ısıl işlem uygulayarak mukavemet değerlerine etkisinin göz önünde bulundurulması gerektiği değerlendirilmektedir.
- Yapılan çalışmalardan elde edilen numunelerin çökelti sertleşmesi sonrası mekanik özelliklerinin değişiminin incelenebileceği düşünülmektedir.
- AZ31 alaşımına İndiyum(İn), Titanyum(Ti) ve Kalay (Sn) elementleri ilavesinin soğuk haddeleme koşullarının araştırılabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Zhang, B., Tu, Y., Chen, J., Zhang, H., Kang, Y. ve Suzuki, H., (2007). "Preparation and Characterization of As-rolled AZ31 Magnesium Alloy Sheets", Journal of Materials Processing Technology, 184:102-107

[2] Wang, J., Shi, N., Wang, L., Cao, Z., Wang, L. and Li, J., (2010). " Effect of Zinc and Mischmetal on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Al-Mn Alloy", Journal of Rare Earths, 28 (5):794-797

[3] Chen, F. ve Huang, T., (2003). "Formability of Stamping Magnesium-Alloy AZ31 Sheets", Journal of Materials Processing Technology, 142:643-647

[4] Noda, M., Mori, H. Ve Funami, K., (2011). "Transition in Deformation Mechanism of AZ31 Magnesium Alloy during High-Temperature Tensile Deformation, Journal of Metallurgy, Volume 2011

[5] Öztürk, F. ve Kaçar, İ., (2012). "Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi", Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1 (1):12-20

[6] Marya, M., Hector, L.G., Verma, R. ve Tong,W., (2006). "Microstructural Effects of AZ31 Magnesium Alloy on its Tensile Deformation and Failure Behaviors", Materials Science and Engineering, A418:341-356

[7] Xing, J., Yang, X., Miura, H. Ve Sakai, T., (2008). "Mechanical Properties of Magnesium Alloy AZ31 after Severe Plastic Deformation", Materials Transactions, 49 (1):69-75

[8] Li, R., Pan, F., Jiang, B., Yang, Q. ve Tang, A., (2013). "Effects of Combined Additions of Li and Al-5T-1B on the Mechanical Anisotropy of AZ31 Magnesium Alloy", Materials and Design, 46: 922-927

[9] Lei, X., Liu, T., Chen, J., Miao, B. ve Zeng, W., (2011). "Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy AZ31 Processed by Compound Channel Extrusion", Materials Transactions, 52 (6):1082-1087

[10] Nakaura, Y., Watanabe, A. ve Ohori, K., (2006). "Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Strip Produced by Twin Roll Casting", Materials Transactions, 47 (7):1743-1749

[11] Czerwinski, F., (2011). Magnesium Alloys- Design, Processing and Properties, InTech Publishing, Rijeka

[12] Jain, C.C., Bai, C.Y., Chen, S.W. ve Koo,C.H., (2007). "The Microstructure and Mechanical Properties of AZ31-xRE Magnesium Alloys", Materials Transactions, 48 (5):1149-1156

[13] Masoudpanah, S.M. ve Mahmudi, R., (2010). "Effects of Rare Elements and Ca Additions on High Temperature Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Processed by ECAP", Materials Science and Engineering, A 527:3685-3689

[14] Zeng, Z., (2015). Development and Characterization of Highly Formable Magnesium Sheet Alloys, Doctor of Philosophy Thesis, Monash University Materials Science and Engineering Department, Victoria.

[15] Sharifi, P., (2012). Structure-Property Relationships of Magnesium Alloys, M.E.Sc. Thesis., The University of Western Ontario Mechanical & Materials Engineering, London: Ontario.

[16] Pekguleryuz, M.O., Kainer, U. ve Kaya, A.A., (2013). Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy: Physical Metallurgy of Magnesium, Woodhead Publishing Limited.

[17] Fleming, S., (2012). An Overview of Magnesium based Alloys for Aerospace and Automotive Applications, M.E.Sc. Thesis. Rensselaer Polytechnic Institute, Mechanical Engineering, Hartford.

[18] Luo, A.A., (2013). "Magnesium Casting Technology for Structural Applications", Journal of Magnesium and Alloys, 1: 2-22.

[19] Lichy, P. ve Cagala, M., (2012). "Microstructure and Thermomechanical Properties of Magnesium Alloys Castings", VSB-Technical University of Ostrava, Department of Metallurgy and Foundry Engineering, Archives of Foundry Engineering, 12 (2):49-54.

[20] Jia, W.P., Hu, X.D., Zhao, H.Y., Ju, D.Y., ve Chen, D.L., (2015). "Texture Evolution of AZ31 Magnesium Alloy Sheets During Warm Rolling", Journal of Alloys and Compounds, 645: 70-77.

[21] Wang, L., Qiao, Q., Liu, Y. ve Song, X., (2013). "Formability of AZ31 Mg Alloy Sheets within Medium Temperatures, Journal of Magnesium and Alloys, 1:312-317.

[22] Pekguleryuz, M.O., Kainer, U. ve Kaya, A.A., (2013). Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy: Alloying Behavior of Magnesium and Alloy Design, Woodhead Publishing Limited.

[23] Wei, S.C., (2006). Mechanical Properties and Microstructure of Magnesium Alloy From Severe Plastic Deformation, Doctor of Philosophy Thesis, National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, Singapore.

[24] Duygulu Ö., Yücel O. ve Kaya A.A., (2010). "Magnezyum Levha Alaşımlarının Üretimi ve Geliştirilmesi", İTÜ Dergisi/d Mühendislik, 9 (4): 133-138

[25] Hu, H., Yu, A., Li, N. ve Allison, J.E., (2003). “Potential Magnesium Alloys for High Temperature Die Cast Automotive Applications: A Review” Materials and Manufacturing Processes,18 (5):687-717

[26] Erdem, İ., (2012). AM60 Mg Alaşımına Farklı Oranlarda Bi ve Cd İlavesi ile Katılaşma Hızının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük

[27] Li, X., (2013). Enhanced Ductility of Mg Alloys Containing Rare Earth Elements, Doctor of Philosophy Thesis, RWTH Aachen University the Faculty of Georesources and Materials Engineering, Hunan.

[28] Hasenpouth, D., (2010). Tensile High Strain Rate Behavior of AZ31B Magnesium Alloy Sheet, M.E.Sc. Thesis, University of Waterloo Mechanical Engineering, Ontario.

[29] Pekguleryuz, M.O., Kainer, U. ve Kaya, A.A., (2013). Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy: Applications: Aerospace, Automotive and Other Structural Applications of Magnesium, Woodhead Publishing Limited.

[30] Guo, W., Wang, Q. D., Ye, B., Liu, M. P., Peng, T., Liu, X. T., ve Zhou, H. (2012). “Enhanced Microstructure Homogeneity and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy by Repetitive Upsetting”, Materials Science and Engineering, A 540: 115–122.

[31] Tahreen, N., Chen, D. L., Nouri, M., ve Li, D. Y. (2015). “Influence of Aluminum Content on Twinning and Texture Development of Cast Mg-Al-Zn Alloy During Compression”, Journal of Alloys and Compounds, 623: 15–23.

[32] Habibnejad-Korayem, M., Jain, M. K., ve Mishra, R. K. (2015). “Microstructure Modification and Bendability Improvement of AZ31 Magnesium Sheet by Bending – Unbending and Annealing Process Before Loading During test V-bending”, Materials Science & Engineering, A 648: 371–384.

[33] Zimina, M., Málek, P., Bohlen, J., Letzig, D., Kurz, G., ve Cieslar, M. (2015). “Mechanical Properties of Homogenized Twin- Roll Cast and Conventionally Cast AZ31 Magnesium Alloys”, Materials Engineering, 22: 8-15

[34] Guo, F., Zhang, D., Yang, X., Jiang, L. ve Pan, F. (2008). "Microstructure and Texture Evolution of AZ31 Magnesium Alloy During Rolling", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18: 170–174.

[35] Raghad Zaid, A.I.O. ve Hememat, S., (2016). “Investigation on the Effect of Titanium (Ti) Addition to the Mg-AZ31 Alloy in the as Cast and After Extrusion Conditions on its Metallurgical and Mechanical Characteristics”, 14th International Symposium on Advanced Materials, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 146: 012026

[36] Ai, X., Quan, G., Yang, J. ve Liu, Z., (2011). “Effect of Ti Addition on the Microstructure and mechanical properties of Cast AZ91 Magnesium Alloy”, Advanced Materials Research, 189-193:3819-3823

[37] Candan, S., Unal, M., Koc, E., Turen, Y. ve Candan, E. (2011). “Effects of Titanium Addition on Mechanical and Corrosion Behaviours of AZ91 Magnesium Alloy”, Journal of Alloys and Compounds, 509(5), 1958–1963.

[38] Becerra, A. ve Pekgüleryüz, M., (2008). “Effects of Zinc, lLithium, and Indium on the Grain Size of Magnesium”, J. Mater. Res., 24 (5): 1722-1729.

[39] Jun, C. ve Li, Q. A. (2010). “Microstructure and Mechanical Properties of Magnesium Alloy AZ81 with % 1 Sn Addition”, Advanced Materials Research, 881-883, 1396-1399.

[40] Qi, F., Zhang, D., Zhang, X. ve Xu, X. (2014). “Effect of Sn Addition on the Microstructure And Mechanical Properties of Mg–6Zn–1Mn (wt.%) Alloy”, Journal of Alloys and Compounds, 585: 656–666.

[41] Song, J.W., Kim, C.W., Han, J.W., Kim, M.S. ve Hwang, S.K., (2003). “Improvement in Mechanical Properties of Magnesium Alloy (AZ31) Sheet Fabricated by Casting and Subsequent Plastic Working”, Materials Science Forum ISSN:1662-9752, 439: 227-232

[42] Miao, Q., Hu, L., Wang, E., Liang, S. ve Chao, H., (2009). “Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheet by Hot Rolling”, International Journal of Modern Physics B, 23 (6 & 7): 984–989

[43] Ucuncuoglu, S., Ekerim, A., Oktay Secgin,G. ve Duygulu,O., (2014). “Effect of Asymmetric Rolling Process on the Microstructure, Mechanical Properties and Texture of AZ31 Magnesium Alloys Sheets Produced by Twin Roll Casting Technique”, Journal of Magnesium and Alloys, 2: 92-98

[44] Nakaura, Y., Watanabe, A. ve Ohori,K., (2006). “Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Strip Produced by Twin Roll Casting”, Materials Transactions, 47 (7): 1743 -1749

[45] Qing, M., Lianxi, H., Guojun, W., Erde, W., (2011). “Fabrication of Excellent Mechanical Properties AZ31 Magnesium Alloy Sheets by Conventional Rolling and Subsequent Annealing”, Materials Science and Engineering, A 528: 6694 – 6701

[46] Li, R. G., Xu, Y., Qi,w., An,J., Lu,Y., Cao, Z.Y. ve Liu, Y.B., (2008). “Effect of Sn on the Microstructure and Compressive Deformation Behavior of the AZ91D Aging Alloy’, Mater. Character., 59 (11):1643–1649.

[47] Xiang,Q., Wu, R.Z. ve Zhang, M.L., (2009). “Influence of Sn on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-5Li-3Al-2Zn alloys”, J. Alloys Compd., 477(1–2): 832–835.

[48] Chen, J., Chen, Z., Yan, H., Zhang, F. ve Liao, K., (2008). “Effects of Sn Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn-Al alloys”, J. Alloy Compd., 461(1–2): 209–215

[49] Kim, B. H., Jeon, J. J., Park, K.C., Park, B.G., Park, Y.H. ve Park, I.M., (2008). “Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Mg-xSn-5Al-1Zn Alloys”, Int. J. Cast Metals Res., 21(1–4):186–192.

[50] Xiao, W., Jia, S., Wang, L., Wu, Y. ve Wang, L., (2010). “Effects of Sn Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg-7Zn-5Al Based Alloys”, Mater. Sci. Eng. A, 527(26): 7002–7007.

[51] Yang, M. ve Pan, F., (2010). “Effects of Sn Addition on As-cast Microstructure, Mechanical Properties and Casting Fluidity of ZA84 Magnesium Alloy”, Mater. Design, 31(1): 68–75.

[52] Fang, C.F., Song, D.D., Liu, G.X., Huang, H., Dong, X.L ve Zang, X.G, (2015). “Effects of Sn Addition Forms on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy”, Materials Research Innovations, 19: 10, S10-273-S10-276

[53] Kubásek, J., Vojtěch, D., Lipov, J. ve Ruml, T., (2013). “Structure, Mechanical Properties, Corrosion Behavior and Cytotoxicity of Biodegradable Mg–X (X=Sn, Ga, In) Alloys”, Materials Science and Engineering, C 33: 2421–2432

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Derya DOĞAN

Doğum Tarihi ve Yeri : 12.03.1985, Kdz. Ereğli/ZONGULDAK

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : sdcddgn@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Met. ve Malz. Müh.	Kocaeli Üniversitesi	2008
Lise	Fen	Kdz. Ereğli Anadolu Lisesi	2003