

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

**MAGNEZYUM AZ91 ALAŞIMININ DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA
DEFORMASYON KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

OĞUZ KARAAHMET

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

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. YAMAN ERARSLAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAGNEZYUM AZ91 ALAŞIMININ DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA
DEFORMASYON KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

Oğuz KARAAHMET tarafından hazırlanan tez çalışması 06.12.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Yaman ERARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Yaman ERARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ÜNAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Erhan ALTAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin seçiminde ve hazırlanmasında değerli bilgi ve önerileriyle çalışmalarına yön veren saygıdeğer hocam Doç. Dr. Yaman ERARSLAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar çalışmalarımda bana yardımlarda bulunan Arş. Gör. Zekeriya Yaşar CÖMERT'e, Teknisyen Mehmet ÇALIŞKAN'a ve deneysel çalışmalarımda bana destekte bulunan arkadaşlarım Arş. Gör. İbrahim Gökhan GÜNDÜZ'e ve Arş. Gör. Gökhan POLAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım boyunca her zaman yanımda olan ve yanımda olacaklarını bildiğim sevgili aileme, bana yüksek lisans çalışmalarımda maddi ve manevi her türlü desteği sağladıkları için minnettarlığımı sunarım.

Ekim, 2013

Oğuz KARAAHMET

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
MAGNEZYUM	4
2.1 Magnezyumun Tarihi ve Gelişim Süreci	4
2.2 Magnezyum Hammaddeleri ve Hammaddeden Magnezyumun Üretimi ..	7
2.2.1 Hammaddeler	7
2.1.1 Hammaddeden Magnezyum Üretimi	8
2.2 Magnezyumun Özellikleri	12
2.2.1 Temel Özellikleri	12
2.2.2 Şekillendirme Kabiliyeti	13
2.2.3 Sertlik	14
2.2.4 Dayanım	15
2.2.5 Süneklik	15
2.2.6 Sürünme	15
2.2.7 Korozyon Direnci	16
2.3 Magnezyumun Alaşım Standartları ve Elementleri	17

2.3.1	Standartları	17
2.3.2	Magnezyum Alaşım Elementleri	20
2.3.3	Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	23
2.4	Magnezyum Alaşımlarının Kullanıldığı Endüstriler	27
2.4.1	Uçak Endüstrisinde	27
2.4.2	Otomotiv Endüstrisinde.....	28
2.4.3	Elektronik Endüstrisinde	30
2.4.4	Diğer Endüstrilerde	31
BÖLÜM 3		
MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM-ÇİNKO ALAŞIMI		32
3.1	Magnezyum-Alüminyum Alaşımı.....	32
3.2	Magnezyum-Alüminyum Denge Diyagramı.....	32
3.3	Magnezyum-Alüminyum-Çinko Alaşımı	34
3.4	AZ91 Alaşımı	34
3.5	Magnezyum-Alüminyum Alaşımlarının Katılaşması	36
3.5.1	Ötektik Büyüme	39
3.5.2	Alaşım Elementlerinin ve Soğuma Hızının Ötektik Büyümeye Etkisi 40	
BÖLÜM 4		
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ.....		46
4.1	Magnezyumun Alaşımlarının Isıl işlemi	46
4.2	Magnezyumun Homojenizasyonu	46
4.3	Magnezyumun Çökelme Sertleşmesi	49
4.3.1	Çözeltiye Alma Isıl İşlemi	50
4.3.2	Yaşlandırma	51
4.3.3	Mg-Al-Zn Alaşımlarında Çökelme	52
BÖLÜM 5		
MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ DEFORMASYONU.....		55
5.1	Plastik Deformasyon	55
5.1.1	Magnezyumun Deformasyonu	56
5.1.2	Magnezyumun Deformasyon Mekanizması	57
5.2	Sıcak Deformasyon	62
5.2.1	Sıcak Deformasyonda Toparlanma ve Yeniden Kristalleşme	64
5.2.2	Dinamik Toparlanma.....	65
5.2.3	Dinamik Yeniden Kristalleşme	66
5.3	Kırılma	68
BÖLÜM 6		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		70
6.1	Deney Malzemesi.....	70
6.2	Deneyin Yapılışı ve Kullanılan Cihazlar.....	71

6.2.1	Metalografik İnceleme.....	71
6.2.2	Isıl İşlem	72
6.2.3	Numunelerin İncelenmesi.....	72
6.2.4	Sertlik Deneyi	73
6.2.5	Çekme İşlemi.....	74
BÖLÜM 7		
DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME		77
7.1	AZ91 Alaşımının İncelenmesi	77
7.1.1	Döküm Hâli Yapının İncelenmesi	77
7.1.2	Homojenizasyon Isıl İşlemi Uygulanmış Yapının İncelenmesi	80
7.1.3	T6 Isıl İşlemi Uygulanmış Yapının İncelenmesi	82
7.1.4	Sertlik Deneyi	85
7.1.5	Değişik Sıcaklıklarda Çekme Deneyi Yapılması	85
7.1.6	Farklı Sıcaklıklarda Numunelere Uygulanan Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi	102
7.1.7	Farklı Sıcaklıklarda Numunelere Uygulanan Çekme Deneyi Sonuçlarının Sıcaklıklara Göre İrdelenmesi	105
7.1.8	Çekme Deneyi Sonucunda Elde Edilen Değerler	108
BÖLÜM 8		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER		113
KAYNAKLAR.....		115
ÖZGEÇMİŞ.....		120

SİMGE LİSTESİ

°C	Santigrat derece
cal	Kalori
cm ³	Santimetreküp
d	Ortalama tane boyutu (µm)
dk	Dakika
E°	Elektronegatiflik
g	Gram
GPa	Gigapascal
K	Kelvin
kg	Kilogram
km	Kilometre
k _y	Malzeme katsayısı (tane sınırlarında yeni dislokasyonların oluşması için gereken gerilime ve tane boyutuna bağlı deneysel olarak hesaplanan bir katsayıdır.)
lt	Litre
m	Metre
mm ²	Milimetrekare
MPa	Megapascal
MW	Megawat
nm	Nanometre
s	Saniye
sa	Saat
T	Sıcaklık
T _m	Malzemenin ergime sıcaklığı
T/T _m	Benzeş sıcaklık (Malzemenin işlem sıcaklığı ile ergime sıcaklığı arasındaki oran)
V	Volt
W	Watt
ε	Gerinim
ε _g	Gerçek plastik birim şekil değiştirme
ε̇	Deformasyon hızı
µm	Mikrometre
σ	Gerilim
σ ₀	Malzemenin gerilimi (uygulanan gerilim)
σ _y	Malzemenin akma dayanımı
Ω	Ohm

\$	Amerikan doları
°	Derece
%	Yüzde

KISALTMA LİSTESİ

AMC	Avustralya Magnezyum Şirketi (Australian Magnesium Corporation)
ASTM	American Society for Testing Materials
BSE	Geri Saçınımlı Elektron (Back-Scattered Electron)
DSM	Ölü Deniz Magnezyum (Dead Sea Magnesium)
DTA	Diferansiyel Termal Analiz (Differential Thermal Analysis)
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi (Energy Dispersive Spectrometry)
HB	Hardness Brinell
HSP	Hegzagonal Sıkı Paket
KYM	Kübik Yüzey Merkezli
IMA	Uluslararası Magnezyum Birliği (International Magnesium Association)
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
US Mag	US Magnezyum (US Magnesium)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Dünya birincil magnezyum metali üretimi..... 5
Şekil 2.2	2002 yılı verilerine göre magnezyumun kullanım alanları ve oranları..... 7
Şekil 2.3	Magnezyum metalinin çeşitli alaşım elementleri ile özelliklerinin gelişimi. 12
Şekil 2.4	Alaşım elementlerinin sertliğe etkileri 14
Şekil 2.5	Bazı magnezyum alaşımlarının dayanımı değerleri 15
Şekil 2.6	Bazı magnezyum alaşımlarının sürünme eğrileri 16
Şekil 2.7	Magnezyum alaşımlarından üretilen bazı otomotiv parçaları 30
Şekil 2.8	Magnezyum esaslı malzemelerin kullanıldığı bazı elektronik ürünler 30
Şekil 3.1	Mg-Al denge diyagramı 33
Şekil 3.2	Mg-Al-Zn üçlü denge diyagramı 33
Şekil 3.3	Mg-9Al alaşımı döküm hali mikroyapısı ışık mikroskobu görüntüleri (a) kum kalıba döküm (b). A, ötektik fazında bulunan yüksek Al içerikli α -Mg fazı. B, ötektik fazında β -Mg ₁₇ Al ₁₂ . C, birincil α -Mg fazından çökelmiş β -Mg ₁₇ Al ₁₂ fazı. 37
Şekil 3.4	Mg-Al alaşımlarının artan alüminyum miktarına göre mikroyapıları..... 37
Şekil 3.5	AZ91 alaşımı mikroyapıda kimyasal analiz noktaları 38
Şekil 3.6	AZ91 alaşımı kimyasal analizi 38
Şekil 3.7	Mg-Al alaşımı ötektik yapısı (a) tamamen ayırık ötektik, (b) kısmen ayırık ötektik 40
Şekil 3.8	Hipoötektik Mg-Al alaşımı kalıcı kalıba dökümde alüminyum, çinko ve soğuma hızının ötektik yapıya etkileri 40
Şekil 3.9	Mg-Al alaşımın kalıcı kalıpta alüminyum miktarına ve soğuma hızına bağlı olarak ötektik yapısında oluşan değişim 41
Şekil 3.10	Mg-%9 Al kalıcı kalıpta %0,8 ve %1,6 Zn eklenmesi ile elde edilen ötektik yapısı 42
Şekil 3.11	AZ91 döküm alaşımı (a) ışık mikroskobu, (b) SEM görüntüleri..... 43
Şekil 3.12	AZ91 alaşımı DTA analizi (a) metal kalıba döküm, (b) kum kalıba döküm ... 43
Şekil 3.13	AZ91 alaşımı metal kalıba döküm (a) ışık mikroskobu, (b) SEM görüntüleri 44
Şekil 3.14	AZ91 alaşımı kum kalıba döküm (a) ışık mikroskobu, (b) SEM görüntüleri . 44
Şekil 3.15	Tane boyutuna alüminyum miktarının etkisi 45
Şekil 4.1	AZ91 alaşımı homojenizasyon ısı işlemi 47

Şekil 4.2	AZ91 alaşımlarının değişik sıcaklık ve sürede homojenizasyonu mikroyapısı (a) 350 °C 5, 10, 15, 24 saat, (b) 380 °C 5, 10, 15, 24 saat, (c) 420 °C 5, 10, 15, 24 saat.....	48
Şekil 4.3	AZ91 alaşımı 430 °C 12 saat homojenize edilmiş ışık mikroskobu görüntüsü .	49
Şekil 4.4	AZ91 alaşımı çözelti sertleştirilmesi ısıtma işlemi	49
Şekil 4.5	Magnezyum alaşımlarının ısıtma işlemine göre gerilim-gerinim eğrisinin değişimi	50
Şekil 4.6	Yaşlandırma işlemi esnasında enerji düzeyleri çökelme bölgelerinin oluşumu	52
Şekil 4.7	β -Mg ₁₇ Al ₁₂ fazının çökmesine alüminyum oranının ve sıcaklığın etkisi	53
Şekil 4.8	AZ91 alaşımının 150 °C'de 16 saat yaşlandırma sonrası yapıda oluşan süreksiz çökmenin SEM görüntüsü	54
Şekil 4.9	AZ91 alaşımının 200 °C'de yaşlandırma sonrası yapıda oluşan çökelmelerin SEM görüntüsü (a) 1 saat süreksiz, (b) 2 saat sürekli çökme	54
Şekil 4.10	AZ91 alaşımının 270 °C'de yaşlandırma sonrası yapıda oluşan çökelmelerin SEM görüntüsü (a) 1 saat sürekli ve süreksiz, (b) 2 saat sürekli çökme....	54
Şekil 5.1	Magnezyumun kayma düzlemleri.....	58
Şekil 5.2	Kritik kayma gerilmesi ile sıcaklık arasındaki ilişki	58
Şekil 5.3	Magnezyumun ikizlenme düzlemi ve doğrultusu	59
Şekil 5.4	AZ91 alaşımı deformasyon ikizlenmesi.....	60
Şekil 5.5	25 °C'de ve 150 °C'de yapılan çekme işlemi sonucunda kırılma yüzeyleri ..	60
Şekil 5.6	Sürünme eğrileri.....	61
Şekil 5.7	Deformasyon sıcaklığı ile deformasyon hızı arasındaki ilişki	63
Şekil 5.8	0,1 mm tane boyutunda saf magnezyumun deformasyon haritası	64
Şekil 5.9	Haddelendirme işlemi sırasında dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşme oluşumu	65
Şekil 5.10	AZ91 alaşımı 350 °C ve 0,1 s ⁻¹ gerinim hızında sıcak deformasyon sonucunda elde edilen dinamik yeniden kristalleşme sonucu boyun mikroyapısı.....	67
Şekil 5.11	Haddelenmiş numunenin tavlama sonrası 250 °C'de 0,5 gerinimde basma mikroyapısı	68
Şekil 5.12	Düşük ve yüksek sıcaklıkta kırılma mekanizmaları	68
Şekil 6.1	AZ91 magnezyum alaşımı çubuk.....	70
Şekil 6.2	Zımparalama (a) ve parlatma (b) cihazları	71
Şekil 6.3	PROTHERM marka ısıtma işlem fırını	72
Şekil 6.4	Leica ICM 1000 marka ışık mikroskobu.....	73
Şekil 6.5	JEOL JSM 5410LV marka Tarama Elektron Mikroskobu (SEM).....	73
Şekil 6.6	Brinell sertlik ölçme cihazı	74
Şekil 6.7	Çekme deneyi çubuğu ölçüleri.....	74
Şekil 6.8	Çekme deneyi çubuğu.....	74
Şekil 6.9	Mohr&Federhaff Universal çekme-basma deney cihazı.....	75
Şekil 6.10	Dikey split fırın	75
Şekil 6.11	Sıcak çekme deneyi öncesi numunenin ısıtılması	76
Şekil 6.12	Sıcak çekme işlemi	76

Şekil 7.1	AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli mikroyapı görüntüleri (a) 50X ve (b) 100X büyütme	77
Şekil 7.2	AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli SEM geri saçınımlı mikroyapı görüntüsü 200X büyütme	78
Şekil 7.3	AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli EDS analizi sonuçları	79
Şekil 7.4	AZ91 magnezyum alaşım döküm hâli mikroyapı görüntüsü 500X büyütme	80
Şekil 7.5	AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli mikroyapı görüntüleri (a) 50X ve (b) 100X büyütme	80
Şekil 7.6	AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli SEM geri saçınımlı elektron mikroyapı görüntüsü 200X büyütme	81
Şekil 7.7	AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli EDS analiz sonuçları.....	82
Şekil 7.8	AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli mikroyapı görüntüsü 500X büyütme	82
Şekil 7.9	AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli mikroyapı görüntüleri (a) 50X ve (b) 100X büyütme	83
Şekil 7.10	AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli SEM geri saçınımlı mikroyapı görüntüsü 200X büyütme	83
Şekil 7.11	AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli EDS analizi sonuçları	84
Şekil 7.12	AZ91 magnezyum döküm alaşımı T6 hâli mikroyapı görüntüsü 500X büyütme	85
Şekil 7.13	25 °C’de döküm numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü	86
Şekil 7.14	25 °C’de döküm numunesi gerilim-gerinim grafiği	86
Şekil 7.15	25 °C’de döküm numunesi kopma mikroyapı görüntüsü 200X büyütme ...	86
Şekil 7.16	25 °C’de homojenize numune çekme deneyi sonrası görüntüsü	87
Şekil 7.17	25 °C’de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği	87
Şekil 7.18	25 °C’de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 200X ve (b) 500X büyütme	88
Şekil 7.19	25 °C’de T6 numune çekme deneyi sonrası görüntüsü	88
Şekil 7.20	25 °C’de T6 numune gerilim-gerinim grafiği	89
Şekil 7.21	25 °C’de T6 numunenin kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 200X büyütme	89
Şekil 7.22	250 °C’de döküm numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü	90
Şekil 7.23	250 °C ‘de döküm numune gerilim-gerinim grafiği.....	90
Şekil 7.24	250 °C’de döküm numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 200X büyütme	91
Şekil 7.25	250 °C’de homojenize numune sıcak çekme testi sonrası görüntüsü	91
Şekil 7.26	250 °C’de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği.....	92
Şekil 7.27	250 °C’de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 200X ve (b) 500X büyütme	92
Şekil 7.28	250 °C’de T6 numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü	93
Şekil 7.29	250 °C’de T6 numune gerilim-gerinim grafiği.....	93
Şekil 7.30	250 °C’de T6 numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 100X büyütme	93
Şekil 7.31	350 °C’de döküm numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü	94
Şekil 7.32	350 °C’de döküm numunesi gerilim-gerinim grafiği	94
Şekil 7.33	350 °C’de döküm numunesi kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 200X ve (b) 500X büyütme	95

Şekil 7.34	350 °C'de homojenize numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü	95
Şekil 7.35	350 °C'de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği.....	96
Şekil 7.36	350 °C'de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 50X büyütme	96
Şekil 7.37	350 °C'de T6 numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü	97
Şekil 7.38	350 °C'de T6 numune gerilim-gerinim grafiği.....	97
Şekil 7.39	350 °C'de T6 numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 500X büyütme	97
Şekil 7.40	400 °C'de döküm numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü	98
Şekil 7.41	400 °C'de döküm numune gerilim-gerinim grafiği	98
Şekil 7.42	400 °C'de döküm numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri 500X büyütme	99
Şekil 7.43	400 °C'de homojenize numune sıcak çekme testi sonrası görüntüsü	99
Şekil 7.44	400 °C'de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği.....	100
Şekil 7.45	400 °C'de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 200X büyütme	100
Şekil 7.46	400 °C'de T6 numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü	101
Şekil 7.47	400 °C T6 numune gerilim-gerinim grafiği.....	101
Şekil 7.48	400 °C'de T6 numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 100X ve (b) 200X büyütme	101
Şekil 7.49	25 °C'de döküm, homojenize ve T6 numunelerinin gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması	102
Şekil 7.50	250 °C'de döküm, homojenize ve T6 numunelerinin gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması	103
Şekil 7.51	350 °C'de döküm, homojenize ve T6 numuneleri gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması	104
Şekil 7.52	400 °C'de döküm, homojenize ve T6 numuneleri gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması	105
Şekil 7.53	Döküm numunelerin farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması	106
Şekil 7.54	Homojenize numunelerin farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması	107
Şekil 7.55	T6 numunelerinin farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması	108
Şekil 7.56	Çekme deneyi sıcaklığına göre çekme dayanımlarının karşılaştırılması	109
Şekil 7.57	Çekme deneyi sıcaklığına göre akma dayanımlarının karşılaştırılması	110
Şekil 7.58	Numune türüne göre çekme dayanımlarının karşılaştırılması.....	110
Şekil 7.59	Numune türüne göre akma dayanımlarının karşılaştırılması	111
Şekil 7.60	25 °C'de çekme dayanımı ile sertlik değerlerini karşılaştırılması.....	111

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	Magnezyum içeren minerallerinin karakteristiği 7
Çizelge 2.2	Magnezyum üretim yöntemlerinin karşılaştırılması 9
Çizelge 2.3	1950’den itibaren önemli magnezyum projeleri 10
Çizelge 2.4	Magnezyumun temel özellikleri 13
Çizelge 2.5	Magnezyum alaşım elementlerinin gösterimi 18
Çizelge 2.6	Magnezyum döküm alaşımları 24
Çizelge 2.7	Dövme magnezyum alaşımları 26
Çizelge 2.8	Bazı uçak imalatı yapan firmaların ürettiği uçaklarda kullandığı magnezyum miktarı, üreten şirket, modeli ve yılı..... 27
Çizelge 2.9	Magnezyum alaşımlarının otomotivlerde kullanıldığı parçalar..... 29
Çizelge 2.10	Bazı otomotiv üreticilerinin, ürettikleri modeller ve bu modellerde magnezyum alaşımlarının kullanıldığı parçalar ve parça ağırlıkları 29
Çizelge 3.1	AZ91 alaşımlarının kimyasal kompozisyonu..... 35
Çizelge 3.2	AZ91 alaşımları özellikleri..... 36
Çizelge 3.3	Analiz noktalarının kimyasal kompozisyonu 39
Çizelge 4.1	Magnezyum alaşımlarının ısıtma işlem sıcaklık ve tutma süreleri 50
Çizelge 5.1	Magnezyum kristalinin bazı kayma düzlemleri ve doğrultuları. 56
Çizelge 6.1	AZ91 magnezyum alaşımı kimyasal kompozisyonu 70
Çizelge 6.2	Asetil glikol dağılayıcı kimyasal içeriği..... 71
Çizelge 6.3	Isıtma işlem sıcaklık ve süreleri..... 72
Çizelge 7.1	AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli EDS analizi sonuçları..... 78
Çizelge 7.2	AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli EDS analizi sonuçları 81
Çizelge 7.3	AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli EDS analizi sonuçları 84
Çizelge 7.4	Numunelerin sertlik değerleri 85
Çizelge 7.5	Çekme deneyi sonucunda elde edilen değerler..... 108

**MAGNEZYUM AZ91 ALAŞIMININ DEĞİŞİK SICAKLIKLARDA
DEFORMASYON KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

Oğuz KARAAHMET

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Yaman ERARSLAN

Günümüzde magnezyum alaşımları hafif bir metal olmasından dolayı birçok sektörün ilgisini çekmektedir ve magnezyum alaşımlarının kullanımı otomotiv, havacılık ve elektronik eşya endüstrilerinde giderek artmaktadır. AZ91 alaşımı, magnezyum alaşımları içerisinde en çok kullanılan alaşımdır. Ancak sadece döküm yöntemiyle üretilmekte, dövme yöntemiyle üretimi yapılmamaktadır. Son yıllarda ise AZ91 alaşımının sıcak dövme yöntemleri ile üretimi üzerine birçok çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışmada, AZ91 magnezyum alaşımının değişik sıcaklıklarda deformasyon kabiliyeti incelenmektedir. Çekme deneyi, deformasyon kabiliyetinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. AZ91 alaşımının üç farklı yapısına, değişik sıcaklıklarda çekme işlemi yapılmaktadır. Bu yapılar döküm, homojenizasyon ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış yapılardır. Homojenizasyon işlemi 415 °C'de 12 saat bekletilerek uygulanmaktadır. T6 işlemi ilk önce 420 °C'de 12 saat bekletilmekte ve su verilerek soğutulmaktadır. Ardından 215 °C'de 4 saat bekletilerek yapay yaşlandırılmaktadır.

Çekme deneyleri 25 °C, 250 °C, 350 °C ve 400 °C sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu sıcaklıklarda elde edilen veriler sonucunda, 25 °C'de yapılan deneylerde tüm numuneler için en yüksek dayanım değerine ulaşılmaktadır ve çekme deney sıcaklığı arttıkça dayanım değerleri sürekli düşmektedir. 25 °C sıcaklıkta gerinim değerleri çok

düşük seviyedir. 250, °C 350 °C ve 400 °C sıcaklıkta gerinim değerlerinin arttığı yani deformasyon kabiliyetinin arttığı görülmektedir.

Döküm numunelerin ve T6 numunelerin yüksek sıcaklıkta gerinim değerlerinin arttığı ve en yüksek gerinim değerinin 400 °C'de 0,51 ile T6 numuneden elde edilmektedir. Ancak homojenize numunelerin en yüksek gerinim değerine 250 °C'de elde edilmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda, numunelerin gerinim değerlerine göre deformasyon kabiliyetleri incelenmektedir. En yüksek gerinim değeri T6 numuneden elde edilmektedir. Döküm numunelerin gerinim değerleri, intermetalik gevrek bir mikroyapıya sahip olmasına rağmen sıcaklıkla arttığı fakat T6 numuneler kadar yüksek değerlere çıkamadığı görülmektedir. Homojenize numunelerin gerinim değerleri ise, döküm ve T6 numunelerden çok daha düşük değerlerdedir.

Anahtar Kelimeler: AZ91 magnezyum alaşımı, homojenizasyon, T6, çekme testi, sıcak deformasyon

**INVESTIGATION OF DEFORMATION ABILITY AT DIFFERENT
TEMPERATURES MAGNESIUM AZ91 ALLOY**

Oğuz KARAAHMET

Department of Metallurgical and Material Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Yaman ERARSLAN

Nowadays magnesium alloys are interested of a lot of sectors because of a light metal and the using of magnesium alloys are gradually increasing automotive, aeronautic and electronic industries. AZ91 alloys are the most using alloys in whole magnesium alloys. However these alloys have only been manufactured with casting methods. They haven't done forging methods. Recently, many studies have been about AZ91 alloys manufacturing with hot forging methods.

In this study, AZ91 magnesium alloy is investigated deformation ability at different temperatures. Tensile tests are used to assess deformation ability. Three different structures of AZ91 alloy is tensile process at different temperatures. These structures are casting, homogenization and T6 heat treatment are applied specimens. Homogenization heat treatment is applied the specimens that are hold 12 hours at 415 °C. T6 heat treatment is applied the specimens that firstly are hold 12 hours at 420 °C and quenched with water. Then specimens is artificially aged for 4 hours waiting at 215 °C.

Tensile tests are done 25 °C, 250 °C, 350 °C and 400 °C temperatures. From data are obtained in these temperature, the highest strength values are reached at 25 °C within all specimens and strength values is always decreased when the temperature of tensile

test increase. At 25 °C strain values are very low levels. Strain values temperatures increase at 250 °C, 350 °C and 400 °C, namely deformation ability increase with temperatures.

Casting and T6 specimens are obtained very high strain values at elevated temperatures and the highest strain is reached at 400 °C. These strain is seen T6 specimen with 0,51. But all homogenised specimens is obtained maximum strain value at 250 °C.

As a result of the done experiments, deformation abilities of the specimens are analyzed in according to values of the strains. The strain value of the highest is obtained T6 specimen. Although deformation ability of casting specimens have a intermetallic brittle microstructure, if temperature increase, ability of deformation is increase. But these specimens are seen to not reach as high as T6 specimens. The strains values of homogenised specimens are much lower values than cast and T6 specimens.

Keywords: AZ91 magnesium alloys, homogenization, T6, tensile test, hot deformation

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Son yıllarda özellikle hafif metallerin otomotiv, elektronik ve uçak gibi sektörlerde kullanımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu hızlı artışın temel nedeni, üreticilerin önceliklerinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Geçmişte otomobil üreticileri sadece konforlu, güvenli ve yüksek performans veren araçlar üretirken, günümüzde artan petrol fiyatları ve çevre kirliliğini önlemek için daha hafif ve daha çevreci araçlar üretmektedir. Bundan dolayı, birçok sektörde malzemelerin hafif olması istenmekte ve dayanım gibi özelliklerin de belirli seviyede olması gerekmektedir. Bu sebeple, tüm yapısal uygulamalarda kullanılan metaller içerisinde en hafifi olan magnezyum metalinin, son yirmi yılda üretiminde büyük artış gözlemlenmiş, üzerine yapılan çalışmalar artış ve birçok farklı uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [1], [2], [3].

Magnezyum, diğer metallerde olduğu gibi saf halde mühendislik malzemesi olarak kullanılamamaktadır. Bu yüzden magnezyum başka metallerle alaşımlandırılarak veya takviye elemanları ile kullanılabilir. Ancak magnezyum günümüzde yapısal olarak kullanılmasının yanı sıra, alüminyum alaşımlamada, desülfürizasyon işleminde, kimyasal madde olarak, elektrokimyasal işlemlerde, metallerin redüksiyonunda, küresel grafitli dökme demirlerde kullanılmaktadır [4], [5], [6], [7], [8].

Magnezyum alaşımları, döküm ve dövme yöntemleriyle kullanılarak yarı mamul haline getirilmektedir. Döküm yöntemlerinin başında, magnezyumun oksijene yüksek ilgisinden dolayı basınçlı döküm yöntemi gelmektedir. Ayrıca gravite döküm, hassas döküm ve yarı-katı döküm yöntemleri kullanılmaktadır [9], [10], [11], [12], [17].

Magnezyum alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan dövme yöntemleri ise ekstrüzyon ve haddelemedir [13], [14], [15], [16].

Magnezyum alaşımlandırılarak veya takviye elemanları ile kullanılarak mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlamaktadır. Magnezyum alaşımlamada alüminyum, çinko, mangan, silisyum, titanyum, zirkonyum, kalay, indiyum ve kalsiyum gibi elementler kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımları hakkında detaylı çalışmalar bulunmaktadır [2], [11], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [25], [26], [27].

Magnezyum alaşımları ekstrüzyon ve haddeleme yöntemleri kullanılarak özellikle yüksek sıcaklıkta ($>250\text{ }^{\circ}\text{C}$) şekillendirilmektedir. Çünkü magnezyum alaşımları hekzagonal sıkı paket (HSP) kafes yapısına sahiptir ve bu durum düşük sıcaklıkta ($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$) malzemenin şekillendirilmesini zorlaştırmaktadır [31], [32], [33], [34], [35].

Magnezyum alaşımları içerisinde AZ (Mg-Al-Zn) grubu alaşımları yüksek dayanım, düşük süneklik ve iyi dökülebilirlik gibi özelliklere sahiptir ve AZ91 (%90 Mg-%9 Al-%1 Zn) alaşımı en çok kullanılan alaşım grubudur. AZ91 magnezyum alaşımları genellikle döküm yöntemleriyle yarı mamule dönüştürülmektedir. Ancak yüksek miktarda alüminyum ($>8,7$) içeriği mikroyapıda intermetalik fazlar oluşturduğu için dövme yöntemlerinin kullanımı sınırlıdır [37], [38], [39], [40], [41], [42]. Bu alaşımların ekstrüzyon ve haddeleme yöntemleriyle şekillenebilmesi için homojenizasyon işlemi uygulanmaktadır. Böylelikle mikroyapıda bulunan intermetalik fazlar dağılacak ve şekillendirme kabiliyeti artacaktır [43], [44], [45], [46]. Homojenizasyon işleminin dışında magnezyum alaşımlarının özelliklerinin geliştirilmesi için çözeltiye alma ve yaşlandırma ısı işlemleri de uygulanmaktadır [47], [48].

1.2 Tezin Amacı

İleri teknoloji üreten firmaların yeni nesil hafif malzemelere ilgileri gün geçtikçe artmaktadır. Bu duruma, sadece malzemelerin özellikleri değil aynı zamanda dünya pazarlarında rekabet düzeyinin artması, birincil enerji kaynaklarının daha ekonomik kullanılması arzusu ve çevre kirliliğinin azaltılmak istenmesi sebep olmaktadır [1].

Magnezyum, günümüzün ihtiyaçları doğrultusunda son yıllarda cazibesini artırmaktadır. Çünkü üreticilerin malzemelerden beklediği özellikler değişmeye

başlamıştır. Bu değişen özelliklerin başında birim ağırlıktaki dayanç gelmektedir. Magnezyum, alüminyumdan %36, çelikten %78 daha hafif olması ile özellikle yapısal olarak hafifliğin ön plana çıktığı sektörler için önemlidir. Bu açıdan otomobil ve uçak üretiminde tercih edilmektedir. Özellikle otomobillerin, düşük yakıt tüketimi ve düşük gaz emisyonu sağlanması için hafif olması gerekmektedir. Bu yüzden magnezyum gibi hafif malzemeler otomotiv sektöründe önemli bir yer tutmaktadır [2], [3], [4].

Magnezyum alaşımları döküm ve dövme yöntemleri ile şekillendirilebilmektedir. Ancak üretimin yaklaşık %90'lık bölümü döküm yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Magnezyum alaşımları içerisinde döküm yöntemiyle en çok üretilen alaşım ise AZ91 (%90 Mg-%9 Al-%1 Zn) alaşımlarıdır. AZ91 alaşımı, %9 civarında alüminyum içeriğinden dolayı dövme alaşımı olarak görülmemektedir. Fakat bu durumun aksine AZ91 alaşımının dövme yöntemleri ile şekillendirilmesi üzerine gün geçtikçe çalışmalar artmaktadır.

Bu çalışmada, magnezyum AZ91 alaşımının değişik sıcaklıklarda deformasyon kabiliyetinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deformasyon kabiliyeti, çekme işlemiyle belirlenmektedir. Bu amaçla döküm, homojenizasyon ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış AZ91 alaşımı numunelere aynı tutma süresinde ve aynı hızda sıcak çekme testi yapılmıştır. Çekme testleri 25 °C, 250 °C, 350 °C ve 400 °C olmak üzere dört farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Her bir çekme numunesinin, çekme testi sonucunda dayanım değerleri, gerinim değerleri ve kopma şekilleri incelenerek deformasyon kabiliyeti hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Magnezyum AZ91 alaşımının farklı sıcaklıklarda deformasyon kabiliyeti çekme testi ile belirlenebilmektedir. Ancak çekme testinin sonucunda elde edilen gerilim-gerinim grafikleri, alaşımın mikroyapısına, test sıcaklığına, çekme hızına ve sıcak çekme için tutma süresine bağlı olarak değişmektedir. Alaşımın ısıtma işlemi uygulanmış veya ısıtma işlemi uygulanmamış hâllerine göre; aynı sıcaklıkta, aynı çekme hızında ve aynı tutma süresinde farklı deformasyon özellikleri gösterebilmektedir.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM

Magnezyum, alkali metaller grubuna girmekte ve periyodik tabloda 2A grubu elementleri arasında bulunmaktadır. Magnezyumun fiziksel görüntüsü gümüş beyaz olarak tanımlanmaktadır. Magnezyum yer kabuğunda %2,7 oranında bulunmakta ve yer kabuğunda en çok bulunan sekizinci elementtir. Magnezyum yüksek reaktifliğinden dolayı doğada element formunda bulunmamaktadır. Magnezyum doğada kimyasal bileşiklerde, genellikle kaya tabakalarında, deniz suyunda ve göllerde tuz çözeltisi halinde bulunmaktadır [5].

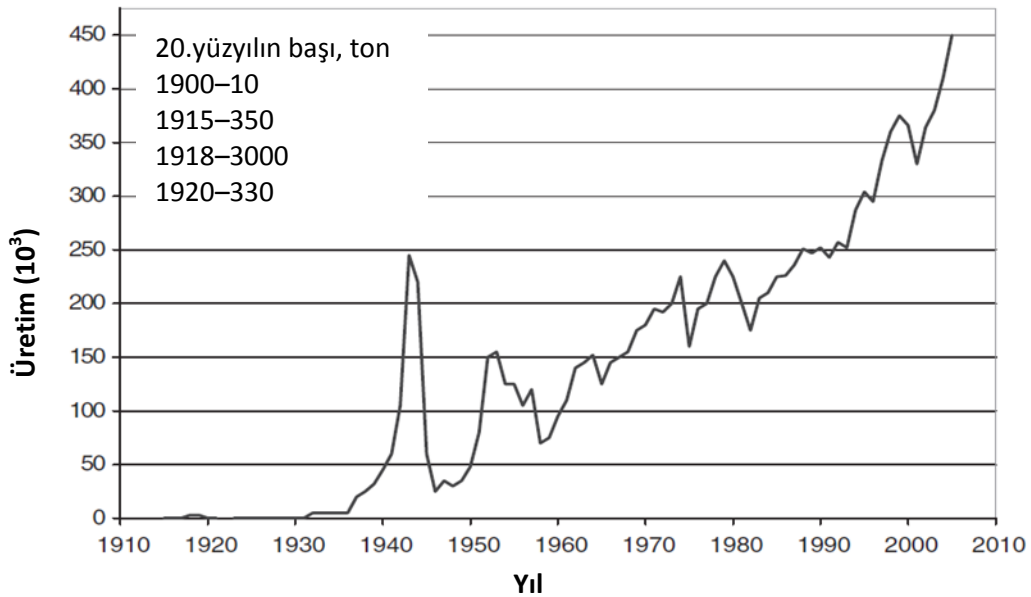
2.1 Magnezyumun Tarihi ve Gelişim Süreci

Magnezyum adını, antik yunan medeniyetinde Thessaly şehrinin Magnesia bölgesinden almaktadır. Magnezyum, 1755 yılında İskoç bir kimyacı olan Joseph Black tarafından keşfedilmiştir. Ancak Joseph Black, magnezyum sülfatı magnezyuma ayırtıramamıştır. 1808 yılında Britanyalı kimyacı ve araştırmacı Sir Humphrey Davy, yaş magnezyum sülfatı elektroliz voltaj hücresi ve cıva katotla magnezyuma ayırtırmayı başaran ilk kişi olmuştur [6].

1833 yılına gelindiğinde Michael Faraday elektroliz yöntemiyle dehidrate magnezyum kloriti azaltarak, saf metalik magnezyumu üretmeyi başarmıştır. 1852 yılına gelindiğinde Alman Robert-Wilhelm Bunsen, karbon-çinko elektroliz hücrelerin geliştirilmesinden sonra metalik magnezyum üretimine başlamıştır [6].

1868 yılında Avrupa’da magnezyum işaret fişeklerinde ve alüminyum üretiminde indirgeyici olarak kullanılmaktadır. Aynı dönemde Almanya’da magnezyumun dökümü de yapılmaktadır [6].

19. yüzyılın sonunda magnezyumun hammaddeden üretimine başlanmıştır. 20. yüzyılın başlangıcında magnezyum üretimi yıllık 10 ton civarındadır. I. Dünya Savaşı’nın başlamasından önce bu oran yıllık 350 ton iken, savaşın etkisiyle bu oran giderek artmış ve 1919 yılına gelindiğinde, bu oran yıllık 3.000 ton olmuştur. II. Dünya Savaşı’nın başladığı 1939 yılında magnezyum üretimi 39.000 ton iken, savaşın etkisiyle 1944 yılına gelindiğinde 240.000 ton olmuştur. II. Dünya Savaşından sonra, 1946 yılında magnezyuma ilgi azalmış ve yıllık üretim 20.000 tona kadar düşmüştür. 1950’lerden günümüze kadar magnezyum üretimi zaman zaman inişli çıkışlı bir grafik izlese de üretim miktarında büyük artış olmuştur [5]. Günümüzde IMA (Uluslararası Magnezyum Birliği) verilerine göre yıllık magnezyum üretimi 809.000 ton olarak ifade edilmektedir [7].



Şekil 2.1 Dünya birincil magnezyum metali üretimi [5]

Magnezyum, geçmişte I. ve II. Dünya Savaşları dönemlerinde büyük ilgi görmüştür. Bu dönemde nükleer, metal ve savunma sanayinde kullanılmış ancak savaş sonrası dönemde magnezyuma ilgi azalmıştır. Savaş sonrası magnezyum üretiminde azalmanın

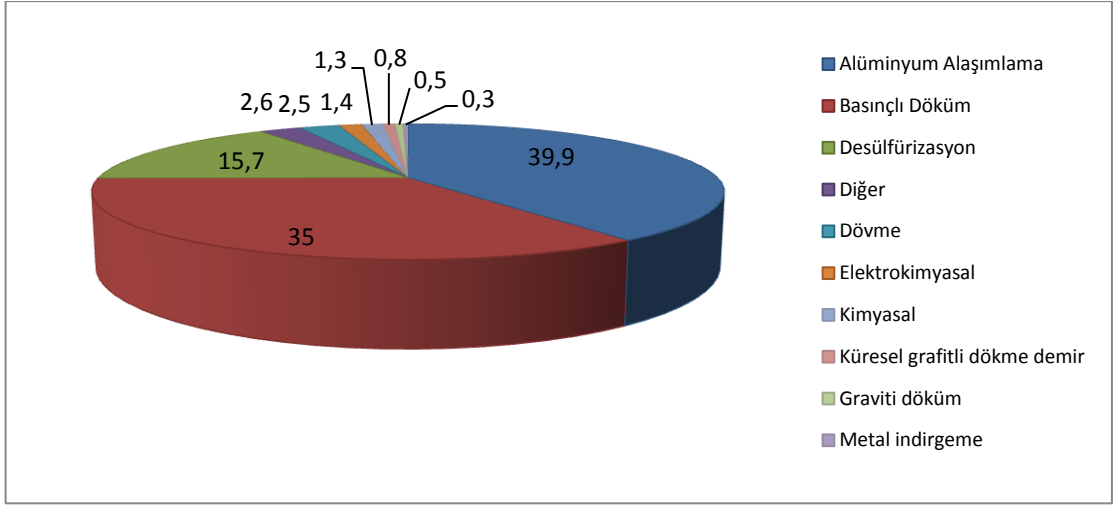
başlıca nedeni, en büyük magnezyum üretici olan Almanya’da fabrikaların kapatılması gösterilmektedir [8], [9].

Almanya’nın savaş sonrası tekrar yapılanma döneminde, 1950’lili yıllarda Volkswagen firmasının Beetle modelinin üretiminde magnezyum alaşımlarını kullanmaya başlaması magnezyuma ilgiyi tekrar artırmıştır. 1970’lerde Volkswagen Beetle çok büyük talep görerek otomotiv piyasasında önemli bir yere gelmiştir. Volkswagen, bu talep doğrultusunda 1970 yılında 40.000 ton, 1975 yılında ise 50.000 ton magnezyumdan üretilmiş parça kullanmıştır [6].

1975 yılından sonra magnezyum fiyatlarının hızla artarak iki katına çıkması (3,5 \$/kg’dan 7 \$/kg’a) ve bu sırada alüminyumun fiyatının değişmemesi, magnezyumun cazibesini kaybetmesine sebep olmuştur. Ancak magnezyum fiyatlarının 1990’lı yıllarda düşmesiyle (3,2 \$/kg’a) magnezyuma duyulan ilgi yeniden artmıştır [10], [11].

1980’den sonra magnezyum üretim rakamları Almanya, Amerika, Kanada gibi ülkelerin yanında Çin, Rusya, Avustralya gibi ülkelerinin sanayilerinin gelişmesiyle artmıştır. Dünyada en büyük magnezyum kaynaklarına sahip olan Çin’in 1994 yılında üretim rakamları 50.000 ton’dan, 2010 yılında 654.000 ton’a çıkmıştır. 1994 yılında Dünya pazarındaki payı %5 olan Çin, 2010 yılında payını %80’e çıkarmıştır [5], [7].

Magnezyum günümüzde döküm ve dövme yöntemleriyle üretimi yapılarak yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Magnezyum metali yapısal olmayan durumlarda; alüminyum alaşımlamada, desülfürizasyon işleminde, kimyasal madde olarak, elektrokimyasal işlemlerde, metallerin redüksiyonunda, küresel grafitli dökme demirlerde ve diğer farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Magnezyum metali çok daha fazla yapısal uygulamaların dışında kullanılmaktadır. Ancak magnezyum özelliklerinden ve günümüzün ihtiyaçlarından dolayı yapısal olarak kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [5]. Şekil 2.2’de IMA (Uluslararası Magnezyum Birliği) verilerine göre, magnezyumun kullanım alanları ve kullanım oranları verilmektedir.



Şekil 2.2 2002 yılı verilerine göre magnezyumun kullanım alanları ve oranları [5]

2.2 Magnezyum Hammaddeleri ve Hammaddeden Magnezyumun Üretimi

2.2.1 Hammaddeler

Magnezyum üretimi için birçok hammadde kaynağı bulunmaktadır. Bunların başında; magnezit, dolomit, brunit, karnelit, serpentin ve deniz suyu gelmektedir (Çizelge 2.1). Bu hammaddeler içerikleri, üretimleri ve çıkarıldıkları yerler bakımından farklılık göstermektedir [6].

Çizelge 2.1 Magnezyum içeren minerallerinin karakteristiği [5]

Mineral	Kimyasal Formülü	Magnezyum İçeriği (%)
Brunit	$Mg(OH)_2$	41,7
Manyezit	$MgCO_3$	28,8
Serpentin	$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	26,3
Dolomit	$MgCO_3 \cdot CaCO_3$	13,2
Karnelit	$KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$	8,8
Tuz gölü	$MgCl_2, MgSO_4$	0,8
Deniz suyu	$MgCl_2, MgSO_4$	0,14

2.1.1 Hammaddeden Magnezyum Üretimi

Magnezyum, doğada her zaman iyonik şekilde bulunur ve $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ şeklinde düzenlenmiş elektron dizilimine sahiptir. Bu şekilde, 3s enerji seviyesinde en dış iki elektronlar göreceli olarak düşük iyonlaşma enerjisiyle karakterize edilmektedir. Bundan dolayı doğada bir veya üç değerlikli magnezyum yoktur sadece iki değerlikli magnezyum bulunmaktadır. Magnezyumun düşük standart indirgeme potansiyelinden dolayı, doğada metalik magnezyum bulunmamaktadır [6].



Bundan dolayı, bütün üretim teknolojilerinde magnezyumdan iki elektron transfer edebilecek bir indirgeme ajanı gerekmektedir. İndirgeme ajanları; uygun voltajda verilen elektrik akımı, değişik formlarda kömür, silisyum esaslı malzemeler FeSi, CaC₂ ve alüminyumdur [6].

Magnezyum üretimi, elektrokimyasal ve termal indirgeme yöntemleriyle yapılmaktadır. Bu yöntemlerde amaç, magnezyum iyonlarının metalik magnezyuma dönüştürmektir. Bu iki prosesi birbirinden ayıran fark, indirgeme işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Elektrokimyasal metotta indirgeme, elektrolit hücreleri besleyen elektrik akımı tarafından sağlanmaktadır. Buna karşılık termal yöntemde indirgeme, silika, alümina gibi malzemelerle yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir [6], [12].

Termal indirgeme yöntemleri, 1990'lı yıllarda cevherden magnezyum üretiminde %4'lük bir orana sahiptir. 2000'li yıllara gelindiğinde, bu oranının elektrokimyasal yöntemler yönünde azalacağı düşünülmektedir. Ancak bu beklenti Çin'de iş gücünün ucuz olması ve dünya pazarında magnezyum üretiminin büyük bir kısmını elinde bulundurmasından dolayı gerçekleşmemektedir. Çin'de, bir termal indirgeme yöntemi olan Pidgeon yöntemiyle üretim 2003 yılında %46 iken, 2005 yılında bu oran %87'ye çıkmıştır [5].

Çizelge 2.2 Magnezyum üretim yöntemlerinin karşılaştırılması [13]

Yöntem	Elektrokimyasal	Termal
Hammaddeler	Manyezit, dolomit, bişofit, karnalit, serpentin, olivin, deniz suyu, tuzlu su	Dolomit, manyezit
Enerji tipi	Hidro-elektrik, gaz, benzin	Kömür, gaz
Enerji Sarfiyatı (MWh/ton)	18-28	45-80
Proses	Sürekli	Aralıklı (yığın olarak işlem yapılır)
Yatırım maliyeti (ABD \$/ton)	10.000-18.000	≤2000
İş gücü	X	5X

Çizelge 2.2’de magnezyumun hammaddeden üretiminde kullanılan yöntemler arasındaki bazı farklılıklar gösterilmektedir. Buna göre elektrokimyasal yöntem enerji sarfiyatı ve iş gücü kullanımı, sürekli ve birçok cevherin işlenmesinde kullanılabilmesinden dolayı termal yöntemlere göre daha avantajlıdır. Ancak termal yöntemin yatırım maliyeti, elektrokimyasal yöntemin maliyetinden oldukça düşüktür. Bu durumda termal yöntemin iş gücü maliyetinin düşük, hammadde miktarının fazla olduğu Çin gibi ülkelerde yaygın olarak kullanılmasının temel nedenlerindendir. Çizelge 2.3’te 1950 yılından itibaren önemli magnezyum projeleri verilmektedir.

Çizelge 2.3 1950’den itibaren önemli magnezyum projeleri [6]

Yıl	Şirket	Bölge	Mg kaynağı	Yöntem
1951	Norsk Hydro	Porsgrunn / Norveç	Deniz suyu	Elektrolitik
1959	Alabama Metallurgical	Selma, AL / ABD	Dolomit	Termal
1960	Furakawa	Japonya	Dolomit	Termal
1964	Pechiney	Fransa	Dolomit	Termal
1965	UstKamenogorst	Kazakistan	MgCl ₂	Elektrolitik
1965	MEL	İngiltere	Dolomit	Termal
1969	Nat. Lead	Utah / ABD	Tuzlu su	Elektrolitik
1970	Am Magnes	Teksa / ABD	Tuzlu su	Elektrolitik
1972	Dow Chem.	Teksa / ABD	Deniz suyu	Elektrolitik
1989	Mag Can	Kanada	Manyezit	Elektrolitik
1989	Norwsk Hydro	Kanada	Manyezit	Elektrolitik
2001	Noranda	Kanada	Serpentin	Elektrolitik
1996	Dead Sea Mg	İsrail	Karnalit, tuzlu su	Elektrolitik
1997	AMC.	Queensland / Avustralya	Manyezit	Elektrolitik
2001	AMC	Queensland / Avustralya	Manyezit	Elektrolitik
1987	Minhe	Çin	Karnalit	Elektrolitik
1990	Various	Çin	Dolomit	Termal

• Elektrokimyasal Yöntem

Magnezyumun, cevherlerden üretiminde çeşitli elektrokimyasal yöntem bulunmaktadır. Genel olarak bu yöntem iki adımdan oluşmaktadır. Birinci adım cevherin hidrometalurjik olarak hazırlanması, ikinci adım bu işlemi takiben elektroliz işlemidir. Gelişmiş proseslerde kullanılan karnalitten magnezyum üretiminde akışkan yatak kurutucuları, klorlayıcılar, elektroliz hücreleri ve magnezyum rafinasyon fırınları gerekmektedir. Elektroliz hücreler dehidrate karnalit ergiyiği, magnezyum klorür ve katı yüksek dehidrate edilmiş karnalit ile beslenmektedir [5].

Birçok elektrokimyasal yöntemler vardır ve bu yöntemler şirketler tarafından geliştirilmektedirler. Bu yöntemlerden bazıları; DSM (Dead Sea Magnesium) Prosesi,

Rusya Prosesi, Dow Prosesi, US Mag Prosesi, Hydro Magnesium Prosesi, AMC (Australian Magnesium Corporation) Prosesi ve Magnola prosesleridir [5].

Elektrokimyasal yöntemlerden biri olan Magnola yönteminde serpentin madeninin posası hammadde olarak kullanılmaktadır. Serpentin cevheri kırma, kurulama ve eleme işlemlerinden sonra magnezyum, tuzlu su oluşturmak üzere asidik liç yoluyla elde edilmektedir. Daha sonra arındırılmış tuzlu su çözeltisi magnezyum klorür granülleri oluşturmak için kurutulmaktadır. Ardından magnezyum klorür hücreleri bir elektrolit içinde çözündürülür ve sonra klorlama işlemi uygulanmaktadır. İkinci aşama olarak klorlama işlemi süresince elektroliz ile magnezyum elde edilmektedir. Son olarak metalik magnezyum ingot olarak dökülmektedir [5].

- **Termal İndirgeme Yöntemi**

Termal indirgeme yöntemiyle sadece dolomit ve manyezit cevherleri kullanılmaktadır. Bu yöntemde, cevher 700-1000 °C sıcaklık aralığında kalsine edilir ve bu sıcaklıkta açığa karbondioksit gazı ve manyezit için MgO, dolomit için MgO·CaO çıkmaktadır. Kalsine işleminden sonra malzeme ince bir toz olacak şekilde öğütülmektedir [6].

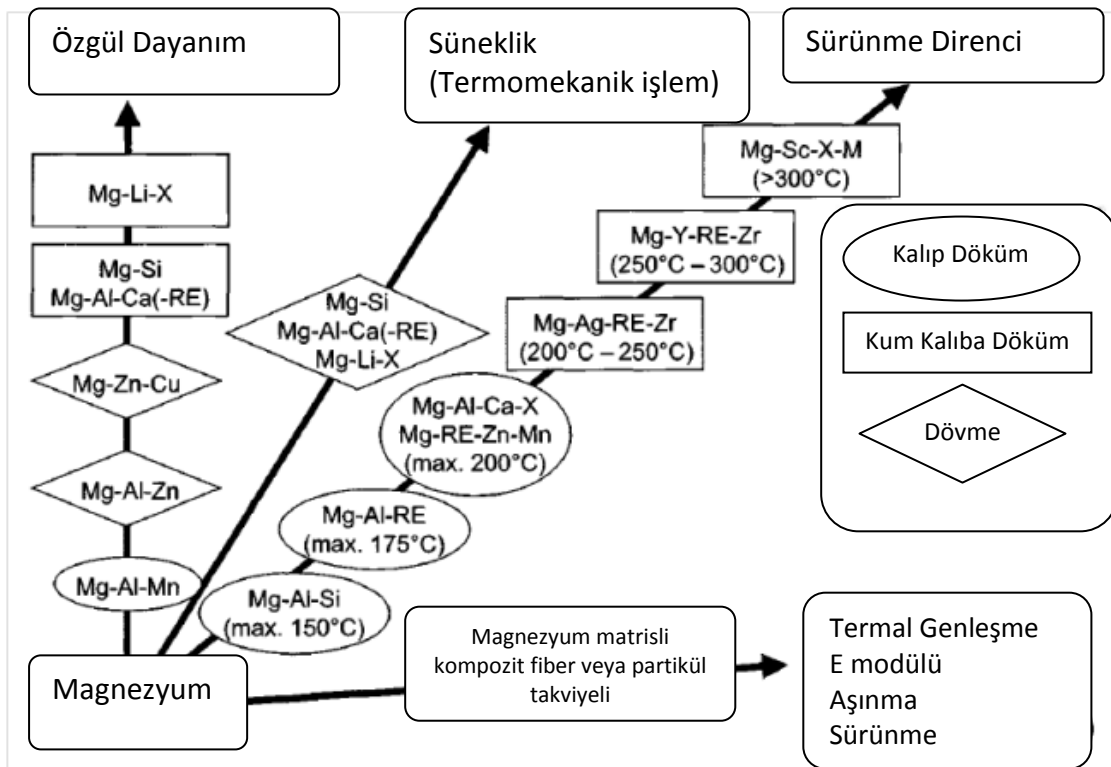
Bu yöntemde magnezyum üretimi için çeşitli hammaddeler ve yanında katkı maddeleri veya indirgeyici ajanlar kullanılmaktadır. Hammadde olarak %65-85 silisyum içeren ferrosilisyum ve boksit kullanılmaktadır. Eklenen katkı maddeleri olarak alüminyum, alümina, kömür ve eklenen indirgeyici ajan olarak kalsiyum karbit kullanılmaktadır. Buna göre hammaddelere, katkı maddelerine, redükleyici ajanlara göre termal indirgeme yöntemleri birbirinden ayrılmaktadır [6].

Isınma ve redüklenme prosesleri, termal teknolojiler arasında tepkimelerin sıcaklıklarına göre termodinamiksel olarak farklılık göstermektedir. İndirgeme tepkimesinin termodinamiği, girenlere, ürünlere, reaksiyon koşullarına (örneğin; basınç, sıcaklık, diğer katkı maddelerine) bağlıdır. Buna göre termal indirgeme yöntemlerini farklı dinamikler oluşmaktadır [6].

Termal indirgeme yöntemlerinden bazıları; Silikotermik Prosesi (Pidgeon Prosesi, Magnotherm Prosesi, Bolzano Prosesi), Alüminotermik Prosesi ve karbotermik prosesleridir [6].

2.2 Magnezyumun Özellikleri

Magnezyum saf halde kullanılmamaktadır. Bu yüzden alaşımlandırılarak veya takviye elemanları ile kullanılmaktadır. Magnezyuma katılan çeşitli alaşım elementlerinin özelliklerine ve üretim yöntemine bağlı olarak, yapının mekanik özellikleri etkilenmektedir. Buna bağlı olarak Şekil 2.3'te magnezyumun oluşturduğu alaşım grupları ve bu alaşım gruplarının göstermekte olduğu bazı mekanik özellikler arasındaki ilişki gösterilmektedir [6].



Şekil 2.3 Magnezyum metalinin çeşitli alaşım elementleri ile özelliklerinin gelişimi [6]

2.2.1 Temel Özellikleri

Magnezyum, $1,74 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa sahiptir ve yapısal olarak kullanılabilen en hafif metaldir. Periyodik tabloda 2A grubunda bulunmaktadır ve toprak alkali metallere aittir. Magnezyumun özellikleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Çizelge 2.4 Magnezyumun temel özellikleri [1], [5] ,[6], [11], [14]

Genel Özellik	Özellik	Değer	Birim	Bilgi
Atomsal	Atom Numarası	12		
	Atom Ağırlığı	24,3050	g	
Kristalografik	Kristal Yapısı	HSP		20 °C'de
		a = 0,32092	nm	a/b=1,6236
		c = 0,52105	nm	
	Atom Hacmi	13,97	cm ³ /mol	
	Burger Vektörü	0,321	nm	
Ağırlık	Yoğunluk	1,738	g/cm ³	20 °C'de
		1,650	g/cm ³	650 °C'de
Mekanik	Elastisite Modülü	45	GPa	
	Kayma Modülü	17,2	GPa	
	Çekme Dayanımı	80-180	MPa	
	Kopma Uzaması	1-12	%	
	Sertlik	30-47	HB	
	Poisson Oranı	0,35		
	Viskozite	1,23	MPa s	650 °C'de
		1,13	MPa s	700 °C'de
Isıl	Ergime Derecesi	650±1	°C	
	Kaynama Derecesi	1090	°C	
	Özgül Isısı	0,25	cal/g °C	
	Isıl Genleşme	26,1	µm°C	20-100 °C'de
		29,9	µm°C	20-500 °C'de
	Isıl İletkenlik (katı faz)	156	W/m K	27 °C'de
		149	W/m K	327 °C'de
		130	W/m K	650 °C'de
	Isıl İletkenlik (sıvı faz)	78	W/m K	650 °C'de
Elektriksel	İletkenlik	22,4	m/(Ω mm ²)	27 °C'de
	Özgül Direnç	45,3	nΩ m	a doğrultusu
		37,8	nΩ m	c doğrultusu
	Elektrokimyasal Potansiyeli	-2,36	V	

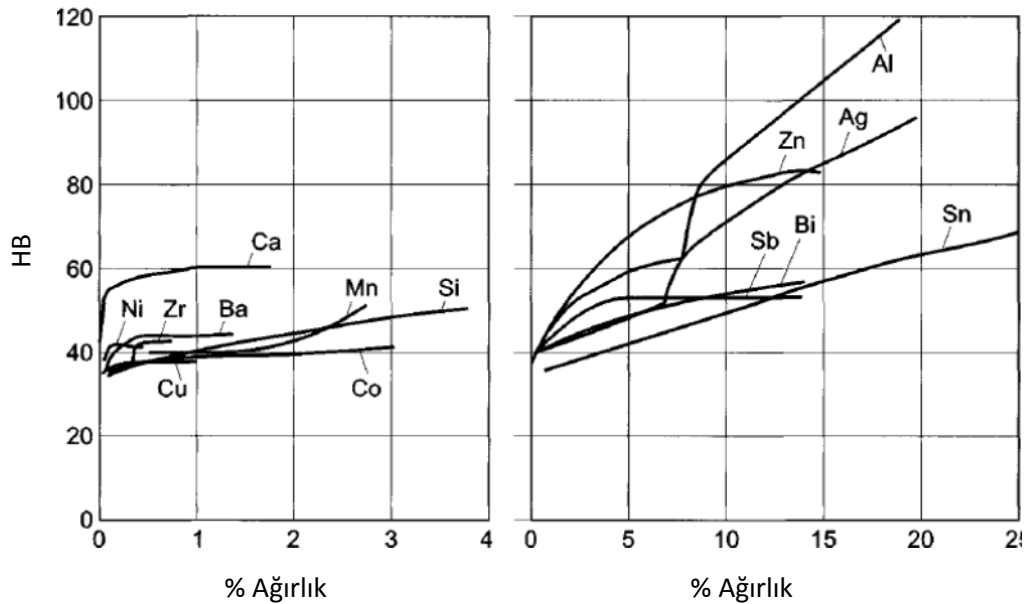
2.2.2 Şekillendirme Kabiliyeti

Magnezyum alaşımları döküm ve dövme yöntemleri ile şekillendirilebilmektedir. Magnezyum alaşımlarının döküm yöntemiyle üretimi, magnezyumun yapısal olarak kullanılmasında önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle magnezyum alaşımlarının basınçlı döküm yöntemiyle üretimi yaygındır. Fakat kum kalıba döküm, kalıcı kalıba döküm, hassas döküm, yarı-katı döküm yöntemleri de kullanılmaktadır.

Magnezyum alaşımlarının dövme yöntemleriyle şekillendirilmesi sınırlıdır. Çünkü magnezyum, HSP kristal kafes yapısına sahiptir. Düşük sıcaklıklarda magnezyumun, bir kayma düzlemi ve üç kayma doğrultusu vardır. Bu kayma sistemi, magnezyumun şekillendirilmesini engelleyici bir etki yapmaktadır.

2.2.3 Sertlik

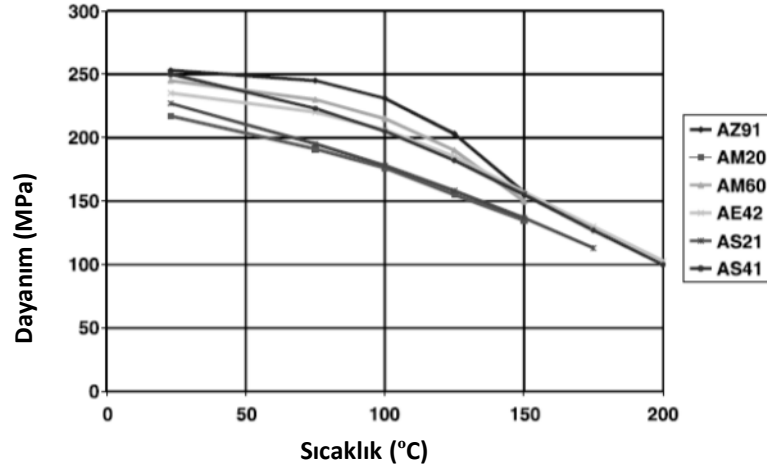
Magnezyum döküm alaşımlarının sertliği, katı çözelti sertleşmesi, tane boyutu incilmesi, yaşlandırma sertleşmesi veya dispersiyon sertleşmesi gibi bilinen sertleştirme mekanizmalarıyla sağlanmaktadır. Alaşım elementleri sertlik değerlerini etkilemektedir. Katı çözelti içerisindeki çeşitli varyasyonlarda bulunan alaşım elementleri özellikle intermetalik faz oluşturarak sertlik değerlerine etki etmektedirler. Bilinen en yaygın sertlik sağlayan alaşımlar alüminyum, çinko, silisyum, nadir toprak elementleri, gümüş ve yitriyumdur (Şekil 2.4). Alüminyum, çinko, gümüş ve yitriyum yüksek katı çözünürlüğü göstermektedir. Bu yaşlandırma sertleşmesi için ön koşul oluşturmakta ve bu elementleri içeren magnezyum alaşımları, ısıtılma işlemine tâbi tutulabilmektedirler [6].



Şekil 2.4 Alaşım elementlerinin sertliğe etkileri [6]

2.2.4 Dayanım

Magnezyum alaşımlarının dayanım değerleri, alaşım elementlerine bağlı olarak değişmektedir ve dayanım değerleri sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır. Bazı magnezyum alaşımlarının çekme dayanımı değerleri Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Bazı magnezyum alaşımlarının dayanımı değerleri [1]

2.2.5 Süneklik

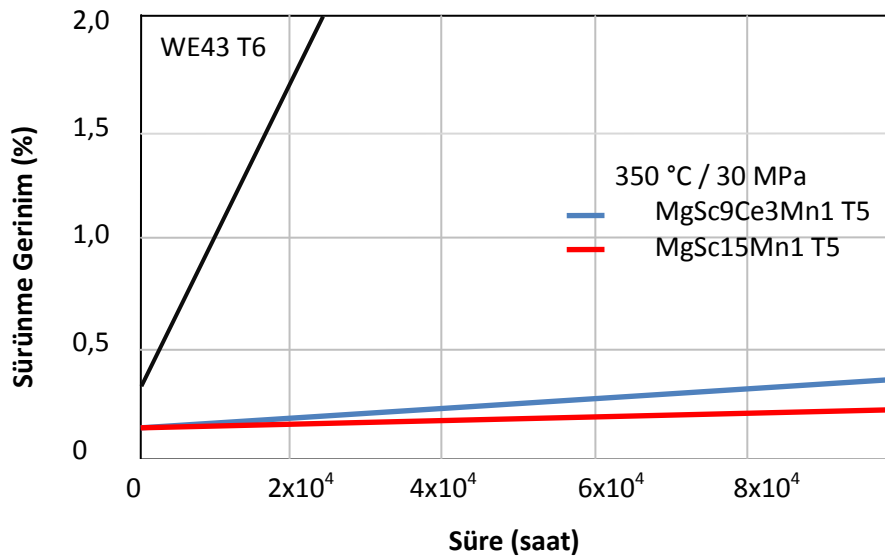
Malzemenin süneklik özellikleri göz önüne alındığında, süneklik özelliğinin yanında yüksek dayanım değerlerinin de bir arada elde edilmesi gerekmektedir. Termomekanik yöntemlerle şekillenebilen magnezyum alaşımları, yüksek süneklik özelliği göstermektedir. Magnezyum, oda sıcaklığında yeterli kayma sistemine sahip değildir. Bundan dolayı süneklik özelliği sınırlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise kayma sistemi sayısı artar ve böylelikle süneklik özelliği de artış gösterir [8].

2.2.6 Sürünme

Metal veya alaşımlar, sürekli bir yük ve gerilme altında belirli bir zaman süresince ilerleyen biçim değiştirmeye maruz kalabilir ve bu zamana bağlı gerilmeye sürünme denilmektedir. Sürünme özelliği, genellikle yüksek sıcaklıklarda kullanılan malzemelerin uygulamalarında önemli bir parametredir [14].

Magnezyum alaşımları, otomotiv sektöründe güç aktarma organları gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan parçalarda kullanılmaktadır. Bu parçalarda kullanılması üzerine çalışmalar yapılan, Mg-Sc-Mn alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda (350 °C'de) WE43 ve

MgSc9Ce3Mn1, MgSc15Mn1 alaşımlarının sürünme eğrileri Şekil 2.6'da verilmiştir [8], [15], [16].



Şekil 2.6 Bazı magnezyum alaşımlarının sürünme eğrileri [8]

2.2.7 Korozyon Direnci

Magnezyum metali, düşük korozyon direncine sahiptir ve bu özelliği magnezyumun pek çok alanda kullanımına engel olmaktadır. Magnezyum ve alaşımları, elektromotor kuvveti ve deniz suyu içinde galvanik serisine göre aktif durumları çok hızlı korozyona uğradığını göstermektedir [18].

Magnezyumun düşük korozyon direnci iki konu ile ifade edilebilmektedir. Bunlar;

- Yarı-pasif hidroksit filmin düşük korucu davranışı,
- Çok düşük elektronegatif potansiyel yüzünden galvanik korozyona karşı duyarlılıktır [5], [18].

Magnezyum, oda sıcaklığında hava ile temas ettiğinde yüzeyinde gri oksit bir film tabaka oluşmaktadır ve nem ile birleştiğinde magnezyum hidroksite dönüşmektedir. Magnezyum hidroksit kuru havada stabildir ancak nem ile birleştiğinde nötr ve asidik alanlarda stabil değildir. Nötr ve düşük pH değerlerinde bulunduğu ortamlarda magnezyum hidroksit, Mg^+ ve Mg^{2+} e dönüşmektedir. Sonuç olarak magnezyum hidroksit yüzeyde koruma sağlayamaz ve bazı iyonların etkisiyle oluşan film bozulmaktadır ve korozyona uğramaktadır [5], [18].

Galvanik korozyon magnezyum yüksek elektronegatifliğinden kaynaklanmaktadır. Magnezyumun elektronegatif potansiyeli -2,37 V iken, demirin -0,44 V, nikelin ise -0,25 V'tur [5].

Magnezyumun korozyon özelliklerinin artırılmasında alaşımlama önemli bir yer tutmaktadır. Magnezyumun alüminyum, çinko ve mangan elementleri ile alaşımlandırılması korozyon direncini geliştirmektedir. Alüminyum, dökümde %8 üzerinde konsantrasyonlarda alaşımlandırıldığında korozyon direncini artırır ve düşük konsantrasyonlarda alaşımlandırıldığında karşı etki yapmaktadır. Mangan, korozyon direncini demir ile birleşip onun etkisini azalttığı için korozyon direncine katkıda bulunmaktadır. Zirkonyum korozyon direncini artırmaktadır. Zirkonyum %4 ile %15 oranında Mg-4Al ile alaşımlandırıldığında korozyon direncini artırır ancak %32 ile %50 arasında korozyon direncini düşürmektedir [5], [19].

Magnezyum ve alaşımları korozyon direncini iyileştirmek için yüzey işlemleri yapılmaktadır. Bu yüzey işlemler; ısıt püskürtme(alevle, arkla, plazmayla) ile pasivasyon gibi örtücü kaplama yöntemleridir. Ayrıca yüzeyden korozyonun kaldırılabilmesi için metal esaslı olmayan temizleyici elemanlar kullanılmaktadır [20].

2.3 Magnezyumun Alaşım Standartları ve Elementleri

2.3.1 Standartları

Magnezyum alaşımları ASTM B275'nolu standarda göre ifade edilmektedir. Bu standarda göre magnezyum alaşımları dört hane, harf sayı sistemiyle gösterilmektedir [3], [11], [21], [22], [23].

1. hane; burada magnezyuma en çok ilave edilmiş iki element yüzdeleri sırasıyla yüzde oranı fazla olandan düşük olana doğru, standardın alaşım elementlerine verdiği özel harflere göre yazılır. Eğer oranları eşit ise alfabetik sıraya göre alaşım elementleri sıralanır. Bu alaşım elementlerinin gösterilişi Çizelge 2.5'te gösterilmektedir.

Çizelge 2.5 Magnezyum alaşım elementlerinin gösterimi [2]

Alaşım Elementi	Harf	Alaşım Elementi	Harf
A	Alüminyum	N	Nikel
B	Bizmut	P	Kurşun
C	Bakır	Q	Gümüş
D	Kadmiyum	R	Krom
E	Nadir Toprak Elementi	S	Silikon
F	Demir	T	Kalay
H	Toryum	W	Yitriyum
K	Zirkonyum	Y	Antimuan
L	Lityum	Z	Çinko
M	Manganez		

2. hane; burada alaşım elementlerinin yüzde oranları yuvarlatılmış şekilde yazılır. 1. hanede belirtilmiş element sırasına göre yüzdeler yazılır.

3. hane; buraya benzer yüzdelerde alaşım oluşturmuş ana alaşım elementlerin, aynı yüzdelerde alaşım oluşturmuş alaşımlar arasındaki farkı belirtmek için standartlar tarafından bir harf verilir. Bu harflere alfabetik sıraya göre belirli kompozisyon atanmıştır(l ve O hariç). Yani;

A birinci kompozisyon, ASTM standardında tanımlı

B ikinci kompozisyon, ASTM standardında tanımlı

C üçüncü kompozisyon, ASTM standardında tanımlı

D yüksek saflık, ASTM standardında tanımlı

E yüksek korozyon direnci, ASTM standardında tanımlı

X deneysel alaşım, ASTM standardından tanımlı değildir.

Bu harfsel gösterim kronolojik olarak belirli alaşımlardaki gelişmeler doğrultusunda, bir harfle ifade edilmektedir. AZ91B, AZ91A'dan daha sonraki versiyondur. Bu versiyonlarda oranlar değişebilir ve ikinci alaşım elementinin miktarı değişebilmektedir. Bu maliyet hedeflerini tutturmak için veya bazı özellikleri sağlamak için ya da işlemlerin avantajlarından yararlanmak için yapılmaktadır. Örneğin, magnezyum alaşımlarının

atmosferik korozyona karşı davranışı büyük ölçüde onların saflıkları ile belirlenmektedir. Böylelikle, AZ91C ile AZ91D arasındaki ana fark alaşım elementlerinin eklenmesiyle değildir. Bunun yerine bakır, demir ve nikel gibi safsızlıkların maksimum değerlerindeki değişimden kaynaklanmaktadır. AZ91E alaşımı, AZ91'in kum kalıba döküm için geçerli kompozisyonuna sahip olan alaşımıdır. AZ91D ise AZ91'in basınçlı döküm için geçerli kompozisyona sahip olan alaşımıdır. AZ91E içindeki bakır oranının düşük oranlarda olması gerekmektedir. Çünkü kum kalıba dökümde katılaşma oranı yavaştır. Bakır, alaşımın mikro-galvanik korozyona eğilimini artırmaktadır. Bundan dolayı bu iki AZ91 alaşımı standartlarca ayrılmaktadır [24].

4. hane; burada alaşımın tavlama durumu gösterilir. Bu ifade standartlarca belirtilmiş ifadelerdir. 3. haneden sonra tire ile ayrılarak gösterilir. Magnezyum alaşımlara uygulanan örnek tavlamaların ifadeleri aşağıda verilmektedir.

F: Üretildiği gibi

O: Tavllanmış

H10, H11: Gerinme sertleştirilmiş

H23, H23, H24: Gerinme sertleştirilmiş ve kısmen tavllanmış.

T4: Çözeltiye alma

T5: Direkt şekil verilmiş ve yapay yaşlandırılmış

T6: Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırılmış

T8: Çözeltiye alma, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış.

Örnek olarak AZ91A, AZ91B, AZ91C ve AZ91C-T6 açıklanmaktadır [21].

- A, alüminyum ve en fazla bulunan alaşım elementi
- Z, çinko ikinci en fazla bulunan alaşım elementi
- 9, alüminyum elementinin yüzdesinin yuvarlatılmış ifadesidir. Alüminyum oranı 8,6 ile 9,4 arasındadır.
- 1, çinko elementinin yüzdesinin yuvarlatılmış ifadesidir. Çinko oranı 0,6 ile 1,4 arasındadır.

- A ilk örnekteki son harf AZ91 kompozisyonu için atanmış nitelikli ilk alaşımdır.
- B ve C, ikinci ve üçüncü örneklerdeki son harflerdir. Bu alaşımların kompozisyonları sonraki gelişmelerle tanımlanmaktadır.
- AZ91C-T6, burada AZ91C yukarıda açıklandığı gibi alaşım elementleri yüzdesine sahiptir. Ancak bu alaşım T6'nın ifade ettiği gibi, çözelti sertleştirilmiş ve yapay yaşlandırılmıştır.

2.3.2 Magnezyum Alaşım Elementleri

Magnezyum, diğer metallerde olduğu gibi nadir olarak saf halde kullanılmaktadır ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için alaşımlandırılmaktadır.

- Alüminyum

Alüminyum, magnezyuma en fazla ilave edilen elementtir. Magnezyum alaşımlarında alüminyum ilavesi oda sıcaklığında dayanımı, sertliği, dökülebilirliği ve korozyon direncini artırmaktadır. Ayrıca alüminyum ilavesi alaşımın katılma zamanını artırmakta ve döküm alaşımlarında mikro gözenekliliği azaltmaktadır. Alüminyum, magnezyum alaşımlarında düşük sıcaklıklarda (120 °C'de) $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalliğini oluşturarak sertlik değerlerini artırmaktadır. Diğer taraftan alüminyumun alaşım miktarının artmasıyla birlikte alaşımın sünekliği ve kırılma tokluğu değerleri azalmaktadır [2], [3], [5].

- Çinko

Çinko, magnezyum alaşımlamada yaygın olarak kullanılan elementlerden biridir. Çinko, alaşımın tokluğunu yükseltmekte, buna karşın sünekliği azaltmaktadır. Çökelti sertleşmesi sayesinde ortam sıcaklıklarında dayanımı ve aynı zamanda ergiyeğin akıcılığını artırmakla birlikte, tane sınırlarına çökmesi ile sıcak yırtılma oluşturduğu için % 2 ile sınırlanmaktadır [2], [5]. Çinko, alüminyum ile birlikte katıldığında süneklik değerleri azalmadan dayanımı artırmaktadır. Ayrıca çinko, demir ve nikel ile birleştikten korozyon direncine artırıcı etki etmektedir [3].

- Mangan

Manganın en önemli işlevi Mg-Al, Mg-Al-Zn alaşımlarının tuzlu su da korozyon direncini artırmasıdır. Mangan ilavesinin, alaşım çekme dayanımına etkisi yoktur ancak akma dayanımını çok az artırmaktadır [3]. Mangan, Fe-Mn çöktelilerinde demir içeriğini kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır [5], [10], [26].

- Kalsiyum

Kalsiyumun, magnezyuma ilavesi alaşımın katılmasıyla tane boyutunu küçültücü etki yapmaktadır Böylelikle alaşımın dayanım ve uzama değerlerini artırmaktadır. Ancak kalsiyum % 1'in üzerinde yapıya katıldığında dayanım ve uzama değerlerini düşürmektedir [27].

- Gümüş

Gümüş, magnezyum alaşımlarında nadir toprak elementleri ile yüksek sıcaklık dayanımı ve sürünme direnci sağlamaktadır [3].

- Toryum

Toryum magnezyum alaşımının 370 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımını artırmaktadır. Toryum elementi, çinko, zirkonyum, mangan ile yaygın olarak magnezyum ile alaşımlandırılır. Ayrıca çinko içeren alaşımların kaynak kabiliyetini artırıcı etki yapar [10].

- Nadir Toprak elementleri

Lantan, seryum, samaryum, evropiyum, gadolinyum, terbiyum, holmiyum, erbiyum, iterbiyum gibi bazı nadir toprak elementleri alaşıma katıldığında genellikle yüksek sıcaklık dayanımını, sürünme direncini ve korozyon direncini artırmaktadırlar. Fakat bu elementler pahalı oldukları için öncelikle ileri teknoloji alaşımlarında kullanılmaktadır. Bu elementlerin varlığı alaşımların katılma süresini azaltıcı yönde etki etmekte ve bunun sonucunda dökümde porozite ve kaynakta çatlak azalmaktadır [3].

- Zirkonyum

Zirkonyum, çok etkili tane incelticidir. Saf magnezyuma ya da çinko, gümüş, yitrium ve toryum içeren alaşımlara eklenmektedir. Zirkonyum, berilyumun tane kabalaştırıcı etkisini, azaltıcı etkiye sahiptir [5].

- Lityum

Lityum ilavesi alaşımın dayanımını azaltmakta buna karşın sünekliliğini artırmaktadır [6], [9]. %30'un üzerinde lityum ilavesi, magnezyumun hegzagonal sıkı kafes yapısından, kübik yüzey merkezli kafes yapıya dönüştürmektedir [6].

- Stronsiyum

Magnezyum-alüminyum alaşımlarına stronsiyum eklenmesi sürünme direncini artırır. Mg-Al-Sr alaşımlarının yüksek sıcaklık dayanımı, Mg-Al-Zn alaşımları kadar yüksektir. Ancak oda sıcaklığında Mg-Al-Sr alaşımının çekme dayanımı, Mg-Al-Zn'den daha düşüktür [27].

- Yitrium

Yitrium, magnezyum alaşımlarının, yüksek sıcaklıklarda gerilme dayanım ve sürünme özelliklerini artırmaktadır. Ayrıca alaşımın korozyon özelliklerini iyileştirici etki yapar. Magnezyum içerisinde yüksek çözünürlüğe sahiptir. Sıcaklığın azalmasıyla birlikte çözünürlüğü azalmakta ve çökeltme sertleşmesine neden olmaktadır [26].

- Bakır

%0,05 oranını geçtiği zaman alaşımın korozyon direncini olumsuz yönde etkilemekle birlikte yüksek sıcaklık dayanımını artırır [10].

- Demir

Demir, magnezyum alaşımları içinde istenmeyen safsızlıklardan biridir. Çünkü çok küçük oranları bile korozyon direncini çok fazla etkilemektedir. Ticari olarak yapılan alaşımlamalarda demir içeriği %0,01 ile %0,03 arasında kullanılmaktadır [10].

- Nikel

Nikel, demir gibi magnezyum alaşımlarının içerisinde bulunan istenmeyen safsızlıklardan birisidir. Alaşımda çok düşük miktarda olsalar bile korozyon direncini çok

büyük oranlarda düşürmektedir. Ticari olarak yapılan alaşımlamalarda nikel içeriği %0,01 ile %0,03 arasında kullanılmaktadır [10].

- **Berilyum**

Berilyum magnezyum içerisinde çok düşük oranlarda çözülebilmektedir. %0,001 oranında bile döküm, ergitme ve kaynak işlemlerinde ergiyik metalik yüzey oksidasyonunu azaltıcı etkisi vardır. Ayrıca tane kabalaşmasına neden olmaktadır [3], [10].

2.3.3 Magnezyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Magnezyum alaşımları döküm ve dövme alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Her iki grupta ısıtıl işlem uygulanan ve uygulanamayan alaşımlar bulunmaktadır [14], [28], [29].

- **Döküm Alaşımları**

Magnezyum alaşımları içerisinde AZ, AM ve AS grubu alaşımlar döküm yöntemiyle üretilmektedir. Bu alaşımlardan üretilen parçalar genellikle otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [24].

AZ ve AM magnezyum alaşımlarının üretiminde gravite döküm, düşük ve yüksek basınçlı döküm, hassas döküm, yarı-katı döküm yöntemleri kullanılmaktadır [24].

Çizelge 2.6 Magnezyum döküm alaşımları [1], [24]

Alaşım Grubu	Uygulamaları	Döküm Yöntemi
AZ (Mg-Al-Zn-Mn)	- Yüksek dayanım, düşük süneklik (125 °C'nin altında) - Oda sıcaklığında iyi özellikler - Düşük ısı direnci ve sürünme direnci - Sınırlı süneklik	- Gravite ve düşük basınçlı döküm - Kum ve metal kalıba döküm - Yüksek basınçlı döküm - Yarı-katı döküm
AM (Mg-Al-Mn)	- Düşük dayanım ancak yüksek süneklilik, 125 °C'nin altındaki ısı ortamlarda çarpma ve darbe riskli - Oda sıcaklığında özellikleri ve dökülebilirliği sınırlıdır. - AM50, AM60	- Gravite ve düşük basınçlı döküm - Kum ve metal kalıba döküm - Yüksek basınçlı döküm - Yarı-katı döküm
AS (Mg-Al-Si-Mn)	125 °C civarında ısı ortamlarda sürünme dayanımını geliştirmek için AZ alaşımları yerine kullanılır. - Mg-RE çökmesiyle yüksek ısı ve sürünme direnci elde edilir. - Dökülebilirliği sınırlıdır ve sadece dökümde kullanılır. - AS21, AS31, AS42	Yüksek basınçlı döküm
AE (Mg-Al-E-Mn)	150 °C'de ortamda güç aktarma organlarında yüksek sürünme direnci sağlar. - AE42, AE44	Yüksek basınçlı döküm
AX ve AJ (Mg-Al-Sr/Ca-Mn)	- Güç aktarma organlarından yüksek sürünme direnci - AJ52, AJ62, AXJ530	Yüksek basınçlı döküm
ZK (Mg-Zn-Zr)	- Yüksek dayanım ve sürünme direnci - Yüksek maliyet - Uçak ve savunma alanlarında kullanılır. - ZK (Mg-Zn-Zr), ZE (Mg-Zn-E-Zr), WE (Mg-Y-E-Zr), QE (Mg-Ag-E-Zr)	Gravite ve düşük basınçlı döküm (kum ve metal kalıba)

Magnezyum döküm ürünleri hafif ve iyi sönümleme özelliği gösterdiklerinden yapısal uygulamalarda kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımları düşük viskoziteye sahip olduklarından, kalıp içerisinde uzun mesafelere ilerleyebilmekte ve dar kalıp boşluklarını tamamen doldurabilmektedir. Magnezyum alaşımlarının nispeten düşük ergime sıcaklığına sahip olması sıcak kamaralı basınçlı döküme izin vermektedir [29].

Döküm yöntemi seçilirken öncelikle boyut, şekil, miktar, maliyet ve istenilen mekanik özellikler göz önüne alınmaktadır. Kum ve metal kalıba döküm yöntemleri hassas

döküm yönteminden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Hassas döküm yönteminin dezavantajı hem sermaye ekipmanlarının hem de döküm başına maliyetin fazla olmasından kaynaklıdır. Ayrıca bu yöntemle, imal edilebildiğinde dökümün boyutları üzerine çok büyük sınırlama bulunmaktadır [29].

Magnezyum alaşımları, yüksek kalıp maliyetini karşılayacak kadar parça üretilecekse metal kalıba döküm tercih edilmektedir. Metal kalıba döküm ile kum kalıba döküm yöntemleri ile üretilen parçaların mekanik özellikleri birbiriyle karşılaştırılabilir özelliktedir. Ancak metal kalıba döküm ile parça boyutu daha iyi kontrol edilmekte ve parçaların yüzey kalitesi daha iyi olmaktadır [29].

Magnezyum alaşımlarının döküm maliyeti ingot fiyatı, alaşımın dökülebilirliği ve ısı işlem gerekliliğine göre maliyeti hesaplanmaktadır. İngot fiyatları nadir toprak elementleri, zirkonyum, gümüş ve toryum ile alaşımlandırıldığında artmaktadır. Kompozisyondaki küçük değişimler ısı işlem süresini ve sıcaklığını değiştirdiği için, toplam maliyeti olumlu veya olumsuz yönde etkilemektedir [29].

- **Dövme Alaşımları**

Dövme magnezyum alaşımlarının şekillendirilebilme kabiliyeti zayıf olmasından dolayı, tüm magnezyum alaşımlarının sadece %10-15'ini oluşturmaktadır. Sıcak şekil verme işlemleri 300 °C-350 °C'den yüksek sıcaklıklarda, fakat 500 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yapılmaktadır [5].

Dövme ve döküm yöntemiyle üretilen aynı magnezyum alaşımları karşılaştırıldığında, dövme ürünü alaşımın mikroyapısı daha homojendir ve genellikle mekanik özellikleri döküm yöntemi ile üretilenden daha iyidir. Dövme ürünlerin mekanik özelliklerindeki bu iyileşme, termomekaniksel yöntemle üretilmesinden kaynaklanmaktadır [3]. Magnezyumun HSP kafes yapısı soğuk işlenebilirliği sınırlamaktadır ve bu durum dövme yöntemleriyle şekillenmesini olumsuz yönde etki etmektedir. Bundan dolayı da dövme magnezyum alaşımlarının sayısı da sınırlanmaktadır [1].

Magnezyum-alüminyum serisi alaşımlarından (AZ31, AZ61, AZ80) parçalar, dövme yöntemleriyle üretilebilmektedir [1]. Ayrıca magnezyum-lityum alaşımları levha ve plaka üretiminde kullanılmaktadır [28].

AZ80, ZK21, ZK60, ZC71, ZM21, ZM61, AZ21X1 alaşımları ekstrüzyon yönteminde kullanılmaktadır. AZ31, ZE10, ZM21, HM21, HK31 ve ZK31 alaşımlar haddeleme yönteminde kullanılmaktadır. AZ80, ZK60, AZ61 ve HM21 alaşımları dövme işleminde en çok kullanılan alaşımlardır. Dövme magnezyum alaşımları döküm yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek maliyetinden dolayı kullanımı sınırlıdır [5].

Çizelge 2.7 Dövme magnezyum alaşımları [5]

Alaşım grubu	Alaşım Sınıfı	Al	Mn	Zr	Zn	Diğer	Özellik
Mg-Mn-Zn	ZM21		1,0		2,0		Haddelemede, iyi şekillendirilebilir, orta dayanım değerlerine sahiptir
Mg-Mn-Zn-Cu	ZC71		1,0		6,5	1,2 (Cu)	İyi mekanik ve yüksek uzama özelliğine sahip orta maliyetli ekstrüzyon alaşımı
Mg-Mn-Al-Zn	AZ10A	1,2	0,2		0,4		Orta dayanım, yüksek uzama, düşük maliyetli ekstrüzyon alaşımı
	AZ31	3,0	0,3		1,0		Orta dayanımlı alaşım
	AZ61A	6,5	0,3		1,0		Mekanik özellikleri iyi ekstrüzyon alaşımı
	AZ80	8,5	0,12		0,5		Ekstrüzyonla üretilir, dövmeyle şekillenir.
Mg-Mn-Zr	ZK21A			0,45	2,3		İyi kaynak edilebilir orta dayanımlı ekstrüzyon alaşımı
	ZK40A			0,45	4,0		Yüksek akma dayanımlı ekstrüzyon alaşımı, ZK60'dan daha düşük dayanımlı
	ZK60A			0,45	5,5		Yüksek dayanımlı ve orta süneklik özelliğine sahip ekstrüzyon ve dövme ürünleri
Mg-Y-RE	WE43			0,7		4,0 (Y) - 3,4 (NTE)	300 °C üzerinde yüksek sürünme direnci

NTE: Nadir Toprak Elementi

Magnezyum alaşımlarının, ekstrüzyon yöntemi ile üretimi çok fazla tercih edilmektedir. Magnezyum ekstrüzyon alaşımları özellikle ulaşım araçlarının imalatında çok fazla kullanılmaktadır [28].

Dövme yöntemleri, genellikle hafif parçalardan istenen yüksek dayanım değerlerini karşılaması için kullanılmaktadır. Böylelikle döküm yöntemiyle üretilen parçalardan daha yüksek dayanım değeri elde edilmektedir [28].

2.4 Magnezyum Alaşımlarının Kullanıldığı Endüstriler

Magnezyum alaşımları başta havacılık, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde kullanılmak üzere, medikal ve spor eşyalarının üretiminde kullanılmaktadır.

2.4.1 Uçak Endüstrisinde

Havacılık sektöründe özellikle magnezyum hafifliğinden dolayı önemli yer tutmaktadır. 1930'lu yıllardan beri uçaklarda kullanılan magnezyum, 1950'lili yıllarda uçak yapımında ve parçalarında kullanımı çok yüksek miktarlara çıkmıştır. Ancak II. Dünya Savaşı sonrasında giderek azalma göstermiştir. 1990'lı yıllarda havacılık sektöründe tekrar magnezyumun kullanımı artsa da yeterince kullanılmamaktadır. Çizelge 2.8'de bazı modelleri ve kullanılan magnezyum miktarı verilmektedir[30].

Çizelge 2.8 Bazı uçak imalatı yapan firmaların ürettiği uçaklarda kullandığı magnezyum miktarı, üreten şirket, modeli ve yılı [30]

İmalat Yılı	İmalat Şirketi	Uçak Modeli	Kullanılan Magnezyum Miktarı
1950	Westland Aircraft Ltd.	Sikorsky S-56	115 kg
1948	Convair Corporation	Convair B-36,	8600 kg plaka: 5555 kg
1952	Tupolev	TU-95MS	1550 kg
1967	Boeing Commercial Airplanes	Boeing 737	Kanat ve kapıda küçük parçalar
1963	Tupolev	Tupolev TU-134	780kg

Magnezyumun uçak sanayinde kullanımı 1950'lerden sonra giderek azalmıştır. Bunun nedeni, magnezyumun alev alma direncinin ve korozyon direncinin düşük olmasından kaynaklıdır. Çünkü magnezyumun alev alma direncinin düşük olması, olası kazalarda

çok büyük tehlike oluşturduğu düşünülmektedir. Korozyon direnci ise havacılık sanayinin için bir malzemenin kullanımında çok önemli bir kriterdir. Bu yüzden magnezyumun korozyon özellikleri üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle havacılık sanayinde magnezyum alaşımlarının kullanılması için Almanya, Amerika Birleşik Devletleri, İsrail, Fransa, Rusya ve Avusturya gibi devletler çalışmalarını sürdürmektedir [30].

2.4.2 Otomotiv Endüstrisinde

Otomotiv endüstrisinde araçlardan yüksek yakıt verimliliği, düşük gaz emisyonu ve düşük enerji tüketimi elde etmek için ağırlıkların azaltılması gerekmektedir. Ancak güç, emniyet ve konfor gibi taleplerin olması araçların ağırlığını artırmaktadır. Bu yüzden araçlarının ağırlıklarının azaltılması için otomotiv üreticileri hafif malzemeler üzerine çalışmalar yapmaktadır. Bundan dolayıdır ki magnezyum kullanımı otomotiv endüstrisinde giderek artmaktadır. Diğer tarafta, çevrenin korunması amacıyla çıkan standartlar ve yasal düzenlemeler, otomotiv üreticilerinin buna zorunlu hâle getirmektedir. [31].

Otomotiv üretiminde magnezyum alaşımının çelik ve alüminyum yerine, motor bloğu, tekerlekler, dişli kutusu, motor kazağı ve karter üretiminde kullanıldığında 72 kg harcanmaktadır. Bu ağırlık miktarı çelikten 48,5 kg, alüminyumdan 19,5 kg daha az gelmektedir. Bunun anlamı çelikten her 100 km'de 0,25 lt, alüminyumdan her 100 km'de 0,1 lt kazanç sağlamaktadır [31].

Magnezyum üretimi, 1907 yılından itibaren Alman Elektron şirketinin magnezyum alaşımlarını üretmesiyle başlamıştır. 1950'li yıllara kadar otomobil, otobüs ve kamyonlarda magnezyum alaşımları çeşitli parçalarda (motor, dişi, debriyajı süspansiyon, fren, ateşleme, koltuk ve direksiyon) kullanılmıştır. [31]. Çizelge 2.9'da çeşitli otomotiv firmalarının (Volkswagen Polo, Passat ve Golf, Porsche 911 ve 928, Daimler Benz, Renault 18 Turbo, Chrysler Jeep, Ford kamyonlarında) magnezyumdan ürettikleri parçalar verilmiştir.

Çizelge 2.9 Magnezyum alaşımlarının otomotivlerde kullanıldığı parçalar [31]

Motor ve Transmisyon parçaları	İç parçalar	Şasi parçaları	Gövde bileşenleri
Dişli kutusu Emme manifoldu Krank mili Silindir kafası kapağı Yağ pompası gövdesi Yağ karteri Aktarma organları	Direksiyon simidi Koltuk iskeleti Gösterge paneli Fren ve debriyaj pedal braketleri Hava yastığı tutucusu	Tekerlekler Süspansiyon kolları(ön ve arka) Motor kızıağı	Döküm parçalar Plaka parçalar Ekstrüzyon parçalar

Magnezyum kullanımına ilgi artmakta olsa bile uygulamada çelik, alüminyum ve plastiklere oranla daha az kullanılmaktadır. Çizelge 2.10'da ve Şekil 2.7'de çeşitli firmaların kullandıkları magnezyum alaşımları ve bu alaşımların kullanıldığı parçalar verilmiştir[15], [32].

Çizelge 2.10 Bazı otomotiv üreticilerinin, ürettikleri modeller ve bu modellerde magnezyum alaşımlarının kullanıldığı parçalar ve parça ağırlıkları [6], [33]

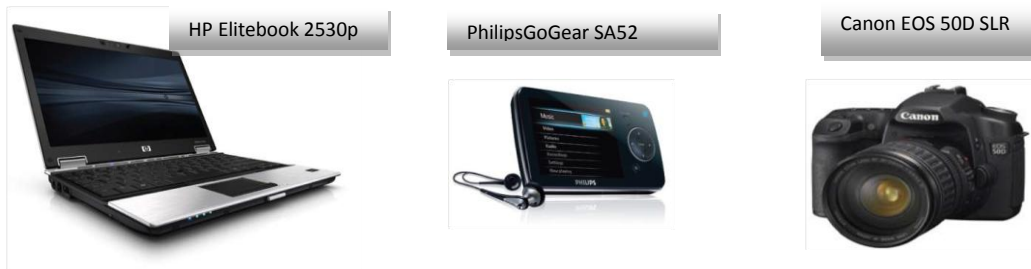
Firma	Model	Parça	Magnezyum Alaşımı	Ağırlık (kg)
Audi	V8	Emme manifoldu	AZ91	5,490
Audi	A8	Silindir kapağı	AZ91	0,790
VW	Beetle	Boxer motor hava soğutmalı	AS21	9,7
VW	Golf-Lupo	Direksiyon simidi	AM50	0,515
Daimler Crysler	500 SEL Roadster	Koltuk sistemi	AM50	
Daimler/Chrysler	Chrysler-SL	Pencere çerçevesi iç kapı	AM50	4,5
Daimler/Chrysler	Slk	Depo kapağı	AM60	3,2
Porsche	Porsche 911	Tavan sistemi parçası	AM50	2,8
GM	Corvette	Tekerlek	AZ91	8,6



Şekil 2.7 Magnezyum alaşımlarından üretilen bazı otomotiv parçaları [6], [33]

2.4.3 Elektronik Endüstrisinde

Günümüzde elektronik eşyalar kişisel kullanıma uygun şekilde tasarlanmaktadır. Bundan dolayı hafif ve dayanıklı olması istenmektedir. Magnezyum esaslı malzemeler dayanımı, ısı transferi, elektromagnetik ve radyo frekansına karşı engelleyici özellikleri nedeniyle her ne kadar plastik malzemeler göre hafiflik dezavantajı olsa da tercih edilmektedir. Magnezyum esaslı malzemeler cep telefonlarında, bilgisayarlarda, taşınabilir medya oynatıcılarında, fotoğraf makinelerinde kasa malzemesi olarak kullanılmaktadır [3].



Şekil 2.8 Magnezyum esaslı malzemelerin kullanıldığı bazı elektronik ürünler [34]

2.4.4 Diğer Endüstrilerde

- Medikal Alanda

Magnezyum, medikal alanda genellikle ortopedik biyomalzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Ancak magnezyumun düşük korozyon direnci sebebiyle implant çevresinde büyük miktarda hidrojen biriktirdiğinden biyomalzeme uygulamalarında kullanımı sınırlanmaktadır. Buna rağmen medikal alanda özellikle yük taşıyıcı implantların yapımında kullanılmaktadır. Magnezyum, insan vücudu için toksik bir madde değildir ve yüksek biyouyumluluğa sahiptir. Ortopedik uygulamalarda magnezyum esaslı malzemelerin kullanımını sınırlayan korozyon problemlerini aşmak için, alaşımlandırma ve kaplama üzerine çalışmalar yapılmaktadır [3]. Ayrıca magnezyum alaşımları stent üretiminde de kullanılmaktadır. Özellikle AE21 alaşımı düşük bozunum hızından dolayı tercih edilmektedir [35].

- Spor Malzemeleri Alanında

Magnezyum esaslı malzemeler okçuluk malzemelerinde, tenis malzemelerinde, golf malzemelerinin üretiminde kullanılmaktadır. Özellikle bisiklet üretiminde magnezyum esaslı malzemeler, hafif ve darbe sönümleme özelliğinden dolayı tercih edilmektedir [3].

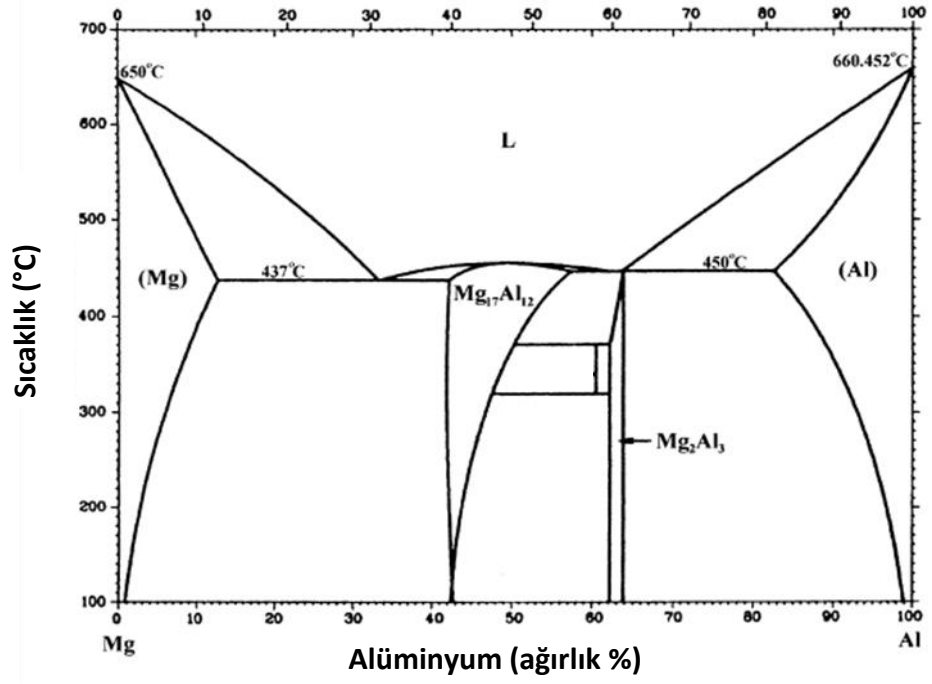
MAGNEZYUM-ALÜMİNYUM-ÇİNKO ALAŞIMI

3.1 Magnezyum-Alüminyum Alaşımı

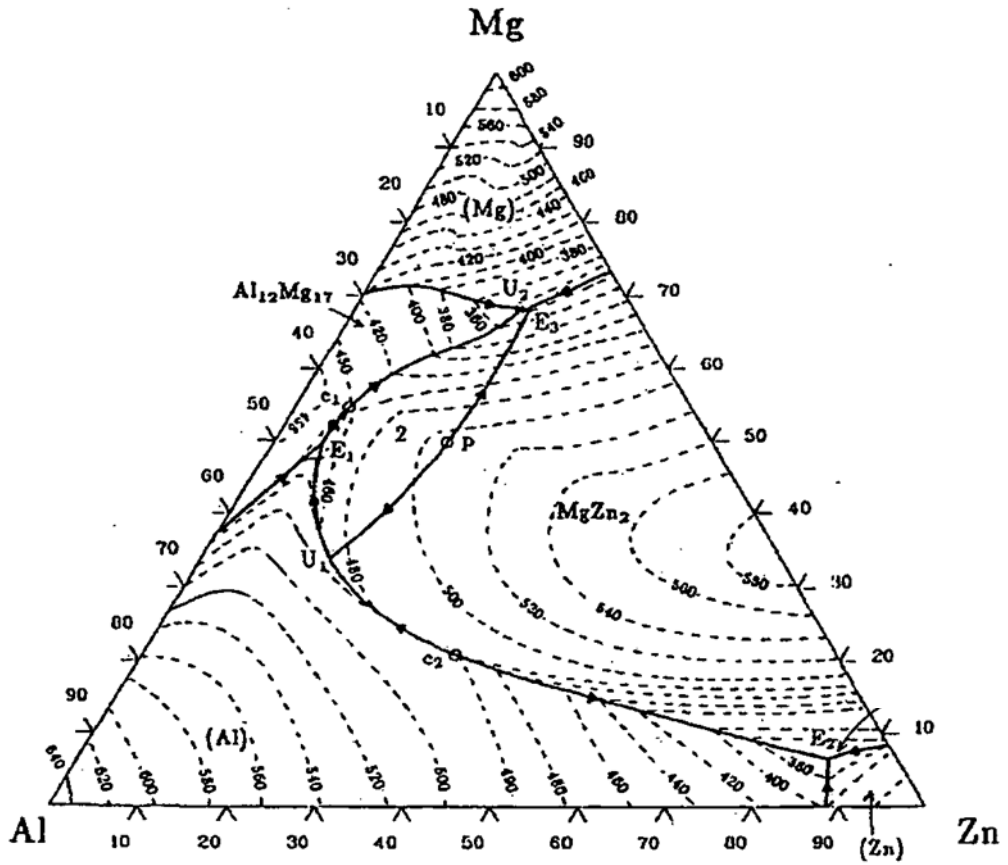
Magnezyum alaşımları içerisinde en fazla kullanılan alaşım grubudur. Bu alaşım grubuna çinko, mangan, silisyum, kalsiyum ve nadir toprak elementleri eklenerek malzemenin mekanik özellikleri geliştirmek amacı ile alaşım grupları oluşturulmaktadır.

3.2 Magnezyum-Alüminyum Denge Diyagramı

Magnezyum-alüminyum alaşımlarının ötektik sıcaklıkta alüminyumun maksimum katı çözünebilirliği %12,7'dir. Ötektik yapısında bulunan α -Mg ve $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalinde ağırlıkça %33 oranında alüminyum bulunmaktadır. Magnezyum alaşımlarında, alüminyum miktarı maksimum katı çözünebilirlik sınırının altındadır ve bu alaşımlar bundan dolayı birincil α -Mg fazıyla katılaşmaktadır. Katılaşma sırasında denge dışı, ötektik formlarda ve Mg-Al alaşımlarının döküm yapısında alüminyum ağırlıkça %2'nin altında bulunmaktadır. Mg-Al denge diyagramında ötektik fazda alüminyum oranının %12,7 civarında olması beklenmektedir. Fakat ötektik fazda, döküm işleminde denge dışı soğuma olduğundan alüminyum içeriğinin ağırlıkça %2 civarında olduğu görülmektedir (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2) [36], [37], [38].



Şekil 3.1 Mg-Al denge diyagramı [36]



Şekil 3.2 Mg-Al-Zn üçlü denge diyagramı [37]

3.3 Magnezyum-Alüminyum-Çinko Alaşımı

Magnezyum-alüminyum-çinko üçlü alaşımlarında çinko, çökeltme sertleşmesi işlemi sonucunda dayanım değerlerini ve ergiyeğin akıcılığını artırmaktadır. Ancak tane sınırlarında çökelediği için sıcak yırtılma olmakta bu yüzden alaşım içeriğinde çinko %2 ile sınırlanmaktadır [2]. Mg-Al ikili alaşım grubuna çinko eklenmesiyle elde edilen magnezyum-alüminyum-çinko grubu alaşımlar AZ grubu olarak adlandırılmakta ve en çok kullanılan magnezyum alaşımıdır.

Magnezyum-alüminyum-çinko (AZ) serisi alaşımlar göreceli olarak iyi dökülebilirliğe, oda sıcaklığında iyi mekanik özelliklere ve ucuz maliyete sahiptir. Fakat AZ magnezyum alaşımlarının zayıf ısı dirence sahip olması kullanımı sınırlanmaktadır. Mg-Al-Zn serisi alaşımların yüksek sıcaklıklarda tane sınırı kayması, deformasyon mekanizmasının önemli bir parçasıdır [39].

Mg-Al-Zn alaşımlarının döküm sonrası yapıları magnezyum-alüminyum döküm sonrası yapıları ile benzerlik göstermektedir. AZ91 alaşımında, Al:Zn oranı 3:1'den fazla olduğunda magnezyum-alüminyum-çinko üçlü fazında intermetalik β -Mg₁₇Al₁₂ fazının yanında yeni faz oluşmamaktadır. Burada çinko, alüminyumun yerine geçmekte ve intermetalik faz Mg₁₇Al_{11,5}Zn_{0,5} veya Mg₁₇(Al,Zn)₁₂ şeklinde oluşmaktadır. Ancak yapıda mangan olması durumunda, alüminyumla birleşerek Al₈Mn₅ intermetalik fazını, yapıda silisyum olması durumunda Mg₂Si fazı oluşturmaktadır [40].

3.4 AZ91 Alaşımı

AZ91 alaşımları dökülebilirlik, işlenebilirlik, dayanım değerleri iyi olan, tokluk değerleri düşük olan, atmosfer kontrollü ortamda korozyon direnci iyi olan bir magnezyum alaşımıdır. AZ91 alaşımları, en çok üretimi gerçekleştirilen magnezyum alaşımlarıdır [6], [41].

ASTM standartlarına göre AZ91 alaşımı çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Buna göre A, B, C, D, E ve F olarak ayrılan alaşımların kimyasal içerikleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1 AZ91 alaşımlarının kimyasal kompozisyonu [41]

Alaşım	İçerik	Kimyasal Kompozisyon (%)							
		Al	Mn	Zn	Cu	Si	Ni	Fe	Mg
AZ91A	Normal	9,0	0,30	0,70					Kalan
	Sınırları	8,3-9,7	0,13-0,50	0,35-1,0	0,10 maks.	0,50 maks.	0,03 maks.		Kalan
AZ91B	Normal	9,0	0,30	0,70					Kalan
AZ91B	Sınırları	8,3-9,7	0,13-0,50	0,35-1,0	0,35 maks.	0,50 maks.	0,03 maks.		Kalan
AZ91C	Normal	8,5	0,30	0,70					Kalan
AZ91C	Sınırları	8,1-9,3	0,13-0,50	0,40-1,0	0,10 maks.	0,30 maks.	0,01 maks.		Kalan
AZ91D	Normal	9,0	0,30	0,70					Kalan
AZ91D	Sınırları	8,3-9,7	0,15-0,50	0,35-1,0	0,030 maks.	0,10 maks.	0,002 maks.	0,005 maks.	Kalan
AZ91E	Normal	8,5	0,26	0,70					Kalan
AZ91E	Sınırları	8,1-9,3	0,17-0,35	0,40-1,0	0,15 maks.	0,20 maks.	0,001 Omaks.	0,005 maks.	Kalan
AZ91F	Normal	8,5	0,26	0,70					Kalan
AZ91F	Sınırları	8,1-9,3	0,17-0,35	0,40-1,0	0,15 maks.	0,20 maks.	0,01 maks.	0,005 maks.	Kalan

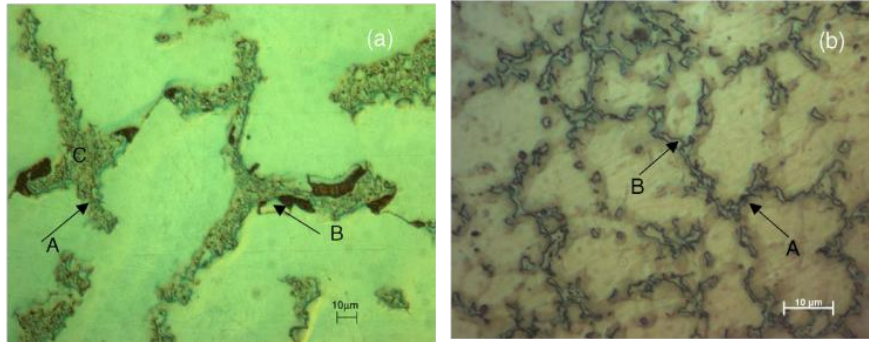
AZ91 alaşımlarının uygulanan döküm yöntemlerine ve ısıt işlemlere göre özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 AZ91 alaşımları özellikleri [41]

	Isıl İşlem	Döküm Yöntemi	ASTM	Çekme dayanımı(MPa)	Akma dayanımı(MPa)	Uzama(%)	Sertlik(HB)	Basma akma dayanımı(MPa)	Maksimum kayma dayanımı(MPa)	Elastisitemodülü(GPa)	Kayma modülü(GPa)	Poisson oranı
AZ91A	F	Basınçlı döküm	B94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91B	F	Basınçlı döküm	B94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91C	F	Kum, kalıcı kalıba	B80, B199, B403	165	97	3	60	97	90	45	17	0,35
AZ91C	T4	Kum, kalıcı kalıba	B80, B199, B403	275	90	15	55	90	150	45	17	0,35
AZ91C	T6	Kum, kalıcı kalıba	B80, B199, B403	275	145	6	70		145	45	17	0,35
AZ91D	F	Basınçlı döküm	B 94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91D	F	Tikso döküm		300	156	8						
AZ91E	F	Basınçlı döküm	B 94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35
AZ91E	F	Kum, kalıcı kalıba	B80, B199, B403	165	97	3	60	97	90	45	17	0,35
AZ91E	T4	Kum, kalıcı kalıba	B80, B199, B403	275	90	15	55	90	150	45	17	0,35
AZ91E	T6	Kum, kalıcı kalıba	B80, B199, B403	275	145	6	66	145	145	45	17	0,35
AZ91F	F	Basınçlı döküm	B 94	250	160	7	70	160	140	45	17	0,35

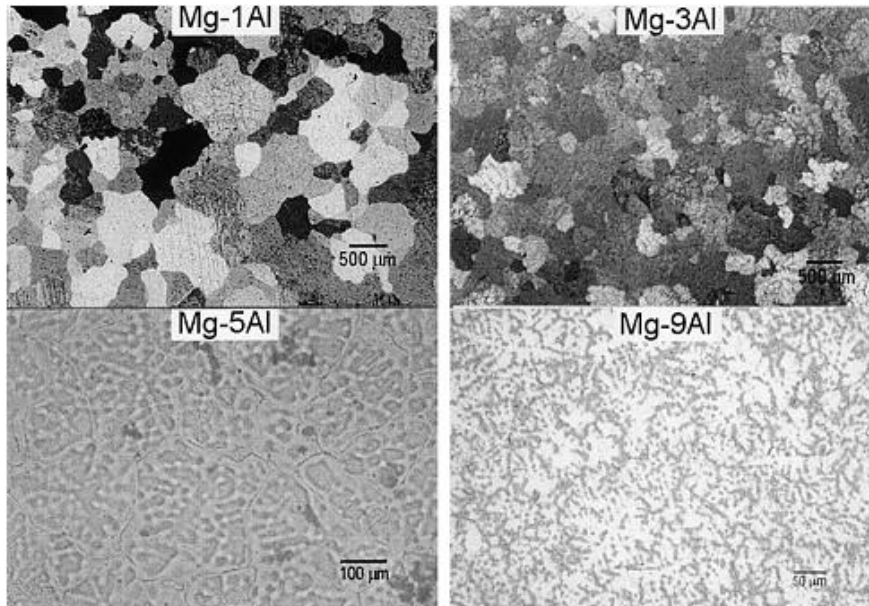
3.5 Magnezyum-Alüminyum Alaşımlarının Katılaşması

Magnezyum-alüminyum alaşımlarının katılaşma işlemi, 600-650 °C’de değişen sıcaklık aralığında birincil magnezyumun (α -Mg) çekirdeklenmesiyle başlamaktadır. Katılaşma ilerledikçe sıcaklık 437 °C ötektik sıcaklığına geldiğinde yapıda α -Mg ve β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazından oluşan ötektik faz oluşmaktadır [2], [36]. Şekil 3.3’te Mg-Al alaşımına ait mikroyapılar görülmektedir.



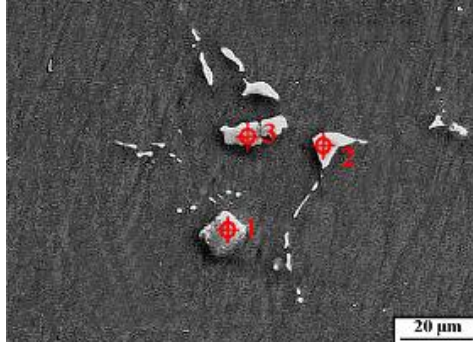
Şekil 3.3 Mg-9Al alaşımı döküm hali mikroyapısı ışık mikroskobu görüntüleri (a) kum kalıba döküm (b). A, ötektik fazında bulunan yüksek Al içerikli α -Mg fazı. B, ötektik fazında β -Mg₁₇Al₁₂. C, birincil α -Mg fazından çökelmiş β -Mg₁₇Al₁₂ fazı [42].

Magnezyum-alüminyum alaşımlarında, alüminyum içeriğine göre mikroyapıda değişiklikler meydana gelmektedir. Saf magnezyuma düşük oranda alüminyum eklendiğinde birincil faz dendritik yapıdan hücresel yapıdaki forma dönüşmektedir. Alüminyum içeriği arttıkça dendrit kolları arasında alüminyumca zengin katı çözelti bölgelerinde rozet şeklinde küresel eşeksenli taneler oluşmaktadır. Alüminyum içeriği %5'e çıkartıldığında dendrit kolları arasındaki ötektik fazın dendritleşmeye başladığı ve alüminyum içeriği arttıkça, dendrit tabakanın sivri bir şekil aldığı görülmektedir [36]. Şöyle ki; α -Mg taneleri, kaba ve ağsı şekilde ötektik β -Mg₁₇Al₁₂ fazı tarafından çevrelendiği Şekil 3.4'te görülmektedir [1].

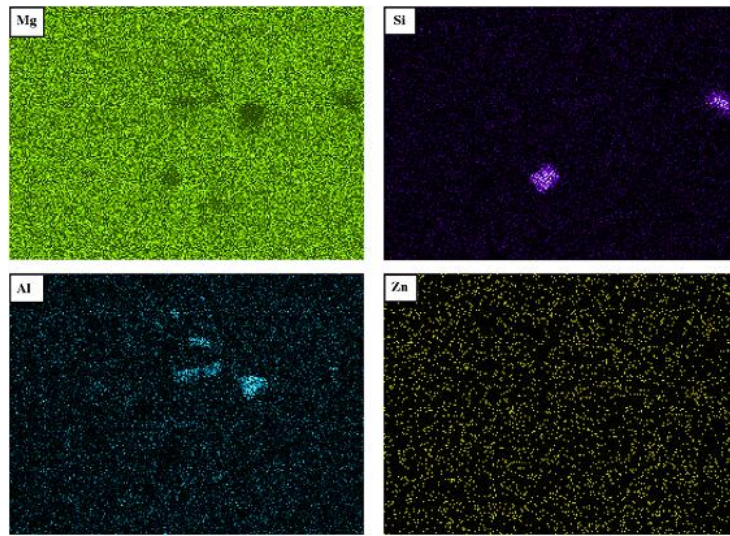


Şekil 3.4 Mg-Al alaşımlarının artan alüminyum miktarına göre mikroyapıları [36]

Magnezyum-alüminyum alaşımlarına küçük miktarlarda eklenen alaşım elementleri birincil fazın çekirdeklenmesine etki etmektedir. Bu alaşım elementleri birincil fazın çekirdeklenmesinden sonra, ikincil fazların oluşumu sırasında farklı fazların oluşumuna neden olmaktadır. Bu alaşım elementlerinin yapı içerisindeki dağılımını Dobrzanski vd. tarafından [43] de incelenmektedir. AZ91 alaşımının EDS ile yüzeyde elementlerin miktarını bulmak için mikro analiz yapılmaktadır.



Şekil 3.5 AZ91 alaşımı mikroyapıda kimyasal analiz noktaları [43]



Şekil 3.6 AZ91 alaşımı kimyasal analizi [43]

Yapılan bu çalışmada Şekil 3.5'te görülen numaralandırılmış bölgelere kimyasal analizler yapılmıştır ve bu noktaların analiz sonuçları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 Analiz noktalarının kimyasal kompozisyonu [43]

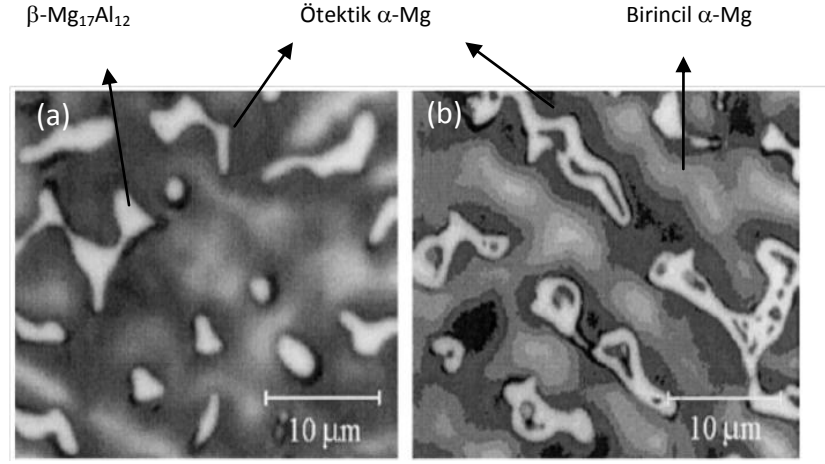
Nokta	Elementlerin Yüzdeleri (%)				
	Mg	Al	Zn	Si	Kalan
1 nolu	69,34			30,50	0,16
2 nolu	61,47	35,09	3,17		0,27
3 nolu	72,59	25,28	1,73		0,40

Kimyasal analiz sonucunda magnezyumun tüm yapı içerisindeki dağılımı görülmektedir. Alüminyum ve çinkonun yapıda bir dağılım gösterdiği, ancak çökeltilerin olduğu bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. Silisyumun ise magnezyum ile 1 nolu bölgede yoğunlaşmaktadır. Yapılan çalışmada bu bölgede Mg_2Si fazının oluştuğu, 2 ve 3 nolu bölgede $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının olduğu öngörülmektedir [43].

3.5.1 Ötektik Büyüme

Ötektiğin katılaşmasında çok önemli iki ana kriter bulunmaktadır. Birincisi, katılaşma işleminde çok kırılgan yapıya sahip olan intermetalik $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ fazının boyutunun, şeklinin ve dağılımının kontrol edilmesidir. Çünkü nihai üründe bu faz sünekliği ve sürünme dayanımını etkilemektedir. İkinci ana kriter ise; katılaşma işleminin son aşamasında ötektik büyüme, beslemeden etkilenmektedir. Besleme, dendritler arasında olmakta ve dendrit ağları boyunca sıvının girebilmesi için büyük basınç farklılıklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ötektik büyüme aşamasında bu farklılık dendritler boyunca sıvının girmesini kolaylaştırmaktadır. Ancak bu durum alaşım içerisinde porozite oluşturmaktadır [36].

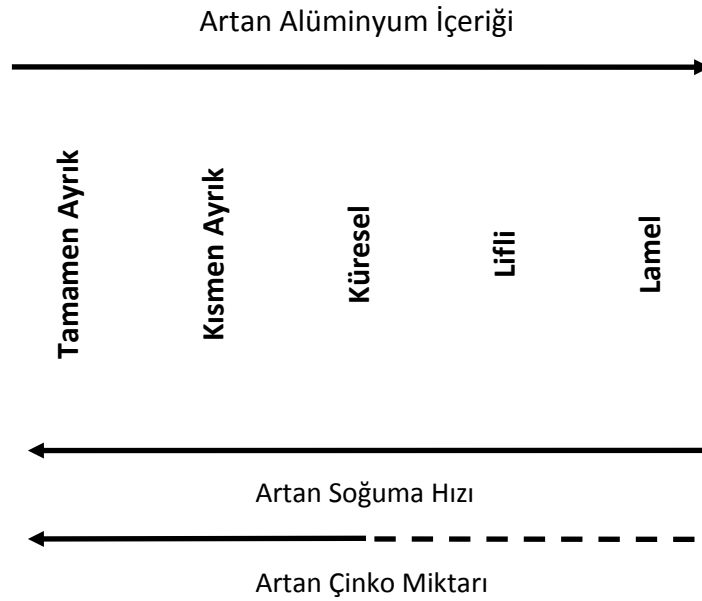
Magnezyum-alüminyum alaşımlarının morfolojisi kompozisyon içeriğine ve soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir. Alüminyum, ötektik içeriğinde %33 oranında bulunmaktadır. Bu durumda ötektik düzenli bir hâlde lamel veya lif şeklindedir. Ancak alüminyum içeriği %10'nun altındaki yapılarda, ötektik tamamen veya kısmen ayrık şekilde bulunmaktadır. Tamamen ve kısmen ayrılmış ötektik yapıları Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Tamamen ayrık yapıda $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ fazı, ötektik $\alpha-Mg$ tarafından çevrelenmektedir. Kısmen ayrık ötektik yapıda, ötektik $\alpha-Mg$ ile $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ fazı birlikte ve birincil $\alpha-Mg$ ana yapıda görülmektedir [36].



Şekil 3.7 Mg-Al alaşıımı ötektik yapısı (a) tamamen ayırık ötektik, (b) kısmen ayırık ötektik [36]

3.5.2 Alaşım Elementlerinin ve Soğuma Hızının Ötektik Büyümeye Etkisi

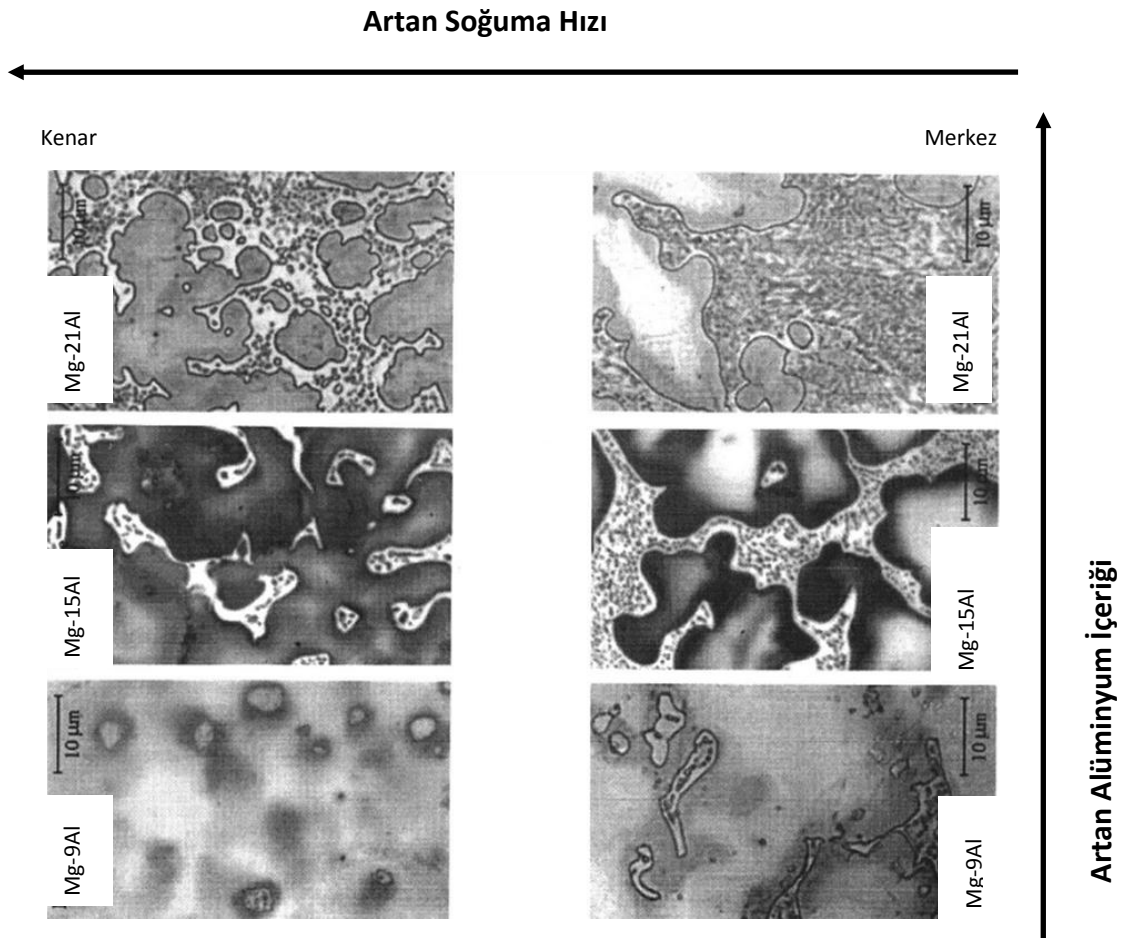
Magnezyum-alüminyum alaşımlarının metal kalıba dökümünde, artan alüminyum miktarına göre ötektiğin daha az ayrılma eğilimde olduğu, artan çinko içeriği ve soğuma oranına bağlı olarak bu eğilimin arttığı görülmektedir [36], [44].



Şekil 3.8 Hipoötektik Mg-Al alaşıımı kalıcı kalıba dökümde alüminyum, çinko ve soğuma hızının ötektik yapıya etkileri [36]

Nave vd. tarafından [44] de alüminyum miktarı ve soğuma hızının ötektik yapı üzerine etkilerini araştırdıklarında, alüminyum miktarının artmasıyla ötektik yapının ayırık halden, lamel yapıya geçtiği ve soğuma hızının artmasıyla ötektik yapının lamel

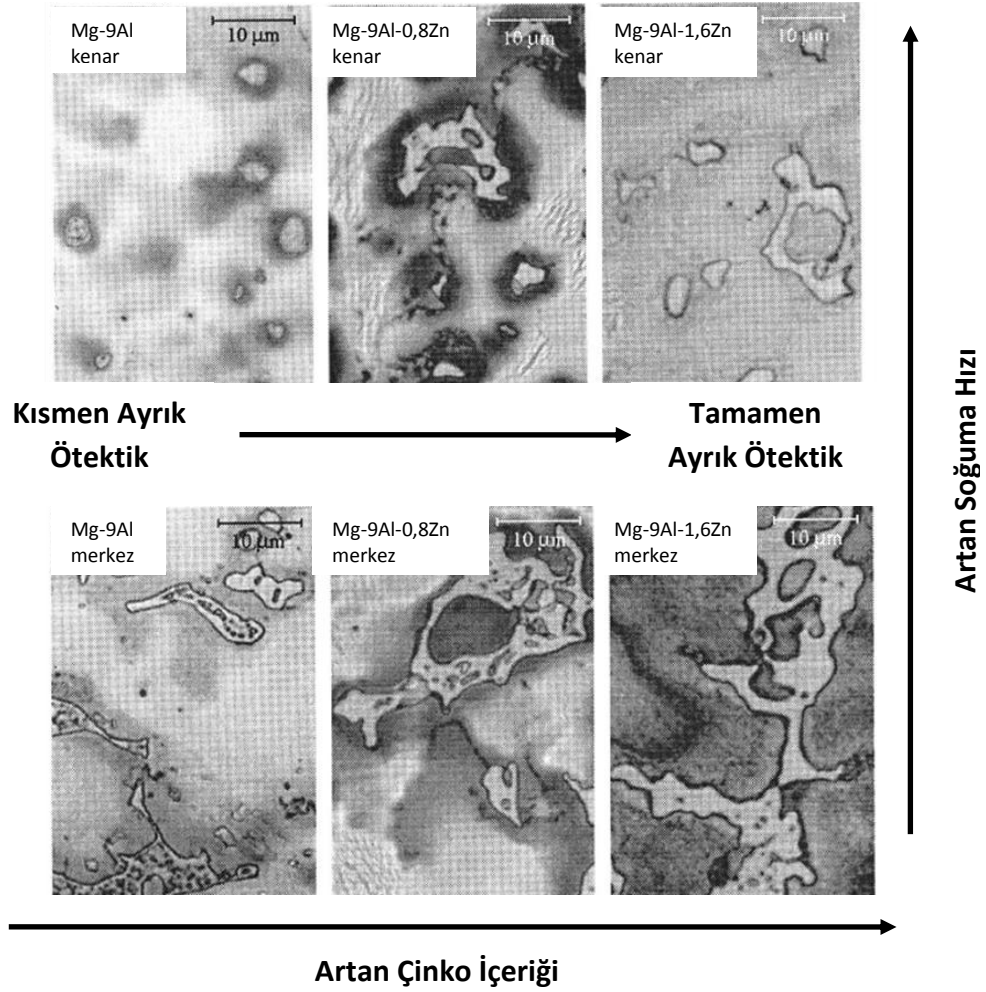
yapıdan, tamamen ayırık yapıya geçtiği görülmüştür. Metal kalıba dökümde kalıbın kenarlardaki soğuma hızı, merkezinden ortalama dört kat daha hızlıdır. Buna göre Şekil 3.9'da magnezyuma %9, %15 ve %21 alüminyum eklenmiş ve soğuma hızı farkı, kalıp merkezi ile kenarları arasındaki fark göz önüne alınmış ve ona göre mikroyapılar incelenmiştir. %9 alüminyumlu yapıda ötektik, soğuma hızının arttığı bölgede küresel yapıya bürünmekte ancak ötektik ayırık şekildedir. %15 alüminyumlu içerikte ötektik küresel, kenar bölgede kısmen ayırık ve tamamen ayırık şekildedir. %21 alüminyum içerikli yapıda ötektik merkezde lifli, kenarda küreselleşme görülmektedir [44].



Şekil 3.9 Mg-Al alaşımlarının kalıcı kalıpta alüminyum miktarına ve soğuma hızına bağlı olarak ötektik yapısında oluşan değişim [44]

Nave vd. tarafından [45] de magnezyum-alüminyum-çinko alaşımlarının katılaşmasında çinkonun etkilerini araştırdıklarında, çinkonun miktarına ve soğuma hızına bağlı olarak ötektik yapının değiştiğini gözlemlemişlerdir. Mg-9Al alaşımına çinko eklenmediğinde ötektik yapısının kısmen ayırık olduğu ve bazı bölgelerde tamamen ayırık olduğu

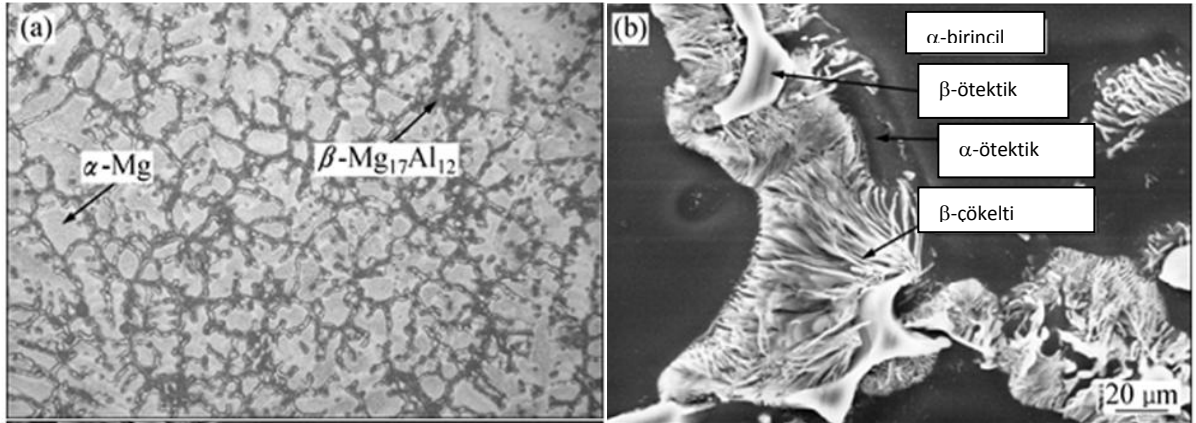
görülmekte, soğuma hızı arttığında ise ötektik yapının, kısmen ayırık ötektik yapıda ve çok az küreselleşme olduğu görülmektedir. Aynı alaşıma %0,8 çinko ilave edildiğinde, ötektiğin merkezde kısmen ve tamamen ayırık ötektik, kenar bölgede tamamen ayırık ötektik yapı görülmektedir. %1,6 çinko eklendiğinde yapıda merkezde tamamen ayırık ve az miktarda kısmen ayırık ötektik yapısı görülmekteyken, kenarda tamamen ayrılmış bir ötektik yapı görülmektedir [45].



Şekil 3.10 Mg-%9 Al kalıcı kalıpta %0,8 ve %1,6 Zn eklenmesi ile elde edilen ötektik yapısı [45]

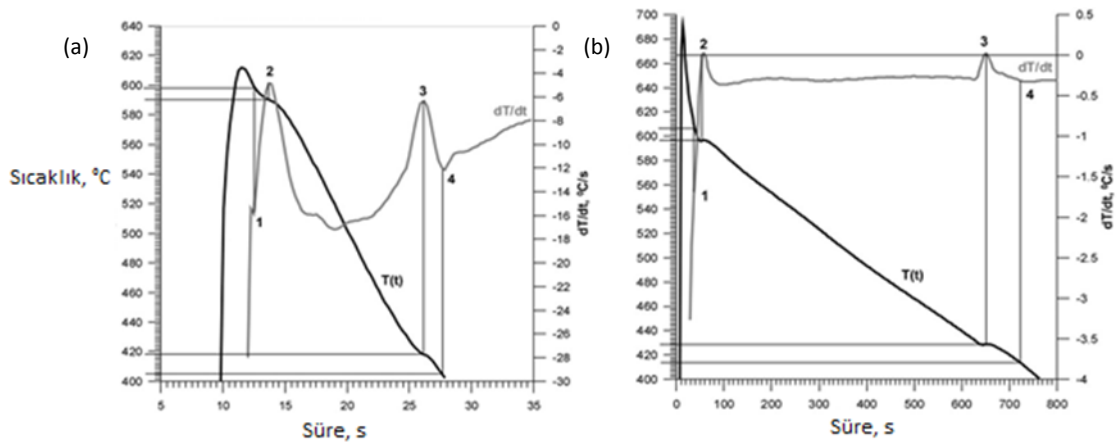
Katılaşma boyunca alüminyum homojen tutmak için soğuma hızı yavaş olmalıdır. Ancak soğuma hızı yeterli olmadığında, ötektik sıcaklığa gelindiğinde kalan sıvıda alüminyum miktarı yüksek oranlarda olmaktadır. Alüminyumca zengin kalan bu sıvı ötektik kompozisyonuna yakındır ve ayırık ötektik (α -Mg ve β -Mg₁₇Al₁₂) yapıya dönüşmektedir. Soğuma ilerledikçe α -Mg matris içerisinde β -Mg₁₇Al₁₂ çökelmektedir

ve özellikle α -Mg'un bulunduğu ayırık ötektik alüminyum miktarı yüksek olmaktadır [40].



Şekil 3.11 AZ91 döküm alaşımı (a) Işık mikroskobu, (b) SEM görüntüleri [40]

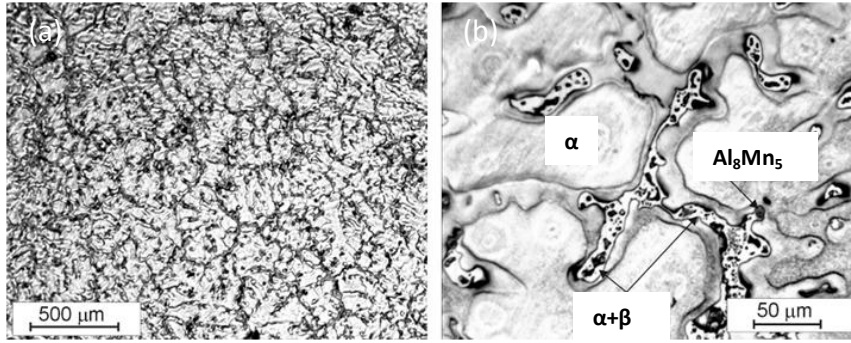
Magnezyum-alüminyum alaşımların katılaşma koşulları kullanılan döküm yöntemine göre değişmektedir. Braszczyńska-Malik ve Zyska tarafından [46] da magnezyum-alüminyum alaşımı olan AZ91 alaşımının gravite döküm yöntemiyle metal kalıba ve kum kalıba dökümü sonrası katılaşma süresinde değişiklik olduğunu göstermişlerdir. Yaptıkları DTA (Diferansiyel Termal Analiz) analizinde metal kalıba dökümde katılaşma 15 saniye sürerken, kum kalıba dökümde katılaşmanın 680 saniye sürdüğü görülmektedir [46].



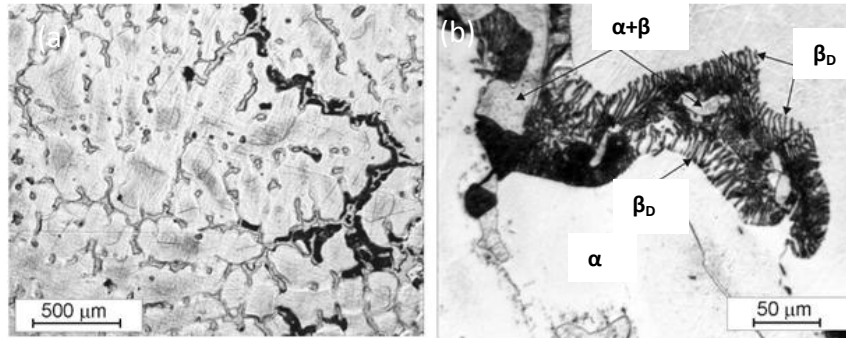
Şekil 3.12 AZ91 alaşımı DTA analizi (a) metal kalıba döküm, (b) kum kalıba döküm [46]

Metal kalıba ve kum kalıba döküm sonrası dendritsel mikroyapı incelendiğinde yapıda α -Mg ve ötektik α -Mg ve β -Mg₁₇Al₁₂ yapıları gözlemlenmektedir. Metal kalıba döküm sonrası yapıda alüminyumun ötektik bölgelerinin yanında çok fazla olduğu ancak

dendritler arası alanda çok az miktarda bulunmaktadır. Kum kalıba dökümde alaşımın katılaşmasının yüksek olduğu görülmektedir. β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazının yakınında süreksiz çökeltiler (β_D) görülmektedir. Bu bölgeler aşırı doymuş katı çözeltilerin dönüşümü ile oluşmaktadır. Süreksiz çökeltiler, kum kalıba dökümde katılaşma sıcaklığının altında dökümün yavaş soğumasında kaynaklı olarak ortaya çıkan lamel şeklinde bir yapı olduğu görülmektedir [46], [47].



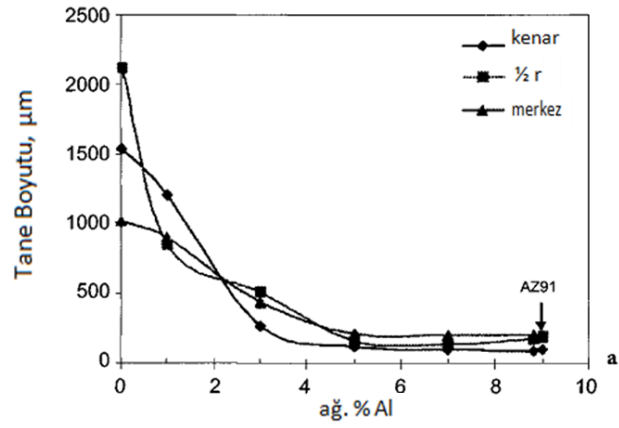
Şekil 3.13 AZ91 alaşımı metal kalıba döküm (a) ışık mikroskobu, (b) SEM görüntüleri [46], [47]



Şekil 3.14 AZ91 alaşımı kum kalıba döküm (a) ışık mikroskobu, (b) SEM görüntüleri [46], [47]

Soğuma hızına bağlı olarak, tanelerin boyutu değişmektedir. Özellikle hızlı soğumanın gerçekleştiği kalıplarda, parça merkezi ile kalıba temas eden kenar yüzeyler arasında soğuma hızında farklılıklar oluşmaktadır. Bu durum tane boyutunun, yapı içerisinde farklı olmasına neden olmaktadır ve mekanik özellikleri kötü etkilemekte, homojen bir yapı elde edilememektedir. Ayrıca, döküm işlemi esnasında yapı içerisine tane inceltici olarak zirkonyum, kalsiyum, silisyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri kullanılabilmekte, başka tane inceltici bileşikler ve değişik tane inceltme yöntemleri

kullanılabilmektedir. Şekil 3.15’de farklı alüminyum miktarının, malzemenin farklı kısımlarındaki tane boyutuna etkileri görülmektedir.



Şekil 3.15 Tane boyutuna alüminyum miktarının etkisi [6]

Alaşımında alüminyum içeriğinin artışı ile birlikte tane boyutunun küçüldüğü, malzemenin kenar bölgesi ile merkezi arasındaki soğuma farkından dolayı kenar bölgedeki tane boyutunun merkeze göre daha küçük olduğu görülmektedir.

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ

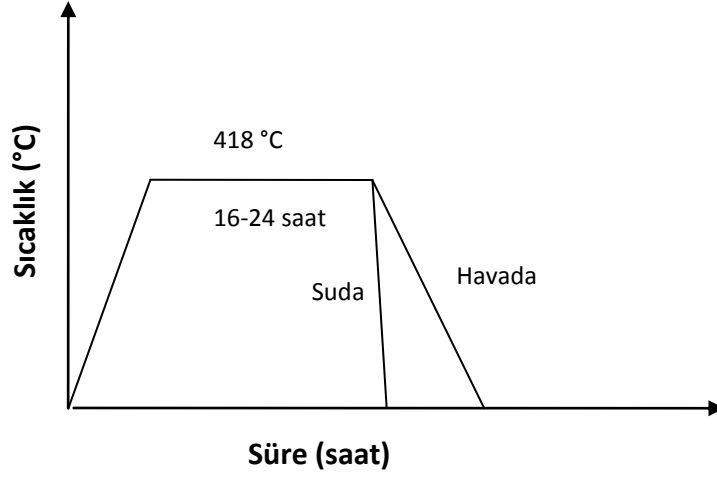
4.1 Magnezyumun Alaşımlarının Isıl işlemi

Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek ve şekillendirme kabiliyetini artırmak için ısıtım işlemi uygulanmaktadır. Magnezyum alaşımlarına uygulanan başlıca ısıtım işlem türleri; homojenizasyon, çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıtım işlemidir. Homojenizasyon işlemiyle malzemenin şekillendirme kabiliyeti, çözeltiye alma ısıtım işlemiyle çekme dayanımı, tokluk ve darbe dayanımı artırılmaktadır. Çözeltiye alma ısıtım işlemi sonrası yapılan yapay yaşlandırma işlemiyle yüksek sertlik ve akma dayanımı elde edilmekte ancak tokluk değerleri düşmektedir [48].

Magnezyum alaşımlarının, ısıtım işlem sıcaklıkları ve süreleri içerdikleri alaşımlı elementlerine göre değişmektedir (Çizelge 4.1).

4.2 Magnezyumun Homojenizasyonu

Magnezyum alaşımlarına uygulanan homojenizasyon işlemi, yapı içerisinde bulunan fazların homojen bir şekilde dağılması amaçlanmaktadır. Döküm yapısında intermetalik fazlar, matris içerisinde tane sınırlarında ağ şeklinde bulunmaktadır. Homojenizasyon işlemiyle, intermetalik fazlar yapı içerisinde dağılımı sağlanmaktadır. Böylelikle magnezyumun deformasyon işlemi sırasında, intermetalik fazların deformasyonu engelleyici etkisi ortadan kalkmaktadır.



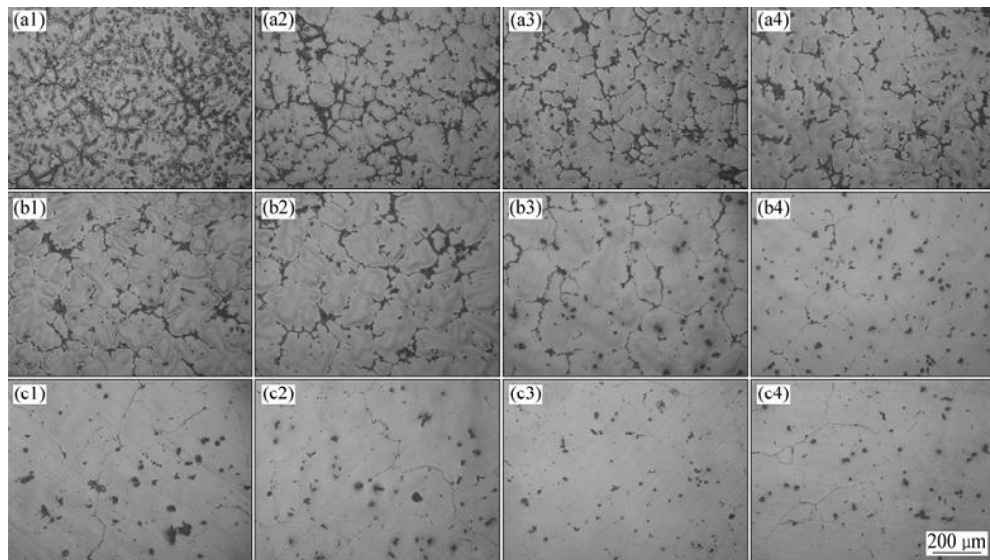
Şekil 4.1 AZ91 alaşımı homojenizasyon ısıt işlemi

Magnezyum-alüminyum alaşımlarında oluşan intermetalik $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazı sert gevrek bir yapıdadır. Bu fazın boyutu, miktarı ve yapı içerisinde dağılımı Mg-Al alaşımlarının şekillendirilmesinde etkili olmaktadır. Kaba ve ağırsı intermetalik $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazı, döküm yapısında $\alpha\text{-Mg}$ fazını çevrelemektedir. Bu durum alaşımın şekillendirme işleminde sünekliliğini engellemekte, dolayısıyla şekillendirmeyi azaltıcı yönde etki etmektedir. Ancak $\alpha\text{-Mg}$ matris içerisinde $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazının ince yapıda, homojen ve eşeksenli şekilde dağılması şekillendirme işlemini olumlu yönde etkilemektedir. Bundan dolayı magnezyumun şekillendirilme işlemlerinden önce homojenizasyon ısıt işlemine tabii tutulması gerekmektedir [49], [50].

Magnezyum-alüminyum alaşımlarının katı halde alaşım elementlerinin çözünürlüğü sıcaklıkla değişmektedir. 437 °C ötektik sıcaklıkta magnezyum içinde alüminyum en fazla %12,9 olan çözünürlüğü, 200 °C'de %2,9'a düşmektedir. Çünkü alüminyumun, magnezyum katı durumdayken difüzyonu çok yavaştır ve homojenleşme ısıt işlemi için uzun süre geçmesi gerekmektedir [50].

$\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ intermetalik fazı, yapı içerisinde soğuma hızına ve alüminyum miktarı bağlı olarak, sürekli ve süreksiz faz olarak adlandırdığımız küresel ve lamel şekilde çökme göstermektedir. Süreksiz faz aşırı doymuş bölgelerde birbirini izleyen lifsi şekilde ikincil faz olarak tane sınırlarına yakın bölgelerde oluşmaktadır. Sürekli faz ise matriste aşırı doymuş kalıntı bölgelerde oluşmaktadır [50]. Homojenizasyon işlemi ötektik bölgeye yakın sıcaklıklarda yapılmaktadır. Çünkü ısıt işlem sırasında aşırı doymuş bölgelerde $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazının, sıcaklığın etkisiyle çökmesi amaçlanmaktadır.

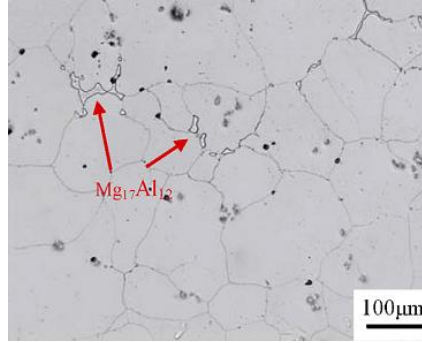
Buna göre, Li vd. tarafından [40] da AZ91 alaşımı içerisinde bulunan $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazının dağılımı incelenmiştir. Buna göre en uygun homojenizasyon sıcaklığı ve süresi belirlenmiştir. Bu çalışmaya göre, 350 °C, 380 °C ve 420 °C de 5, 10, 15 ve 24 saat homojenizasyon işlemi uygulanmış ve mikroyapılar incelenmiştir. $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazının, artan sıcaklık ve tutma süresiyle azaldığı görülmektedir. 350 °C'de $\alpha\text{-Mg}$ matriste dendritler arası bölgesinde bulunan $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazının çözünmesi sonucunda taneler, giderek dendrit şekilden eşeksiz yapıya dönüşmektedir. $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazı 380 °C'de, 350 °C'den daha hızlı çözünmektedir. Bu sıcaklıkta 15 saatten fazla tutulduğunda $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazı yok olmakta ve $\alpha\text{-Mg}$ tane sınırlarında süresiz lineer şekilde çökelmektedir. Alüminyum atomlarının çoğu $\alpha\text{-Mg}$ matris içinde çözünmekte ve alaşım oda sıcaklığında aşırı doymuş katı çökmesi oluşturmaktadır. Bu durumda ortalama tane boyutu 130 μm olmaktadır. Tutma süresi 24 saati geçtiğinde, taneler 200 μm 'yi geçmektedir. 420 °C sıcaklıkta 5 saatte $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ fazı çözülmemektedir. Fakat tane kabalaşması olmaktadır. Yapılan çalışmada en uygun homojenizasyon sıcaklığı ve süresi 380 °C de 15 saat olarak belirlenmiştir [40].



Şekil 4.2 AZ91 alaşımının değişik sıcaklık ve sürede homojenizasyonu mikroyapısı (a) 350 °C 5, 10, 15, 24 saat, (b) 380 °C 5, 10, 15, 24 saat, (c) 420 °C 5, 10, 15, 24 saat [37]

Hanlin vd. tarafından [51] de yaptığı çalışmada ise, AZ91 alaşımının homojenizasyon işlemini 420 °C 12 saat olarak gerçekleştirilmiş ve bu işlemin sonucunda ortalama tane boyutu 120 μm bulunmuştur. Homojenizasyon işlemi sonucunda yapıda $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$

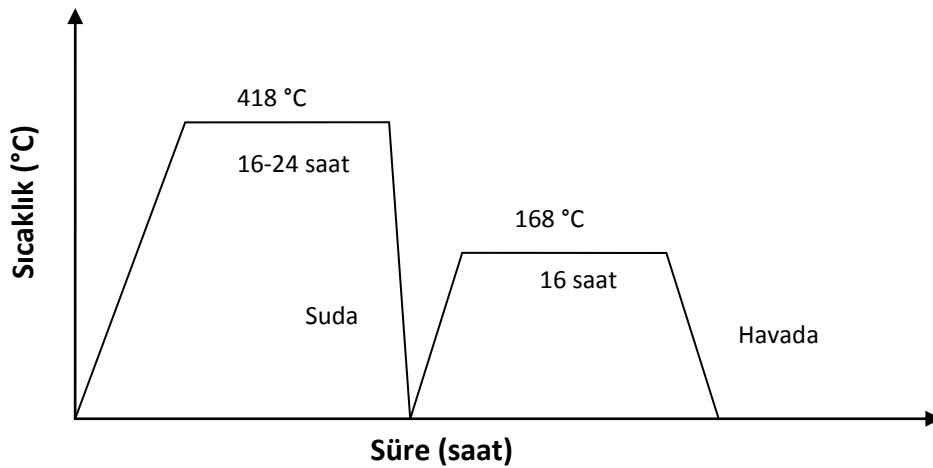
intermetalik fazın matriste dağıldığı, intermetalik fazın tane sınırında ve tane içinde süreksiz şekilde çökeldeği tespit edilmiştir. [51].



Şekil 4.3 AZ91 alaşımı 430 °C 12 saat homojenize edilmiş ışık mikroskobu görüntüsü [51]

4.3 Magnezyumun Çökelme Sertleşmesi

Çözeltiye alma ısısal işlemi ve ardından uygulanan yapay yaşlandırma işlemiyle çökelme sertleşmesi gerçekleştirilmektedir. Çözeltiye alma ısısal işlemi, alaşımın katılaşma çizgisine yakın sıcaklıklarda belirli süre bekletilerek, yaşlandırma ise çözeltiye alma ısısal işlemi uygulanmış alaşımın daha düşük sıcaklıklarda yeniden ısıtılmasıyla sağlanmaktadır.



Şekil 4.4 AZ91 alaşımı çözelti sertleştirme ısısal işlemi

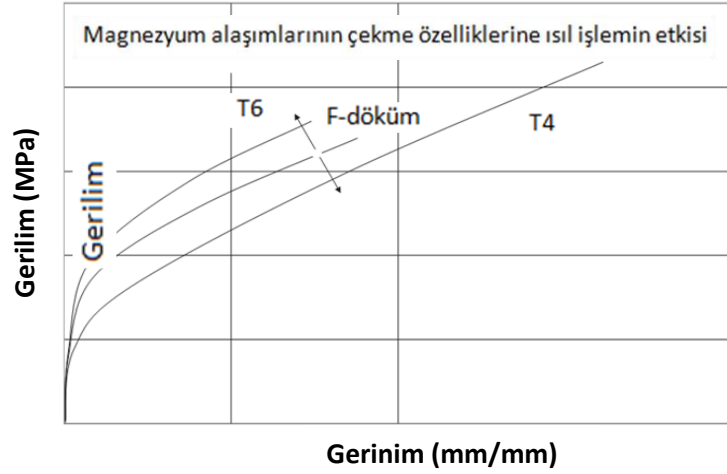
Çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemlerinin, sıcaklık ve süreleri alaşım içeriğine bağlıdır. Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısısal işlemlerin sıcaklıkları arttıkça tutma süresi kısalmakta, sıcaklık azaldıkça tutma süresi artmaktadır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 Magnezyum alaşımlarının ısı işlem sıcaklık ve tutma süreleri [5]

Alaşım	Tavlama	Çözeltiye Alma Isıl İşlemi			Yaşlandırma	
		Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Maks. Sıcaklık (°C)	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)
AZ91	T4	413	16-24	418		
	T5				168	16
	T6	413	16-24	418	168	16
AZ80	T5				177	16-24
AZ63	T4	385	10-14	391		
	T5				260	4
	T6	385	10-14	391	218	5
AM100	T4	424	16-24	432		
	T5				232	5
	T6	424	16-24	432	232	5
WE43	T6	525	4-8	535	250	16
ZE63	T6	480	10-72	491	141	48
ZK61	T5				149	48
	T6	499	2	502	129	48
ZK60	T5				150	24

Alaşım içeriğine bağlı olarak çökeltme sertleşmesi, dayanım değerleri etkilenmektedir.

T4 ve T6 ısı işlemi uygulanmış Mg-Al-Zn alaşımlarının gerilim-gerinim grafikleri Şekil 4.5'te verilmiştir [5].



Şekil 4.5 Magnezyum alaşımlarının ısı işleme göre gerilim-gerinim eğrisinin değişimi [5]

4.3.1 Çözeltiye Alma Isıl İşlemi

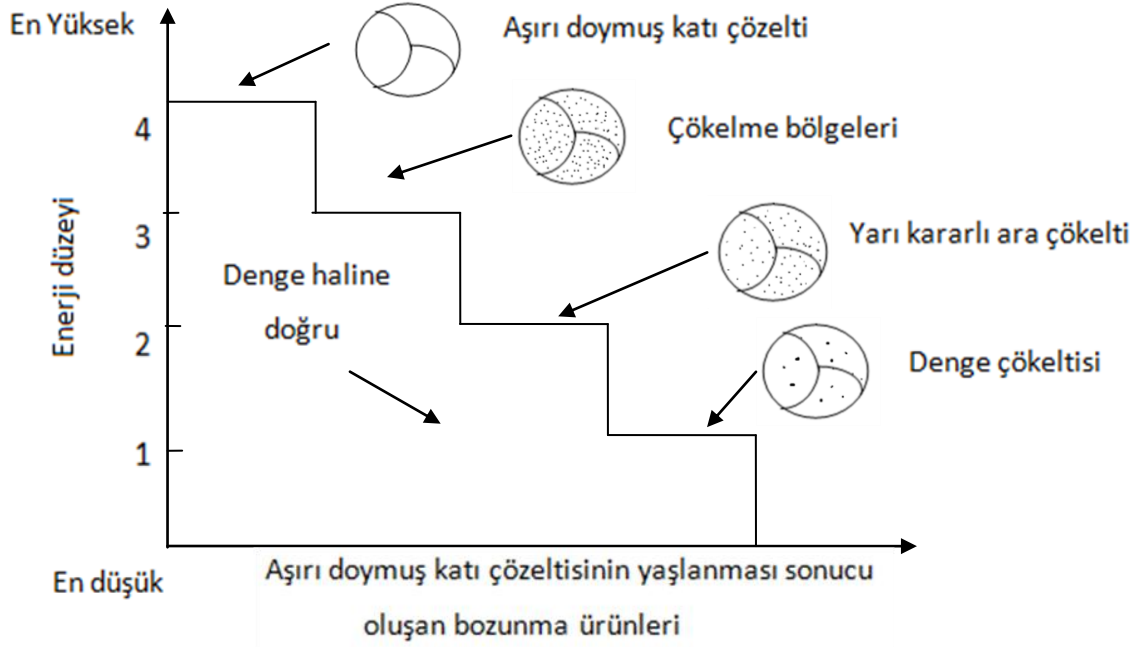
Çözeltiye alma ısı işlemi, döküm ve dövme alaşımlarına uygulanabilen çökeltme sertleşmesinin ilk adımıdır. Çökeltme sertleşmesi, matris içinde homojen ve ince

ökelmiş parçacıkların dağılması amaçlanmaktadır. Çökelen parçacıklar dislokasyonların hareketini engelleyerek metalin dayanımını artırmaktadır [14].

Bir alaşım sisteminde çökelme sertleşmesi oluşabilmesi için, sıcaklık düştükçe çözünürlüğü azalan bir katı çözeltisinin var olması gerekmektedir. Çözelti ısıl işleminde, numune özgenle katıgen arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve homojen bir katı çözelti yapısı elde edilinceye kadar belirli bir süre beklenilmektedir. ökelti ısıl işleminin ardından su verme ve yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmaktadır. Su verme işlemiyle; numune hızla oda sıcaklığına soğutulmaktadır. Su verme işleminden sonra yapı, aşırı doymuş katı çözeltisidir. Bu aşamadan sonra ince ve dağılmış çökeltilerin oluşabilmesi için yaşlandırma yapılması gerekmektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile elde edilen yapı, ya çökeltileri kesmek ya da etrafında dolanmak zorunda bırakarak dislokasyon hareketini engeller ve şekillendirme sırasında dislokasyonların hareketini sınırlandırarak alaşımın dayanımını artırmaktadır [14].

4.3.2 Yaşlandırma

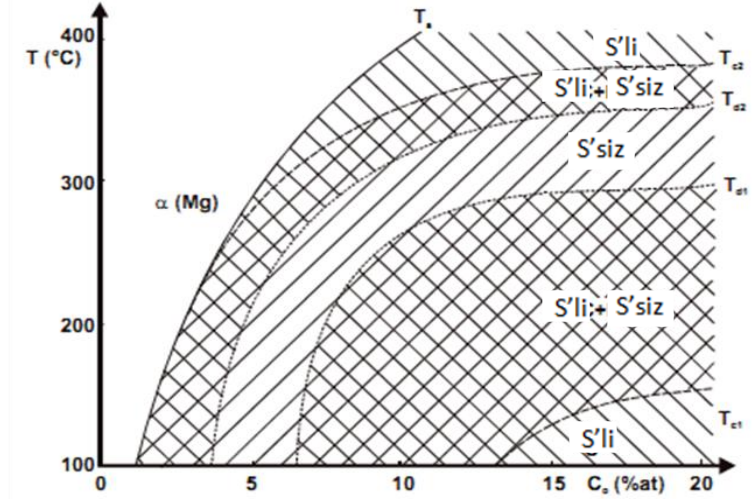
Yaşlandırma ısıl işlemi, oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Oda sıcaklığında yapılan yaşlandırmaya doğal, yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırmaya yapay yaşlandırma denilmektedir. Yapay yaşlandırma, oda sıcaklığı ile çözelti ısıl işlemi arasındaki sıcaklık farkının %15 ile %25'i arasındaki bir sıcaklıkta yapılmaktadır. Aşırı doymuş katı çözeltisi durumunda bulunan alaşım yüksek enerjili durumdadır. Bu durumda bulunan çözeltinin durumu nispeten kararsızdır ve istemli bozunma ile daha düşük bir enerji durumdaki yarı kararlı hale veya denge fazlarına geçmek isteyecektir. Yarı kararlı fazların ve denge fazlarının ökilmesi için gerekli enerji, denge fazların oluşumu sonucunda azalacaktır. Düşük bir sıcaklıkta az miktarda etkinleşme enerjisiyle, aşırı doymuş katı ökeltisinden ayrılan atomlar çökelme gerçekleşmektedir. Yaşlandırma ilerledikçe, sıcaklık yeterli etkinleştirme enerjisini vermiş ise, kaba ve yarı kararlı çökelti ler oluşacaktır. Yaşlandırma devam ettiğinde yeterli etkinleşme enerji varsa, ara çökelti ler yerini denge halindeki çökelti lere bırakacaktır [14].



Şekil 4.6 Yaşlandırma işlemi esnasında enerji düzeyleri çökelme bölgelerinin oluşumu [14]

4.3.3 Mg-Al-Zn Alaşımlarında Çökelme

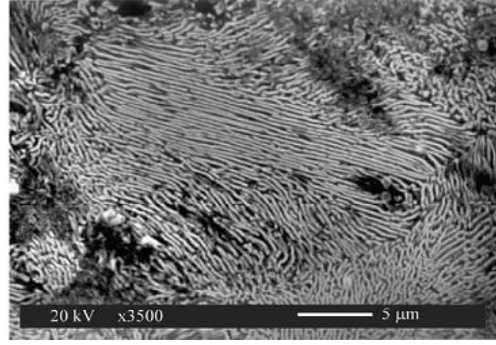
Magnezyum-alüminyum alaşımlarının katılaşması ile mikroyapıda β -Mg₁₇Al₁₂ gevrek intermetalik fazı oluşmaktadır. Bu faz yapı içerisinde ısı işlem sıcaklığına ve alüminyum miktarına bağlı olarak, sürekli ve süreksiz şekilde bulunmaktadır. Süreksiz faz aşırı doymuş bölgelerde birbiri izleyen şekilde lifsi şekilde ve tane sınırlarında oluşmaktadır. Sürekli faz ise matriste aşırı doymuş kalıntı bölgelerinde oluşmaktadır [47], [50]. Şekil 4.7'de magnezyum-alüminyum alaşımında, β -Mg₁₇Al₁₂ fazının alüminyum oranına ve sıcaklığın bağlı olarak çökelme şekli gösterilmiştir.



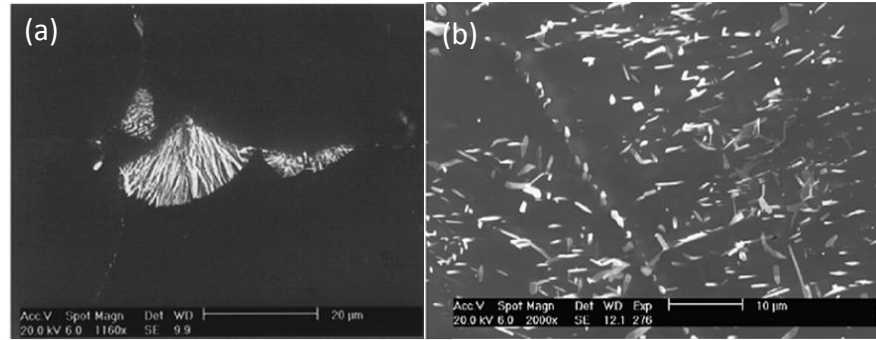
Şekil 4.7 β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazının çökmesine alüminyum oranının ve sıcaklığın etkisi [52]

- $T < T_{c1}$ sıcaklığında $Mg_{17}Al_{12}$ fazı sürekli çökelmektedir.
- $T_{c1} < T < T_{d1}$ aralığında alaşımın içinde $Mg_{17}Al_{12}$ fazı hem sürekli hem de süreksiz çökelmektedir.
- $T_{d1} < T < T_{d2}$ sıcaklık aralığında alaşımın içinde $Mg_{17}Al_{12}$ fazı süreksiz çökelmektedir.
- $T_{d2} < T < T_{c2}$ sıcaklık aralığında alaşımın içinde $Mg_{17}Al_{12}$ fazı hem sürekli hem de süreksiz çökelmektedir.
- $T_{c2} < T < T_s$ sıcaklık aralığında alaşımın içinde $Mg_{17}Al_{12}$ fazı sürekli çökelmektedir [52].

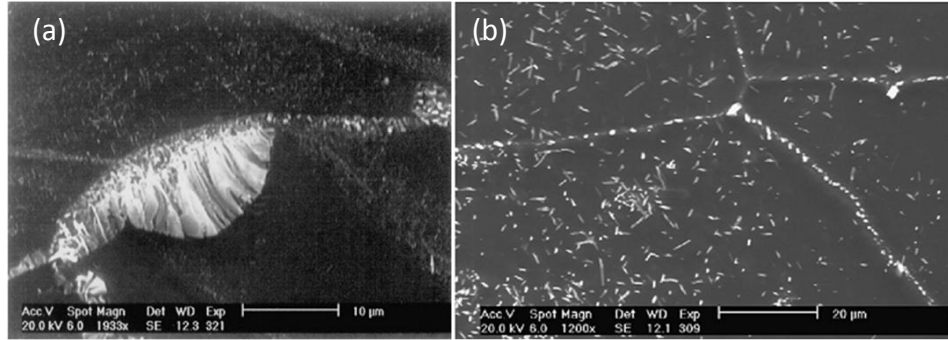
Braszczyńska-Malik tarafından [50] de yapmış olduğu çalışmada AZ91 alaşımlarının değişik ısıtma sıcaklıklarında çökme mikroyapıları incelenmiştir. AZ91 alaşımının 150 °C'de aşırı doymuş katı çözeltisi 16 saat yaşlandırıldığında ince, tabaka şeklinde süreksiz β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazı oluştuğunu tespit etmiştir. 200 °C'de 1 saat yaşlandırdığında süreksiz, 2 saat yaşlandırıldığında ise sürekli çökme oluşumunu gözlemlemiştir. 270 °C'de benzer sonuçlar elde etmiş ve tane sınırlarında süreksiz çökelti lamellerin büyüdüğünü görmüştür [50].



Şekil 4.8 AZ91 alaşımlarının 150 °C’de 16 saat yaşlandırma sonrası yapıda oluşan süreksiz çökelmenin SEM görüntüsü [50]



Şekil 4.9 AZ91 alaşımlarının 200 °C’de yaşlandırma sonrası yapıda oluşan çökelmelerin SEM görüntüsü (a) 1 saat süreksiz, (b) 2 saat sürekli çökelme [50]



Şekil 4.10 AZ91 alaşımlarının 270 °C’de yaşlandırma sonrası yapıda oluşan çökelmelerin SEM görüntüsü (a) 1 saat sürekli ve süreksiz, (b) 2 saat sürekli çökelme [50]

Magnezyum-alüminyum alaşımı olan AZ91 alaşımında da görüldüğü gibi, çökelmeler sıcaklığa, tavlama süresine ve hızına göre değişme göstermektedir. 150 °C gibi düşük sıcaklıkta kısa sürede süreksiz faz oluşumu gözlenirken, tavlama süresi artırıldığında sürekli faz oluşumu görülmektedir. 350 °C gibi yüksek sıcaklıkta süreksiz çökelmeler oluşur, süre artırıldığında ise süreksiz çökeltiler de oluşur. 200 °C ve 270 °C’de hem sürekli hem de süreksiz çökeltiler oluşmaktadır. Çökelmelerin çekirdeklenmesi ve büyümesi için gerekli zaman yaşlandırma sıcaklığına bağlıdır [50], [53].

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ DEFORMASYONU

5.1 Plastik Deformasyon

Dövme yöntemiyle malzemenin geri döndürülemeyecek deformasyonuna, plastik deformasyon denilmektedir. Plastik deformasyon işleminde gerilim ve gerinimi etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerin başında, malzemenin yapısı, mekanik özelliği, deformasyon sıcaklığı, deformasyon hızı, sürtünme ve kalıntı gerilmeler gibi faktörler gelmektedir [58].

Malzeme yapısı, deformasyon kabiliyetini etkileyen en önemli parametredir. Metalik malzemelerin alaşım içeriği, deformasyon yöntemi ve uygulanan ısıl işlemi malzemenin yapısını belirlemektedir. Malzemenin tane boyutu, mikroyapısı, fazların miktarı ve safsızlıklar malzemenin mekanik özelliklerini etkilemekte ve dolayısıyla deformasyon kabiliyetini belirlemektedir [58].

Malzemelerin mekanik özellikleri çeşitli mekanik testlerle elde edilebilmektedir. Bu testlerin başında çekme, basma ve eğme gibi mekanik testler gelmektedir. Mekanik testler, metalik malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesinin yanı sıra, deformasyon özellikleri hakkında da bilgi vermektedir. Çekme testi sırasında uygulanan gerilim değerleri malzemenin deformasyon işlemi sırasında dayanımını işaret ederken, gerinim malzemenin sünekliliği hakkında bize bilgi vermektedir. Böylelikle malzemenin değişik gerilim ve gerinim oranlarında özellikleri gözlemlenerek, deformasyon işlemi sırasında nasıl bir tepki göstereceği belirlenebilmektedir [58].

5.1.1 Magnezyumun Deformasyonu

Magnezyum, HSP kristal yapısına sahip olup, oda sıcaklığında üç kayma sistemi bulunmaktadır. Bu yüzden, magnezyum alaşımlarının deformasyon kabiliyeti özellikle düşük sıcaklıklarda yeterli değildir. Oda sıcaklığında, sadece temel $\{0001\}$ düzlem üzerinde üç doğrultuda kayma oluşmaktadır. 250 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda temel düzlemin yanında prizmatik $\{10\bar{1}0\}$ ve pirimidal $\{11\bar{2}1\}$ düzlemlerde etkinleşmektedir (Şekil 5.1) [54].

Çok kristalli malzemelerde, deformasyon kayma ile başlamaktadır. Fakat etkin kayma sistemlerinin eksikliğinden, uygulanan gerilimden yararlanmak için kaymanın yanında ikizlenme oluşmaktadır. İkizlenme deformasyonun gerçekleşmesi için önemli bir mekanizmadır. İkizlenme daha çok 150 °C-200 °C sıcaklıklarda gözlemlenmektedir [54]. [55]. Çizelge 5.1'de magnezyumun kayma düzlemleri, kayma doğrultuları ve ikizlenme ve kaymanın görüldüğü sıcaklıklar verilmektedir.

Çizelge 5.1 Magnezyum kristalinin bazı kayma düzlemleri ve doğrultuları [54].

Düzlemler	Doğrultular	Şekil	İşlem Sıcaklığı
$\{0001\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	Temel	225 °C'nin altında
$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	Prizmatik	225°C'nin üzerinde
$\{11\bar{2}1\}$	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	Pirimidal	Yüksek sıcaklık
$\{11\bar{2}2\}$	$\langle 11\bar{2}3 \rangle$	Pirimidal	Yüksek sıcaklık
$\{10\bar{1}2\}$	$\langle 10\bar{1}1 \rangle$	Pirimidal(ikizlenme)	225 °C'nin altında

Deformasyon kabiliyeti, malzemenin tane boyutundan etkilenmektedir. Deformasyon işlemini sırasında malzemenin şekil değiştirebilmesi için belirli bir akma gerilimine ulaşması gerekmektedir. Bu akma gerilimi malzemenin tane boyutuna ve uygulanan gerilime bağlıdır. Bu tane boyutu ve akma gerilimi arasındaki ilişki Hall-Petch bağıntısı ile ifade edilmektedir.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \sqrt{d} \quad (5.1)$$

σ_y ; malzemenin akma dayanımı, σ_0 ; gerilim, k_y ; malzeme katsayısı ve d: ortalama tane boyutudur. k_y değeri tane sınırlarında dislokasyonların oluşabilmesi için gerekli gerilime bağlıdır ve deneysel olarak hesaplanabilen bir katsayıdır. Hall-Petch

bağıntısına göre, malzemenin tane boyutunun büyük olması ve k_y değerinin yüksek olması, malzemenin akma dayanımı değerini artırmaktadır. Ancak akma dayanımının yüksek olması, magnezyumun deformasyon işlemini zorlaştırmaktadır. Ayrıca tane boyutunun küçük olması, akma dayanımının da düşük olduğunu göstermektedir [54].

5.1.2 Magnezyumun Deformasyon Mekanizması

Magnezyum alaşımlarının deformasyon işlemi kayma ve ikizlenme mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir. Deformasyon sıcaklığına bağlı olarak, kayma mekanizmaları ve kayma sistemleri değişmektedir [5], [56].

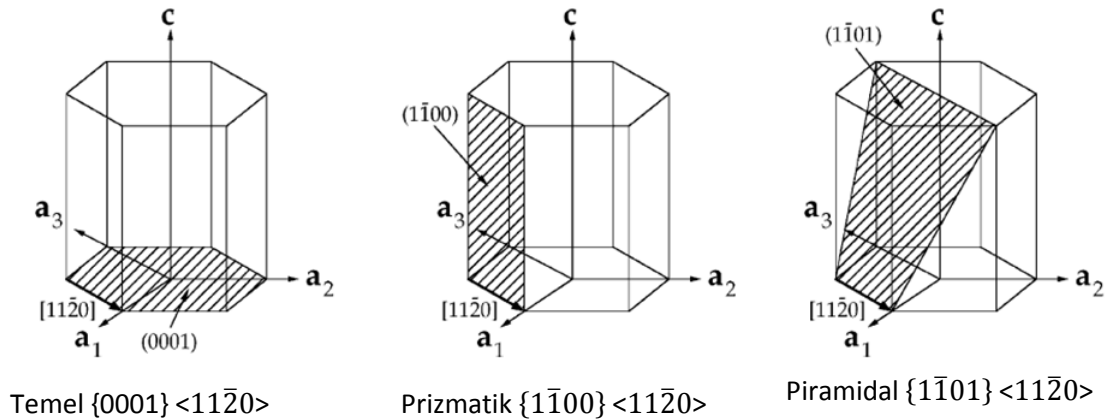
Düşük sıcaklıklarda (<150 °C) saf magnezyumun deformasyon mekanizması, iki doğrusal bağımsız <1120> doğrultuda, (0001) temel düzleminde sıkı pakette dislokasyon hareketi şeklindedir. Çok kristalli malzemelerin deformasyon kabiliyeti “Von Mises Kriterleri” ile açıklanabilmektedir. Bu kritere göre; beş bağımsız kayma sisteminin, tane sınırlarında çatlak olmadan deformasyon olabilmesi için her bir kristalde aktive olması gerekmektedir. Üç sistemin eksikliğinde magnezyumun ortam sıcaklığında deforme olabilmesi çok zorlaşmaktadır. Bundan dolayı deformasyon işlemi için, temel düzlem haricinde prizmatik ve primidal kayma sistemleri çok önemlidir [1].

Yüksek sıcaklıklarda (>250 °C) sıkı paket düzlemlere sahip magnezyum, deformasyon sırasında uzun süre sıkı düzen yapısını koruyamaz ve sıcaklığın etkisiyle prizmatik kayma ve piramidal kayma sistemleri aktif hâle gelir. Bu ilave kayma sistemleri sayesinde çapraz kayma mümkün hâle gelmekte ve tane sınırları aşılabilmektedir. İlave kayma sistemlerinin aktivasyonu için gerekli sıcaklık kısmen mevcut alaşım elementlerine ve tane boyutuna bağlıdır. Bu sıcaklık magnezyum alaşımları için 200 °C ile 250 °C arasındadır. Saf magnezyum için 225 °C'dir [1].

- **Kayma**

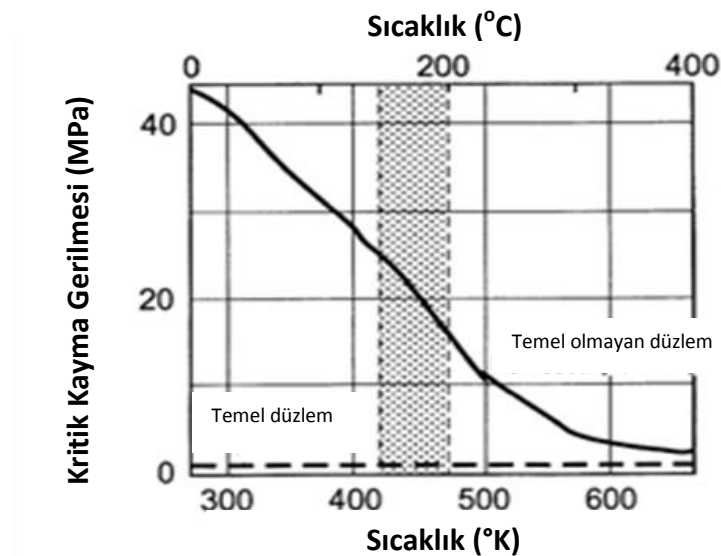
Plastik deformasyon işlemi, kristal blokların diğer kristal blokların üzerine kayması ile gerçekleşmektedir. Kayma, belirli düzlemler ve belirli doğrultularda oluşmaktadır. Kayma düzlemleri, atom yoğunluğunun en fazla olduğu düzlemler olup, kayma doğrultuları sıkı paket doğrultularıdır. Çok kristalli malzemelerde çatlama olmadan tanelerin uyum içinde şekillenebilmesi için, tane sınırlarında uyumlu kayma hareketleri

olması gerekmektedir. Bu da beş bağımsız kayma sistemi ile gerçekleşmektedir [5], [56].



Şekil 5.1 Magnezyumun kayma düzlemleri [5], [56]

Tek kristalli magnezyumda kayma temel $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ ve prizmatik $\{1\bar{1}00\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ sistemlerde olmaktadır. Çok kristalli malzemelerde ise, üçüncü bir kayma sistemi olan piramidal $\{1\bar{1}01\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$ kayma sistemi bulunmaktadır [5], [56]. Tek kristalli malzemeler çekme ve basmaya maruz kaldıklarında, dislokasyonların hareket edebilmesi için kritik kayma gerilmesini aşması gerekmektedir. Kritik kayma gerilmesi, sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır. Çünkü sıcaklıkla birlikte kayma sistemi sayısı artmakta ve dolayısıyla dislokasyonların hareket kabiliyeti artmaktadır. Şekil 5.2’de kritik kayma gerilmesiyle sıcaklık arasındaki ilişki verilmiştir.

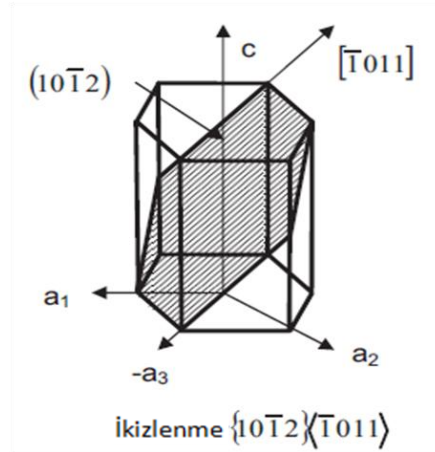


Şekil 5.2 Kritik kayma gerilmesi ile sıcaklık arasındaki ilişki [57]

- **İkizlenme**

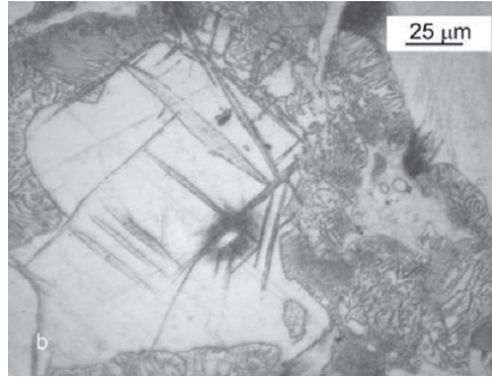
İkizlenme, dövme yöntemleriyle şekillenebilen metallik malzemelerin deformasyon mekanizmasında kaymadan sonra en çok görülen mekanizmadır. İkizlenme esnasında kristal kafes yapısında herhangi bir değişiklik olmamakta, sadece kristal kafesin konumu değişmektedir. Deformasyon ikizlenmesi basit bir kayma gerilmesiyle başlar ve bunu şekil değişikliği izler. Tek kristalli bir malzeme ikizlenme mekanizması ile kaydığında, kayan bölümün kristal yapısı korunur ve orijinal kristal yapının simetrisini oluşturur [5], [56].

HSP kristal kafes sistemine sahip malzemelerde ikizlenme farklı biçimlerde oluşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda bütün HSP metallerde deformasyon ikizlenmesi genellikle $\{10\bar{1}1\}$ düzleminde görülmekte ve c doğrultusunda şekil değişikliğine görülmektedir. $c/a < \sqrt{3}$ olan malzemelerde (magnezyumun $c/a=1,623$), kayma $[\bar{1}011]$ doğrultusunda oluşmakta olup, ikizlenme c eksenine paralel şekilde oluşmaktadır. Eğer $c/a > \sqrt{3}$ ise, kayma $[10\bar{1}1]$ doğrultusunda oluşmakta olup, ikizlenme c eksenine paralel şekilde oluşmaktadır [5], [56].



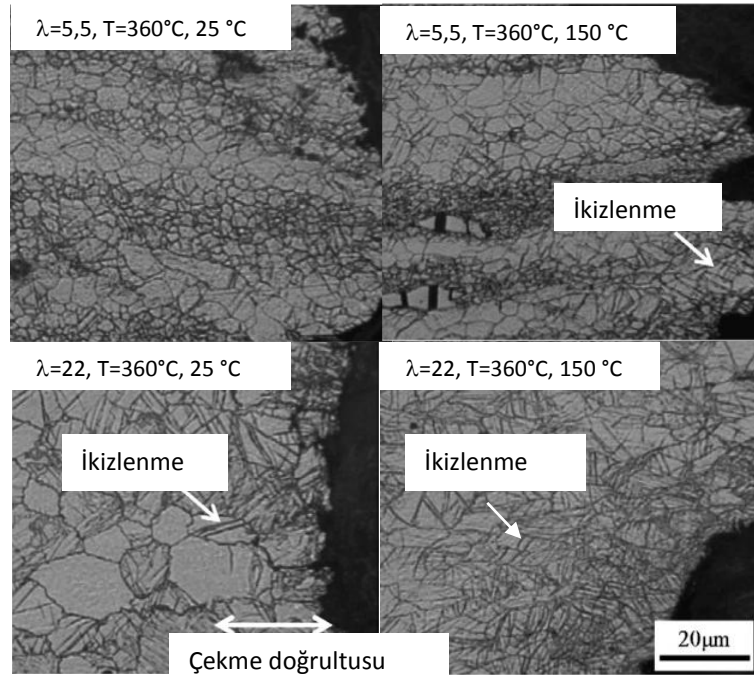
Şekil 5.3 Magnezyumun ikizlenme düzlemi ve doğrultusu [5]

Magnezyumun deformasyonunda kayma ve ikizlenme bir arada görülebilmektedir. Şekil 5.4'te AZ91 alaşımının basma deformasyonu sonucu oluşan ikizlenme görülmektedir. α -Mg fazı, $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazı ve Mg- $Mg_{17}Al_{12}$ ötekliği tarafından çevrelenmiştir. İkizlenmeler tane sınırlarında ötektik yapıya yakın yerlerde görülmektedir [5], [56].



Şekil 5.4 AZ91 alaşıımı deformasyon ikizlenmesi [5]

Ding vd. tarafından [51] de ekstrüze edilmiş magnezyum AZ91 alaşımlarının özellikleri incelemiştir. Yapılan çalışmada farklı ekstrüzyon oranlarında ve farklı ekstrüzyon sıcaklıklarında ekstrüze edilmiş numunelere, 25 °C ve 150 °C'de çekme testi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda kırılma bölgelerinin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapıda ikizlenmelerin oluştuğu görülmüştür [51].



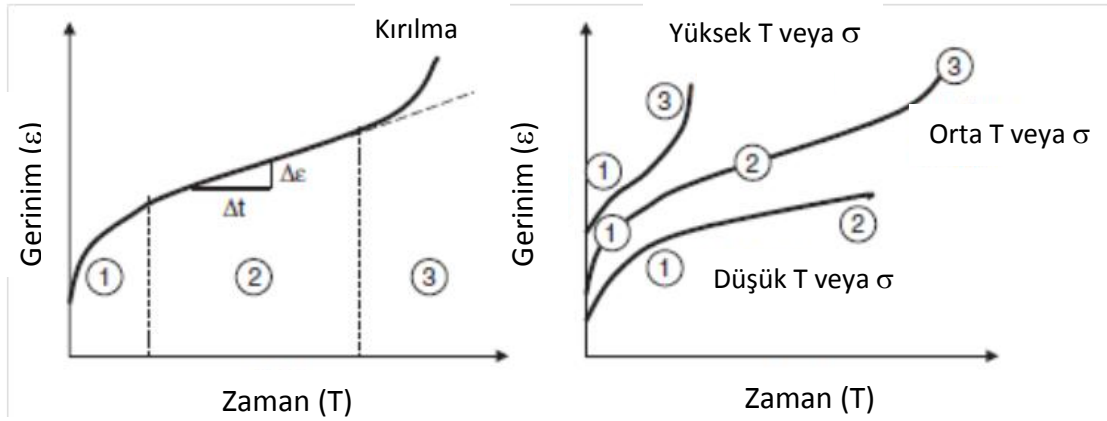
Şekil 5.5 25 °C'de ve 150 °C'de yapılan çekme işlemi sonucunda kırılma yüzeyleri [51]

Burada aynı sıcaklıkta, farklı ekstrüze oranlarında ekstrüze edilmiş numunelerden 25 °C yapılan çekme testinde ikizlenme sadece yüksek ekstrüzyon oranında ekstrüze edilmiş numunede görülürken, 150 °C'de yapılan sıcak çekme işleminde ise bütün numunelerde ikizlenme görülmüştür [51].

- **Sürünme**

Sürünme işlemi malzemenin sabit yük altında ve belirli bir sıcaklıkta, dayanım süresinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. Sürünme işlemi sabit yük altında $T > 0,4T_m$ gibi yüksek sıcaklıklarda ve $10^{-5} s^{-1}$ 'den düşük deformasyon hızında yapılmaktadır [55], [58], [59].

Sürünme işlemi yüksek sıcaklıklarda, düşük gerilimde ve düşük gerinim hızlarında olmaktadır. Şekil 5.6'da sürünme işlemi esnasında gerinim ve zamana bağlı olarak elde edilen sürünme grafikleri verilmiştir [59].



Şekil 5.6 Sürünme eğrileri [56]

Sürünme grafikleri üç bölgeye ayrılarak değerlendirilmektedir. Birinci bölgede; yükleme yapılır ve deformasyon başlar. Deformasyon süresince yeni dislokasyonlar oluşur. Her bir dislokasyon diğerinin hareketini engeller ve bu nedenle sürünme hızı azalır. Aynı zamanda dislokasyonların birbirini engellemesi deformasyon sertleşmesine neden olurken, yüksek sıcaklıkta olması yapıda toparlanmayı sağlamaktadır [58], [59].

İkinci bölgede, sürünme hızı sabittir. Bu bölge kararlı durum sürünmesi olarak adlandırılır. Bu bölgede gerinim sertleşmesi ve dinamik toparlanma denge halindedir. Sürünme testinde sabit bir sürünme gerilimi uygulanmaktadır ve belirli bir süre sonra sabit gerilim hızı görülür [59].

Üçüncü bölge, numunenin boyun vermesiyle başlar. Uygulanan gerilim artar ve artan gerinim, sürünme hızını artırır. Böylelikle boşlukların sayısı artar ve boşlukların büyümesiyle kırılma gerçekleşir [58], [59].

- **Tane Sınırı Kayması**

Tane sınırı kayması, yüksek sıcaklıkta ve düşük deformasyon hızında gerçekleşmektedir. Süperplastik özellik gösteren malzemelerin deformasyon işleminde görülmektedir. Tane sınırı kayması, taneler arasında boşlukların çok hızlı oluşması sonucunda meydana gelmektedir. Tane sınırlarının kayması sırasında, iki tane birbiri üzerine aşağı yukarı şekilde hareket ederek ilerlerler [59].

Tane sınırı kayması ince taneli malzemelerde deformasyon mekanizması olarak ortaya çıkmaktadır. Nanokristalin magnezyumda oda sıcaklığında tane sınırı kayması görülmektedir. Tane sınırı kayması, tane boyutu azaldıkça artmaktadır [60].

5.2 Sıcak Deformasyon

Sıcak deformasyon işlemi, malzemelerin düşük sıcaklıklarda yeterli deformasyon kabiliyetinin olmadığı durumlarda tercih edilmektedir. Sıcaklık, metalik malzemelerin deformasyonu için önemli etkenlerdendir. Çünkü metalik malzemeler kristal kafes yapılarına göre yüksek sıcaklıklarda daha iyi şekillenme özelliği gösterirler. Malzemelerin şekillendirilmesi, deformasyon sıcaklığının (T °C), malzemenin ergime sıcaklığına (T_m °C) oranı olan benzeş sıcaklığına bağlı olarak üç farklı şekilde adlandırılmaktadır. Bunlar;

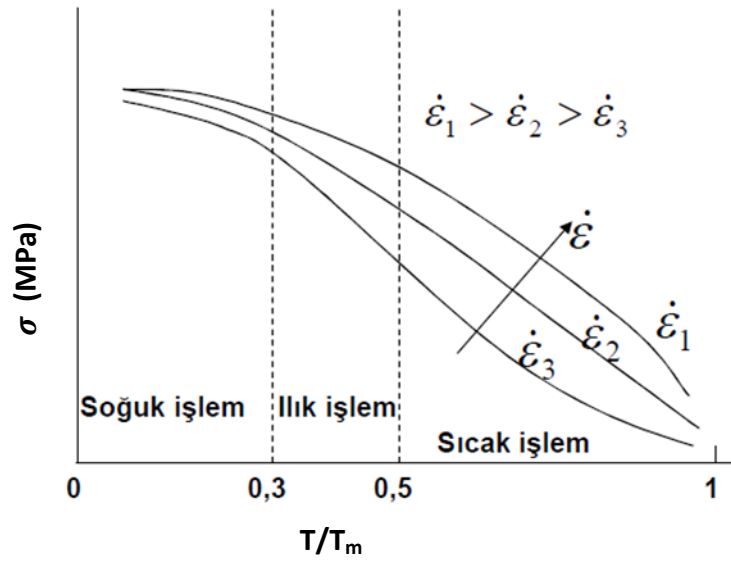
- $T < 0,3T_m$ Soğuk işlem (5.2)

- $0,3T_m < T < 0,5T_m$ Ilık işlem (5.3)

- $T > 0,5T_m$ Sıcak işlem (5.4)

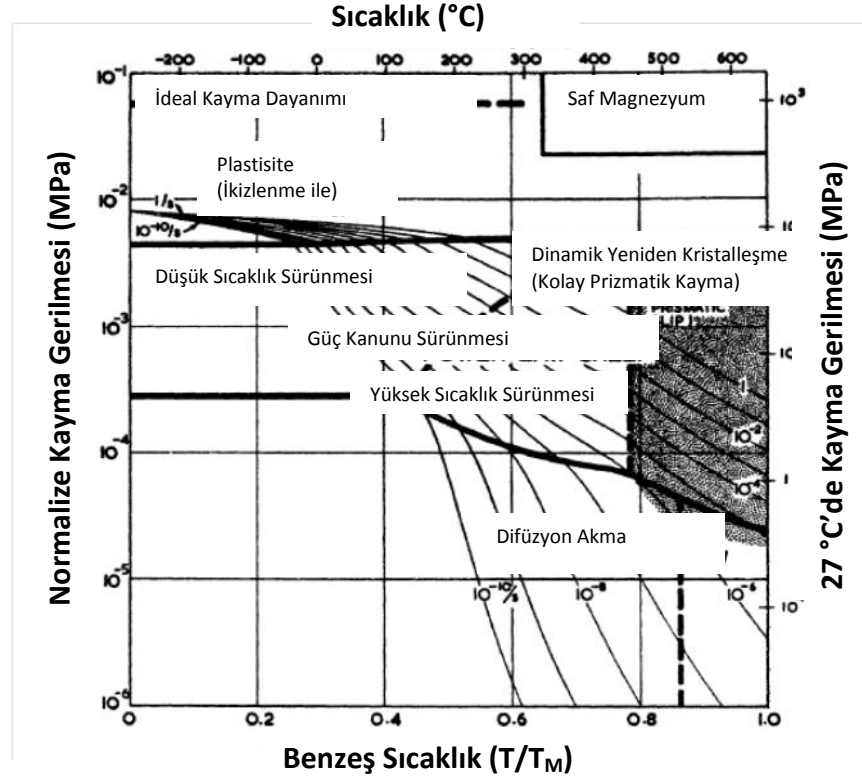
Yüksek sıcaklıkta yapılan deformasyon işlemiyle, malzemenin şekillenmesi kolaylaşmaktadır. Sıcak deformasyon işlemi sırada deformasyon sertleşmesi sıcaklığın etkisiyle ihmal edilebilecek seviyelerde kalırken, soğuk işlem sırasında deformasyon sertleşmesinin etkisi görülmekte ve bu durum şekillendirmeyi zorlaştırmaktadır (58).

Sıcak deformasyon işleminde, deformasyon hızı çok önemli bir parametredir. Deformasyon hızı arttıkça mukavemet artmakta ancak süneklik azalmaktadır. Şekil 5.7’de deformasyon sıcaklığı ile deformasyon hızı ($\dot{\epsilon}$) arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 5.7 Deformasyon sıcaklığı ile deformasyon hızı arasındaki ilişki [58]

Deformasyon sıcaklığına bağlı olarak, farklı deformasyon mekanizmalarıyla şekillenme gerçekleşmektedir. Deformasyon işlemi sırasında meydana gelen mekanizmalar deformasyon haritalarında görülmektedir. Şekil 5.8’de farklı benzeş sıcaklıklarda ve kayma gerilmelerinde saf magnezyumun deformasyon mekanizmaları verilmiştir. Burada işlem sıcaklığı arttıkça yapıda sürünme mekanizmasının aktif hâle geldiği görülmektedir. Düşük benzeş sıcaklıklarda ve yüksek kayma gerilmelerinde ikizlenme gözlenirken, yüksek benzeş sıcaklıklarında ve yüksek kayma gerilmelerinde kayma meydana gelmektedir. Bu durumda dinamik yeniden kristalleşmenin de olduğu deformasyon haritasında görülmektedir. Yüksek benzeş sıcaklıklarda ve azalan kayma gerilmelerinde sürünme mekanizmaları devreye girmektedir. Ancak yüksek benzeş sıcaklıklarda kayma gerilmesinin çok düşük olması halinde deformasyon mekanizması difüzyon yardımıyla olmaktadır.



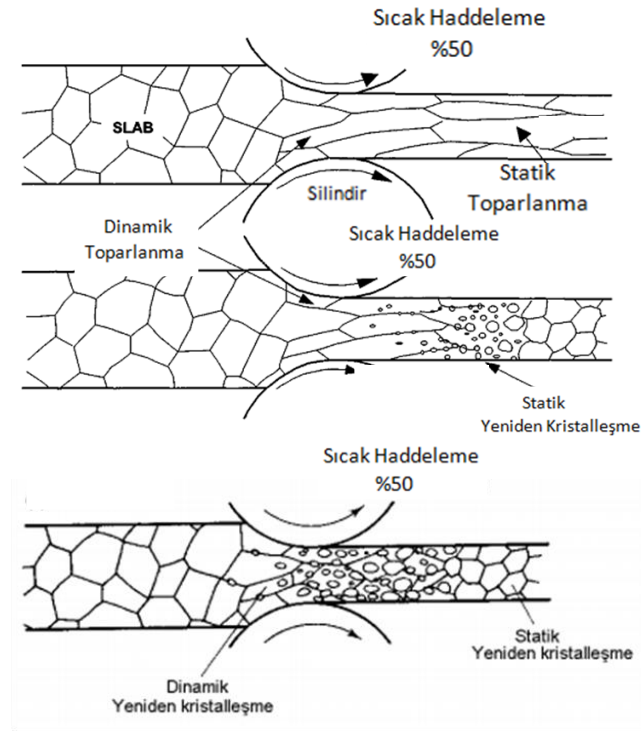
Şekil 5.8 0,1 mm tane boyutunda saf magnezyumun deformasyon haritası [1]

5.2.1 Sıcak Deformasyonda Toparlanma ve Yeniden Kristalleşme

Sıcak deformasyon işlemi esnasında, yapıda toparlanma ve yeniden kristalleşmeler görülmektedir. Termomekanik işlem sırasında görülen toparlanmaya dinamik toparlanma, yeniden kristalleşmeye dinamik yeniden kristalleşme denilmektedir. Dinamik olarak adlandırılmasının nedeni, deformasyon işlemi sonrasında uygulanan ısı işlem olan statik tavlamadan ayırmak içindir. Dinamik yeniden yapılanma işlemleri olan dinamik toparlanma ve dinamik yeniden şekillendirme işlemleri endüstriyel açıdan çok büyük önem taşımaya rağmen, çok iyi anlaşılamamaktadır. Çünkü bu işlemlerin deneysel çalışmaları ve teorik açıdan modellenmesi çok zordur [55].

Dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşme, sıcak haddeleme, ekstrüzyon ve dövme gibi metallerin şekillendirilmesi sırasında meydana gelmektedir. Dinamik yeniden yapılanma işlemleri malzemenin akma gerilimini düşürmektedir. Böylelikle malzemenin kolayca deforme edilmesini sağlamaktadır. Dinamik yeniden kristalleşme sürünme sırasında da görülmektedir. Sıcak çekme işlemi ile sürünme arasında ana

farklılık gerinim hızından kaynaklanmaktadır. Sıcak çekme işleminde gerinim hızı 1-100 s^{-1} arasındayken, sürünme hızı $10^{-5} s^{-1}$ 'den düşük hızlardadır [55].



Şekil 5.9 Haddeleme işlemi sırasında dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşme oluşumu [3]

Şekil 5.9'da haddeleme işlemi sırasında meydana dinamik toparlanma, dinamik yeniden kristalleşme ve statik toparlanma, statik yeniden kristalleşme sırasında tanelerin oluşumu gösterilmiştir.

5.2.2 Dinamik Toparlanma

Toparlanma, dinamik ve statik toparlanma olarak iki farklı şekilde olmaktadır. Statik toparlanma, soğuk şekillendirme sonrasında yapının ısıtılmasıyla gerçekleşirken, dinamik toparlanma sıcak deformasyon işlemi sırasında meydana gelmektedir [55].

Dinamik toparlanma işlemiyle deformasyon esnasında artan dislokasyon yoğunluğunun azalması amaçlanmaktadır. Dinamik toparlanma, dislokasyonların yeniden düzenlenmesini ve yeni hücrelerinin oluşumunu sağlamaktadır. İşlem hızının değişmediği ve işlem sıcaklığının sürekli olarak arttığı durumlarda dinamik toparlanma devam etmektedir. Bu durumda hücreler kabalaşmakta ve hücre sınırları ortaya çıkmaktadır. İşlem sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda oluşan hücre sınırları, alt

tanelere dönüşmektedir. Hücrelerin alt tanelere dönüşümü, hücre sınırlarının iki boyutlu hâle gelmesiyle olur. Alt tanelerin, deformasyon esnasındaki boyutu sabittir ve eş eksenlidir [58].

Deformasyon işlemi sırasında, dinamik toparlanmanın etkisiyle bazı tane sınırları kaybolmakta ve yeni tane sınırları oluşmaktadır. Yeni tane sınırlarının oluşması, devamlı bir yeniden yapılanmayı sağlamaktadır [55], [58].

5.2.3 Dinamik Yeniden Kristalleşme

Dinamik yeniden kristalleşme işlemi yüksek sıcaklıklarda deformasyon işlemi sırasında meydana gelmektedir. Bu işlem sırasında yeni taneler oluşarak, malzemenin akma dayanımının düşmesi ve deformasyon işleminin kolaylaşması sağlanmaktadır.

Dinamik yeniden kristalleşmeyle çekirdek oluşabilmesi için deformasyon işlemi sırasında yapıda biriken enerjinin belli bir değere ulaşması gerekmektedir. Bu enerji, dislokasyonların yoğunluğunun artmasıyla elde edilmektedir. Dinamik yeniden kristalleşmede, çekirdeklenme tane sınırlarında başlar. Daha sonra tane sınırında büyüyen taneler, boyun oluşturarak taneden ayrılır ve böylelikle yeni taneler oluşur. Fakat deformasyon işlemi süresince, büyüyen taneler dislokasyonların yoğunluğunu artırmakta ve tanelerin büyümesini engellemektedir. Ancak çekirdeklenme sürekli olarak devam etmektedir [55].

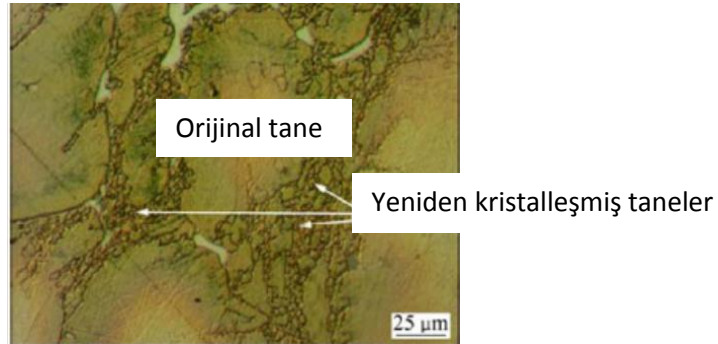
• Yeniden Kristalleşmeyi Etkileyen Faktörler

Deformasyon hızı ve sıcaklık, yeniden kristalleşmeyi etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Yüksek deformasyon hızlarında ve düşük sıcaklıklarda, düşük deformasyon hızlarında ve yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşmenin oluşumu değişmektedir [58].

İstifleme hatası, kristal kafes içerisinde atomların diziminde herhangi birinde eksiklik ve fazlalık durumuna denilmektedir. Dislokasyonların hareketiyle birlikte de istif hataları oluşmaktadır. İstif hatası enerjisi, dislokasyonların denge durumunda tutulabilmesi için gerekli olan birim alan başına düşen enerji olarak adlandırılabilir. Yüksek istifleme hatası enerjisi dinamik toparlanmayı kolaylaştırır. Diğer tarafta düşük istifleme enerjisine sahip olan malzemelerde dislokasyonların kayması ve tırmanması sınırlı

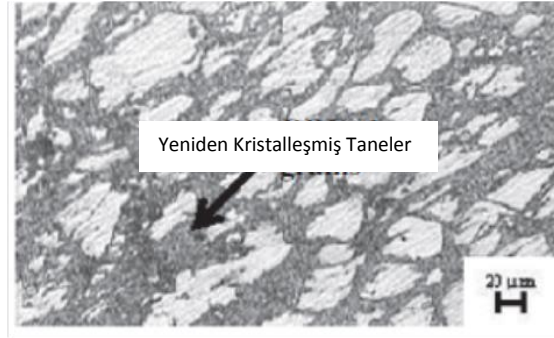
olduğundan, dinamik yeniden kristalleşme gerçekleşmesi kolaylaşır. Dinamik yeniden kristalleşme ile yeni tanelerin oluşumu, istifleme hatası enerjisinin miktarına göre değişmektedir. Yüksek istifleme hatası enerjisine sahip malzemede alt tane şeklinde taneler oluşurken, düşük istifleme enerjisine sahip malzemelerde taneler, tane sınırlarında oluşmaktadır [58].

Magnezyum alaşımlarında dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşme yüksek deformasyon sıcaklıklarında görülmektedir. Magnezyum alaşımlarında, yüksek sıcaklıklarda dinamik toparlanmadan daha çok dinamik yeniden kristalleşme görülmektedir. Ebrahimi vd. tarafından [61] de yapılmış olduğu çalışmada AZ91 alaşımın 350 °C ve 400 °C’de sıcak deformasyon özelliklerinin incelenmiştir. Bu çalışmada dinamik yeniden kristalleşmenin oluşumu gözlemlenmiştir [61].



Şekil 5.10 AZ91 alaşımı 350 °C ve 0,1 s⁻¹ gerinim hızında sıcak deformasyon sonucunda elde edilen dinamik yeniden kristalleşme sonucu boyun mikroyapısı [61]

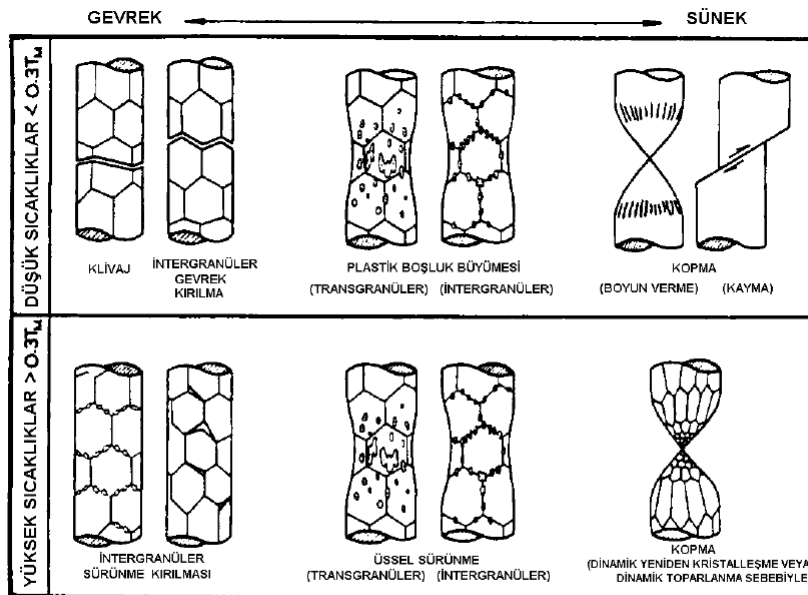
Pilehva vd. tarafından [62] de AZ91 alaşımının deformasyon özelliklerine sıcaklığın ve mikroyapının etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada numuneler 425 °C’de 12 saat homojenize edilmiştir. Daha sonra bu numuneler haddelenmiş ve haddeleme sonrası 350 °C’de 100 dk tavlantı yapılmıştır. Tavlama işlemi sonrasında, sadece haddelenmiş ve tavlantı yapılmış numunelere 250 °C’de yapılan basma testi sonucunda en fazla dinamik yeniden kristalleşme sadece haddelenmiş numunede olduğu gözlemlenmiştir. Burada ikizlenme bantlarında yeniden kristalleşmiş taneler görülmektedir [62].



Şekil 5.11 Haddelenmiş numunenin tavlanması sonrası 250 °C’de 0,5 gerinimde basma mikroyapısı [62]

5.3 Kırılma

Metalik malzemelerin kafes yapıları, alaşım durumu, ısıtım işlem özellikleri ve işlem sıcaklığı gibi birçok parametre, çekme işlemi sonucunda kırılma şeklini etkilemektedir. İşlem sıcaklık kırılma için bir önemli parametredir. Düşük sıcaklıklarda, klivaj, intergranüler ve transgranüler kırılma görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda ise intergranüler sürünme kırılması ve sürünme kırılması görülmektedir. Şekil 5.12’de deformasyon sıcaklığına göre malzemelerin gösterdiği kırılma mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 5.12 Düşük ve yüksek sıcaklıkta kırılma mekanizmaları [58]

Malzemeler genellikle iki şekilde kırılmaktadırlar. Bunlar gevrek ve sünek kırılmadır. Bu iki tür kırılma düşük ve yüksek işlem sıcaklıklarında görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda görülen gevrek kırılma klivaj ve intergranüler şekilde görülmektedir. Tane içinde oluşan

boşluklar sonucunda olan kırılmaya transgranüler, tane sınırında oluşan boşlukların ilerlemesi sonucunda olan kırılmaya intergranüler kırılma denilmektedir. Sünek kırılma esnasında ise malzeme boyun verir ve kopma gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda gevrek kırılma tane arasında oluşan boşluklar ile gerçekleşir. Yüksek sıcaklıklarda transgranüler sürünme kırılması görülmektedir. Transgranüler kırılmada sürünmenin etkisiyle daha önce tane içinde oluşmuş boşluklar büyür ve boşlukların birleşmesiyle kırılma gerçekleşir. Bu tür kırılmada, sürünme düşük gerilmelerde oluşur ve kırılma yüksek deformasyon değerlerinde gerçekleşmektedir. Intergranüler kırılmada tane sınırları boyunca boşluklar oluşmaktadır. Sürünmenin etkisiyle bu boşluklar büyür. Eğer işlem sıcaklığında sıcaklık difüzyon için yeterli ve gerilme sürünme kontrollüyse boşluklar difüzyonun etkisiyle büyür. Uygulanan deformasyon şartlarında, dinamik yeniden kristalleşme ve dinamik toparlanma meydana geliyorsa malzeme sünek kırılmaktadır [58].

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyisel çalışmalarda Şekil 6.1’de verilen Yıldırım Döküm ve Anot San. Tic. Ltd. Şti tarafından 50 mm çapında ve 325 mm uzunluğunda döküm metodu ile çubuk formunda üretilmiş AZ91 magnezyum alaşımı malzeme kullanılmıştır. Sıcak deformasyon kabiliyetinin incelenmesi kapsamında döküm hâli, homojenize ve T6 ısıt işlemleri yapılarak sıcak çekme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 6.1 AZ91 magnezyum alaşımı çubuk

6.1 Deney Malzemesi

AZ91 magnezyum alaşımı çubukların kimyasal analizi Yıldırım Döküm ve Anot San. Tic. Ltd. Şti tarafından yapılmıştır. Alaşımın kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 AZ91 magnezyum alaşımı kimyasal kompozisyonu

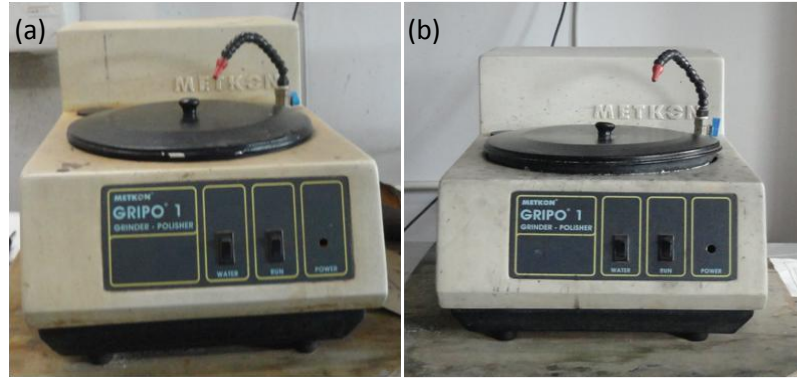
	Kimyasal Kompozisyon (%)					
Alaşım	Mg	Al	Zn	Mn	Cu	Fe
AZ91	89,7	9,1	0,91	0,23	0,04	0,02

6.2 Deneyin Yapılışı ve Kullanılan Cihazlar

Deney sırasında döküm ve ısıl işlem numunelerin metalografik incelemeleri için ilk önce zımpara ve parlatma işlemleri yapılmış ardından dağlanmıştır. Sonra numuneler ışık mikroskopunda ve Tarama Elektron Mikroskopunda (SEM) incelenmiştir.

6.2.1 Metalografik İnceleme

Deneylerde kullanılan alaşımların metalografik incelemesi YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarında yapılmıştır. Metalografik inceleme için numuneler sırasıyla 600, 800, 1000 ve 1200 mesh'lik zımparalarla zımparalanmış ardından 1 μm 'lik elmas pasta ile parlatılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemi, METKON GRIPO 1 marka cihazlarda gerçekleştirilmiştir. Bu cihazlar Şekil 6.2 (a) ve Şekil 6.2 (b)'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Zımparalama (a) ve parlatma (b) cihazları

Daha sonra numuneler Çizelge 6.2'de içeriği verilen asetik glikol dağlayıcı ile 5 saniye süreyle dağlanmıştır [51].

Çizelge 6.2 Asetil glikol dağlayıcı kimyasal içeriği

Kimyasal İçerik	Miktar (ml)
Asetik asit	20
HNO ₃	1
Etilen glikol	60
Su	19

6.2.2 Isıl İşlem

Homojenizasyon, çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma ısı işlemleri 1000 °C kapasiteli PROTHERM marka ısı işlem fırınında yapılmıştır. Bu fırın YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Üretim Metalurjisi Laboratuvarında olup, Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3 PROTHERM marka ısı işlem fırını

Bu fırında uygulanan homojenizasyon ve T6 ısı işlemlerinin, sıcaklık ve süreleri Çizelge 6.3'te gösterilmiştir [40], [63].

Çizelge 6.3 Isıl işlem sıcaklık ve süreleri

Isıl İşlem	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)
Homojenizasyon	415	12
Çözeltiye Alma	420	12
Yapay Yaşlandırma	215	4

6.2.3 Numunelerin İncelenmesi

Deney parçalarının görüntüleri ışık mikroskobu ve Tarama Elektron Mikroskobunda (SEM) alınmıştır. Bu işlem YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mikroskopi ve Elektron Mikroskobu Laboratuvarlarında yapılmıştır. Şekil 6.4'te Leica ICM 1000 model ışık mikroskobu ve Şekil 6.5'te JEOL JSM-5410LV model Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Leica ICM 1000 marka ışık mikroskobu



Şekil 6.5 JEOL JSM 5410LV marka Tarama Elektron Mikroskobu (SEM)

6.2.4 Sertlik Deneyi

Sertlik ölçümü, YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mekanik Muayene Laboratuvarında yapılmıştır. Şekil 6.6'da gösterilen Brinell sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Uygulanan yük 62,5 kp ve bilya çapı 2,5 mm olarak seçilmiştir. Sertlik ölçümünde her bir numune üzerinde üç farklı noktadan sertlik alınıp ortalama iz çapı belirlenmiştir. Ortalama iz çapı ile Brinell sertlik formülüne göre sertlik değerleri hesaplanmıştır.

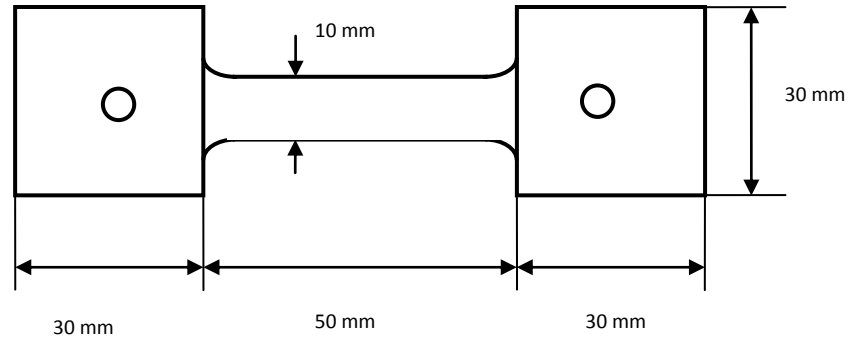


Şekil 6.6 Brinell sertlik ölçme cihazı

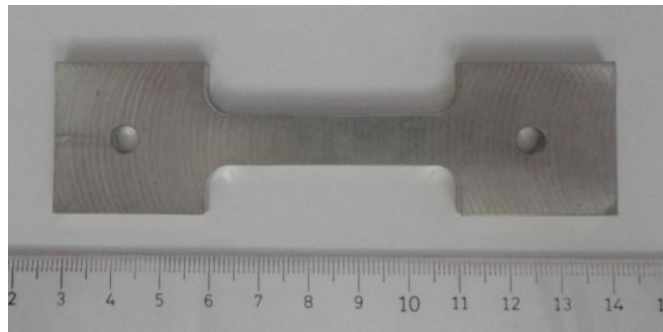
6.2.5 Çekme İşlemi

- Çekme Numunesi

Çekme deney çubukları TS EN 10002 standardına göre İGG Metalurji firmasında talaşlı yöntemle hazırlanmıştır. Şekil 6.7’de çekme deneyi çubuğu ölçüleri, Şekil 6.8’de çekme deney numunesi verilmiştir.



Şekil 6.7 Çekme deneyi çubuğu ölçüleri



Şekil 6.8 Çekme deneyi çubuğu

- **Çekme Deneyi**

Sıcak çekme deneyi YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mekanik Muayene Laboratuvarında bulunan 10 ton'luk Mohr&Federhaff Universal Çekme Basma cihazı ve ısıtıcı olarak dikey split fırın kullanılarak yapılmıştır. Şekil 6.9'da çekme basma cihazı ve Şekil 6.10'da dikey split fırın gösterilmiştir.



Şekil 6.9 Mohr&Federhaff Universal çekme-basma deney cihazı



Şekil 6.10 Dikey split fırın

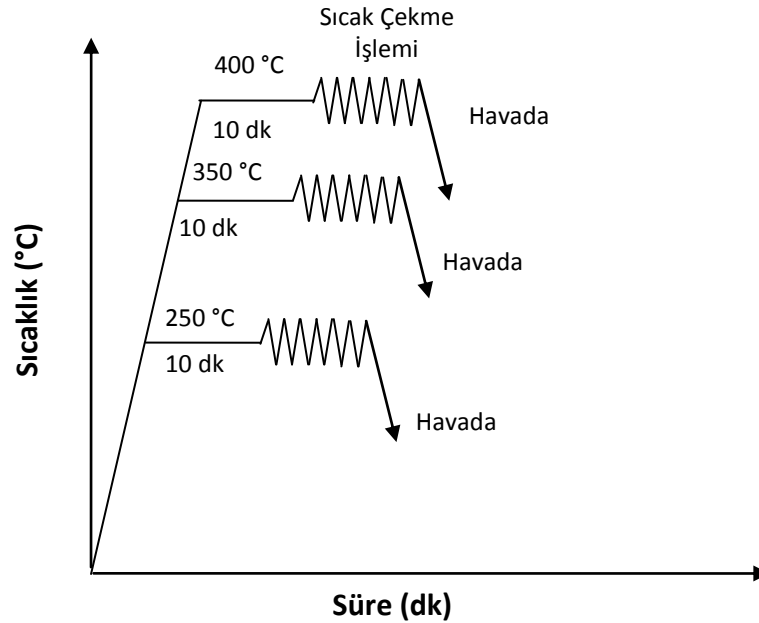
- **Sıcak Çekme İşlemi**

Çekme deney çubukları çeneler arasına bağlanır ve istenilen sıcaklığa gelmesi için dikey tüp fırın çeneler arasına yerleştirilir. Fırın istenilen sıcaklığa geldikten sonra çekme deneyi yapılır.



Şekil 6.11 Sıcak çekme deneyi öncesi numunenin ısıtılması

Sıcak çekme işlemi döküm, homojenize ve T6 numunelere uygulanmıştır. Sıcak çekme işlemi Şekil 6.12’de belirtildiği gibi 250 °C, 350 °C ve 400 °C’de yapılmıştır. Sıcak çekme işlemi öncesinde numuneler, çekme sıcaklığında 10 dakika beklenilmiştir. Sıcak çekme deneyleri $0,02 \text{ s}^{-1}$ çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Denye sonunda numuneler havada soğutulmuştur.



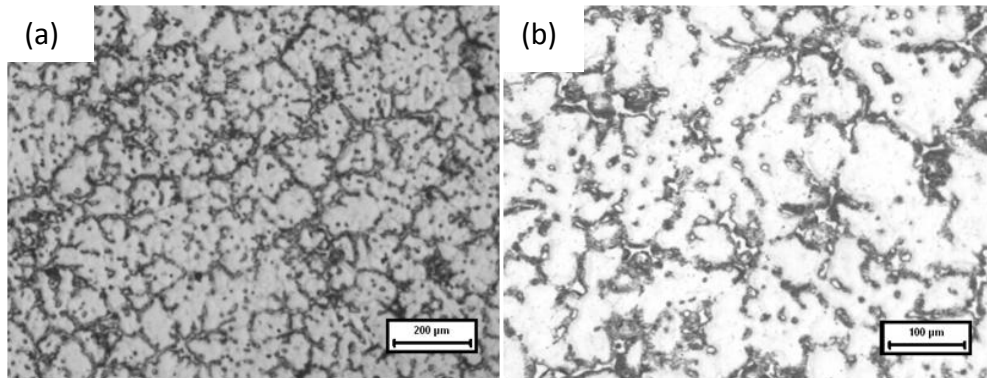
Şekil 6.12 Sıcak çekme işlemi

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME**7.1 AZ91 Alaşımının İncelenmesi**

AZ91 magnezyum alaşımının döküm hâlinin, homojenizasyon hâlinin ve T6 ısıt işlemleri uygulanmış hâlinin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapılar, ışık mikroskopunda ve Tarama Elektron Mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Ayrıca tarama elektron mikroskopunda numunelerin elementel analizi yapılmıştır.

7.1.1 Döküm Hâli Yapının İncelenmesi

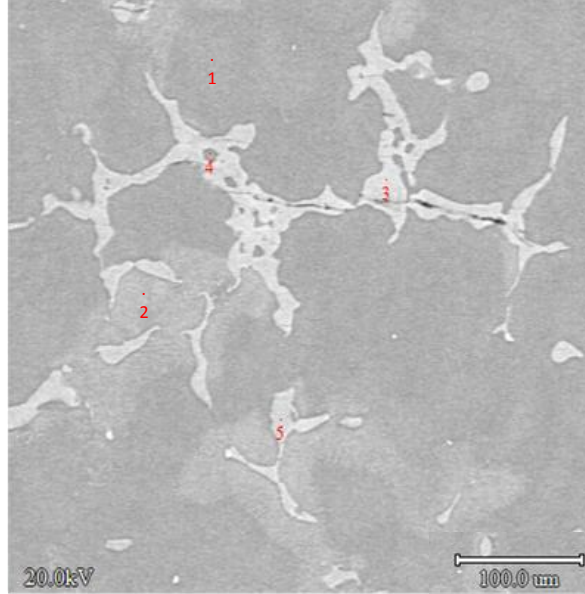
AZ91 magnezyum alaşımı Çizelge 6.1’de verilen kimyasal kompozisyona sahiptir. AZ91 alaşımının ışık mikroskopuyla elde edilen 50X ve 100X büyütme görüntüleri Şekil 7.1 (a) ve (b)’de verilmiştir.



Şekil 7.1 AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli mikroyapı görüntüleri (a) 50X ve (b) 100X büyütme

- **EDS Analizi**

AZ91 magnezyum alaşımının döküm hâli fazlarının Tarama Elektron Mikroskopunda (SEM), EDS (Energy Dispersive Spectrometry) analizi yapılmıştır.



şekil 7.2 AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli SEM geri saçınımlı mikroyapı görüntüsü 200X büyütme

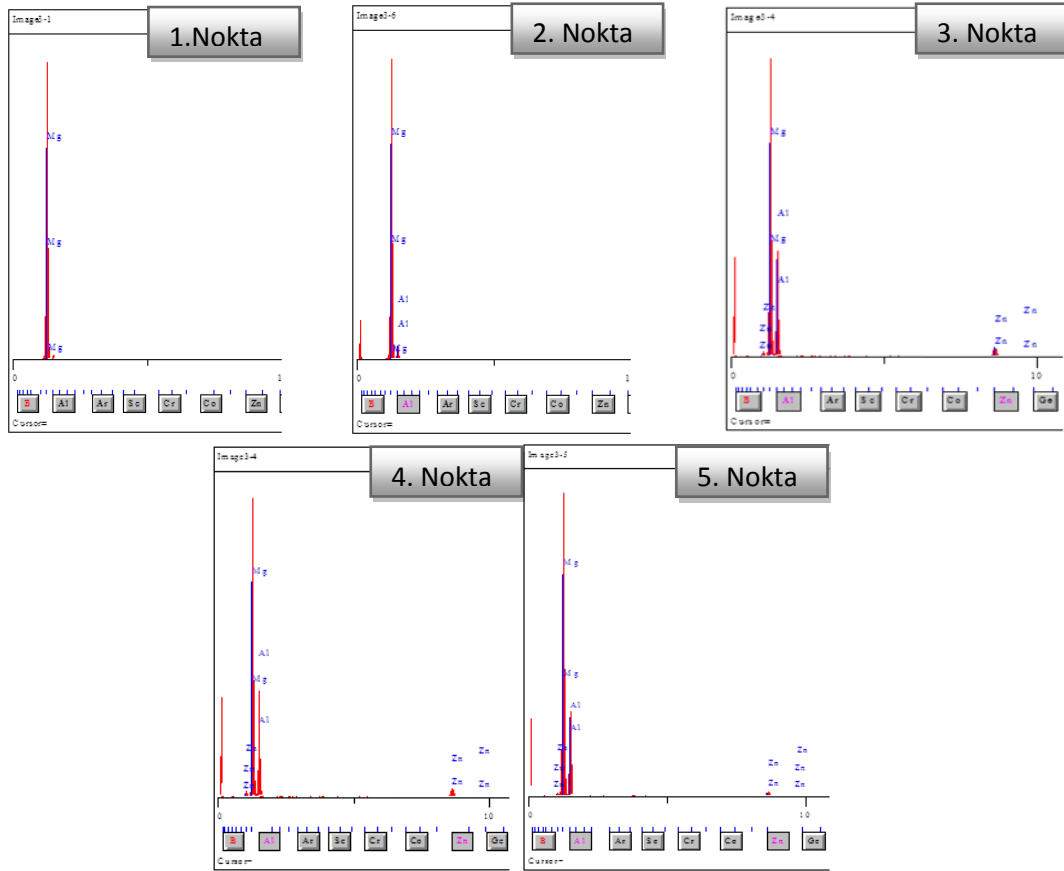
Elementel analizlerin yapıldığı noktalar şekil 7.2’de numaralandırılmıştır. Bu noktalardan alınan fazların elementel analiz sonuçları ve grafikleri Çizelge 7.1’de ve şekil 7.3’te verilmiştir.

Çizelge 7.1 AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli EDS analizi sonuçları

NOKTA	1	2	3	4	5
Mg	%95,3	%75,69	%35,69	%43,43	%50,28
Al	%4,7	%24,30	%30,49	%25,57	%28,04
Zn			%33,83	%31,06	%21,67
Toplam	%100	%100	%100	%100	%100

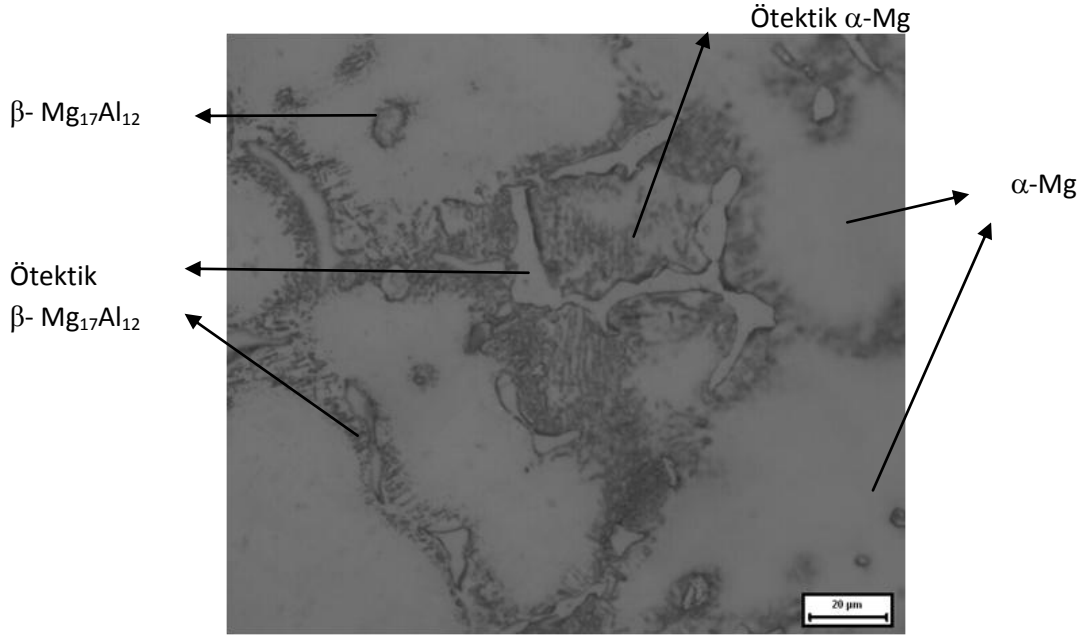
Fazların elementel analizi sonucunda, 1. noktanın olduğu bölge olan matriste %95,3 magnezyum bulunmuştur. 2. noktanın olduğu bölge alüminyumca zengin bölgedir. 3.

ve 5. noktalar çökeltilerin üzerinden alınmıştır ve yüksek miktarda alüminyum ve çinko bulunmuştur.



Şekil 7.3 AZ91 magnezyum alaşımı döküm hâli EDS analizi sonuçları

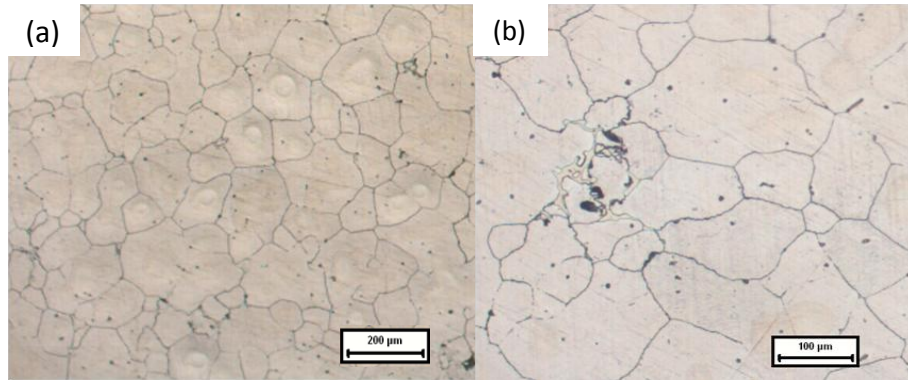
Yapılan EDS analizi sonucuna göre; Şekil 7.4’te döküm yapısında matriste α -Mg, β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazı ve ötektik faz α -Mg+ β -Mg₁₇Al₁₂ fazı görülmüştür. Mikroyapıda α -Mg fazı, dendrit şeklinde β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik ve ötektik faz tarafından çevrelenmiştir. Burada siyah renkli yapı β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik faz, beyaz renkli yapı α -Mg fazıdır.



Şekil 7.4 AZ91 magnezyum alaşım döküm hâli mikroyapı görüntüsü 500X büyütme

7.1.2 Homojenizasyon Isıl İşlemi Uygulanmış Yapının İncelenmesi

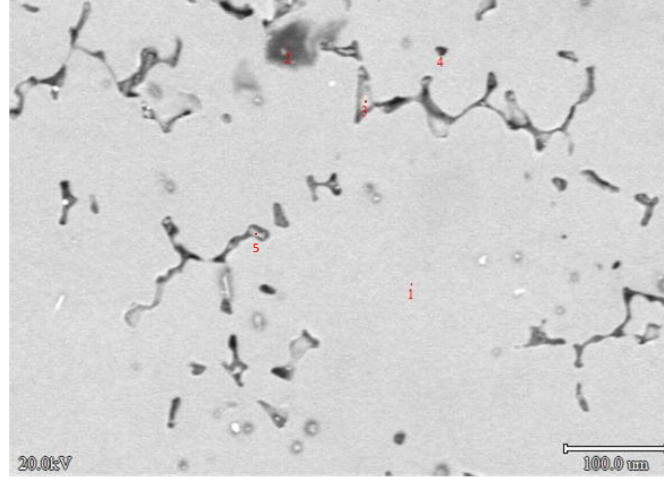
AZ91 magnezyum alaşımı, 415 °C’de 12 saat bekletilerek homojenize edilmiştir. Bu işlemde amaç, döküm alaşımında görülen dendritsel yapının dağılmasını sağlamak ve tane boyutunun eş eksenli olmasının sağlamaktır. Homojenizasyon işlemi sonrasında β - $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazı, matris içerisinde dağılmaktadır. Bu şekilde bir yapının şekillendirilmesi kolaylaşmakta ve yapıya kırılganlık getiren intermetalik fazın dağılmasıyla dayanım değerleri artmaktadır. Homojenizasyon işlemi sonrası numunelerin mikroyapıları incelenmiştir. Şekil 7.5 (a) ve (b)’de homojenize AZ91 magnezyum alaşımının mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.5 AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli mikroyapı görüntüleri (a) 50X ve (b) 100X büyütme

- **EDS Analizi**

Homojenizasyon işlemi sonrasında Tarama Elektron Mikroskopunda (SEM) fazların elementel analizi yapılmıştır. Bu analizlerin sonuçları alındığı noktalar mikroyapı üzerinde Şekil 7.6’da gösterilmiştir.



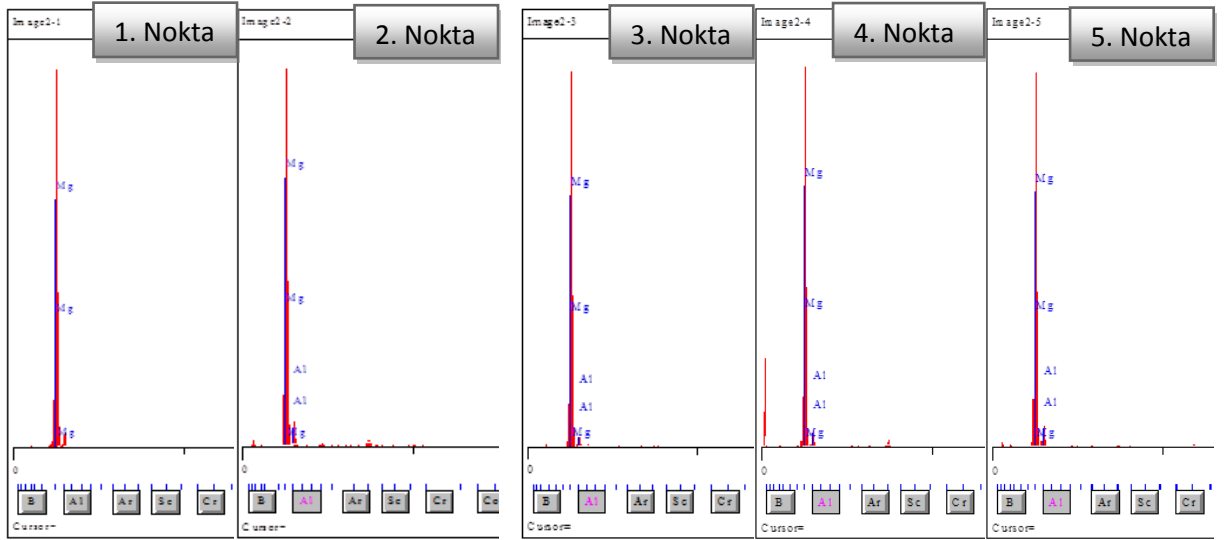
Şekil 7.6 AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli SEM geri saçınımlı elektron mikroyapı görüntüsü 200X büyütme

Homojenizasyon işlemi uygulanmış numunenin, EDS analiz sonuçları ve grafikleri Çizelge 7.2’de ve Şekil 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7.2 AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli EDS analizi sonuçları

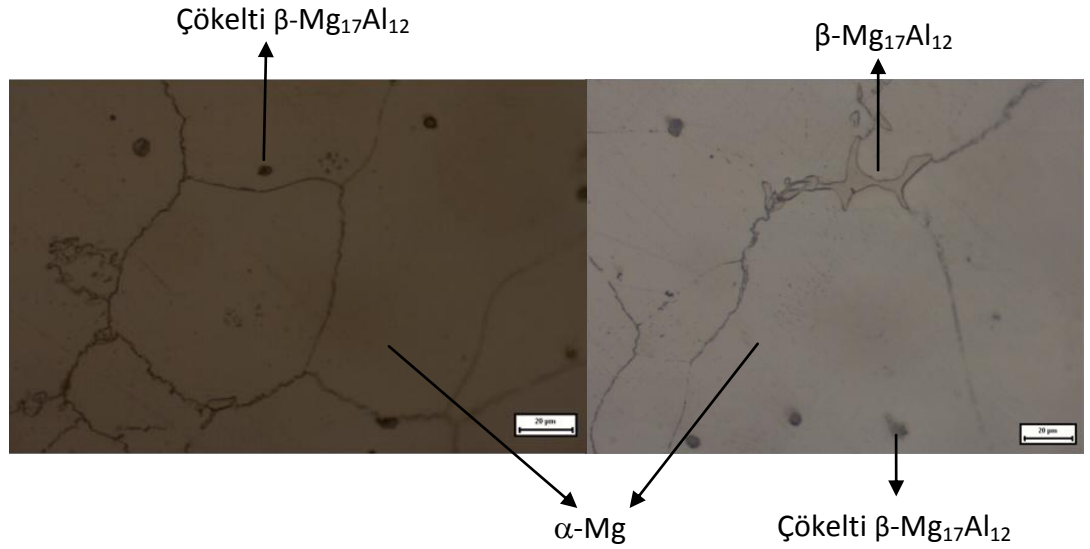
NOKTA	1	2	3	4	5
Mg	%90,7	%75,29	%82,09	%77,96	%72,48
Al	%9,3	%24,70	%17,90	%22,03	%27,51
Toplam	%100	%100	%100	%100	%100

EDS analizi beş farklı noktadan alınmıştır. 1. noktanın olduğu bölge matristir. Matriste magnezyum oranı %90,7 gibi yüksek değerlerdedir. Diğer noktalar çökeltilerin olduğu fazlardır.



Şekil 7.7 AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli EDS analiz sonuçları

Yapılan EDS analizi sonucuna göre; Şekil 7.8’de matriste α -Mg, β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazı ve çökelti β -Mg₁₇Al₁₂ fazı görülmüştür. Mikroyapıda α -Mg fazı gri renkte, çökelti β -Mg₁₇Al₁₂ siyah renktedir.

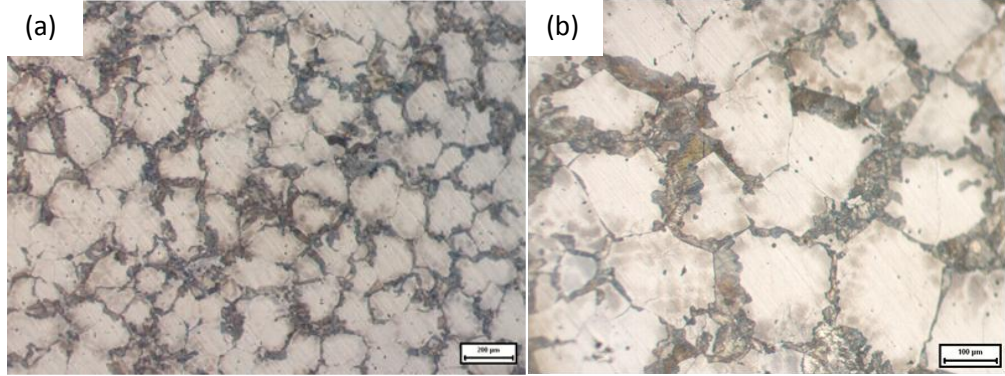


Şekil 7.8 AZ91 magnezyum alaşımı homojenize hâli mikroyapı görüntüsü 500X büyütme

7.1.3 T6 Isıl İşlemi Uygulanmış Yapının İncelenmesi

T6 ısıt işlemleri çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma işlemlerini kapsayan bir çökelti sertleşme işlemidir. Numuneler 420 °C’de 12 saat bekletilerek çözeltiye alınmıştır. Ardından suda ani soğutulmuş ve daha sonra 215 °C’ de 4 saat bekletilerek yapay yaşlandırılmıştır. Çözeltiye alma ısıt işleminde mikroyapıda bulunan intermetalik

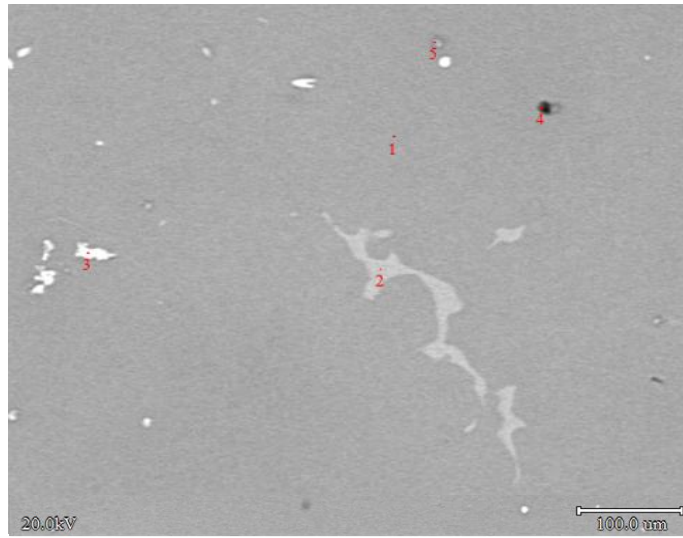
fazın dağılması, ani su verme işlemi ile bu yapının korunması ve yapay yaşlandırma işlemi ile aşırı doymuş katı çökeltilerin ince ve dağılmış şekilde çökmesi istenmiştir. Şekil 7.9 (a) ve (b)'de T6 ısıtılmasına uğramış numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.9 AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli mikroyapı görüntüleri (a) 50X ve (b) 100X büyütme

- **EDS Analizi**

T6 ısıtılma işlemi sonrasında Tarama Elektron Mikroskopunda (SEM) fazların elementel analizi yapılmıştır. Analizi alınan noktalar Şekil 7.10'da verilmiştir.



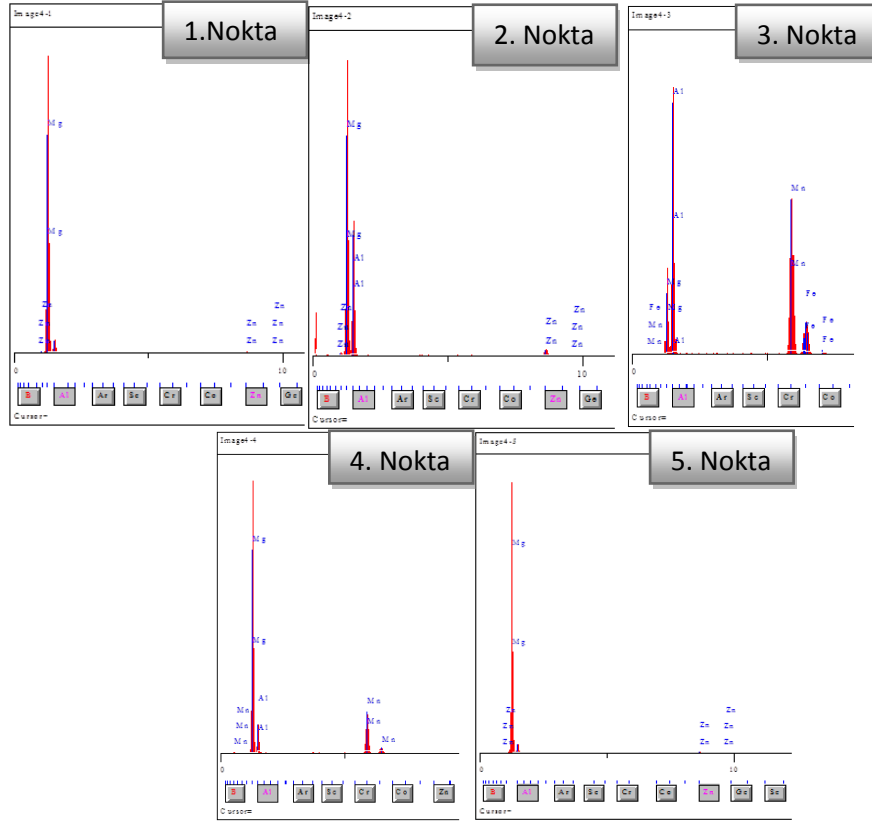
Şekil 7.10 AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli SEM geri saçınımı mikroyapı görüntüsü 200X büyütme

T6 ısıtılma işlemine uğramış numunenin elementel analiz sonuçları ve grafikleri Çizelge 7.3'te ve Şekil 7.11'de verilmiştir.

Çizelge 7.3 AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli EDS analizi sonuçları

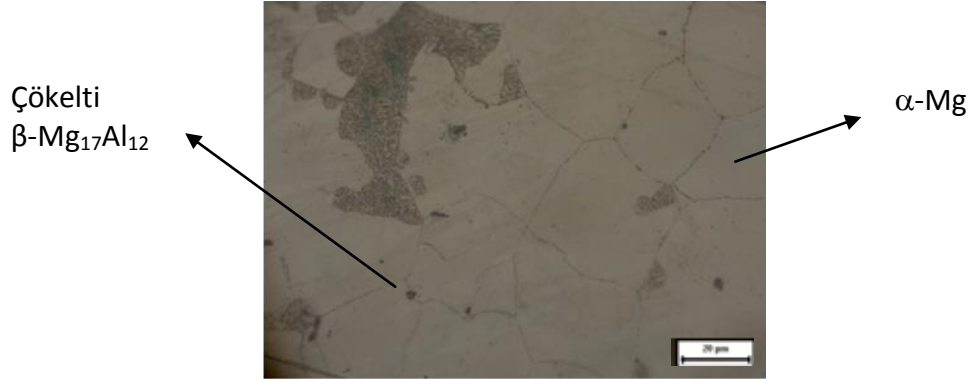
NOKTA	1	2	3	4	5
Mg	%72,00	%39,11	%7,21	%41,10	%74,98
Al	%13,31	%38,11	%20,511	%9,85	%12,68
Zn	%10,67	%22,77			%12,37
Mn			%61,44	%49,31	
Fe			%10,83		
Toplam	%100	%100	%100	%100	%100

EDS analizi beş farklı noktadan alınmıştır. Analiz sonucunda çok küçük oranlarda bulunan demire rastlanılmıştır. Magnezyum, alüminyum ve çinko analiz sonucunda matriste görülmüştür.



Şekil 7.11 AZ91 magnezyum alaşımı T6 hâli EDS analizi sonuçları

Yapılan EDS analizi sonucuna göre; Şekil 7.12’de matriste α -Mg, çökelti β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazı görülmüştür. Mikroyapıda α -Mg fazı gri renkte, çökelti β -Mg₁₇Al₁₂ fazı siyah renktedir.



Şekil 7.12 AZ91 magnezyum döküm alaşımı T6 hâli mikroyapı görüntüsü 500X büyütme

7.1.4 Sertlik Deneyi

Çekme deneyi yapılacak olan döküm, homojenize ve T6 numunelerin sertlik değerlikleri Brinell yöntemiyle hesaplanmıştır. Numunelerin sertlik değerleri Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4 Numunelerin sertlik değerleri

Numune	Sertlik (HB)
Döküm	64,15
Homojenize	62,92
T6	74,26

7.1.5 Değişik Sıcaklıklarda Çekme Deneyi Yapılması

Sıcak çekme deneyi üç farklı numuneye, dört farklı sıcaklıkta yapılmıştır. Döküm, homojenizasyon ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış çekme deney numunelerine $0,02 \text{ s}^{-1}$ çekme hızında, 25°C 'de, 250°C 'de, 350°C 'de ve 400°C 'de çekme testi yapılmıştır.

• 25°C 'de Çekme Deneyi

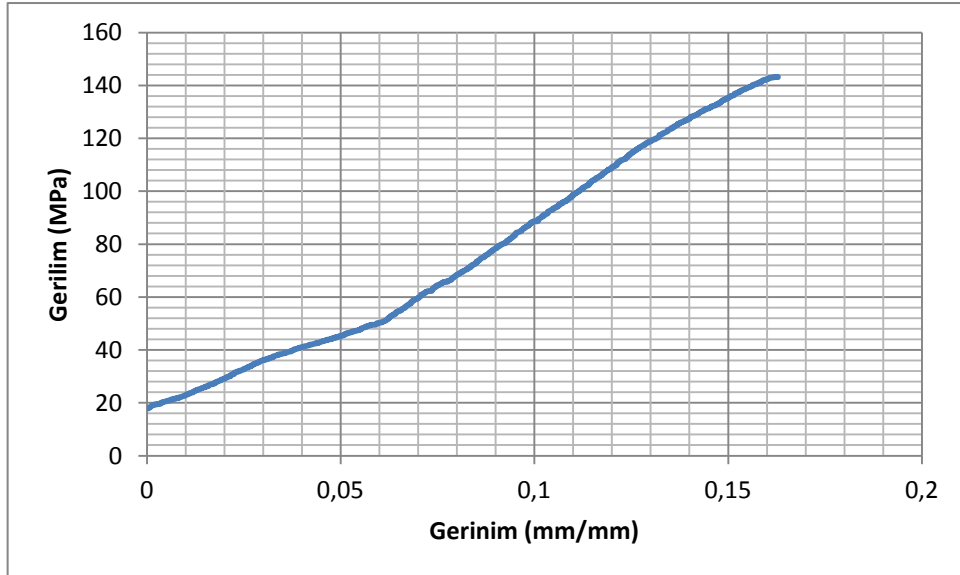
➤ Döküm Numune

25°C 'de döküm numuneye uygulanan çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin, çekme deneyi sonrası görüntüsü Şekil 7.13'te verilmiştir.

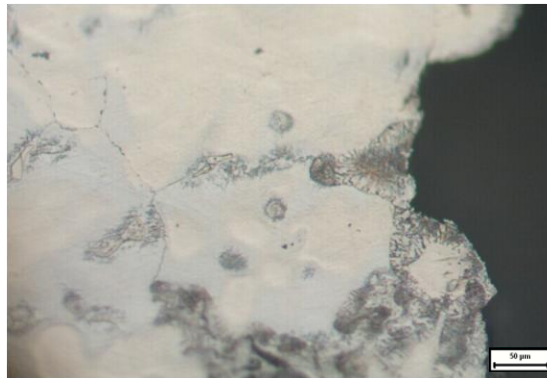


Şekil 7.13 25 °C’de döküm numunesinin çekme deneyi sonrası görüntüsü

Bu işlem sırasında 141 MPa çekme dayanıma ve 120 MPa akma dayanımına ulaşmıştır. Malzemenin kopma dayanımı, çekme dayanımıyla aynıdır. Malzeme maksimum çekme dayanımına geldiğinde kopma gerçekleşmiştir. Çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.14’te, kopma mikroyapısı Şekil 7.15’te verilmiştir.



Şekil 7.14 25 °C’de döküm numunesi gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.15 25 °C’de döküm numunesi kopma mikroyapı görüntüsü 200X büyütme

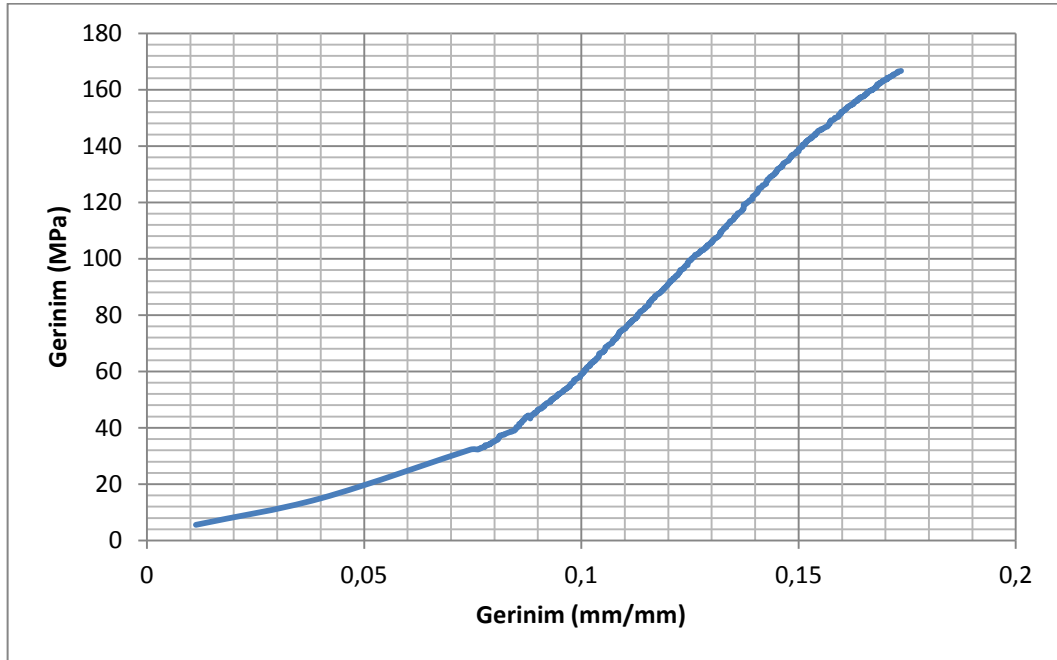
➤ Homojenize Numune

25 °C’de homojenize numuneye uygulanan çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin çekme deneyi sonrası görüntüsü Şekil 7.16’da verilmiştir.

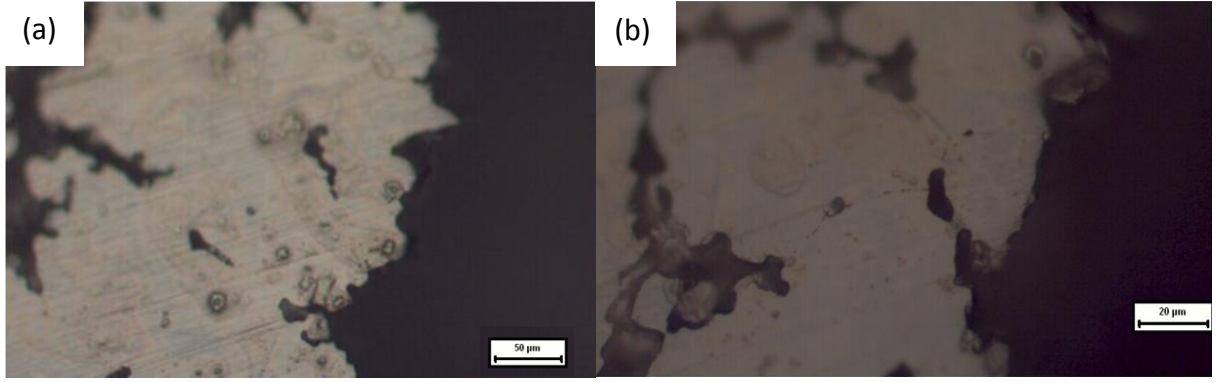


Şekil 7.16 25 °C’de homojenize numune çekme deneyi sonrası görüntüsü

Homojenize numune çekme testi sonucunda 161 MPa çekme dayanımına ve 144 MPa akma dayanımına ulaşmıştır. Kopma, çekme dayanımının maksimum olduğu noktada olmuştur. Yani kopma dayanımı çekme dayanımı ile aynı değerdir. Çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.17’de, kopma mikroyapısı Şekil 7.18’de verilmiştir.



Şekil 7.17 25 °C’de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.18 25 °C’de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 200X ve (b) 500X büyütme

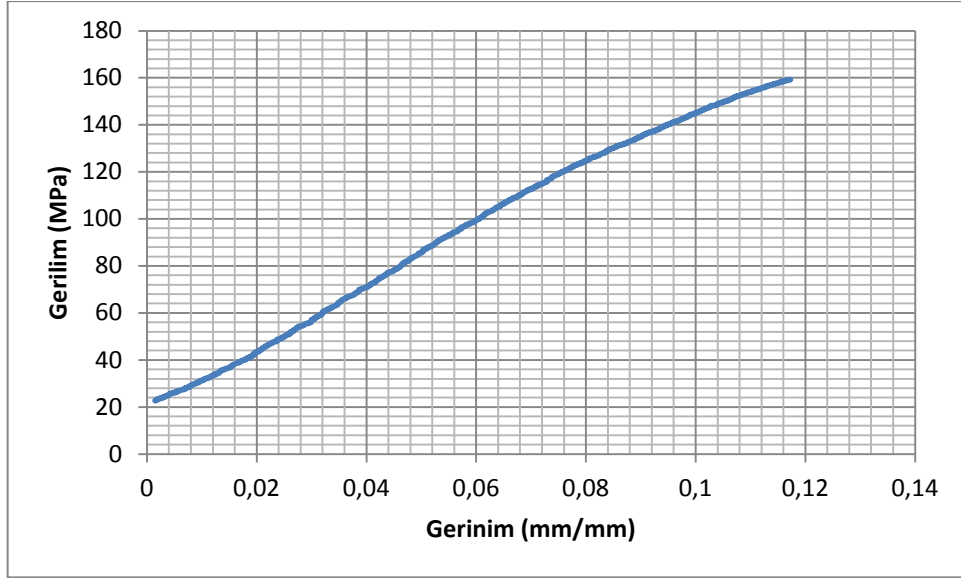
➤ T6 Numune

25 °C’de T6 numuneye uygulanan çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin çekme deneyi sonucunda görüntüsü Şekil 7.19’da verilmiştir.

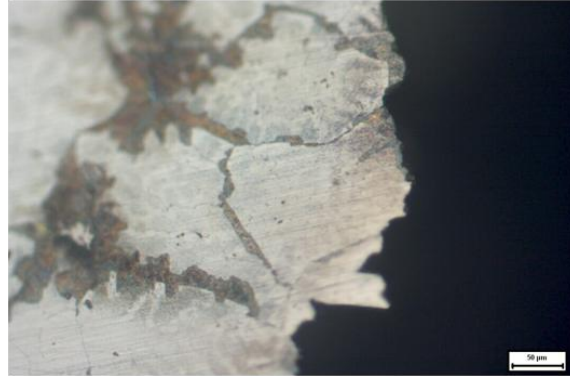


Şekil 7.19 25 °C’de T6 numune çekme deneyi sonrası görüntüsü

Bu numunenin çekme işlemi sonucunda 160 MPa çekme dayanımına ve 140 MPa akma dayanımına ulaşmıştır. Numune çekme dayanımının maksimum olduğu değerde kopmuştur. Numunenin kopma dayanımı ve çekme dayanımı aynı değerdir. Çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.20’de, kopma mikroyapısı Şekil 7.21’de verilmiştir.



Şekil 7.20 25 °C’de T6 numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.21 25 °C’de T6 numunenin kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 200X büyütme

- **250 °C’de Çekme Deneyi**

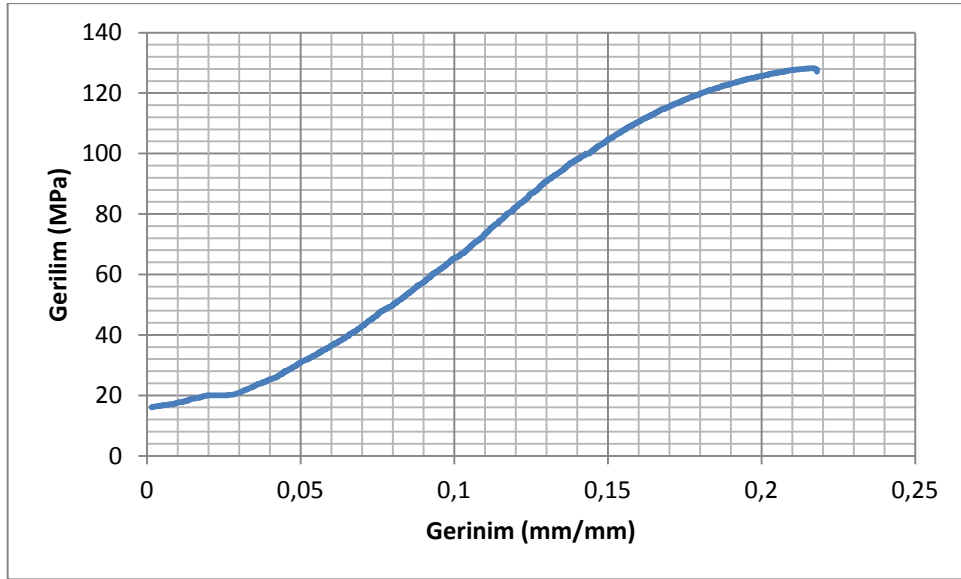
- **Döküm Numune**

250 °C’de döküm numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü Şekil 7.22’de verilmiştir.



Şekil 7.22 250 °C’de döküm numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü

Bu işlem sonucunda numune 128 MPa çekme dayanımına ve 88 MPa akma dayanımına ulaşmıştır. Ancak bu sıcaklıkta daha yüksek gerinim değerleri elde edilmiştir. Bu numune maksimum çekme dayanımında kopmuştur. Bu sıcaklıkta malzemenin çekme ve kopma dayanımı aynı değerdedir. Sıcak çekme testi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.23’te, kopma mikroyapısı Şekil 7.24’te verilmiştir.



Şekil 7.23 250 °C ‘de döküm numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.24 250 °C’de döküm numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 200X büyütme

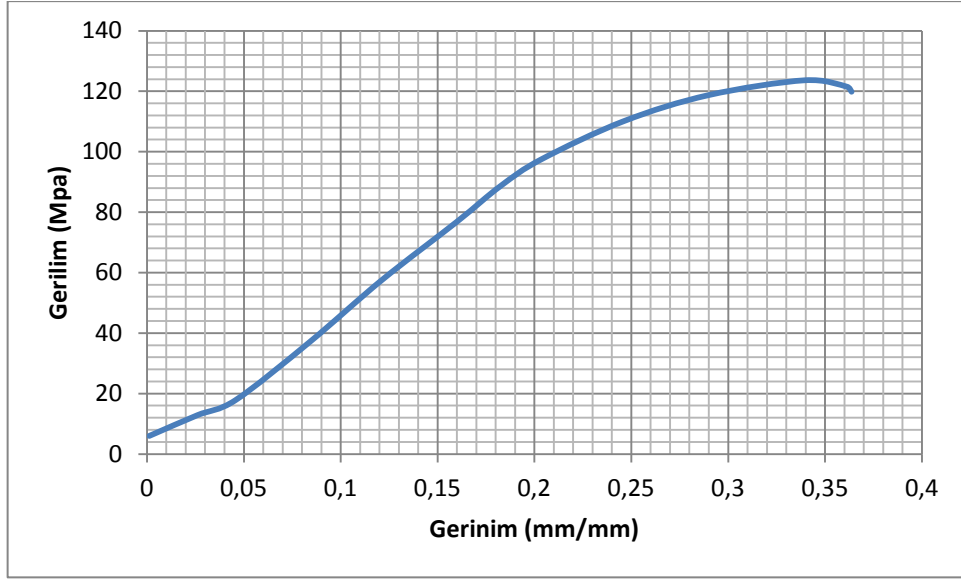
➤ Homojenize Numune

250 °C’de homojenize numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü Şekil 7.25’te verilmiştir.

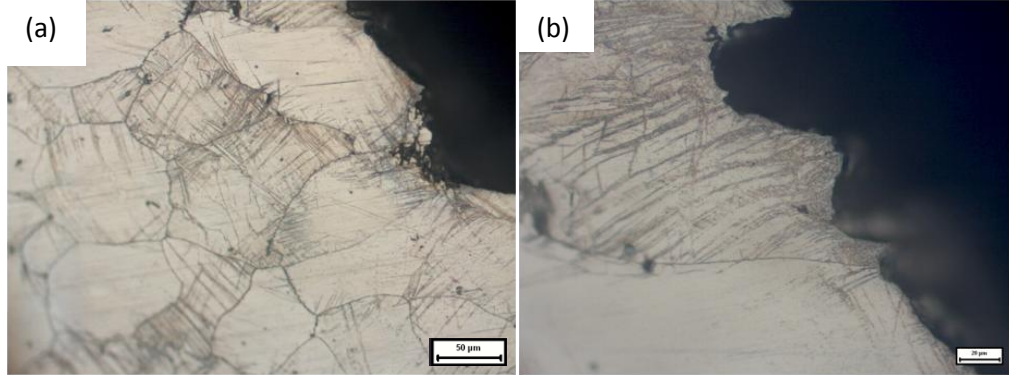


Şekil 7.25 250 °C’de homojenize numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü

Homojenizasyon işlemi sonucunda 124 MPa çekme dayanımına ve 96 MPa akma dayanımına ulaşılmıştır. Numune maksimum çekme dayanımındayken kopma gerçekleşmiştir. Kopma dayanımı ile malzemenin çekme dayanımı aynı gerilim değerindedir. Sıcak çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.26’da, kopma mikroyapısı Şekil 7.27’de verilmiştir.



Şekil 7.26 250 °C’de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.27 250 °C’de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 200X ve (b) 500X büyütme

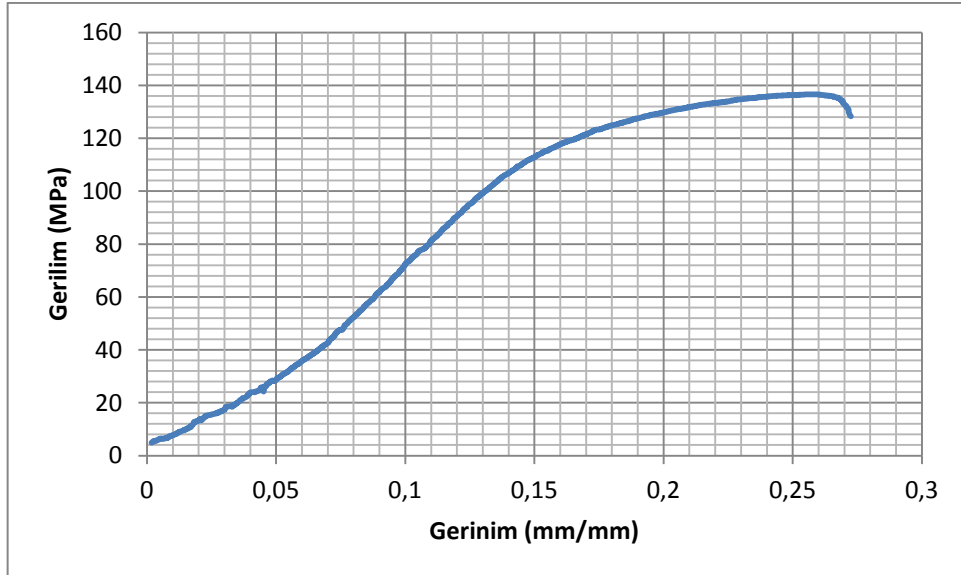
➤ T6 Numune

250 °C’de T6 numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme deneyi sonrası görüntü Şekil 7.28’de verilmiştir.



Şekil 7.28 250 °C'de T6 numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü

Çekme işlemi sonucunda bu numunenin çekme dayanımı 136 MPa ve akma dayanımı 104 MPa'dır. Bu malzemenin maksimum çekme dayanımında koptuğu görülmektedir. Sıcak çekme deneyi sonucu elde gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.29'da, kopma mikroyapısı Şekil 7.30'da verilmiştir.



Şekil 7.29 250 °C'de T6 numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.30 250 °C'de T6 numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 100X büyütme

- **350 °C’de Çekme Deneyi**

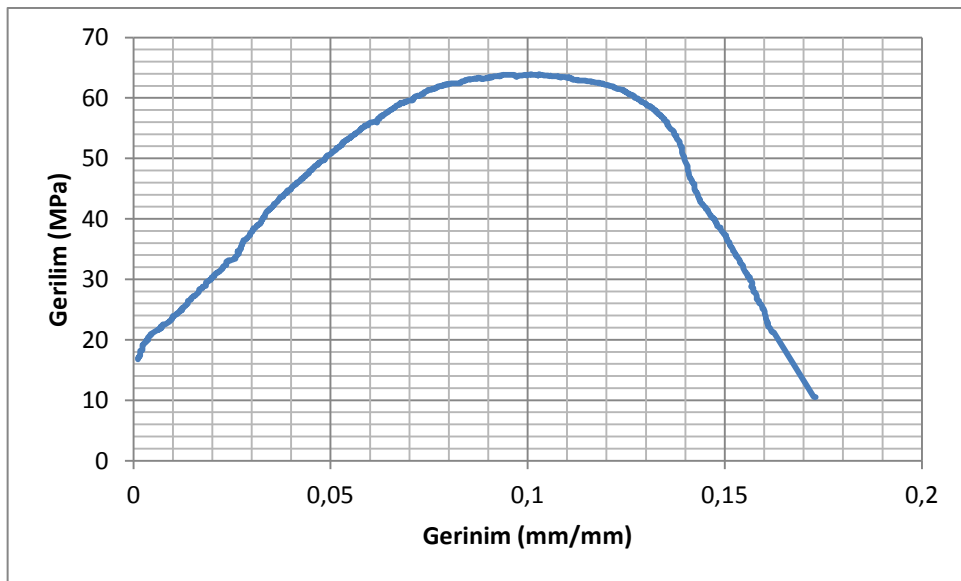
- **Döküm Numune**

350 °C’de döküm numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme deneyi sonrası kopma görüntüsü Şekil 7.31’de verilmiştir.

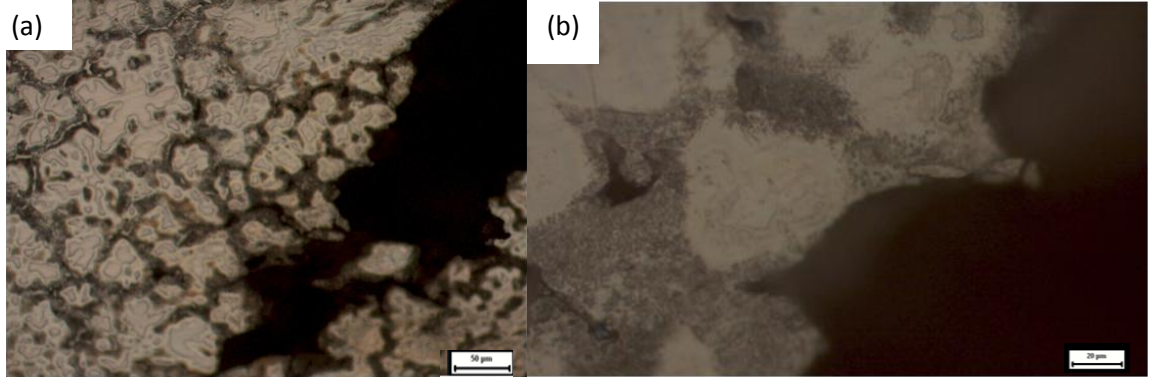


Şekil 7.31 350 °C’de döküm numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü

Çekme işlemi sonrasında malzemenin çekme gerilimi 64 MPa ve akma dayanımı 58 MPa’dır. Burada malzeme maksimum çekme dayanımından sonra kopmamış ve kopma işlemi 10 MPa değerinde olmuştur. Numune, gerilim-gerinim grafiğine göre sünek davranış göstermiştir. Ancak çekme numunesinde uzama çok küçük değerlerde kalmıştır. Sıcak çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.32’de, kopma mikroyapısı Şekil 7.33’te verilmiştir.



Şekil 7.32 350 °C’de döküm numunesi gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.33 350 °C’de döküm numunesi kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 200X ve (b) 500X büyütme

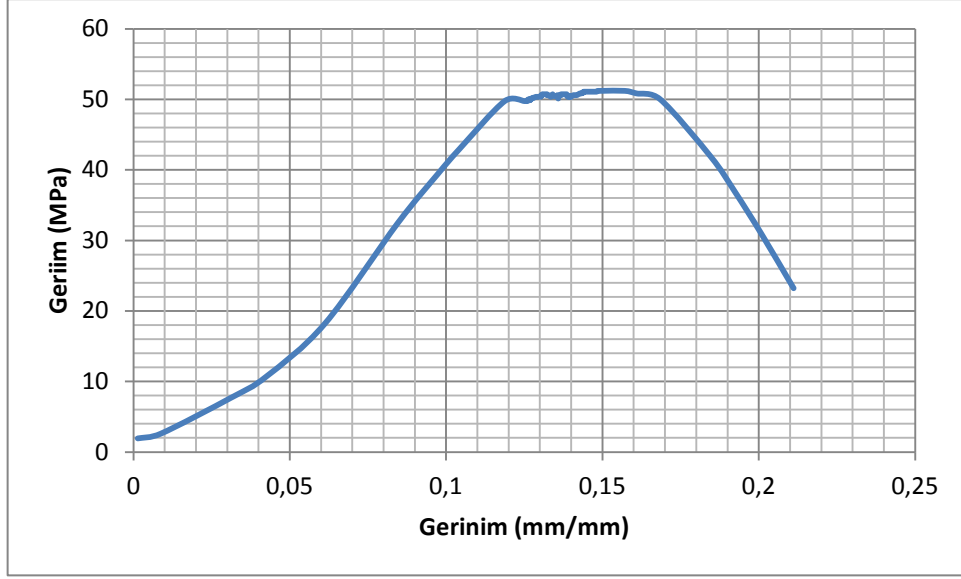
➤ Homojenize Numune

350 °C’de homojenize numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme deneyi sonrası kopma görüntüsü Şekil 7.34’te verilmiştir.



Şekil 7.34 350 °C’de homojenize numune sıcak çekme testi sonrası görüntüsü

Homojenize edilmiş numune 51 MPa çekme dayanımına ve 49 MPa akma dayanımına ulaşmıştır. Malzemenin akmaya başlaması gerilim-gerinim grafiğinde görülmektedir. Malzemenin kopma dayanımı 23 MPa’dır. Malzemenin gerinim değeri beklenenden düşük değerdedir. Sıcak çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.35’te, kopma mikroyapısı Şekil 7.36’da verilmiştir.



Şekil 7.35 350 °C’de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.36 350 °C’de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 50X büyütme

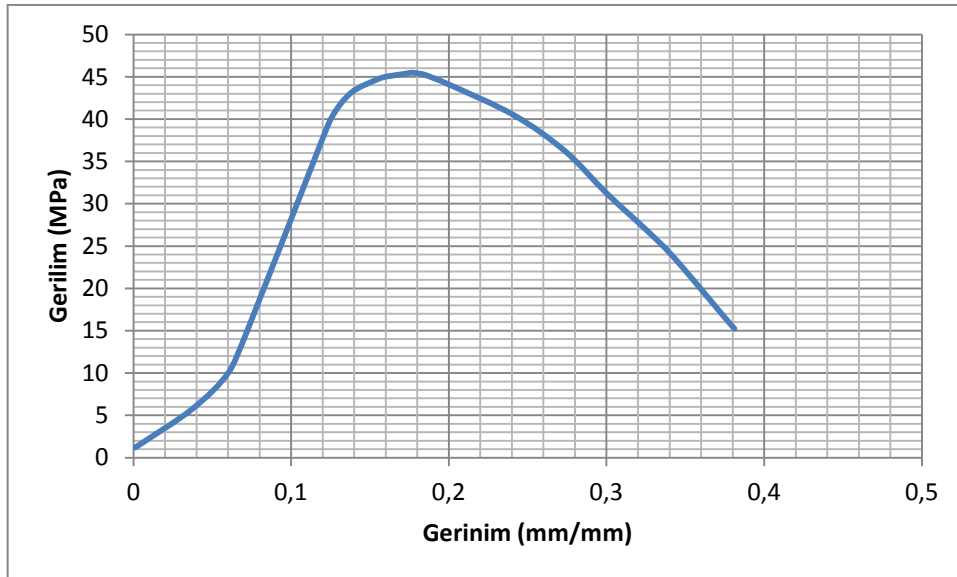
➤ T6 Numune

350 °C’de T6 numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme testi sonrasında görüntüsü Şekil 7.37’de verilmiştir.

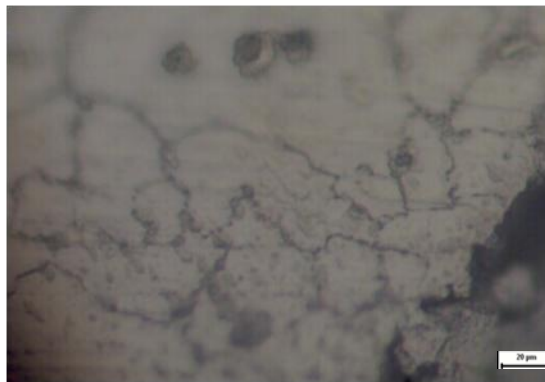


Şekil 7.37 350 °C’de T6 numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü

Bu malzeme çekme işlemi sonrasında 45 MPa çekme dayanımına ve 40 MPa akma dayanımına sahiptir. Malzemenin kopma dayanımı 15 MPa’dır. Sıcak çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.38’de, kopma mikroyapısı Şekil 7.39’da verilmiştir.



Şekil 7.38 350 °C’de T6 numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.39 350 °C’de T6 numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 500X büyütme

- **400 °C’de Çekme Deneyi**

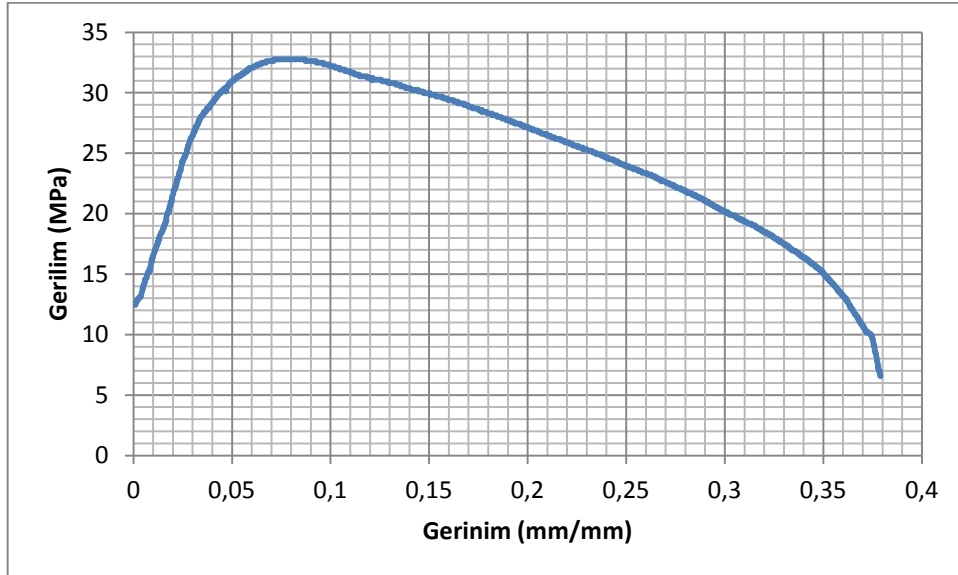
- **Döküm Numune**

400 °C’de döküm numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme testi sonrasında görüntüsü Şekil 7.40’da verilmiştir.

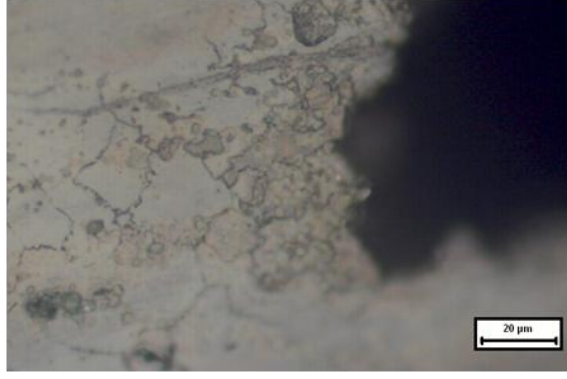


Şekil 7.40 400 °C’de döküm numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü

Çekme işlemi sonrasında numunenin 33 MPa çekme dayanımına ve 28 MPa akma dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Malzemenin kopma dayanımının 6 MPa olduğu görülmektedir. Sıcak çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.41’de, kopma mikroyapısı Şekil 7.42’de verilmiştir.



Şekil 7.41 400 °C’de döküm numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.42 400 °C’de döküm numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri 500X büyütme

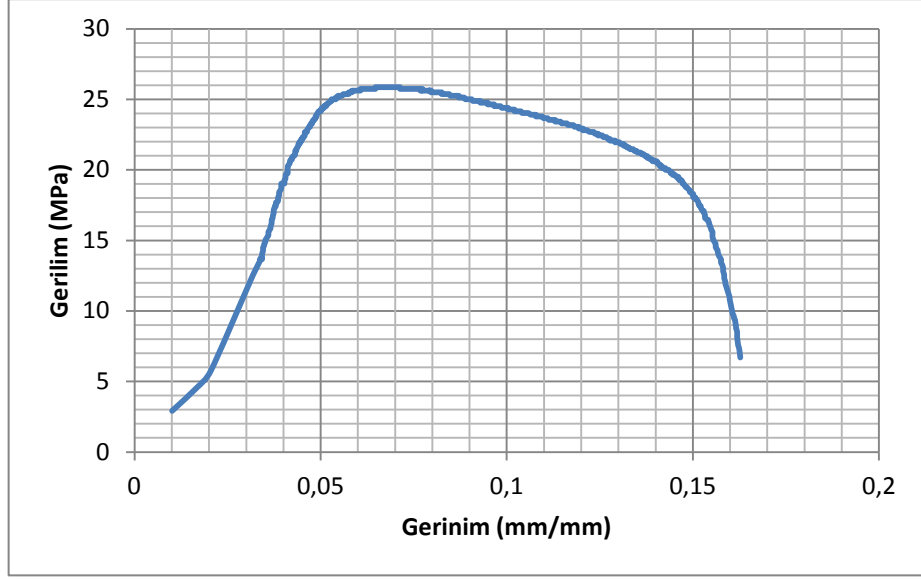
➤ Homojenize Numune

400 °C’de homojenize numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune gevrek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme testi sonrası görüntüsü Şekil 7.43’te verilmiştir.

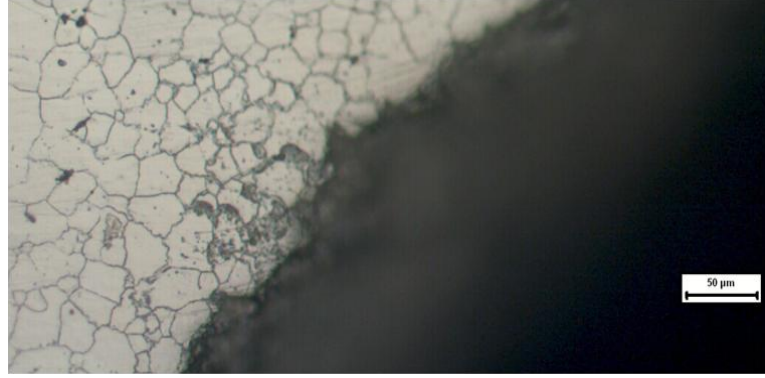


Şekil 7.43 400 °C’de homojenize numune sıcak çekme testi sonrası görüntüsü

Numunenin çekme işlemi sonrasında 26 MPa çekme dayanımına ve 20 MPa akma dayanımına sahiptir. Malzemenin kopma dayanımı 6 MPa olmuştur. Malzemedan bu sıcaklıkta daha yüksek uzama beklenmektedir. Ancak malzeme gerilim-gerinim grafiğinde görüldüğü gibi belirli seviyeye kadar malzeme uzamış ancak belirli bir gerilim değerinden sonra ani düşüş gerçekleşmiştir. Sıcak çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.44’te, kopma mikroyapısı Şekil 7.45’te verilmiştir.



Şekil 7.44 400 °C’de homojenize numune gerilim-gerinim grafiği



Şekil 7.45 400 °C’de homojenize numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüsü 200X büyütme

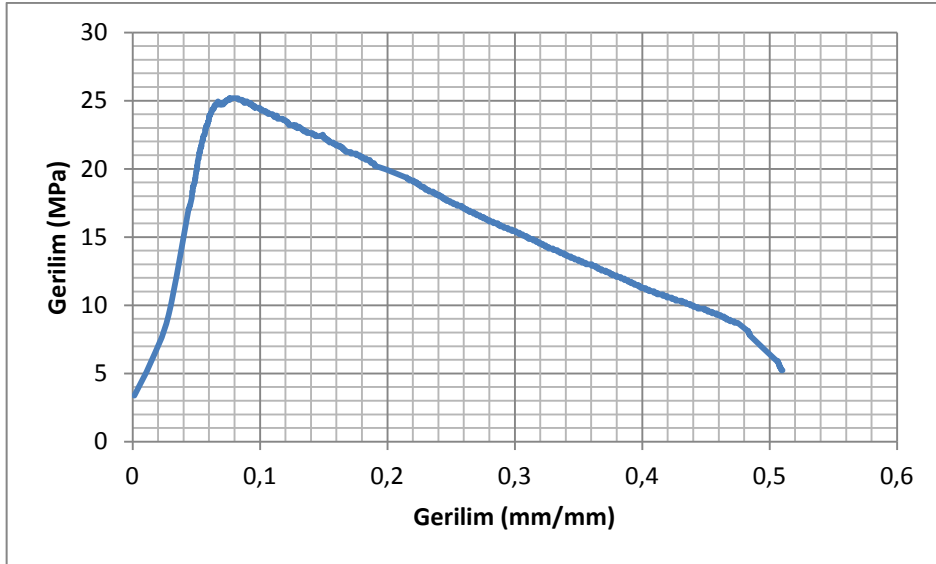
➤ T6 Numune

400 °C’de T6 numuneye uygulanan sıcak çekme deneyi sonucunda, numune sünek bir şekilde kopmuştur. Numunenin sıcak çekme testi sonrasında kopma görüntüsü Şekil 7.46’da verilmiştir.

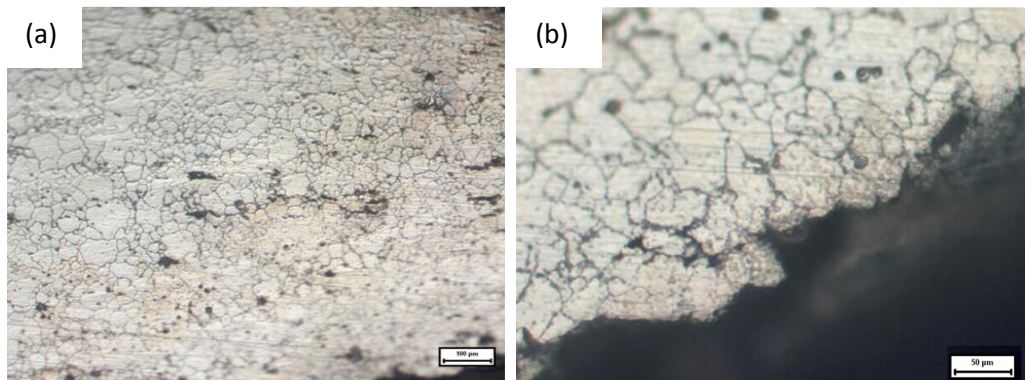


Şekil 7.46 400 °C’de T6 numune sıcak çekme deneyi sonrası görüntüsü

Çekme işlemi sonrasında numune 25 MPa çekme dayanımına ve 22 MPa akma dayanımına sahiptir. Malzemenin kopma dayanımına 5 MPa olmuştur. Sıcak çekme deneyi sonucu elde edilen gerilim-gerinim grafiği Şekil 7.47’de, kopma mikroyapısı Şekil 7.48’de verilmiştir.



Şekil 7.47 400 °C T6 numune gerilim-gerinim grafiği

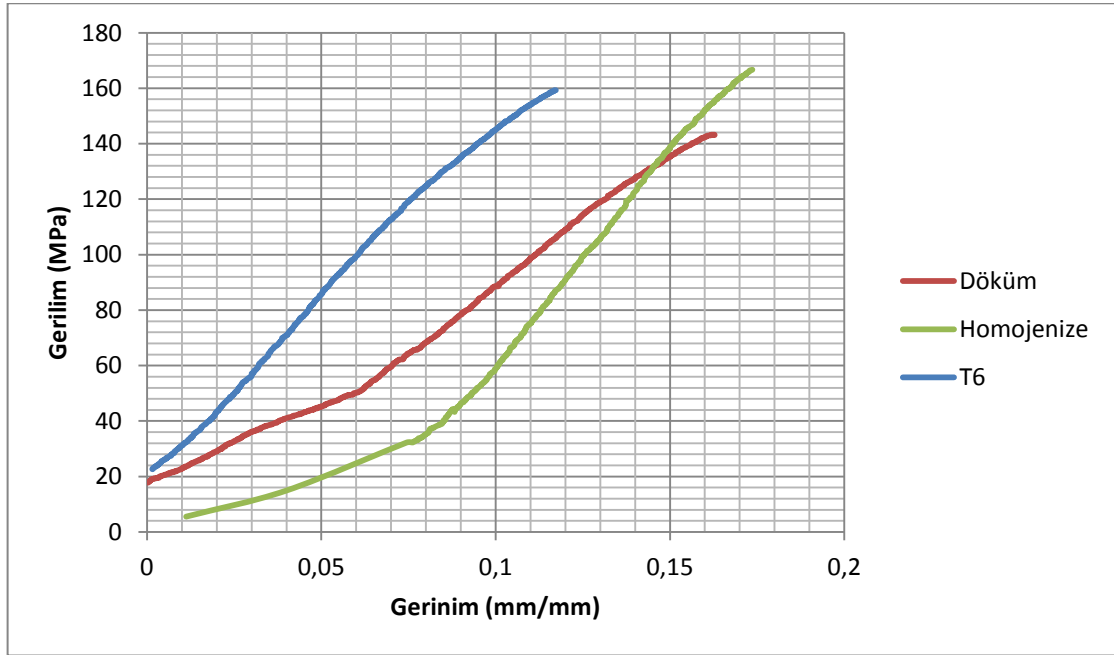


Şekil 7.48 400 °C’de T6 numune kopma bölgesi mikroyapı görüntüleri (a) 100X ve (b) 200X büyütme

7.1.6 Farklı Sıcaklıklarda Numunelere Uygulanan Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

- 25 °C Sıcaklıkta Numunelerin Çekme deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

25 °C’de çekme deneyi sonucunda döküm, homojenize ve T6 numunelerden elde edilen gerilim-gerinim grafikleri Şekil 7.49’da verilmiştir. Bu grafiklere göre en yüksek çekme dayanımı sırasıyla homojenize, T6 ve döküm numuneden elde edilmiştir. 25 °C’de döküm numune diğerlerine göre daha düşük dayanım değerine sahiptir. Ancak gerinim değeri, T6 numuneden 0,06 fazladır ve homojenize numune ile arasında çok az fark vardır. T6 numune, döküm ve homojenize numuneye göre düşük gerinim değerine sahip olup, dayanım değeri döküm numuneden fazladır. Elde edilen veriler doğrultusunda homojenize numune en yüksek dayanım ve gerinim değerine sahip olduğu görülmüştür.

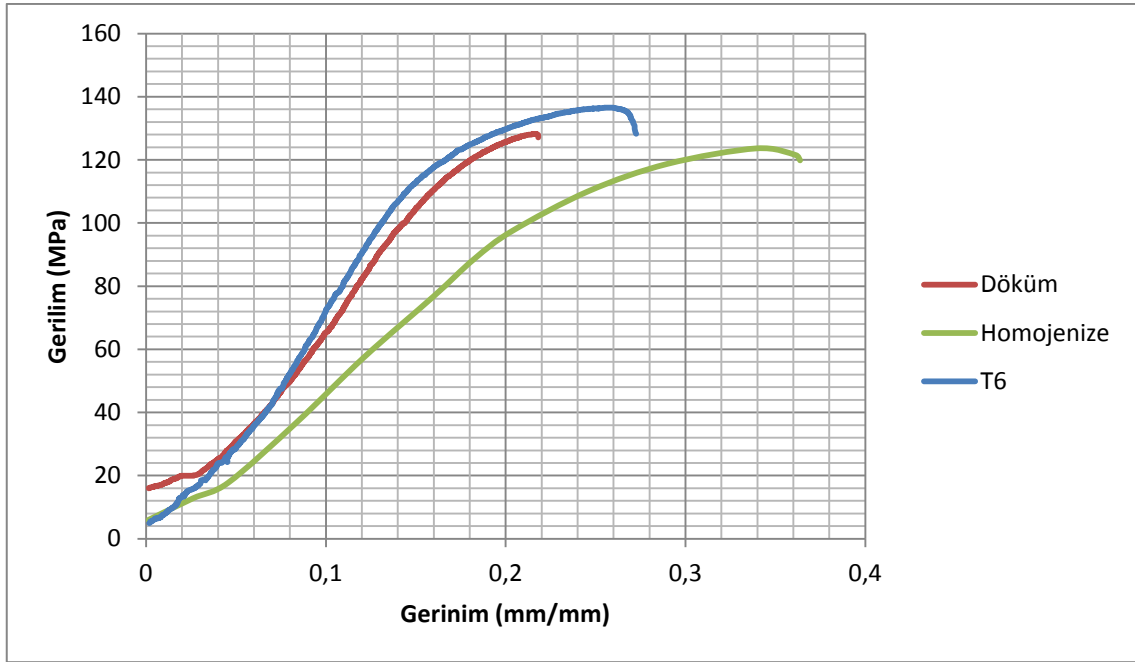


Şekil 7.49 25 °C’de döküm, homojenize ve T6 numunelerinin gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

- 250 °C Sıcaklıkta Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

250 °C’de sıcaklıkta yapılan çekme işlemi sonucunda numunelerin gerilim-gerinim grafikleri Şekil 7.50’de verilmiştir. Sıcak çekme işlemi sonucunda, oda sıcaklığında yapılan çekme işleminden daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Bu sıcaklıkta

malzemenin ergime derecesi ile çekme işlemi sıcaklığı arasındaki oran yani benzeş sıcaklık 0,38'dir. Bu benzeş sıcaklıkta yapılan işleme ılık işlem denilmektedir. Bu sıcaklık aralığında Ding vd. tarafından [51] de yapılan çalışmada magnezyumun mikroyapısında ikizlenmeler ve dinamik toparlanma görülmüştür. Çekme işlemi sonucunda elde edilen grafikler incelendiğinde en yüksek çekme dayanımı sırasıyla T6, döküm ve homojenize numuneden elde edilmiştir. Burada homojenize numune, düşük dayanım değeri vermesine rağmen en fazla uzama gösteren numune olmuştur. Döküm numunenin yapısı dayanım değerinin yüksek olmasını sağlasa da uzamasını kısıtlamıştır. T6 numuneden en fazla dayanım değeri elde edilmiştir. Ancak çökeltiler uzamayı engellemiş ve uzama değerleri homojenize numuneden oldukça düşük değerde kalmıştır.

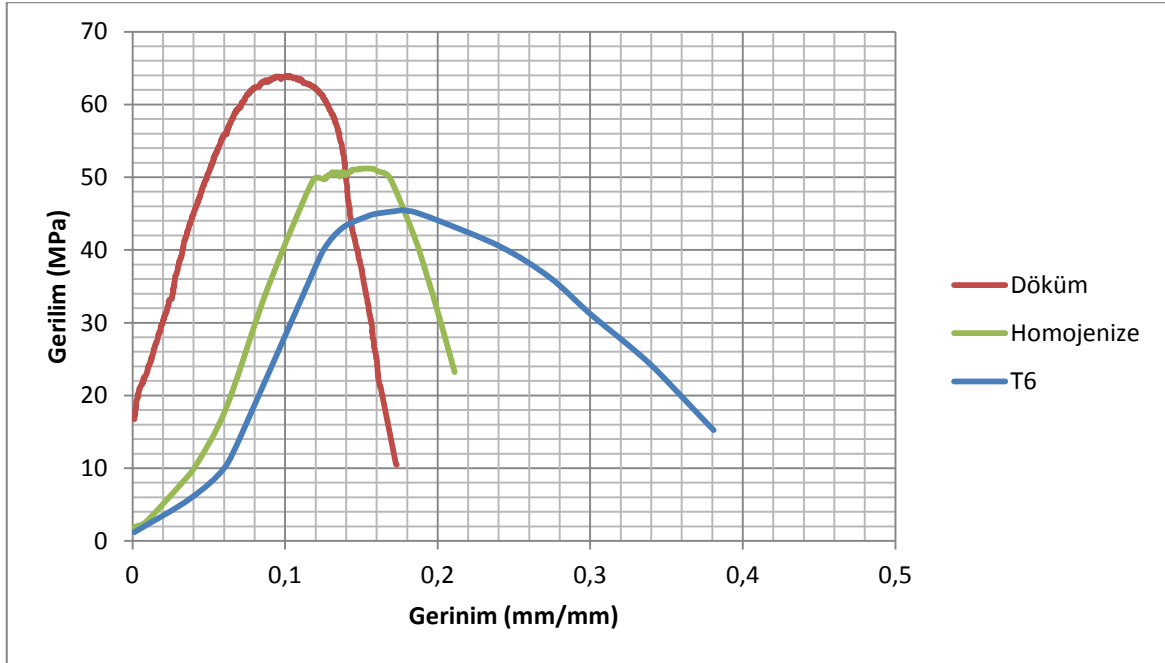


Şekil 7.50 250 °C’de döküm, homojenize ve T6 numunelerinin gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

• 350 °C Sıcaklıkta Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

350 °C’de yapılan çekme deneyi sonucunda numunelerinin gerilim-gerinim grafikleri Şekil 7.51’de verilmiştir. Bu grafiklerde, sıcaklığın etkisiyle dayanım değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu sıcaklıkta malzemenin benzeş sıcaklığı 0,53’tür. Bu işleme, sıcak işlem denilmektedir. Von Mises Kriterlerine göre bu sıcaklıkta magnezyumun deformasyon işlemini sırasında (oda sıcaklığından farklı olarak) kayma sistem sayısı beşe çıkmaktadır

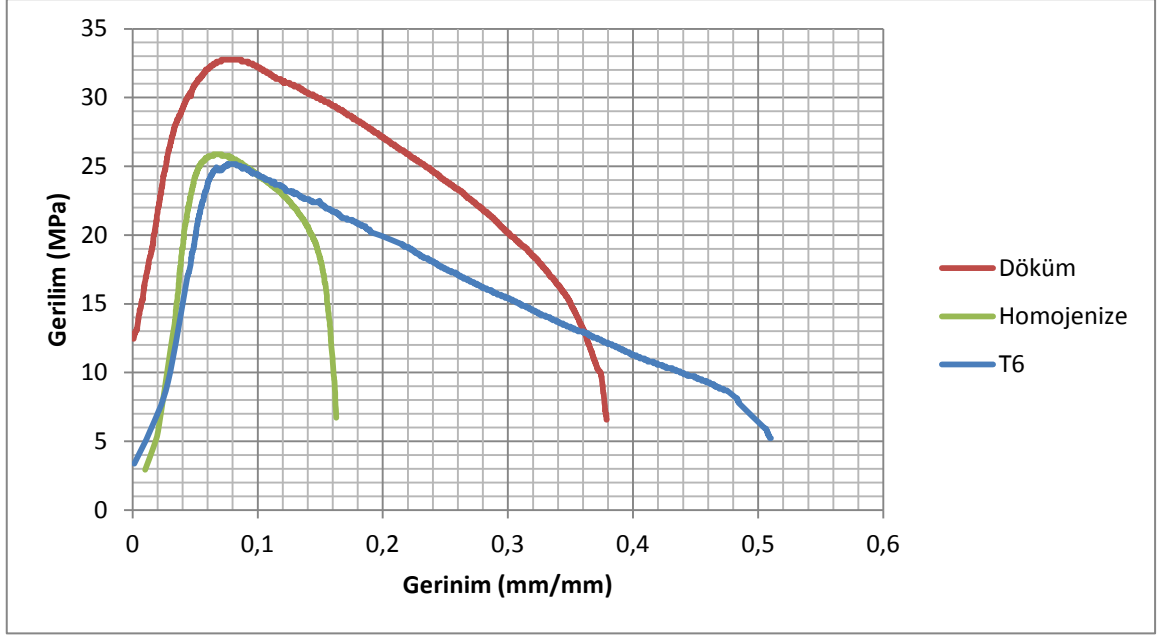
ve akma gerilmesi sıcaklığın artmasıyla azalmaktadır. Buna göre yüksek sıcaklıkta yapılan çekme işlemi de bir sıcak deformasyon yöntemidir. Yapılan sıcak çekme işleminde, en yüksek çekme dayanımı sırasıyla döküm, homojenize ve T6 numuneleridir. Döküm numuneden bu sıcaklıkta en yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir. T6 numuneden ise en yüksek çekme uzaması değerleri edilmiştir.



Şekil 7.51 350 °C’de döküm, homojenize ve T6 numuneleri gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

• 400 °C Sıcaklıkta Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

400 °C’de yapılan çekme numunelerinin gerilim-gerinim grafikleri Şekil 7.52’de gösterilmiştir. Bu sıcaklık değerinde de 350 °C’de yapılan sıcak çekme işleminde olduğu gibi dayanım değerleri düşmektedir. Ancak gerinim değerleri daha da artmaktadır. Bu sıcak deformasyon işleminin benzeş sıcaklığı 0,61’dir. Bu sıcaklıkta da 350 °C’de olduğu gibi Von Mises Kriterlerine göre ilave kayma sistemleri devreye girmekte ve ayrıca dinamik yeniden kristalleşme görülmektedir. 400 °C’de en yüksek dayanım değerleri sırasıyla döküm, homojenize ve T6 numunelerden, gerinim değerlerinde ise en yüksek sırasıyla T6, döküm ve homojenize numunelerden elde edilmiştir. Homojenize numunenin, gerinim değerlerinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. T6 numunenin ise gerinim değerleri diğer numunelerden oldukça fazladır.

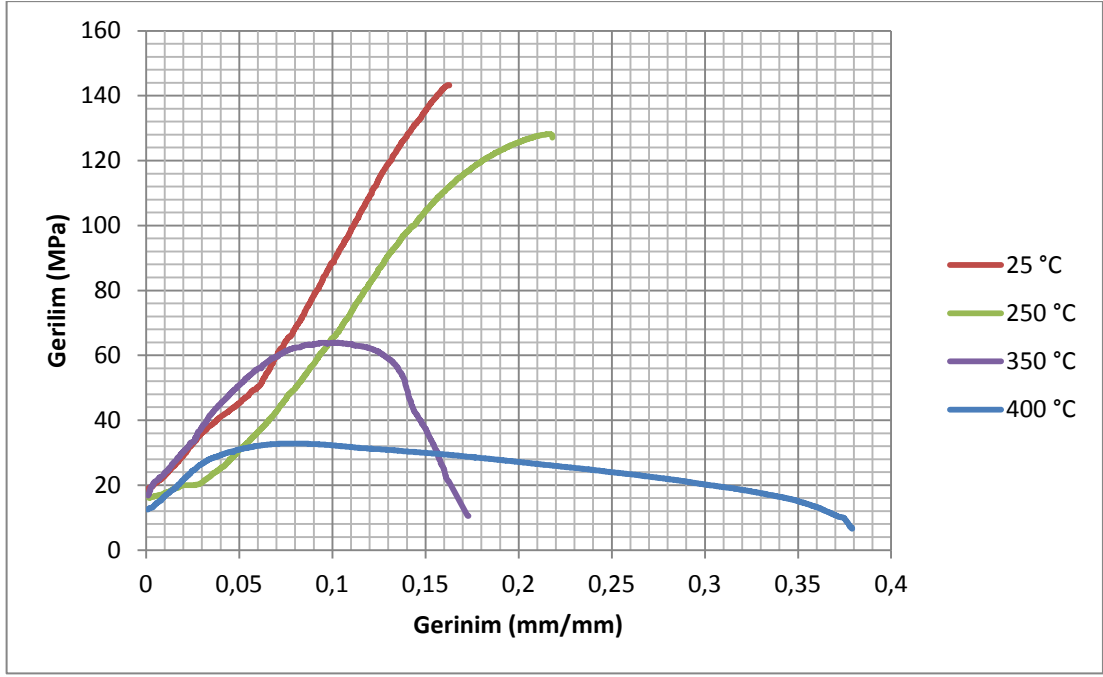


Şekil 7.52 400 °C’de döküm, homojenize ve T6 numuneleri gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

7.1.7 Farklı Sıcaklıklarda Numunelere Uygulanan Çekme Deneyi Sonuçlarının Sıcaklıklara Göre İrdelenmesi

- **Döküm Numunelerin Farklı Sıcaklıklarda Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi**

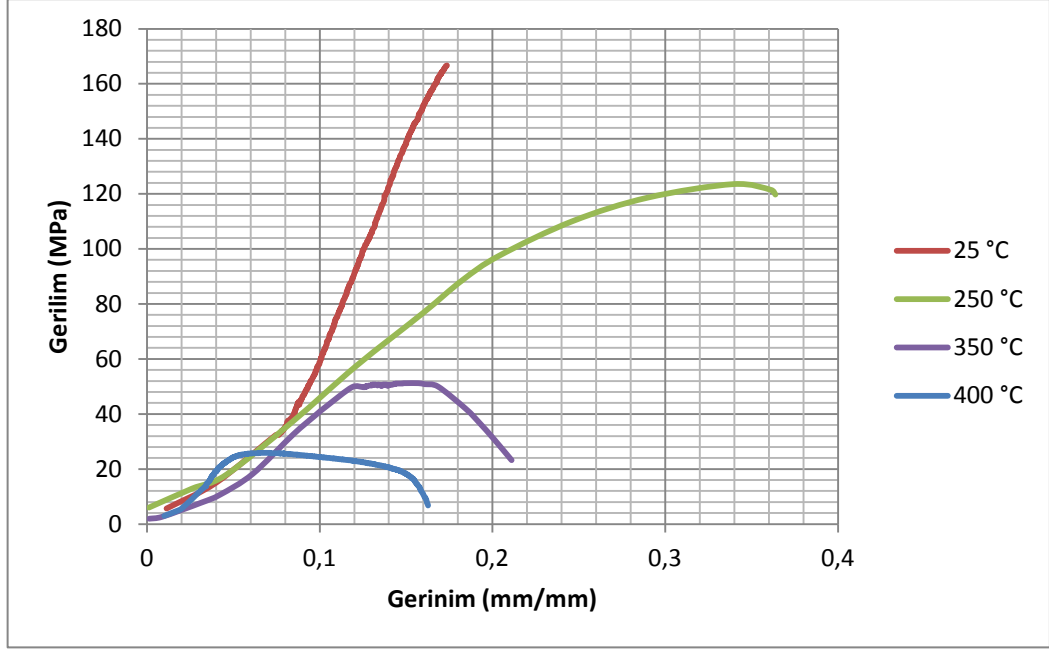
Döküm numunelerin sıcaklıkla birlikte dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. 25 °C sıcaklıkta uzamanın az olduğu ve çekme dayanımının yüksek olduğu görülmektedir. Döküm numunelerin HSP kafes yapısı, faz dağılımı gibi özellikleri dikkate alındığında deformasyon kabiliyetinin düşük sıcaklıklarda iyi olmadığı, ancak sıcaklığın artmasıyla deformasyon kabiliyetinin arttığı görülmektedir. Sıcaklık yükseltildiğinde, akma dayanımları ile malzemelerin çekme dayanımında olduğu gibi azalma gözlemlenmiştir. Burada 250 °C ile 350 °C sıcaklıklarda yapılan çekme işlemi sonuçları karşılaştırıldığında çekme dayanımının 128 MPa’dan 64 MPa’a düştüğü görülmüştür. 400 °C sıcaklıkta ise dayanım değeri 32 MPa’a düşmüştür. Ancak aynı sıcaklıkta gerinim değeri 0,2 artış göstermiştir.



Şekil 7.53 Döküm numunelerin farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

- **Homojenize Numunelerin Farklı Sıcaklıklarda Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi**

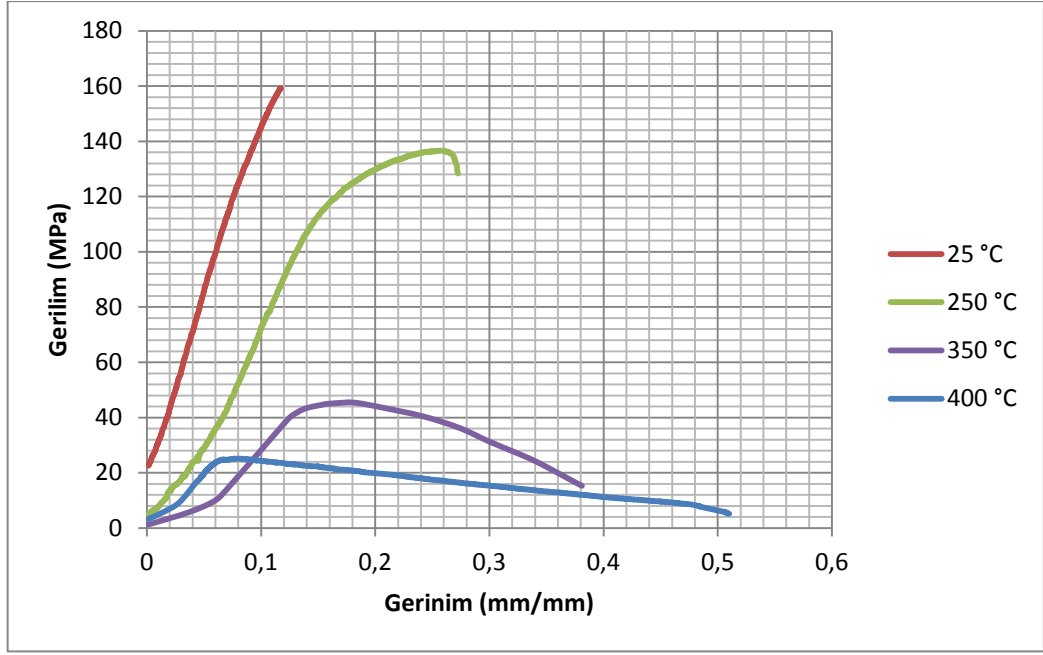
Homojenize numuneler incelendiğinde sıcaklığın etkisiyle çekme dayanımı değerleri azalmıştır. Aynı şekilde homojenize numunelerin gerinim değerleri de sıcaklığın artmasıyla azalmıştır. Homojenize numunenin 25 °C’de çekme dayanımı 168 MPa iken, 400 °C’de çekme dayanımı 26 MPa’dır. Ancak her iki sıcaklığın gerinim değerleri sırasıyla 0,17 ve 0,16’dır. Homojenize numuneler içinde en yüksek gerinim değeri 250 °C’de 0,36 olarak tespit edilmiştir. 350 °C ve 400 °C’de elde edilen gerinim değerleri ise sırasıyla 0,21 ve 0,16’dır ve bu değerler 250 °C’de elde edilen gerinim değerinden oldukça düşüktür.



Şekil 7.54 Homojenize numunelerin farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

- **T6 Numunelerin Farklı Sıcaklıklarda Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi**

Bu numunelerin sıcaklığın etkisiyle dayanım değerlerinin azaldığı ve sıcaklığın etkisiyle gerinim değerlerinin arttığı görülmüştür. Çekme işlemi sırasında elde edilen veriler doğrultusunda, 25 °C’de 160 MPa çekme dayanımı elde edilirken 400 °C’de 24 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Aynı sıcaklıklarda gerinim değerleri ise sırasıyla 0,12 ve 0,51’dir. 400 °C’de T6 numuneye yapılan çekme işlemi sonucunda, en düşük çekme dayanımı ve en yüksek gerinim elde edilmiştir. Bu sonuçlar, T6 numunenin 400 °C’de deformasyon kabiliyetinin diğer numunelere göre oldukça iyi olduğunu göstermiştir.



Şekil 7.55 T6 numunelerinin farklı sıcaklıklarda elde edilen gerilim-gerinim grafiklerinin karşılaştırılması

7.1.8 Çekme Deneyi Sonucunda Elde Edilen Değerler

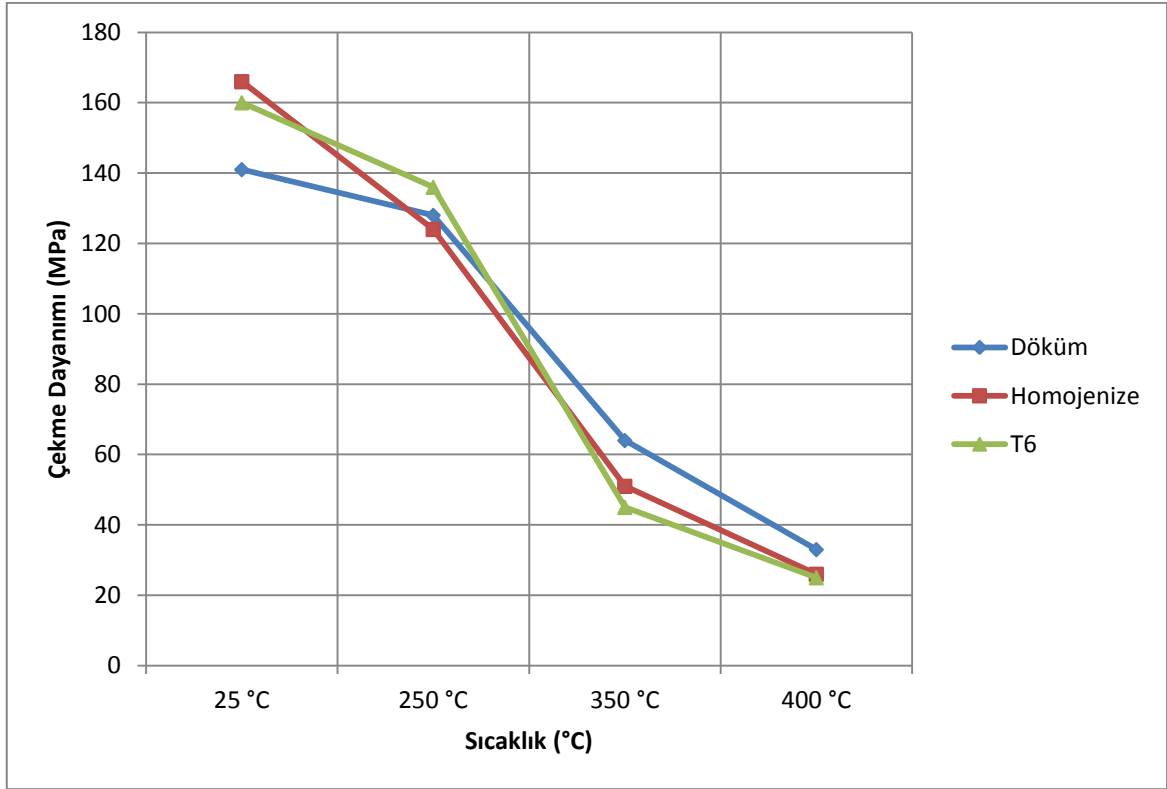
Yapılan çekme işlemleri sonucunda gerilim-gerinim grafiklerinden elde edilen veriler Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7.5 Çekme deneyi sonucunda elde edilen değerler

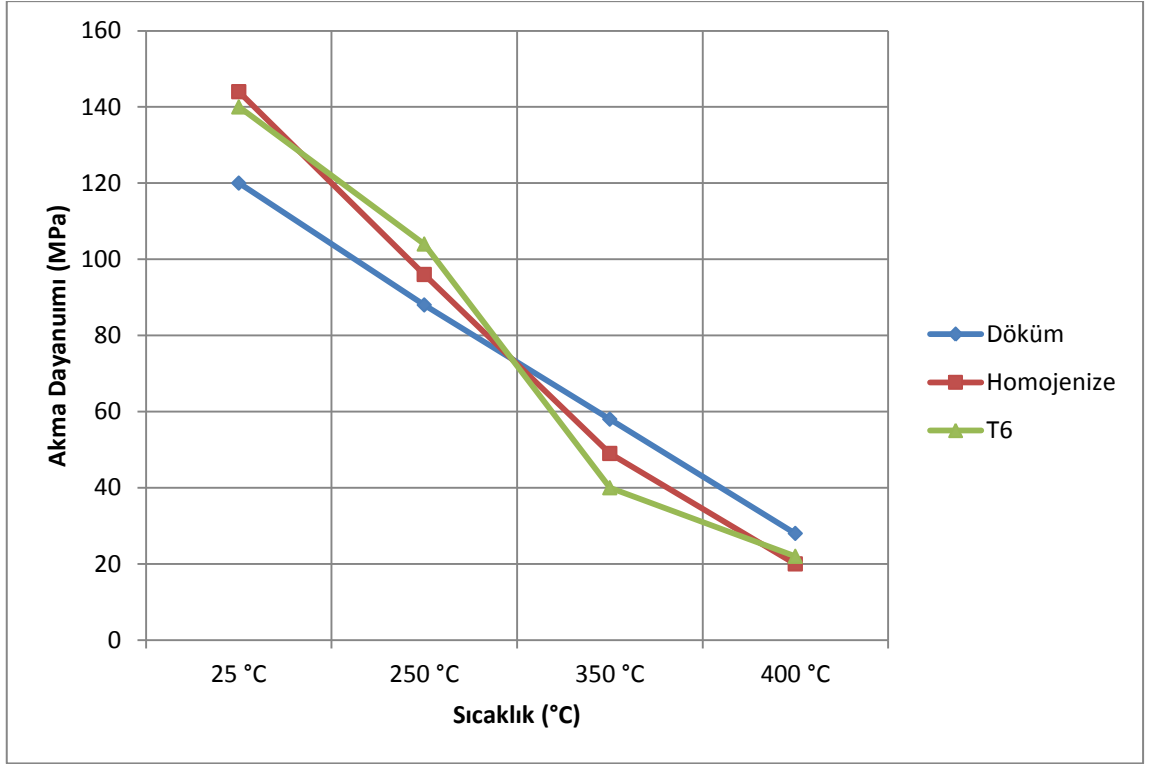
Sıcaklık	Isıl işlem	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzama (%)
25 °C	Döküm	141	120	141	
	Homojenizasyon	166	144	166	
	T6	160	140	160	
250 °C	Döküm	128	88	128	
	Homojenizasyon	124	96	124	
	T6	136	104	136	
350 °C	Döküm	64	58	10	2,5
	Homojenizasyon	51	49	23	
	T6	45	40	15	15
400 °C	Döküm	33	28	6	25
	Homojenizasyon	26	20	6	
	T6	25	22	5	30

Elde edilen veriler doğrultusunda numunelerinin gerilme-gerinim grafiklerinden çekme, akma ve kopma dayanımı elde edilmiştir. Çekme, akma ve kopma dayanımının, sıcaklık

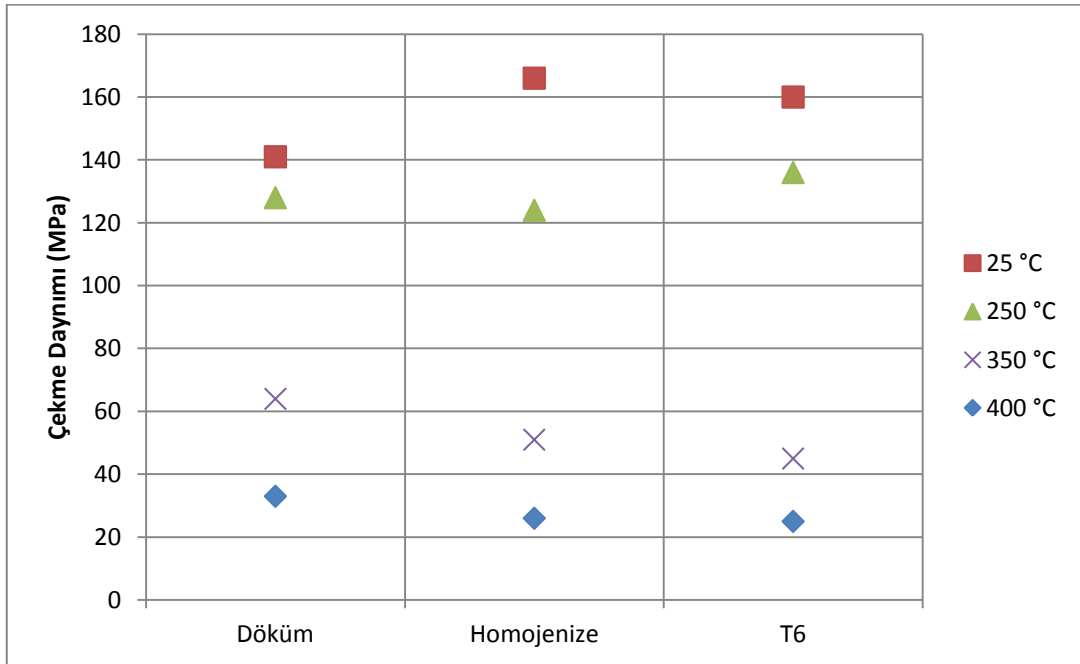
ile ters orantılı hareket etmekte olduğu görülmüştür. En yüksek çekme ve akma dayanımı 25 °C’de homojenize numuneden elde edilmiştir. En düşük çekme dayanımı 400 °C’de T6 numuneden elde edilmiştir. En düşük akma dayanımı 400 °C’de homojenize numuneden elde edilmiştir (Şekil 7.56, Şekil 7.57, Şekil 7.58 ve Şekil 7.59). Kopma dayanımı değerleri 25 °C ve 250 °C’de çekme dayanımı ile aynıdır. Ancak 350 °C ve 400 °C’de çekme, akma ve kopma dayanımı düşmektedir.



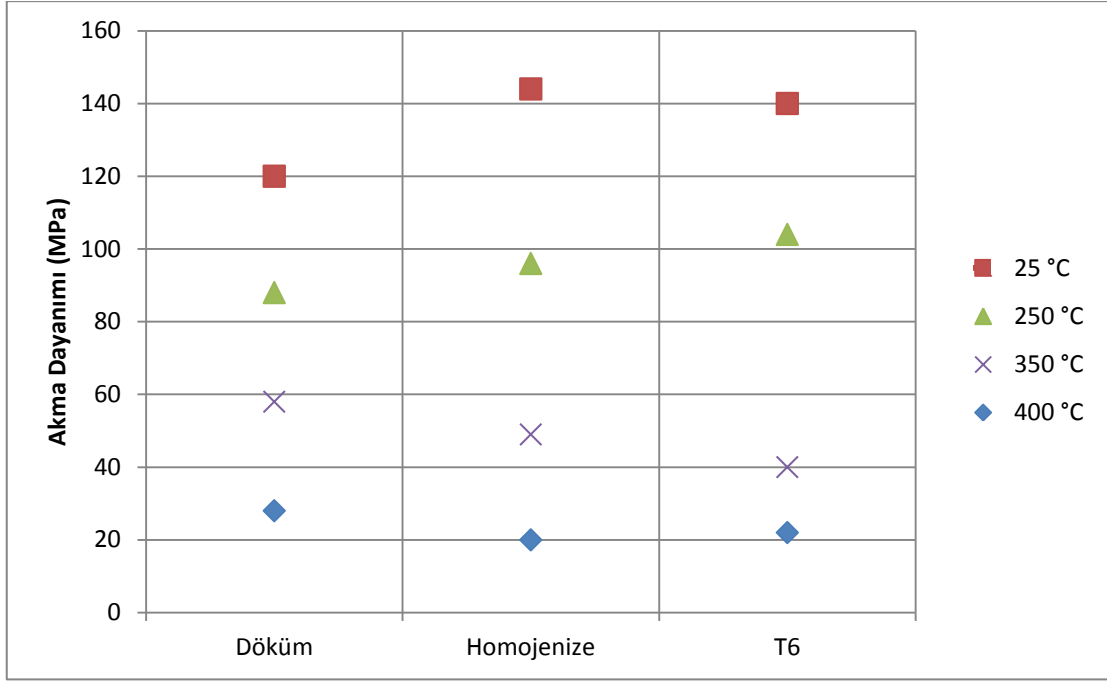
Şekil 7.56 Çekme deneyi sıcaklığına göre çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 7.57 Çekme deneyi sıcaklığına göre akma dayanımlarının karşılaştırılması

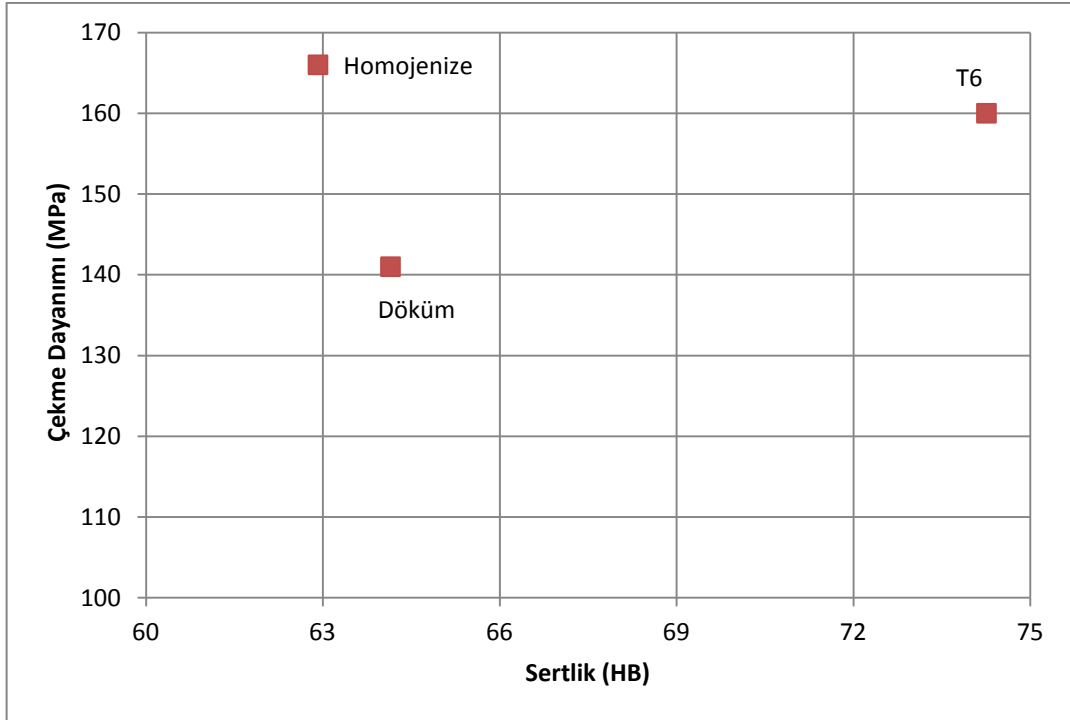


Şekil 7.58 Numune türüne göre çekme dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 7.59 Numune türüne göre akma dayanımlarının karşılaştırılması

Şekil 7.60'da 25 °C'de elde edilen çekme dayanımı ile sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Sertliği diğer numunelere göre daha düşük olan homojenize numunenin, en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 7.60 25 °C'de çekme dayanımı ile sertlik değerlerini karşılaştırılması

Burada döküm numunenin en düşük dayanım değerinde olduğu görülmüştür. Bu durum mikroyapısında bulunan gevrek intermetalik fazdan kaynaklanmıştır. T6 numunenin ise sertlik değerinin diğer numunelerden daha yüksek olduğu ve dayanım değerinin de homojenize numuneye yakın olduğu görülmüştür.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çekme deneyleri sonucunda çekme sıcaklığının ve ısıtılmanın deformasyon kabiliyetini artırdığı görülmüştür. Çekme sıcaklığının artmasıyla, numunelerin dayanım değerleri düşmekte ve gerinim değerleri artmıştır. Çekme sıcaklığı arttıkça döküm, homojenize ve T6 numunelerin gerinim değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek gerinim değerleri T6 numunelerden elde edilmiştir. Buna göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerden, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. 25 °C’ de yapılan çekme işleminde AZ91 alaşımının mekanik özellikleri ve deformasyon kabiliyeti incelenmiştir. Bu sıcaklıkta en yüksek dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Ancak gerinim değerleri çok düşük seviyede kalmıştır. Bu sıcaklıkta AZ91 magnezyum alaşımının döküm, homojenize ve T6 numunelerinin deformasyon kabiliyetinin iyi olmadığı görülmüştür.
2. 250 °C’de yapılan sıcak çekme işleminde dayanım değerlerinin düştüğü görülmüştür. Ancak numunelerin gerinim değerleri, 25 °C’de elde edilen gerinim değerlerinden daha yüksektir. Bu durum sıcaklığın artmasıyla deformasyon kabiliyetinin arttığını göstermiştir.
3. 350 °C’de yapılan sıcak çekme işleminde gerinim değerlerinin (T6 numune dışında) çok fazla değişmediği görülmüştür. Bu sıcaklıkta T6 numunenin gerinim değerinin, homojenize numunenin gerinim değerinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

4. 400 °C’de sıcaklığın etkisiyle dayanım değerlerinin düştüğü ve gerinim değerlerinin (homojenize numune dışında) arttığı görülmüştür. T6 numunenin bu sıcaklıkta göstermiş olduğu uzama diğer numunelerden çok daha fazladır.
5. Döküm numunelerin sıcaklığın artmasıyla gerinim değerlerinin arttığı ve dayanım değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ancak döküm numunelerin uzama değerleri, T6 numunelerin uzama değerlerinden oldukça düşüktür. Döküm numunelerin deformasyon kabiliyeti sıcaklığın yükselmesiyle artmıştır.
6. Homojenize numunelerin dayanım değerleri, sıcaklığın artmasıyla azalmıştır. Gerinim değerlerinin ise, 250 °C’de en yüksek seviyeye çıktığı ancak 350 °C ve 400 °C sıcaklıklarda düşük değerlerde kaldığı görülmüştür.
7. T6 numunelerin dayanım değeri sıcaklık ile azalmış, gerinim değerleri ise sıcaklıkla artış göstermiştir. T6 numunelerden yüksek sıcaklıklarda, döküm ve homojenize numunelerden daha yüksek gerinim değerleri elde edilmiştir.

Deformasyon kabiliyetinin belirlenmesinde deformasyon sıcaklığı çok önemlidir. Bu yüzden deformasyon sıcaklığının belirlenmesi için, farklı sıcaklıklarda sıcak çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan çekme deney sıcaklıklarımız dışında, farklı sıcaklıklarda ve uygulanan sıcaklığın deformasyona etkisinin incelenmesi için farklı tutma sürelerinde sıcak çekme deneyleri yapılabilir. Aynı şekilde deformasyon kabiliyetini belirlenmesinde deformasyon hızı da önemi bir yer tutmaktadır. Yapılan çekme deneyleri, $0,02 \text{ s}^{-1}$ deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Deformasyon hızı değiştirilerek sıcak çekme deneyleri yapılırsa, malzemenin deformasyon kabiliyetindeki değişimler görülebilir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Kainer, K.U., (2003). Magnesium-Alloys and Technology, First Edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
 - [2] Ünal, M., Koç, E., Türen, Y., Gül, F. ve Candan, E., (2009). "AZ91 Magnezyum Alaşımının Döküm ve Mekanik Özelliklerine Silisyum İlavesinin Etkisi", 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
 - [3] Gupta, M. ve Sharon, N.M.L., (2011). Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites, First Edition, John Wiley & Sons Inc., New Jersey.
 - [4] Yang, Z., Li, J.P., Zhang, J.X. , Lorimer, G.W. ve Robson, J., (2008), "Review on Research and Development of Magnesium Alloys", Acta Metallurgica Sinica, 21:313-328.
 - [5] Czerwinski, F., (2008). Magnesium Injection Molding, First Edition, Springer Science LLC., New York.
 - [6] Friedrich, H.E. ve Mordike, B.L., (2006). Magnesium Technology, First Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Würzburg.
 - [7] International Magnesium Association, Years 2010 Primary Magnesium Production, www.intlmag.org/files/yend2010.pdf, 12 Ekim 2012.
 - [8] Mordike, B.L. ve Ebert, T., (2001). "Magnesium Properties-Applications-Potential". Materials Science and Engineering A, 302:37-45.
 - [9] Kaçar, İ. ve Öztürk, F., (2006). "Magnezyum Alaşımlarının Şekillendirilmesinde Son Gelişmeler", TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi, 26-28 Nisan 2006, Balıkesir.
 - [10] Avedesian, M.M. ve Baker, H., (1999). Magnesium and Magnesium Alloys, First Edition, ASM International, Ohio.
 - [11] Kuşdemir, H., (2008). AZ91 Magnezyum Alaşımının Korozyon Davranışları Üzerine İlave Alaşım Elementlerinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
 - [12] Vanlı, A.S., (2007). Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümünde İşlem Faktörlerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [13] Simandl, G.J., Schultes, H., Simandl, J. ve Paradis, S., (2007). "Magnesium-Raw Materials, Metal Extraction and Economics-Global Picture", Proceedings Of The Ninth Biennial SGA Meeting, 20-23 Ağustos 2007, Dublin, 827-830.
- [14] Smith, W.F., (1995). Principles of Material Science And Engineering, Third Edition, Mc Graw-Hill Book Co, New York; Çeviren: Kınıkoğlu, N.G., (2001). Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, İkinci Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [15] Kandemir, K. ve Can, A.Ç., (2003). "Otomotiv Endüstrisi İçin Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Potansiyeli", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9: 37-45.
- [16] Pekgülgüz, M.Ö. ve Kaya, A.A., (2004). "Creep Resistant Magnesium Alloys For Powertrain Applications", 6th International Congress on Magnesium Alloys and Their Applications, 18-20 Kasım 2011, Wolfsburg, 74-93; Derleyen: Kainer, K.U., (2004). Magnesium: Proceedings of the 6th International Conference Magnesium Alloys and Their Applications, First Edition, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [17] Aghion, E., Bronfin, B., Von Buch, F., Schumann, S. ve Friedrich, H., (2003). "Newly Developed Magnesium Alloys for Powertrain Applications", JOM, 55:30-33.
- [18] Cramer, S.D. ve Covino, B.S., (2003), ASM Handbook Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, 13A, Ninth Edition, ASM International, Ohio.
- [19] Banghi, M., Yin-Shun, W., Jiu-ging, L. ve Wei, Z., (2004). "Corrosion Behavior of Magnesium and Magnesium Alloys", Transactions Nonferrous Metals Society China, 14:1-10.
- [20] Kaçar, F. ve Öztürk, İ., (2012). "Magnezyum Alaşımları ve Kullanım Alanlarının İncelenmesi", Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 1-:12-20.
- [21] Proffitt, H., (1998). ASM Handbook Casting, 15, First Edition, ASM International, Ohio.
- [22] Lampman, S., (1996). ASM Handbook Fatigue and Fracture, 19, First Edition, ASM International, Ohio.
- [23] Zorc, T.B. ve Henry, D.S., (1995). ASM Handbook Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 2, First Edition, ASM International, Ohio.
- [24] Mallick, P.K., (2010). Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, First Edition, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 114-144.
- [25] Erçayhan, Y. ve Saklakoğlu, N., (2011). "AZ91 Magnezyum Alaşımının Metalografik ve Mekanik Özelliklerine İndiyum Elementinin Etkisi", CBÜ Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimleri Dergisi, 1:11-23.
- [26] Ünal, M., (2008). Magnezyum Alaşımlarının Döküm Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [27] Hirai, K., Somekawa, H., Takigawa, Y. ve Higashi, K., (2005). "Effects of Ca and Sr Addition on Mechanical Properties of A Cast AZ91 Magnesium Alloy at

- Room and Elevated Temperature”, Materials Science and Engineering A., 403(2005):276-280.
- [28] Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F. ve Wu, S., (1995). Potential Applications of Wrought Magnesium Alloys for Passenger Vehicles, www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/101.pdf, 12 Aralık 2012.
- [29] Campbell, F.C., (2012). Lightweight Materials-Understanding The Basics, First Edition, ASM International, Ohio.
- [30] Ostrovsky, I. ve Henn, Y., (2007). “Present State and Future of Magnesium Application in Aerospace Industry”, International Conference "NEW CHALLENGES IN AERONAUTICS" ASTEC'07, 19-22 Ağustos 2007, Moskova, 1-5.
- [31] Angion, E., Bronfin, B. ve Eliezer, D., (2001). “The Role of the Magnesium Industry in Protecting the Environment”, Journal of Materials Processing Technology, 117: 381-385.
- [32] Blawert, C., Hort, N. ve Kainer, K.U., (2004). “Automotive Applications of Magnesium and Its Alloys” Transactions Indian Institute of Metals, 57:397-408.
- [33] Mert, F. ve Özdemir, A., (2011). "Magnezyum Alaşımlarının Basınçlı Dökümü ve Otomotivdeki Uygulamaları", 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
- [34] International Magnesium Association, Mg Showcase Issue, www.intlmag.org/mgshow.html, 7 Kasım 2012.
- [35] Moravej, M. ve Mantovani, D., (2011). “Biodegradable Metals for Cardiovascular Stent Application: Interests and New Opportunities”, International Journal of Molecular Sciences, 12:4250-4270
- [36] Dahle, A.K., Lee, Y.C., Nave, M.D Schaffer, P.L. ve StJohn D.H., (2001). “Development of the As-Cast Microstructure in Magnesium-Aluminium Alloys”, Journal of Light Metals, 1:61-72.
- [37] Kasukawa, M., Nakagawa, S. ve Miyamoto, K., (2011). “Dissimilar Metal Joining Method for Magnesium Alloy and Steel”, United States Patent, 30 Haziran 2011, Virginia.
- [38] Yılık, M., (2011). Farklı Soğuma Hızları ve Alaşım Elementlerinin AZ91 Magnezyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [39] Yuan, G.Y., Liu, Z.L., Wang, Q.D. ve Ding, W.J., (2002). “Microstructure Refinement of Mg-Al-Zn-Si Alloys”, Materials Letters, 56:53-58.
- [40] Li, J., Xie, J., Jin, J. ve Wang, Z., (2012). “Microstructural Evolution of AZ91 Magnesium Alloy During Extrusion and Heat Treatment”, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 22:1028-1034.
- [41] Kaufman, J.G., (2011). Magnesium Alloy Database, First Edition, Knovel, New York.

- [42] Cai, J., Ma, G.C., Liu, Z., Zhang, H.F. ve Hu, Z.,Q., (2006). "Influence of Rapid Solidification on the Microstructure of AZ91HP Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 422:92-96.
- [43] Dobrzanski, L.A., Tanski, T., Čížek, L. ve Brytan, Z., (2007). "Structure and Properties of Magnesium Cast Alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 192: 567–574.
- [44] Nave, M.D., Dahle, A.K. ve StJohn, D.H., (2000). "Eutectic Growth Morphologies in Magnesium-Aluminium Alloys", 2000 TMS Annual Meeting, 12-16 Mart 2000, Tennessee, 233-242; Derleyen: Kaplan, H.I., Hryn, J.N., Clow, B.B., (2000). *Magnesium Technology Alloys*, First Edition, TMS, Pennsylvania.
- [45] Nave, M.D., Dahle, A.K. ve StJohn, D.H., (2000). "The Role of Zinc in the Eutectic Solidification of Magnesium-Aluminium-Zinc Alloys", 2000 TMS Annual Meeting, 12-16 Mart 2000, Tennessee, 243-252; Derleyen: Kaplan, H.I., Hryn, J.N., Clow, B.B., (2000). *Magnesium Technology 2000*, First Edition, TMS, Pennsylvania.
- [46] Braszczynska-Malik, K.N. ve Zyska, A., (2009). "Influence of Solidification Rate on Microstructure of Gravity Cast AZ91 Magnesium Alloy", *Archives of Foundry Engineering*, 10:23-26.
- [47] Czerwinski, F., (2011). *Magnesium Alloys-Design, Processing and Properties*, First Edition, Intech, Rijeka.
- [48] Zorc, T.B. ve Daquia, J.L., (1991). *ASM Handbook Heat Treating*, 4, First Edition, ASM International, Ohio.
- [49] Ebrahimi, G.R., Maldar, A.R., Ebrahimi, R. ve Davoodi, A., (2010). "The Effect of Homogenization on Microstructure and Hot Ductility Behaviour of AZ91 Magnesium Alloy", *Kovove Materials*, 48:277-284.
- [50] Braszczynska-Malik, K.N., (2009). "Discontinuous and Continuous Precipitation in Magnesium-Aluminium Type Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 477:870-877.
- [51] Ding, H., Liu, L., Kamado, S., Ding, W. ve Kojima, Y., (2008). "Study of The Microstructure, Texture and Tensile Properties of as-Extruded AZ91 Magnesium Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 456:400-406.
- [52] Kiełbus, A., Adamiec, J., Cwajna, J. ve Paśko, J., (2007). "The Influence of Heat Treatment on the Microstructure of GA8 Magnesium Alloy", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 20:131-134.
- [53] Cellotto, S., (2000), "TEM Study of Continuous Precipitation in Mg-9Al-Zn Alloy", *Acta Materialia*, 48:1775-1787.
- [54] Eliezer, D., Kaya, A.A. ve Pekgülyüz, M.Ö., (2005). "High Temperature Deformation Behaviour of Magnesium Alloys", *The Deformation and Processing of Structural Materials*, First Edition, Woodhead Publishing Ltd, London.
- [55] Humphreys, F.J. ve Hatherly, M., (2004). *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, First Edition, Elsevier Ltd., Oxford.

- [56] Staroselsky, A. ve Anand, L., (2003). "A Constitutive Model For HCP Materials Deforming by Slip and Twinning: Application to Magnesium Alloy AZ31B", *International Journal of Plasticity*, 19:1843-1864.
- [57] Sugie, T., Nakagaki, Y., Inuida, M., Kinoshita, K., ve Tanizawa, M., (2011). "Heat-Resistant Magnesium Alloy", United States Patent, 21 Temmuz 2011, Virginia.
- [58] Yıldırım, S., (2001). Saf Bakırın Yüksek Sıcaklıkta Mekanik Davranışı: Dinamik Yeniden Kristalleşme ve Dinamik Tane Büyümesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [59] Verlinden, B., Driver, J., Samajder, I. ve Doherty, R.D., (2007), *Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials*, 11, First Edition, Elsevier Ltd., Oxford.
- [60] Koike, J., Ohyama, Y., Kobayashi, T., Suzuki, M. ve Maruyama, K., (2003). "Grain-Boundary Sliding in AZ31 Magnesium Alloys at Room Temperatures to 523 K", *Materials Transactions*, 44:445-451.
- [61] Ebrahimi, G.R., Maldar, A.R., Monajati, H., ve Haghshenas, M., (2012). "Hot Deformation Behavior of AZ91 Magnesium Alloy in Temperature Ranging from 350 °C to 425 °C", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22:2066-2071.
- [62] Pilehva, F., Zarei-Hanzaki, A. ve Fatemi-Varzaneh, S.M., (2012). "The Influence of Initial Microstructure and Temperature on the Deformation Behavior of AZ91 Magnesium Alloy", *Materials and Design*, 42(2012):411–417.
- [63] ASTM B661-12, (2012), *Standart Practice for Heat Treatment of Magnesium Alloys*, ASTM, Philadelphia.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Oğuz KARAAHMET
Doğum Tarihi ve Yeri : 21.05.1987 / Giresun
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : oguz_karaahmet@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	İhsan Mermerci Lisesi	2004