

**METALLER ARASI BİLEŞİK Mg_2Si TAKVİYELİ
AZ91/ Mg_2Si KOMPOZİT MALZEMENİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Ayhan DEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2006
ANKARA**

Ayhan DEMİR tarafından hazırlanan METALLER ARASI BİLEŞİK Mg_2Si TAKVİYELİ AZ91/ Mg_2Si KOMPOZİT MALZEMENİN GELİŞTİRİLMESİ adlı tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr.Burhanettin İNEM

Tez yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr.Bahtiyar SALAMOV

Üye : Prof.Dr.Burhanettin İNEM

Üye : Doç.Dr.Mehmet ERDOĞAN

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

**METALLER ARASI BİLEŞİK Mg₂Si TAKVİYELİ
AZ91/Mg₂Si KOMPOZİT MALZEMENİN GELİŞTİRİLMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Ayhan DEMİR

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ocak 2006

ÖZET

Bu çalışmada, AZ91/Mg₂Si in-situ kompozit malzemede Mg₂Si fazının modifikasyonu üzerine kalsiyumun ve farklı üretim şartlarının etkisi araştırılmıştır. Düşük yoğunluğa, yüksek sertlik ve elastik modülüne sahip ince ve poligonal Mg₂Si fazı kompozit malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmektedir. Bu nedenle Mg₂Si fazının morfolojisi, kalsiyum ilavesi ve/veya katılma davranışının kontrolü ile Çin harfi şeklinden küçük poligonal şekle dönüştürülmektedir. In-situ AZ91/Mg₂Si kompozit malzeme sıvı karıştırma yöntemi ile üretilmiştir. Alaşım sıvısı hazırlandıktan sonra kalsiyum ve daha sonra silisyum sıvıya 670 °C’de ilave edilmiş ve 720 °C’de döküm tamamlanmıştır. Numunelerden bazıları, mikroyapı ve Mg₂Si fazının inceltmesi amacıyla farklı şartlarda üretilmiştir. Mikroyapı numuneleri %2’lik nital dağlayıcısı ile dağlanmıştır. Mekanik test için ise test çubukları ve sertlik numuneleri hazırlanmıştır. Sonuç olarak Mg₂Si fazı nispeten poligonal şekle dönüştürülmüş ve böylelikle kompozitin mekanik özellikleri geliştirilmiştir.

Bilim Kodu : 710
Anahtar Kelimeler : In-situ, Mg₂Si, Kompozit, Mikroyapı ve Mekanik Özellikler
Sayfa Adedi : 90
Tez Yöneticisi : Prof.Dr.Burhanettin İNEM

**THE DEVELOPMENT OF INTER-METALIC COMPOUND Mg_2Si
REINFORCED AZ91/ Mg_2Si COMPOSITE MATERIAL**

(M.Sc. Thesis)

Ayhan DEMIR

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2006

ABSTRACT

In this study, effect of calcium and different production conditions on modification of Mg_2Si in AZ91/ Mg_2Si in-situ magnesium composite was investigated. Fine and polygonal Mg_2Si having low density, high hardness and elastic modulus improves mechanical properties of the composites. Therefore the morphology of Mg_2Si has been changed from the Chinese script to small polyagonal shape through addition of calcium and/or controlling the solidification behaviour. In-situ AZ91/ Mg_2Si composite was produced by melt stirring method. After preparation of the alloy, calcium and then silicon were introduced into the melt at 670 °C and then cast into a special die at 720 °C. Some of the specimens were produced in different production conditions to modify the microstructure and Mg_2Si . Specimens for optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) were etched with a solution of 2 vol. % nitric acid + ethyl alcohol. Furthermore tensile testing bars and hardness specimens were prepared for mechanical tests. As a result, Mg_2Si was changed to relatively polygonal type, and thus mechanical properties of composite was improved.

Sicence Code	: 710
Key Words	: In-situ, Mg_2Si, Composite, Microstructure and Mechanical Properties
Page number	: 90
Adviser	: Prof.Dr.Burhanettin INEM

TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları boyunca hiç bir şekilde yardımlarını esirgemeyen değerli Hocam Prof. Dr. Burhanettin İNEM'e, araştırma ve çalışmalarımda destek olan G.Ü. Metal Eğitimi Anabilim Dalından Yüksek Lisans öğrencisi Gökhan YILMAZ'a, Arş.Gör. Volkan KILIÇLI'ya, Arş.Gör. Melika CERRAH'a ve bölüm teknisyeni İsmail ESER'e, çekme numune hazırlığındaki katkılarından dolayı G.Ü. Makine Eğitimi Bölümünden. Arş.Gör.Gökhan SUR'a, çekme test deneyleri için ALFA döküme, G.Ü. Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü Öğretim üyesi Doç.Dr.Metin Gürü'ye ve Ostim KOSGEB'e, Elektron Mikroskop çalışmaları için Kırıkkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Anabilim Dalı Öğretim üyesi Yrd.Doç.Dr.Selçuk AKTÜRK'e, X-Işınları deneyleri için Türkiye Atom ve Enerji Kurumuna (TAEK), malzeme temininde yardımcı olan NA-KA Katodik Koruma Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. genel müdürü Naci KALYONCU'ya ve G.Ü.Gazi Eğitim Fakültesi Kimya Bölümü öğretim üyelerinden Yrd.Doç.Dr.Yüksel ÖZKAHRAMAN (ALTUN)'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
2.1. Fiziksel Özellikleri	3
2.2. Mekanik Özellikleri.....	6
2.3. Kullanım Alanları	7
2.4. Üretimi.....	9
2.4.1. Termal (Isıl) üretim yöntemi.....	9
2.4.2. Elektrolitik üretim yöntemi	10
2.5. Reaktivitesi	11
2.5.1. Azot	11
2.5.2. Oksijen	11
2.5.3. Silisyum oksit.....	12
2.5.4. Su	12
2.5.5. Demir oksit.....	12
2.6. Ergitme ve Döküm İşlemleri	13
2.6.1. Ergitme.....	14

	Sayfa
2.6.2. Temizleme.....	15
2.6.3. Tane inceltme	17
2.6.4. Döküm.....	19
3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	21
3.1. Genel Özellikleri	21
3.2. Magnezyuma Alaşım Elementlerinin Etkisi.....	24
3.3. Yaşlandırma.....	26
3.4. AZ91 Alaşımları ve Mg-Al sistemi	28
4. MAGNEZYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER.....	35
4.1. Üretim Yöntemleri.....	35
4.2. Takviye Elemanlarının Rolü ve Türleri.....	36
4.3. Matris/Takviye Arayüzey Reaksiyonları.....	36
4.4. Mg/SiC Kompozit Sistem.....	38
4.5. Mg/Karbon ve Mg/Grafit Kompozit Sistem.....	40
4.6. Mg/TiC Kompozit Sistem	42
4.7. Mg/B ₄ C Kompozit Sistem.....	44
4.8. Mg/Al ₁₈ B ₄ O ₃₃ Kompozit Sistem	45
4.9. Mg/Al ₂ O ₃ Kompozit Sistem	47
5. Mg/Mg ₂ Si ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER	49
5.1. Metaller Arası Bileşik Mg ₂ Si Fazı	49
5.2. Poligonal Mg ₂ Si Şekli Oluşturmada Bazı Elementlerin Etkisi	52
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
6.1. Alaşım Hazırlığı	57

Sayfa

6.2. Ergitme ve Ergitme Sonrası İşlemler	58
6.2.1. İşlem uygulanmış döküm parçalar	60
6.3. Karakterizasyon İçin Numune Hazırlama	60
6.3.1. Mikroskopik inceleme numunesi	60
6.3.2. Sertlik testi numunesi	61
6.3.3. Çekme testi numunesi	61
6.3.4. X-Işını ve EDX analizi numunesi	62
6.4. Takviye ve Tane Boyutu Hesabı	63
7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	64
7.1. Mikroyapı Sonuçları ve Tartışma	64
7.1.1. AZ91 numunesi	64
7.1.2. AZ91+1Si numunesi	64
7.1.3. AZ91+1Si+0,3Ca numunesi	66
7.1.4. Isıl işlem görmüş AZ91+1Si+0,3Ca numunesi	68
7.1.5. Yeniden ergitilmiş AZ91+1Si+0,3Ca numunesi	70
7.1.6. Suda soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesi	72
7.2. X-Işını Analizi Sonuçları ve Tartışma	76
7.3. Tane ve Mg ₂ Si boyutu Sonuçları ve Tartışma	76
7.4. Sertlik Deneyi Sonuçları ve Tartışma	78
7.5. Çekme Testi Sonuçları ve Tartışma	81
7.6. Genel Sonuçlar	84
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Saf magnezyumun özellikleri	4
Çizelge 2.2. 1998’de ki magnezyum tüketimi	7
Çizelge 2.3. Ergitme ve temizlemede kullanılan kimyasalların kompozisyonu	13
Çizelge 3.1. Önemli magnezyum alaşımlarından bazıları	22
Çizelge 3.2. Magnezyum alaşımlarında bazı üretim yöntemleri ve özellikleri.....	23
Çizelge 3.3. Magnezyuma bazı alaşım elementlerinin genel etkisi	25
Çizelge 3.4. Magnezyum alaşımlarında muhtemel çökelek oluşumu	27
Çizelge 3.5. ASTM AZ91 alaşımları ve kompozisyonu	29
Çizelge 3.6. ASTM AZ91 alaşımlarının mekanik özellikleri	29
Çizelge 4.1. SiC _p takviyeli AZ91 alaşımının mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 4.2. Ortam sıcaklığında, dökülmüş halde ki AZ91 ve AZ91- %10 TiC kompozitin mekanik özellikleri.....	44
Çizelge 4.3. AZ91 alaşımı ile AZ91/Al ₁₈ B ₄ O ₃₃ kompozitlerin ortalama çekme özellikleri	47
Çizelge 4.4. %1,1 Al ₂ O ₃ takviyeli Mg/Al ₂ O ₃ kompozitinin mekanik özellikleri	48
Çizelge 5.1. Sıkıştırılmalı döküm Mg-%5Al-%1Zn-%0,7Si-X alaşımının çekme özellikleri	54
Çizelge 5.2. Mg-6Zn-1Si-xCa alaşımlarının mekanik özellikleri.....	55
Çizelge 5.3. Mg ₂ Si ve CaSi ₂ fazları arasındaki düzlemsel uyumsuzluk (δ) değerleri.....	55
Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve üretim şartları	57
Çizelge 6.2. Ergitmede kullanılan Magrex 60 yüzey örtücüsünün kimyasal bileşimi	59
Çizelge 7.1. Deneysel çalışmalarda elde edilen tane ve Mg ₂ Si boyutu	78

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.2. Deneysel çalışmalarda elde edilen Brinell sertlik ölçüm sonuçları	79
Çizelge 7.3. Bazı çalışmalardan elde edilmiş farklı takviye elemanı bulunduran AZ91 alaşımı esaslı kompozitlerin sertlik değerleri.....	81
Çizelge 7.4. Deneysel çalışmalardan elde edilen çekme testi sonuçları	82

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 20. yüzyıl boyunca yoğunluğa karşı hafif ve ağır malzemelerin her on yıldaki üretimi için ortalama büyüme üssü.....	5
Şekil 2.2. Magnezyum için elektrolitik üretim işlemi akış şeması	10
Şekil 2.3. Norsk Hydro temizleme fırını	16
Şekil 2.4. Farklı kaynaklardan elde edilen demirin magnezyumda çözünübilirliği	16
Şekil 3.1. Bazı magnezyum AZ alaşım grubunun yaşlandırma özellikleri.....	26
Şekil 3.2. Magnezyum-alüminyum faz diyagramı	30
Şekil 3.3. Sürekli kalıba dökülmüş ötektik üstü Mg-Al alaşımlarında alüminyum ve çinko miktarıyla soğuma hızının ötektik morfolojide etkisi	33
Şekil 3.4. Mg-Al-Zn basınçlı metal kalıba döküm alaşımlarının muhtemel bileşim değerleri.....	34
Şekil 5.1. Magnezyum-silisyum denge diyagramı	51
Şekil 5.2. Silisyum ve Mg_2Si 'nin kafes yapısı.....	52
Şekil 5.3. Farklı çalışmalardan elde edilmiş kalsiyum-silisyum denge diyagramı.....	56
Şekil 6.1. Ergitmede pota ve katılaştırılmada ise kalıp amaçlı kullanılan çelik profillerin şematik gösterimi	60
Şekil 6.2. Çekme test çubuğunu elde etmede kullanılan yöntem.....	62
Şekil 6.3. Çekme test çubuğu ebatları (mm) (ASTM E 8M).	62
Şekil 7.1. AZ91+1Si+0,3Ca alaşımından alınmış X-Işını analizi.....	76
Şekil 7.2. 62,5 Kg yük uygulanan numunelerin sertlik grafiği	80
Şekil 7.3. 187,5 Kg yük uygulanan numunelerin sertlik grafiği	80
Şekil 7.4. Hızlı soğutulmuş kompozit malzemenin gerilme/uzama eğrisi.....	83

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. 730°C sıcaklıktan aynı soğuma şartları altında katılaştırılmış magnezyumun tane yapısı.....	18
Resim 3.1. %2 nital ile dağlanmış AZ91 alaşımının mikroyapısı	28
Resim 3.2. Artan alüminyum miktarına göre Mg-Al sisteminde dentritik yapının oluşumu	31
Resim 3.3. Ötektik üstü Mg-Al alaşımlarında ötektik morfoloji	33
Resim 4.1. SiC _p takviyeli AZ91 alaşımının SEM mikroyapısı.....	39
Resim 4.2. P100S Karbon fiber takviyeli AZ91D alaşımının parlatılıp dağlanarak elde edilmiş SEM görüntüsü	41
Resim 4.3. AZ91/ % 10 TiC döküm kompozitin SEM mikroyapısı.....	43
Resim 4.4. T/M yoluyla üretilen B ₄ C/Mg kompozitlerin SEM mikroyapıları	45
Resim 4.5. Sıkıştırılmalı döküm MB15/Al ₁₈ B ₄ O _{33 w} kompozitin optik mikroskop görüntüsü.....	46
Resim 4.6. %20 Al ₂ O ₃ kısa fiber takviyeli sıkıştırılmalı döküm ile üretilmiş AZ91/Al ₂ O ₃ kompozitin TEM mikroyapısı	48
Resim 5.1. In-situ AZ91/Mg ₂ Si kompozit malzemede Çin harfi şeklindeki Mg ₂ Si fazının optik mikroskop görüntüsü	50
Resim 5.2. Mg-%5Al-%1Zn-%0,7Si alaşımının optik mikroskop görüntüsü (%0,03 P (a) ve %0,2 Ca (b) ilave edilmiş)	53
Resim 5.3. Mg-%5Al-%1Zn-%0,7Si alaşımının SEM mikroyapısı (%0,03 P (a) ve %0,2 Ca (b) ilave edilmiş)	53
Resim 5.4. Ca ve Sb ihtiva eden magnezyum alaşımları. (a) Mg-6Zn-1Si-0,5 Ca ve (b) Mg-5Al-1Zn-1Si-0,5 Sb alaşımlarının optik mikroyapıları	54
Resim 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımlarının ön hazırlık aşaması	58
Resim 6.2. Deneylerde kullanılan ergitme ocağı.	59
Resim 7.1. Tipik AZ91'in X50 büyütmede ki mikroyapısı.	64

Resim	Sayfa
Resim 7.2. AZ91+1Si numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde ki mikroyapısı (X100(a, b) ve X400(c) büyütme)	65
Resim 7.3. AZ91+1Si numunesinin SEM görüntüsü.....	66
Resim 7.4. AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde ki mikroyapısı (X50(a), X100(b) ve X400(c) büyütme)	67
Resim 7.5. Isıl işlemlili AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde ki mikroyapısı (X50(a), X100(b) ve X400(c) büyütme)	69
Resim 7.6. Isıl işlemlili AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin SEM mikroyapısı.....	70
Resim 7.7. Yeniden ergitilmiş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde ki mikroyapısı (X50(a), X100(b) ve X400(c) büyütme)...	71
Resim 7.8. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütme ölçeklerinde ki mikroyapısı (X100(a) ve X400(b) büyütme)	72
Resim 7.9. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesi farklı büyütme ölçeklerindeki mikroyapısı (X100(a) ve X400(b) büyütme) (dağlanmamış)	73
Resim 7.10. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin SEM görüntüsü ve işaretli bölgeden bulunan Mg ₂ Si fazının EDX analiz sonucu	74
Resim 7.11. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin SEM görüntüsü ve işaretli bölgeden bulunan Mg ₁₇ Al ₁₂ ötektikinin EDX analiz sonucu	75
Resim 7.12. Mg ₂ Si boyutu hesaplamalarında kullanılan bazı mikroyapı resimleri (1(a), 2(b), 3(c), 4(d), 5(e) ve 6(f) no'lu numuneler).....	77

1. GİRİŞ

Magnezyum ve alaşımları $1,8 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğu ile hafif metal grubunun (Al, Mg, Ti) en düşük yoğunluğa sahip endüstriyel malzemesidir. Çelik ve alüminyum ile karşılaştırıldığında yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olan bu malzeme, otomotiv ve uzay endüstrisi gibi sektörlerde, ayrıca makinelerde ve el takımlarının yapımında tercih edilen alternatif malzeme durumundadır ve kullanım alanları giderek artmaktadır.

Magnezyum, nispeten düşük ergime sıcaklığına sahiptir ve bu nedenle yüksek sıcaklıklarda kullanımı oldukça zordur. Oda sıcaklığının $100-150^\circ\text{C}$ üstünde sürünme direnci düşer. Ayrıca oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda oksitlenme problemi mevcuttur ve oluşan gözenekli oksit tabakası oksitlenmeyi giderek hızlandırmaktadır. Ancak, bu problemlerin giderilmesi amacıyla geliştirilen çeşitli magnezyum ürünleri ile korozyon ve sürünme problemleri nispeten azaltılarak oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikler geliştirilmiştir. Günümüzde, sağladığı birçok avantaj ile kullanım alanları giderek artan magnezyum esaslı kompozit malzeme ürünleri, ticari saflıktaki magnezyum ve magnezyum alaşımlarından daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda ($\sim 200^\circ\text{C}$) daha kullanışlıdır. Bu nedenle magnezyum esaslı kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanım alanı genişlemektedir.

Takviye malzemesinin reaksiyon yoluyla oluştuğu (in-situ) magnezyum esaslı kompozitler, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve kararlı takviye/matris arayüzey özellikleri nedeniyle yüksek avantajlar sağlamaktadır. Bu kompozit malzemelerden birisi olan AZ91(%9Al-%1Zn)/ Mg_2Si kompozit malzemede Mg_2Si fazı istenen şekle ve boyutlara getirildiğinde ana malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmektedir. Normal şartlarda Mg_2Si fazı Çin harfi şekline benzer bir yapıdadır ve sahip olduğu bu yapı nedeniyle kompozitin kırılganlığı artırmaktadır. Bu nedenle Mg_2Si fazı kalsiyum, fosfor ve antimon gibi ilaveler ile modife edilerek inceltilmektedir. Böylelikle daha küçük ve poligonal şekillere dönüşen Mg_2Si fazları kompozit malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmektedir.

Bu çalışmada, Mg_2Si fazının şekli Çin harfinden poligonal küçük parçacıklara dönüştürülerek in-situ AZ91/ Mg_2Si kompozitinde mekanik özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Elektrikli ergitme ocağında bir çelik pota (aynı zamanda kalıp olarak ta kullanılmıştır) içerisinde AZ91 ana malzeme sıvısı elde edildikten sonra sıvıya %0,3 kalsiyum ve %1 silisyum ilave edilmiş ve bir süre karıştırma yapılmıştır. Uygulanacak işleme göre sıvı ya katılaştırma sırasında ya da katılaştırma sonrası farklı işlemlere tabii tutulmuştur. Isıl işlem, yeniden ergitme ve hızlı soğutma uygulanmış döküm parçalar işlemleri alaşımlar olarak üretilmiştir. Bunun yanında, işlemleri alaşımlarla karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla işlemsiz AZ91, AZ91+1Si ve AZ91+1Si+0,3Ca alaşımları üretilmiştir.

2. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

Son yıllarda, performans gelişiminde ağırlık tasarrufunun kritik olduğu mühendislik uygulamalarında hafif malzeme kullanımının artması ile birlikte otomotiv, uzay ve makine gibi üretim sektörlerinin magnezyum ve alaşımlarına olan ilgisi artmıştır. Diğer metaller (Al, Ti, Zn, Fe) ile karşılaştırıldığında oldukça düşük yoğunluğa sahip saf magnezyum 1.74 g/cm^3 yoğunluğu ile yaklaşık olarak alüminyum alaşımlarından %35, titanyum alaşımlarından ise %65 daha hafiftir. Oda sıcaklığında yüksek dayanım-yoğunluk ve yüksek elastik modülü-yoğunluk oranı ile magnezyum, alüminyum ve titanyum gibi hafif malzemelere göre daha avantajlıdır. Mükemmel dökülebilirlik, kaynak yapılabilme ve yüksek ısı iletkenlik ise diğer avantajlarıdır. Ancak, bir kaç kayma sistemi ile sıkı paket hegzagonal (sph) kafes yapıya sahip olması, sınırlı sünekliğe ve dolayısıyla tokluğa yol açmaktadır. Magnezyumda soğuk şekillendirmenin yapılması zordur ve bu nedenle şekillendirmenin yüksek sıcaklıklarda yapılması gereklidir. Ayrıca zayıf korozyon direncine sahiptir ve en önemlisi üretim maliyeti yüksektir.

Döküm uygulamalarında genellikle Mg-Al serisi, Mg-9Al-0,8Zn-0,2Mn (AZ91) ve Mg-6Al-0,25Mn (AM60) gibi çok iyi dökülebilen, oda sıcaklığında iyi mekanik özelliklere sahip ve düşük maliyetli magnezyum alaşımları kullanılmaktadır. Bu alaşımlar makinelerde, uzay sanayisinde, otomobillerde ve el takımlarının yapımında kullanım alanı bulmaktadır (1-6).

2.1. Fiziksel Özellikleri

Çizelge 2.1’de saf magnezyumun özellikleri verilmektedir. Magnezyumun kimyası genel olarak bu metalin indirgen niteliğine dayanır. Uranyum florürden (UF_4) uranyum üretiminde, özellikle bu metalden yararlanılır. Elementlerin dönemli sınıflandırılmasında IIA kolonunun ilk sırasında yer alır ve aynı kolonda bulunan toprak alkali metallerle yakın benzerlikler taşır. Magnezyum kuru havadan etkilenmemesine karşın nemli ortamlarda yükseltgenir. İnce şerit, tel ya da toz

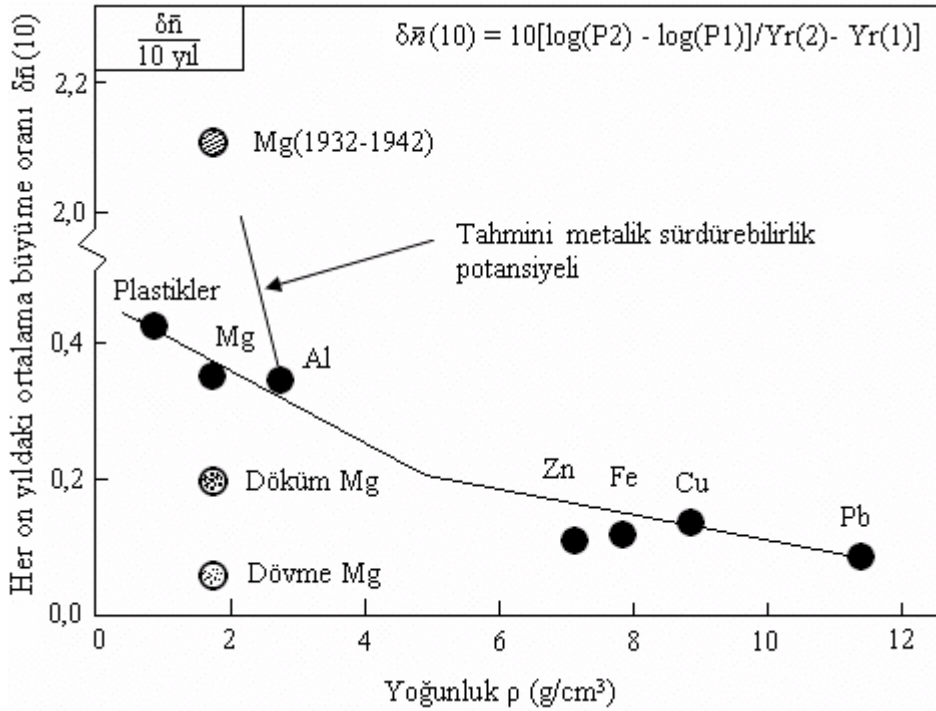
halindeyken, 300 °C'nin üzerinde ki sıcaklıklarda parlak bir alevle yanarak magnezyayı (MgO) verir. Kütle durumunda tutuşma sıcaklığı erime sıcaklığının üzerine çıkar. Kızıl derecede azot ve halojenlerle birleşir, kaynama sıcaklığındaki suyu ayrıştırır, oksitlerin çoğunu indirger ve asitleri bozundurur (7).

Çizelge 2.1. Saf magnezyumun özellikleri (1)

Atomik numara	12
Atomik kütle	24.31 g/g.mol
Renk	Gümüşümsü gri metal
Yoğunluk	20 °C'de 1.738 g.cm ⁻³ 650 °C'de 1.58 g.cm ⁻³
Ergime sıcaklığı	650 °C
Kaynama derecesi	1103 °C
Kristal yapısı	Sıkı-paket hegzagonal
Yanma ısısı	25020 kJ.kg ⁻¹
Parlama sıcaklığı	2800°C
Buharlaştırma ısısı	5272 kJ.kg ⁻¹
Özgül ısısı	20°C'de 1025 J.K ⁻¹ .kg
Buhar basıncı	527 °C'de 20 Pa 650 °C'de 360 Pa 1727 °C'de 400 Pa
Viskozite	650°C'de 1.25 cp
Isıl iletkenlik	27 °C'de 156W/m K 527 °C'de 146W/m K

Magnezyumun kullanımında en önemli etkenlerden başta yoğunluğu gelmektedir. Magnezyumun diğer metaller ile karşılaştırıldığında yoğunluğu oldukça düşüktür ve bu nedenle çoğu yapısal uygulamalarda kullanım için tercih edilmektedir. Şekil 2.1'de magnezyumun yoğunluğu diğer endüstriyel malzemeler ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere hafif malzemelerin daha yüksek ortalama büyüme hızına sahip olduğu görülebilmektedir. Formülde P2 mevcut

istatistiğin son yılında ilgilenilen metalin üretimi, P1 ilk yılında metalin üretimi, Yr(2) mevcut istatistiğin son yılı ve Yr(1) ise ilk yıldır. Mukayese için dövme ve döküm magnezyum alaşımları ve 1932-1942 yılları arasındaki magnezyum üretimiyle ilgili büyüme oranları dahil edilmiştir (8).



Şekil 2.1. 20. yüzyıl boyunca yoğunluğa karşı hafif ve ağır malzemelerin (içi dolu daireler) her on yıldaki üretim için ortalama büyüme üssü (8)

Magnezyumun kullanımında ki en önemli problemi korozyon direncinin düşük olmasıdır. Magnezyum, alüminyum gibi hemen yüzeyinde oksit filmi oluşturur ve bu oksit filminin korozyon direncini artırmış olması beklenir. Ancak, alüminyumda gelişen geçirmez bariyer tipi oksit filminden farklı olarak bu oksit tabakası magnezyumda gözeneklidir ve koruyucu değildir. Aksine oksitlenmeyi daha da hızlandırmaktadır. Bu durum, hem saf magnezyum hem de alaşımlarının korozyonuna neden olmaktadır. Magnezyumda oluşan oksit filmi aynı zamanda suda çözünmeye ya da ortamda ki klorür, bromür, sülfat, nitrat ve kromat gibi kimyasallar ile kimyasal olarak bozunmaya eğilim gösterir. Bu yüzden her ne kadar magnezyum alaşımları kuru ve serbest klorür ortamlarında kullanılmış olsa da özellikle klorürlü

ortamlarda zayıf korozyon direnci mühendislik uygulamalarında kullanımını oldukça sınırlamıştır (9).

2.2. Mekanik Özellikleri

Saf magnezyum, 45 GPa elastikiyet ve 26 GPa makaslama modülüne (8), ve Brinell HB = 33 sertliğe sahiptir. Zayıf sürünme direnci ile oda sıcaklığının 150-230 °C üstünde ki sıcaklıklarda dayanımını büyük ölçüde kaybetmektedir. Bu nedenle ticari magnezyum alaşımlarının sahip olduğu zayıf sürünme direnci nedeniyle, motor blokları ve otomatik şanzıman kutusu gibi çoğunlukla güç ileten ya da aktaran parçalarda (işlem sıcaklığının 170°C-250°C olduğu yerlerde) kullanımı sınırlanmıştır. Son zamanlarda böyle uygulamalar için sürünme direncinin geliştirilmesine yönelik çabalar, deneysel alaşımların artmasına neden olmuştur. Bu alaşımların çoğu Mg-Al-Ca esaslı sistemdir. Yakın zamanda, küçük miktarlarda stronsyum ve/veya silisyum ihtiva eden yeni Mg-Al-Ca alaşımları serisi (ACX alaşımları, alüminyum için A, kalsiyum için C ve stronsyum ya da silisyum için X olarak belirtilmiştir) General Motors Araştırma ve Geliştirme Merkezinde geliştirilmiştir. Üçlü intermetalik faz (Mg,Al)₂Ca, ACX alaşımlarının mikroyapısında gözlemlenmiş ve alaşımların sürünme direncinin gelişmesine neden olmuştur. Yeni ACX alaşımları, mükemmel sürünme direnci (hem çekme hem de basma gerilimi altında) ile otomotiv güç aktarma parçalarında kullanılmakla birlikte düşük maliyetli malzeme gereksinimini de sağlamaktadır (10).

Magnezyum ve alaşımları tüm yapısal malzemelerden daha yüksek işlenebilirliğe sahiptir. Normalde kuru olarak işlenebilir, fakat çok yüksek kesme hızları gerektirdiğinden yanma meydana gelebilir. Bu gibi durumlarda soğutucu kullanmak gereklidir. Su bazlı soğutucuların reaksiyon oluşturma ihtimali nedeniyle mineral yağlar soğutucu olarak kullanılmalıdır. Magnezyum alaşımları HNO₃ ya da HCl seyreltik çözeltisinde veya %5'lik H₂SO₄'de dağlanarak kimyasal olarak ta işlenebilmektedir (11).

İyi darbe ve çentik direnci ile sonuçlanan elastik enerji soğurma (absorbe) özelliğine sahip magnezyum ve alaşımları, sahip olduğu bu üstün özellikleri nedeni ile hava yastığı sistemleri gibi güvenlik ilişkili otomotiv uygulamalarında, mekanik sarsıntı direnci gerektiren taşınabilir araçlarda ve elektronik paketleme işlemlerinde tercih edilmektedir (12).

2.3. Kullanım Alanları

Endüstride magnezyum kullanımı ile ilgili olarak artan ihtiyaç Kanada ve Hindistan'da yeni tesislerin kurulmasına, Brezilya ve Japonya'da mevcut tesislerin genişletilmesine neden olmuştur. 1992 yılında desülfürizasyon (kükürt giderme) ve yüksek basınçlı döküm alanlarında büyük bir artış olmuştur. Ancak 1997 yılında en büyük kullanım alanı 146.150 ton/yıl ile alüminyum alaşımlandırma, 95.300 ton/yıl ile basınçlı döküm ve 47.950 ton/yıl ile desülfürizasyondur. Çizelge 2.2'de 1998 yılına ait magnezyum tüketimi verilmektedir (13).

Çizelge 2.2. 1998'de ki magnezyum tüketimi (14)

Kullanımı	1998'de ki üretimi (1000 ton)	Üretimde ki yüzdesi
Alüminyum alaşımlama	154	49
Basınçlı döküm	75	24
Demir ve çelik desülfürizasyonu	50	16
Nodüler demir (KGDD)	11	3
Elektrokimyasal (korozyon koruyucuları, bataryalar)	10	3
Kimyasal (yağlayıcılar, silikonlar, eczacılık, vitaminler)	7	2
Metal indirgeme (titanyum, zirkonyum, hafniyum, uranyum, berilyum ve bor)	5	2
Dövme ürünler	4,5	1

Magnezyum metalinin kullanımında ki üç temel özelliği:

- Diğer metallerle intermetalik bileşik oluşturmaya yatkınlığı
- Yüksek kimyasal aktifliği
- Düşük yoğunluğu

Diğer önemli kullanımları;

- Kum ya da basınçlı döküm metal parçaların üretiminde (özellikle şimdiki ve gelecekteki yakıt tasarruf standartlarını karşılama amacıyla magnezyuma ihtiyaç duyulan en kuvvetli alandır),
- Magnezyum alaşımı korozyon anotları, çeliğin korunması ve desteklenmesi için genellikle gemi ambarları, yağ ve gaz boru hatları ve meskenlerde sıcak su ısıtıcıları gibi yapıların katodik olarak korunmasını sağlamada,
- Havai fişek ve yangın çıkartan araçların yapımında,
- Kurşundan bizmutun temizlenmesinde kullanılmaktadır (1).

Magnezyum alaşımlarının üretiminde yıllara göre önemli artışlar kaydetmiştir. Hafifliği yanında bu artışlardaki en önemli etkenlerden birisi de magnezyumun zehirleyici özelliğinin az olmasıdır. Ayrıca bu malzemenin çeşitli alanlardaki kullanılabilirliğinin artması da üretiminin hızla artmasına neden olmaktadır. Özellikle son yıllarda otomobil endüstrisinde magnezyum alaşımlarının kullanımının artması, doğrudan magnezyum alaşımı kullanımını da arttırmaktadır. Otomobillerde, motor destekleri, motor gövdesi, pedal destekleri, devir kutuları, direksiyon parçaları, vites kutusu, distribütör parçaları, gösterge paneli destekleri ve koltuk kısımları gibi bölümlerde kullanılır. Uçaklarda ise motor parçalarında ve uçak gövdesinde kullanılır. Daire ve zincir testere gövdesi, havalı çivileyiciler, bagaj, dizüstü bilgisayarlar, hücreli telefonlar, spor araçları ve kameralar da diğer kullanım alanlarıdır (12-14).

2.4. Üretimi

Magnezyum metalinin üretimi ile ilgili endüstride az bilgi bulunmaktadır. Diğer metallerin üretiminden farklı olarak magnezyum için bir çok üretim yöntemi kullanılmaktadır. Magnezyum, doğada özellikle oksit (MgO ; magnezya ya da periklaz), sade karbonat ($MgCO_3$; magnezit), magnezyum ve kalsiyum çifte karbonat ($MgCO_3.CaCO_3$; dolomit), magnezyum ve potasyum çifte klorür ($MgCl_2.KCl.6H_2O$; karnalit) ya da çeşitli silikatlar (talk amyant) olarak bulunmaktadır. Ayrıca tuzlu göl sularında, deniz suyunda klorür veya sülfat şeklinde bulunur (7, 15). Üretim işlemleri, magnezyum buharı elde etmek için MgO 'ın termal indirgenmesi veya sıvı magnezyum klorürün ($MgCl_2$) elektrolizidir. Her iki yöntemde magnezyum üretiminde önemli yer tutmakla beraber, geleneksel üretim yöntemi çoğunlukla elektrolitik metodudur.

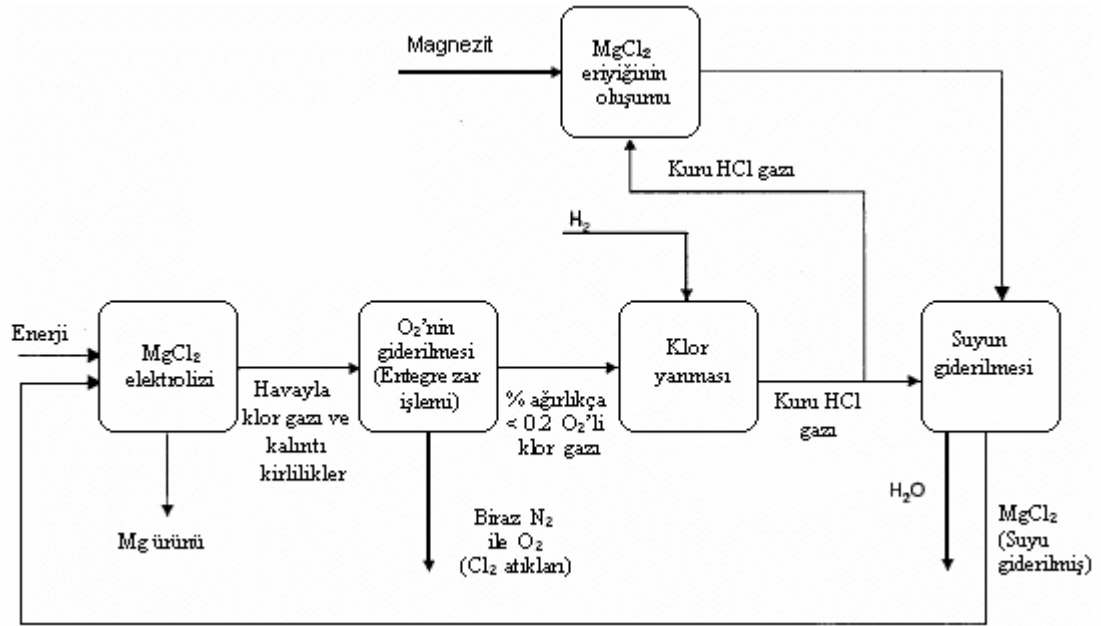
Termal indirgeme (silikotermik) işleminde MgO , yer kabuğunda oldukça yaygın olan brucit ($Mg(OH)_2$), dolomit, serpantin ya da magnezit gibi magnezyum ürünü veren minerallerden elde edilir. Elektrolitik işlemi için magnezyum klorür, tuzlu sudan, karnalitten, potasyum hidrat işleminden kalan parçacıklardan, dolomit ya da diğer magnezyum ürünü veren minerallerden elde edilir (16).

2.4.1. Termal (Isıl) üretim yöntemi

Termal indirgeme yöntemlerinde magnezyum cevheri yüksek sıcaklıkta bir indirgen eşliğinde tepkimeye sokulur. İndirgen olarak özellikle ferrosilisyum kullanılır. İndirgeyici gaz basıncı altında magnezyum buharı elde etmek için $1200^{\circ}C-1600^{\circ}C$ sıcaklıkta ki ergiyik curufta bulunan MgO indirgenir. Bunun için curufa ferrosilisyum ilave edilir ve sonra elde edilen buhar ana ocaktan ayrı olan bir yerde yoğunlaştırılır. Magnezyum ya süblimleşmiş bir katı biçiminde (Pidgeon yöntemi ve değişik uygulamaları) ya da sıvı olarak (Magnetherm yöntemi) elde edilir. Yoğuşmuş magnezyum daha sonra yeniden ergitilip, arıtılıp dökülür. Bu üretim yöntemleriyle %99.95 yüksek saflıkta magnezyum üretimi gerçekleştirilir (1, 7).

2.4.2. Elektrolitik üretim yöntemi

Ticari magnezyum, genellikle 700 °C altındaki sıcaklıklarda bulunan alkali metal karışımı bir klorür sıvısı içinden elektroliz geçirilerek üretilir. Şekil 2.2’de elektrolitik üretim akış şeması basitçe verilmektedir. Doğrudan cevherden (dolomit, magnezit, deniz suyu, tuzlu su gölleri) elde edilen MgO’nin klorürleyici kavrulması sonunda susuz magnezyum klorür elde edilir. 720-750 °C arasında ergiyik klorürün elektrolizi, metalin sıvı olarak katotta toplanmasını sağlar. Anotta geri kazanılan klor, klorürleme işleminde yeniden kullanılır. Daha sonra arılaştırma işlemi yapılır. Uzaklaştırılması gereken katkı maddeleri alkali akışkanlaştırıcılarla süblimleştirilerek damıtılır. Bu işlem ile yaklaşık % 99.8 saflıkta magnezyum elde edilir.



Şekil 2.2. Magnezyum için elektrolitik üretim işlemi akış şeması (17)

Bor ve sülfatlar gibi küçük kirlilikler giderildikten sonra en zor kısım MgCl₂'e kimyasal olarak bağlanmış altı su atomunu (MgCl₂.6H₂O) ayırmaktır. İlk 4½ su molekülü ısı yoluyla kolayca uzaklaşmaktadır, ancak son 1½ su molekülü ısı ile birlikte istenmeyen ürünleri oluşturmaktadır. Ancak geliştirilen üç üretim yöntemi ile

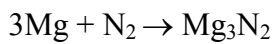
(Dow, Farben ve Anhydrous üretim yöntemleri) bu problem farklı metotlar uygulanarak ortadan kalkmaktadır (1, 16).

2.5. Reaktivitesi

Magnezyum, atmosfer ve diğer bilinen reaktif ürünler ile değişik reaksiyonlara maruz kalmaktadır. Bu reaksiyonlar magnezyum ile elementler ya da bileşikler arasında elde edilir. Bu reaksiyonların bazıları, normal şartlar altında daha fazla reaksiyon oluşumunu engelleyen ürünler üretirler. Magnezyumun bu maddelerle bazı şartlar altında reaksiyona girmesi tehlikeli reaksiyonlarla sonuçlanabilir. Aşağıda, magnezyumun çeşitli elementlerle olan reaksiyonları verilmiştir.

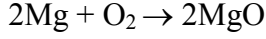
2.5.1. Azot (N)

Magnezyum, azot ile reaksiyona girdiğinde sarımsı magnezyum nitrür (Mg_3N_2) oluşur. Normal şartlar altında magnezyum, atmosferdeki oksijen ile tercihli olarak reaksiyona girer ve çok az nitrür oksidasyon ürününde bulunur. Eğer yanma meydana gelirse yüksek sıcaklık, yanma bölgelerinde oksit ile birlikte nitrür oluşumuna izin verecektir. Sarımsı Mg_3N_2 magnezyumun yaygın bir bileşenidir ve oldukça sert bir bileşiktir. Bu metalik olmayan bileşik metal içinde mevcut ise işlenebilirlik üzerinde zararlı etkilere yol açabilir. Bu reaksiyon aşağıda verilmektedir.



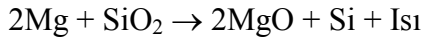
2.5.2. Oksijen (O_2)

Magnezyumun en çok bilinen reaksiyon ürünü MgO , ergitme ve döküm sırasında karşılaşılan başlıca problemlerden birisidir. $370\text{ }^{\circ}C$ altındaki sıcaklıkta magnezyum yüzeyinde yeni oluşmuş MgO ince filmi henüz koruyucudur. Ancak $370\text{ }^{\circ}C$ üzerinde bu film, geçirgen ve koruyucu olmayan bir büyüme ile kalınlaşmaya başlar ve $425\text{ }^{\circ}C$ civarında magnezyum yanmaya başlar. Reaksiyon aşağıda verilmektedir.



2.5.3. Silisyum oksit (SiO_2)

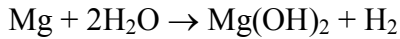
Düşük yoğunluklu yüksek SiO_2 içeren refrakter malzemeler, genellikle metal ergitme fırınlarında kullanılır. Bu malzemeler, sıvı magnezyum ile ekzotermik reaksiyona uğrayabilir. Reaksiyon aşağıda verildiği gibidir.



Reaksiyon tehlikeli olabilir. Bu yüzden magnezyum ergitmelerinde izolasyon malzemeleri ve refrakter tuğlalarında düşük oranda SiO_2 , yüksek oranda MgO ve Al_2O_3 (alumina) bulunmalıdır.

2.5.4. Su (H_2O)

Magnezyum suyla reaksiyona girdiğinde magnezyum hidroksit ve hidrojen gazı oluşur. Reaksiyon ekzotermiktir. Bu reaksiyon aşağıda verilmektedir.

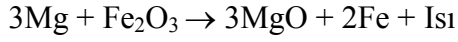


Paslanma (korozyon) ürünü $\text{Mg}(\text{OH})_2$ koruyucudur ve ileri reaksiyonları yavaşlatmaktadır. Ancak suda ki klorür gibi kirlilikler bu koruyucu tabakayı bozabilir. Ayrıca geniş yüzey alanına sahip parçalar ve makinede işleme sırasında oluşan ısı bu reaksiyonu hızlandırmaktadır.

2.5.5. Demir oksit (Fe_2O_3)

Termit reaksiyonları metal ile metal oksitler arasında elde edilir. Endüstriyel uygulamalara bir örnek olarak çeliğe kaynak (termit kaynağı) yapmak için kullanılan alüminyum ve demir oksit tozları arasında meydana gelen termit reaksiyonları

verilebilir. Magnezyum, 2200°C gibi aşırı ısı ve sıcaklık değişimi durumunda demir oksit ile şiddetli reaksiyona girebilmektedir. Reaksiyon aşağıda verilmektedir.



Magnezyum ergitme işlemlerinde kullanılan çelik ekipmanlarda demir oksit kalıntıları oluşabilmektedir. Üretim sırasında bu sıcak demir kalıntıları ciddi problemlere yol açmaktadır. Özellikle gaz ateşlemeli fırınlarda yanan gazın oluşturduğu türbülans sık sık demir kalıntılarını pota içersine düşürmektedir (18).

2.6. Ergitme ve Döküm İşlemleri

Magnezyum ve alaşımlarının üretimi sırasında en büyük problemi atmosfer ile teması sırasında yanmasıdır. Daha öncede bahsedildiği gibi magnezyum oksijen ile reaksiyona girer ve yanarak MgO'ı oluşturur. Bu problem için çeşitli koruyucu gazlar ve yüzey örtücüler (flaks) kullanılmaktadır. Çizelge 2.3'de hem ergitme hem de temizlemede kullanılan kimyasallar verilmektedir (15).

Çizelge 2.3. Ergitme ve temizlemede kullanılan kimyasalların kompozisyonu (% ağırlık) (15)

Amaç	CaCl ₂	NaCl	KCl	MgCl ₂	CF ₂	MgO
Ergitme	40	30	20	10	-	-
Ergitme ve temizleme	20	10	10	35	15	10
Temizleme	15	10	10	35	20	10

2.6.1. Ergitme

Alüminyum ve alaşımlarından farklı olarak sıvı magnezyumda bir oksit filminin oluşması metali daha fazla oksitlenmeden korumaz. Tam tersi bu süreci hızlandırır. Ergimeden sonra yüksek sıcaklıklara çıkıldığında (850 °C) magnezyum sıvısının yüzeyinde oksidasyon hızı süratle artar. Ancak uygun flaks ya da asal gazlar kullanıldığında sıvı magnezyumun yanması durur.

Magnezyum sıvısının korunmasındaki geçerli metot, sıvı yüzeyinde uygun ve kararlı bir filmin oluşmasıdır. Yüzey örtücüleri düşük ergime sıcaklığına sahip tuz karışımlarıdır ve sıvı metalin yüzeyinde buharlaşma ve oksidasyonu geciktiren ince bir film oluşturur. Yüzey örtücüler yanmayı engellemede oldukça etkilidir. Ancak bu sonuçlara rağmen, örtücüler dökümhanelerde zararlı atmosfer oluşturabilir ve üretim dışında bunlara da dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bunlar magnezyum parçalarda korozyona neden olmaktadır. Olumsuz özelliklerinden dolayı, ergitme işlemlerinde örtücü kullanımı yerine çoğunlukla koruyucu atmosferler tercih edilmektedir.

Koruyucu atmosferler, SF₆ (Sülfür hekzaflorit) ile ya SO₂ (Sülfürdioksit) ya da hava, veya CO₂ ile hava karışımlarıdır. Bu gazlar atmosferdeki oksijenin sıvıyla olan temasını keser. Atmosfere SF₆ ya da SO₂ gibi koruyucu gazların eklenmesi, sıvı metal yüzeyinde oluşan ve buharlaşma ve ileri oksidasyonu engelleyen oksit filmini modife etmektedir. Argon ve helyum gibi soy gazlar sıvı magnezyum ile reaksiyona girmez ve koruyucu atmosfer olarak sık sık önerilmektedirler. Soy gazlarla yanmanın engellenmesi tüm havanın sıvı magnezyum yüzeyinden atılması ile mümkün olmaktadır. Soy gazlarda problemlerden birisi metal yüzeyinde oluşması engellenen MgO filmidir. Bu nedenle sıvıda buharlaşma görülür.

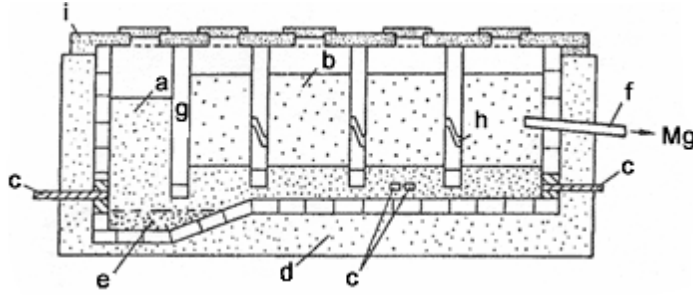
SO₂ ve SF₆ bulunan koruyucu atmosferlerde bu gazların karışım içindeki miktarlarının kontrolü oldukça önemlidir. Koruyucu atmosfer oluşumunu sağlamak ve sürdürmek için sıvı yüzeyinde yeteri kadar gaz gereklidir. Her iki gazda eğer

bileşen miktarları gerekenden çok fazla ise korozyon ve/veya reaktif bir yan ürün oluşum problemi mevcuttur. Koruyucu gazda SF_6 miktarı % 0,7'yi geçmemelidir. SO_2 için ise maksimum değer % 1'dir. Bu gazların aşırı düzeyde olması potaların kimyasal korozyonuna neden olabilir. SO_2 ve SF_6 koruyucu gazları ile sıvı yüzeyinde koruyucu atmosfer duvarı oluşturmak kadar bu gazların çalışma ortamında ve çevrede ki etkisi de önemlidir. SO_2 oldukça kokulu ve zehirleyicidir. SF_6 ise pahalıdır ve küresel ısınmada etkisi oldukça yüksektir.

Hidrojen magnezyum için büyük problem teşkil etmektedir. Bu hidrojenin ana kaynağı nemli flakslardan kaynaklanan su buharıdır ya da oksitlenmiş hurda veya ingotlardır. Düşük hidrojen içeriği gaz gözenekliliğini azaltır. Genel Mg-Al ve Mg-Al-Zn alaşımlarında klor ile bu malzemelerin gazı giderilmelidir. Gaz giderme için optimum sıcaklık 725-750 °C aralığındadır. Gaz gözenekliliği zirkonyum içeren magnezyum alaşımları için normal bir problem değildir ve bu alaşımlarda gaz gidermeye gerek yoktur. Çünkü hidrojen ZrH_2 olarak sıvıdan uzaklaşır. Ancak Mg-Al-Zr alaşımlarında zirkonyum kaybına neden olan ZrH_2 oluşması mekanik özellikleri etkiler. Bu bakımdan zirkonyum ilave edilmeden gaz giderme işlemi tamamlanmalıdır (11, 18).

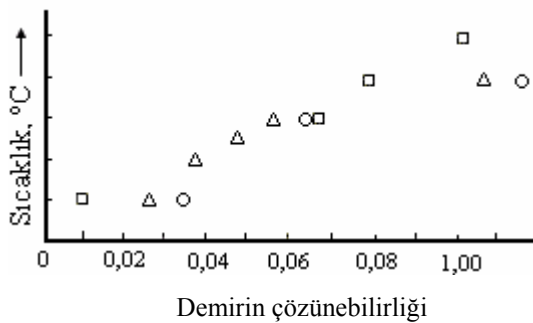
2.6.2. Temizleme

Nitrür, karbür, klorür inklüzyonları ve özellikle oksit şeklindeki metalik olmayan kirlilikler alaşımın mekanik ve yüzey özelliklerini düşürdüğü gibi korozyon direncini de zayıflatmaktadır. Bu nedenle sıvı işlemlerinde, sıvının temizlenmesi için çeşitli flakslar kullanılmaktadır. Alkali klorür ve MgCl_2 gibi flakslar kirlilik parçacıklarının yüzeyini ıslatır ve kaplar. Bu flakslar kirliliklerin yoğunluğunu artırarak sıvı dibine doğru çökmesine neden olur. MgO ve kalsiyum florür (CaF_2) gibi kalınlaştırıcı flakslar ise kirliliklerin akışkanlığını azaltır ve bu nedenle kirliliklerin dibe çökmesi ile birlikte sıvıyı kirletmesine engel olur. Şekil 2.3'de Norsk Hydro temizleme fırını görülmektedir. Magnezyum temizlemedeki standart teçhizat, geniş, sabit, tuğla astarlı fırınlar ya da harici olarak ısıtılmış sırasıyla 2-6 ya da 10-25 ton sıvı magnezyum ihtiva eden çelik potalardan oluşmaktadır.



Şekil 2.3. Norsk Hydro temizleme fırını (15). (a) Sıvı tuz; b) Magnezyum metali; c) Elektrotlar; d) Refrakter; e) Atık; f) Tapa musluğu; g) Bölme duvarı; h) Metal kanalı; i) Refrakter kapak

Ergitme işlemi ve yüksek oranda metalik olmayan kirliliklerin temizlenmesi için metal hacminin % 5-10 kadar flaks tüketimi gereklidir. Saf magnezyumda bilinen genel metal kalıntıları demir, bakır, nikel, manganez, çinko, alüminyum, silisyum, kalsiyum ve sodyumdur. Bunlardan alüminyum, manganez, demir ve silisyum faydalı intermetalik fazları oluşturur. Ancak ağır metaller aynı zamanda magnezyumun korozyon direncini azaltır. Magnezyumun demir ile olan reaktivitesi alüminyuma oranla daha azdır. Bu da magnezyum ergitimin de dökme demir ya da çelik potaların kullanımını mümkün kılar. Şekil 2.4'de magnezyumun demir çözündürebilirliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Bu sistemde metalotermik magnezyum bulutu (yoğuşmuş magnezyum kristali) ya da buğusu, katı halde yeniden kullanılabilir hale gelebilmektedir.



Şekil 2.4. Farklı kaynaklardan elde edilen demirin magnezyumda çözünebilirliği (15)

Sıcaklığın artmasıyla demirin çözünürlüğü de artmıştır. Düşük sıcaklıklardaki (660-680 °C) işlemlerde, demir seviyesi düşük tutulabilmektedir. Demir miktarı, manganez,

çinko, berilyum ya da $TiCl_4$ ilavesi ile birlikte daha da azalmaktadır (15).

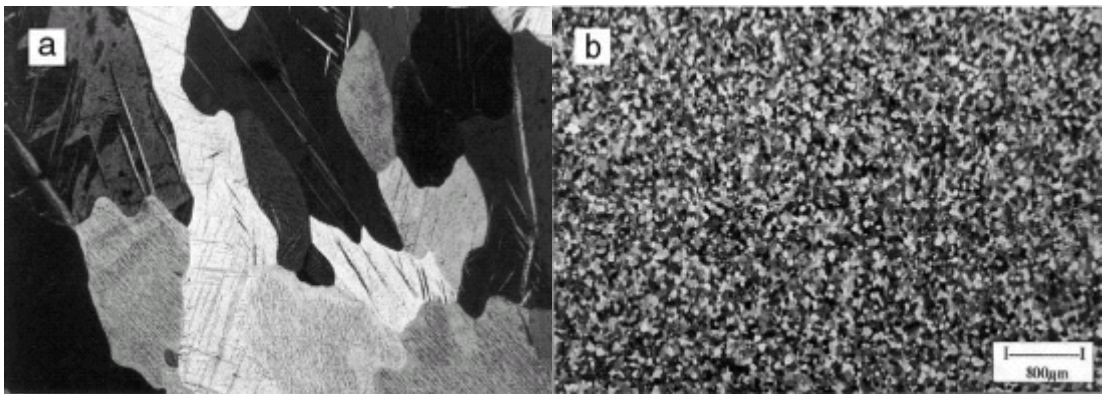
2.6.3. Tane inceltme

Magnezyum alaşımlarında mekanik özellikleri geliştirmek için genelde iki yöntem vardır. Birincisi, alüminyum gibi alaşım ilavelerinin girişiyle olurken, ikincisi ise geleneksel üretim işlemlerinin kontrolü ve iyileştirme yöntemi ile magnezyum alaşım mikroyapısının inceltmesi ile mümkün olmaktadır (4). Tane inceltme, dökümlerin özelliklerini geliştirmek için önemli uygulamalar arasındadır. Dökümlerde tane boyutu mekanik özelliklerin önemli derecede etkilediği için bu yöntem gerekli ve temel bir yaklaşımdır. Tane boyutu genellikle katılaşmanın erken safhasında dentritlerin çekirdeklenmesiyle belirlenir. Magnezyumda tane inceltme için bir kaç metot geliştirilmiştir. İlk yöntemlerden birisi süper ısıtma (superheating) işlemi olarak isimlendirilen dökümden önce yapılan basit ısıtma işlemi ile tane inceltmedir. Bu yöntem, alaşımın sıvı denge sıcaklığının üstündeki yüksek sıcaklıklarda kısa süre tutulmasından sonra arzu edilen döküm sıcaklığına genellikle $150^{\circ}C-260^{\circ}C$ arasındaki bir sıcaklığa sıvının hızlı soğutulması işlemini kapsamaktadır. Süper ısıtma yöntemiyle elde edilen tane inceltme başarılı olmasına rağmen, çoğunlukla yüksek işlem sıcaklıklarına yönelik olan bir kaç problem nedeniyle bu yönteme alternatif teknikler araştırılmıştır (19).

Çoğu magnezyum döküm alaşımlarında tane inceltme genellikle sıvıya florzirkonat (flourzirconate, K_2ZrF_6) şeklinde % 0,6 ila 0,7 zirkonyum ilavesiyle sağlanmaktadır. Sıvı magnezyum florzirkonat'ı indirger ve zirkonyumu serbest bırakır. Zirkonyum döküm mikroyapılarında magnezyum tanelerinin merkezinde konsantre olmaktadır. Hegzagonal α -Zr kafes parametresi ile ($a = 0,323$ nm, $c = 0,514$ nm) magnezyumun kafes parametresi ($a = 0,320$ nm, $c = 0,520$ nm) birbirine yakındır; eğer zirkonyum parçacıkları ilkin sıvıdan çökelmişse bu zirkonyum parçacıkları etkili çekirdeklenme aracı olarak etkiye bulunmaktadır. Bununla birlikte alternatif olarak zirkonyum bileşiği de oluşabilmektedir. Resim 2.1'de ortalama $750\ \mu m$ tane boyutlu saf magnezyum (a) ile ortalama $50\ \mu m$ tane boyutlu Mg-0,56Zr (b) alaşımının mikroyapısı verilmektedir. (b) Alaşım, zirkonyum parçacıklarının sıvıya $730^{\circ}C$ 'de

ilave edilip daha sonra karıştırılmasıyla elde edilmiştir. Alüminyum ihtiva etmeyen magnezyum alaşımları için zirkonyum kuvvetli tane incelticidir. Zirkonyumun bu eşsiz özelliği nedeniyle zirkonyum içeren ticari dövme ve kum döküm magnezyum alaşımlarının gelişmesine neden olmuştur. Yeni geliştirilen sürünme dirençli kum döküm magnezyum alaşımları vites kutusu ve motor blokları gibi otomotiv uygulamalarında kullanılmıştır.

Alüminyum ve manganez ihtiva eden magnezyum alaşımlarında demir klorür (FeCl_3) ilavesiyle (Elfinal prosesi) tane inceltme düzeyi süper ısıtma ile elde edilene oldukça benzemektedir. Ancak, bu yöntem demir ilavesinin korozyon direncinde zararlı etkisi nedeniyle endüstriyel ilgiyi çekmemiştir. Çeşitli karbon ve klor içeren haksakloreten (C_2Cl_6), heksaklorbenzol (C_6Cl_{16}), CCl_4 , SiC parçacıkları, ya da granüler grafit, FeCl_3 gibi organik veya inorganik ilaveler, tane inceltmede alüminyum içeren magnezyum alaşımları için başarıyla uygulanmaktadır. Sıvı metale 750-800 °C'de klor gazı verilir, % 0,5 heksakloreten ilave edilir ve daha ince tane yapısına sahip magnezyum alaşımı elde edilir. Sıvıya karbon aşılایıcının ilavesi düşük işlem sıcaklıkları ve daha az sönümüyle avantajlar sağlamaktadır. Karbon ilavesi ile birlikte oluşan Al_4C_3 oldukça etkili bir aşılایıcıdır. Ancak, karbon aşılایıcının alüminyum içermeyen magnezyum alaşımlarda hiç bir etkisi yoktur (19-24).



Resim 2.1. 730°C sıcaklıktan aynı soğuma şartları altında katılaştırılmış magnezyumun tane yapısı. Saf Mg (a) ile Mg-0,56 Zr (b) alaşımı (21)

2.6.4. Döküm

Katılaşma sırasında % 4.2 ve 20 °C'ye soğuma sırasında % 5 büzülen magnezyum yüzey çatlaklarına ve çekme boşluklarına karşı duyarlıdır. Düzensiz akışın olması metalik olmayan kalıntıların oluşumunu destekler. Bu nedenle katılaşma işlemi sırasında dikkatli olunmalı ve türbülans azaltılmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda veya düzensiz metal akışında kükürt (S) tozu, oksidasyonu bastırmak için sıvı yüzeyine doğru serpilmelidir (15). Magnezyum alaşımlarının üretiminde tercih edilen önemli yöntemlerden birisi de kum döküm yöntemidir. Bu üretim yönteminde magnezyumun fiziksel özellikleri ve kimyasal reaktivitesi açısından aşağıda belirtilen maddeler dikkate alınmalıdır.

- Uygun engelleyici (inhibitör), sıvı magnezyum ile hidrojen açığa çıkaran nem arasındaki reaksiyonu engellemek için kalıp kumuna ilave edilmelidir. Bağlanmaya yardımcı olması amacıyla karbondioksit ile yeşil kum ya da gazlı kum için sülfür kullanılırken sentetik kumlar için KBF_4 ve KSiF_6 gibi bileşikler eklenir. Aynı zamanda uygun inhibitör olan borik asit, bazı kumlar için kalıplamaya yardımcı olması nedeni ile kullanılır.
- Metal akışı oksidasyonu minimize edecek şekilde düzgün olmalıdır.
- Magnezyumun düşük yoğunluğu nedeniyle kalıbın doldurulmasına yardımcı olması için havşa ve besleyicide nispeten düşük basınç vardır. Kum geçirgen olmalı ve kalıba havanın çıkışına izin verecek şekilde yeterince çıkıcılar (gaz çıkış kanalı) açılmalıdır.
- Magnezyum nispeten düşük hacim ısıtma kapasitesine sahiptir. Bu nedenle en sıcak metalin bulunduğu bölgenin iyi bir şekilde korunması için uygun besleyici kullanımı gereklidir. Bu ihtiyaçtan dolayı besleyicilerin ve diğer besleme araçlarının uygun bir şekilde kalıba yerleştirilmesi ve bunların dökülmüş halde ki magnezyum alaşımının yaklaşık $\frac{1}{4}$ 'ü kadar hacmine sahip olması gereklidir.

Sürekli kalıba döküm işlemi, hızlı katılaşma sağlayarak daha ince tane yapısına ve daha üniform mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen kum dökümler ile ortak özelliklere sahiptir. Basınçlı metal kalıba döküm işlemi hem sıcak hem de soğuk kamaralı metotlarla yapılmaktadır. Magnezyumun düşük hacim ısı kapasitesi alüminyum ve çinko ile karşılaştırıldığında metal kalıp yoluyla uzaklaştırılması için daha az ısı gereksinimi bir avantajdır ve bu nedenle üretimde kolaylık sağlar (11).

3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

3.1. Genel Özellikleri

Alüminyum ve çelik gibi büyük kullanım alanına sahip metallerde olduğu gibi magnezyumun da birçok alaşımı mevcuttur. Bu alaşımlar, birçok yapısal uygulamada kullanılmaktadır ve giderek kullanım alanları artmaktadır. Magnezyum döküm alaşımları genellikle ötektik sisteme dayanır ve birçoğuna ısıtıl işlem uygulanabilir. Alaşımlar dağılım mukavemetlenmesi veya yaşlandırma ile mukavemetlendirilebilir. Zirkonyum, toryum, gümüş veya nadir toprak elementi gibi alaşım elementleri içeren bazı yaşlandırılmış magnezyum alaşımları 300 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda aşırı yaşlanmaya karşı iyi dirence sahiptir (25).

Magnezyum %99,8'i geçen saflığı ile ticari olarak mühendislik uygulamalarında nadiren kullanılmıştır. Hegzagonal kafes yapısı ve alaşımlama davranışı katı eriyik oluşturacağı elementlerin çeşitliliği için önemlidir. Ticari metallerle ikili alaşım sistemleri iki kategori şeklinde ayrılmıştır. Bunlar azalan atomik çözünürlük sırasına göre parantez içindeki yüzde ağırlık ile aşağıda verilmektedir.

Peritektik sistemler : Mn (% 3,4), Zr (% 3,8)

Ötektik sistemler : Li (% 5,7), Al (% 12,7), Ag (% 15,5), Zn (% 8,4), Nd (~% 3),
Th (% 4,5), Ce (% 0,85)

Çizelge 3.1.'de önemli magnezyum alaşımlarından bazılarının özellikleri verilmiştir. Standart ASTM magnezyum alaşımları, içerilen elementin yüzdesine göre harf semboller ile gösterilmiştir. Alüminyum için A, manganez için M, silisyum için S, zirkonyum için Z, toryum için H, gümüş için Q, ve nadir toprak elementleri için E kullanılmaktadır (8). Rakamlar ise içerilen alaşım elementinin sırasıyla yüzdesini ifade etmektedir. En eski ticari alaşım elementleri alüminyum, çinko ve manganezdır ve Mg-Al-Zn dökümleri II.Dünya savaşı sırasında Almanya da geniş ölçüde kullanılmıştır. Bu alaşımlarda ıslak ve rutubetli ortamlarda korozyon problemi ortaya çıkmış ve 1925 yılında küçük miktarlarda manganez ilavesi ile (% 0,2) bu problem

azaltılmıştır. Bu ilavenin sıvıdan demiri ve zararsız intermetalik bileşikler içersideki diğer kalıntıları uzaklaştırdığı belirlenmiştir. Mg-Al-Zn sistemine dayanan alaşımlar ortam sıcaklıklarında kullanılmak üzere magnezyum döküm alaşımları için temel malzemeler olarak kalmıştır. En eski dövme alaşımı Mg-1,5Mn alaşımıdır ve levha, ekstrüzyon ve dövme ürünler olarak kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Önemli magnezyum alaşımlarından bazıları (1)

Alaşım adı	Alaşım ilaveleri	Kullanımları	Kullanım nedenleri
AZ91	% 9.0 Al, % 0.7 Zn, % 0.13 Mn	Genel döküm alaşımı	Dökülebilirliğinin iyi olması, $T < 150^{\circ}\text{C}$ 'de iyi mekanik özellikler göstermektedir.
AM60	% 6.0 Al, % 0.15 Mn	Yüksek basınçlı metal kalıp alaşımı	AZ91'den daha fazla tokluk ve şekil değiştirebilme (haddelenme), bir miktar mukavemeti düşürür. Sık sık otomotivlerde yapısal uygulamalar için tercih edilirler.
AZ31	% 3.0 Al, % 1.0 Zn, % 0.2 Mn	Dövme magnezyum ürünleri	İyi ekstrüzyon alaşımıdır.
ZE41	% 4.2 Zn, % 1.2 Re, % 0.7 Zr	Özel döküm alaşımı	Nadir toprak element ilavesi, yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımı sağlar.
AS41	% 4.2 Al, % 1.0 Si	Genel döküm alaşımı	Yüksek sıcaklıklarda AZ91'den daha iyi sürünme direnci sergiler, fakat düşük dayanıma sahiptir.

İki dünya savaşı arasındaki dönemde, magnezyum döküm alaşımlarında sık sık zayıf mekanik özelliklerle sonuçlanan büyük ve değişken tane boyutu ve mikro gözeneklilik (mikroporozite) nedeniyle zorluklarla karşılaşmıştır. 1937'de Almanya da zirkonyumun magnezyumda tane inceltme üzerine oldukça etkili olduğu bulunmuştur. Ancak zirkonyumun hem alüminyumla hem de manganez ile kararlı bileşikler oluşturmasıyla ergiyikten uzaklaşması ve görevini yerine getirmemesi mevcut ticari alaşımlarda kullanımını sınırlamıştır. Bu durum hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda gelişmiş mekanik özelliklere sahip zirkonyum içeren yeni döküm ve dövme alaşım serisinin gelişmesine yol açmıştır. Mevcut zirkonyum içeren hem dövme hem de döküm alaşımlarında alüminyum ve manganez

bulunmamaktadır. Bu alaşımlar şu anda uzay araçları endüstrisinde geniş ölçüde kullanılmaktadır (11).

Magnezyum alaşımlarının üretiminde bir çok değişik döküm ve dövme yöntemi uygulanmaktadır. Döküm alaşımları, soğuk ve sıcak kamaralı basınçlı döküm, yarı-katı döküm (thixocasting), savurma döküm, sürekli döküm ve kum döküm yöntemleri ile üretilmektedir. Normal döküm ürünlerine göre daha yüksek mekanik özelliklere, düşük maliyet, yüksek dayanım ve iyi sünekliğe sahip dövme ürünler genellikle levha, plaka ve ekstrüzyon alaşımları olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.2’de bazı üretim yöntemlerinin özellikleri verilmektedir. Genellikle makine veya metal yapı elemanları olarak tasarlanan magnezyum alaşım elemanları basınçlı döküm yöntemiyle üretilmektedir. Magnezyum döküm alaşımlarında döküm sıcaklığı yaklaşık olarak AZ91 alaşımı için 650-680 °C, AM60 alaşımı için 670-685 °C ve AS41 alaşımı için 665-680 °C civarındadır.

Çizelge 3.2. Magnezyum alaşımlarında bazı üretim yöntemleri ve özellikleri (13)

Ana Grup	Alt Grup	Özellikler
Döküm	Kum döküm	Grift şekiller, düşük hacime uygun , iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkündür.
	Kabuk kalıp	Grift şekiller, yüksek hacime uygun, iyi kalite, yüksek maliyet, büyük parça üretimi mümkündür.
	Düşük-Basınçlı Döküm	Grift şekiller, yüksek kalite, orta boy parça dökümü, düşük maliyet özelliklerine sahiptir.
	Düşük-Basınçlı Döküm	Nihai boyutlar, gerektiği kadar yüksek hacim ortalama büyüklükte parçalar, orta kalite, düşük maliyet özelliklerine sahiptir.
	Hassas Döküm	En hassas nihai boyut, yüksek kalite, çok grift parça üretimi, yüksek maliyet özelliklerine sahiptir.
Dövme	Levha	Düşük özellikler, yüksek maliyet
	Plaka	Düşük özellikler, düşük maliyet, iyi boyut kararlılığı
	Ekstrüzyon	Yüksek mekanik özellikler, düşük maliyet, grift parçalar
	Dövme	Yüksek kalite, ortalama özellik, ortalama maliyet

En önemli basınçlı döküm magnezyum alaşım grubu magnezyum-alüminyum sistemidir. Alüminyum bu sisteme yüksek dayanım ve iyi dökülebilirlik kazandırır. Pres dökümün kolaylıkla yapılabilmesi için %3'ün üzerinde alüminyum ilave edilmesi gereklidir (8, 11, 13).

3.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Geleneksel magnezyum alaşımları katı eriyik (çözelti) sertleşmesi ve/veya çökelme sertleşmesi ile mukavemetlendirilmektedir. Katı çözeltinin oluşabilmesi için çözen ve çözünen atomların boyutları arasında %15'den fazla fark olmaması gereklidir. Atomik boyutlarda büyük farklılıklar olduğunda çözünürlük sınırlı olarak gerçekleşmektedir. Magnezyum elektropozitif bir malzemedir ve çoğu alaşım elementleri ile intermetalik bileşikler oluşturmaktadır. Oluşan bileşiklerin kararlılığı, alaşım elementlerinin artan elektronegatifliği ile artmaktadır. Katı eriyik mukavemetlenmesi ise tamamen bu elementlerin atomik boyutları ile ilgilidir. Magnezyum içinde maksimum çözünebilen elementler IIB grubu elementleridir. Bunlardan en önemlileri hsp çinko ve kadmiyumdur. Sadece kadmiyum yüksek sıcaklıklarda ($>253^{\circ}\text{C}$) magnezyum ile sürekli katı eriyik oluşturur. Bazı önemli alaşım elementlerinden nadir toprak elementleri yitrium ve gümüş oldukça pahalıdır ve bu nedenle kullanımları sınırlıdır. Magnezyum alaşımlarının geliştirilmesinde, çok az miktarda yüzey aktif elementleri olan Ca, Sr, Ba veya Sb, Sn, Pb ve Bi katılarak mikro alaşımlandırma denenmektedir. Yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen yeni magnezyum alaşımlarında nadir toprak metalleri kullanılmaktadır.

Çizelge 3.3'de magnezyuma bazı alaşım elementlerinin etkisi verilmektedir. Çinko, magnezyum alaşımlarında mukavemet arttırıcı rol oynar, ancak %2'nin üzerinde sıcak kırılganlığa sebep olur. Manganın bir ürünü olan Al-Mn-Fe bileşikleri sıvı metalin akışkanlığını düşürür ve mikroyapıyı inceltir. Demir, nikel ve bakır korozyon direnci üzerinde zararlı etkiye sahiptir. Demir miktarı ve Fe/Mn oranı magnezyum alaşımlarında kritiktir ve korozyon direnci bakımından kontrol altında tutulmalıdır (13).

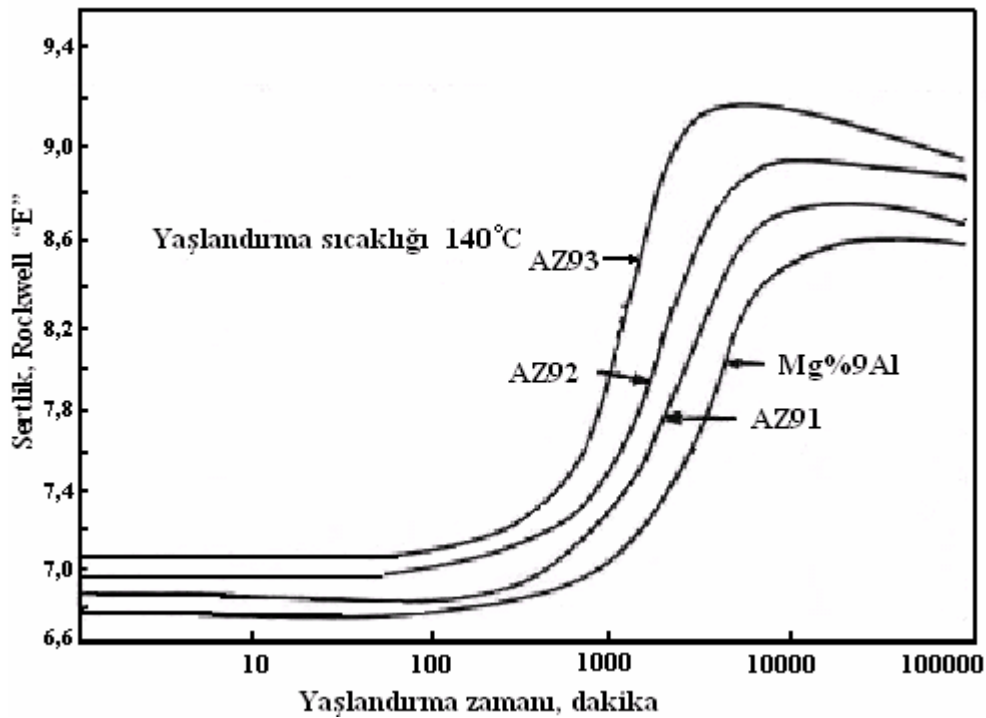
Çizelge 3.3. Magnezyuma bazı alaşım elementlerinin genel etkisi (8)

Alaşım elem.	Ergime ve döküm özellikleri	Mekaniksel ve teknolojik özellikleri	Korozyon davranışı *(İ/M) ile üretilmiş
Ag		Nadir toprak elementleri olduğunda yüksek sıcaklıkta sürünme ve çekme özelliklerini geliştirir.	Korozyon davranışında zararlı etkiye sahiptir.
Al	Dökülebilirliği geliştirir, mikro gözenek oluşumuna neden olur.	Düşük sıcaklıklarda (< 120 °C) katı eriyik mukavemetlenmesi, çökelme sertleşmesi sağlar.	Daha az etkilidir.
Be	Oldukça düşük (< 30 ppm) konsantrasyonlarda sıvı yüzeyinin oksidasyonunu oldukça azaltır, kaba tanelere yol açar.		
Ca	Etkileyici tane inceltme sağlar, sıvı magnezyumun oksidasyonunu bir miktar azaltır.	Sürünme özelliklerini geliştirir.	Korozyon davranışında zararlı etkiye sahiptir.
Cu	Kolaylıkla metalik camlar oluşumuyla dökülebilirliği geliştirir.		Korozyon davranışında zararlı etkiye sahiptir, sınırlama zorunludur.
Fe	Magnezyumun çelik potayla reaksiyona girmesi zordur.		Korozyon davranışında zararlı etkiye sahiptir, sınırlama zorunludur.
Li	Buharlaşma ve yanma davranışını artırır, yalnızca koruyucu ve sızdırmaz fırınlarda ergitme yapılır.	Ortam sıcaklıklarında katı ergiyik sertleşmesi sağlar, yoğunluğu azaltır, sünekliği artırır.	Korozyon özelliklerini oldukça azaltır, nemden korumak için yüzeyin kaplanması gereklidir.
Mn	Fe-Mn bileşiği çökeltisiyle Fe miktarı kontrolü ve çökelti küçülmesi sağlar.	Sürünme direncini artırır.	Demir kontrolüyle korozyon davranışını iyileştirir.
Ni	Kolaylıkla metalik camlar oluşumu söz konusudur.		Korozyon davranışında zararlı etkiye sahiptir, sınırlama zorunludur.
RE	Dökülebilirliği geliştirir, mikro gözenek oluşumunu azaltır.	Ortam ve yüksek sıcaklıklarda katı eriyik ve çökelme mukavemetlenmesi; yüksek sıcaklıklarda çekme ve sürünme özelliklerini geliştirir.	Korozyon davranışını iyileştirir.
Si	Dökülebilirliği azaltır, Al, Zn ve Ag ve diğer çoğu elementlerle kararlı silisit bileşikler oluşturur, zayıf tane incelticidir.	Sürünme davranışını geliştirir.	Zararlı etkiye sahiptir.
Th	Mikro gözenek oluşumunu bastırır.	Yüksek sıcaklıklarda çekme dayanımını, sürünme direncini ve sünekliği geliştirir. Çoğu elementle uyumludur.	
Y	Tane inceltme etkisi vardır.	Yüksek sıcaklıklarda çekme ve sürünme özelliklerini geliştirir.	Korozyon davranışını iyileştirir.
Zn	Akışkanlığı artırır, zayıf tane incelticidir, mikroskopik eğilim gösterir.	Çökelme sertleşmesi ortam sıcaklığında dayanımı geliştirir, Zr ile tane inceltmedikçe kırılabilirliğe ve sıcak yırtılmaya eğilimlidir.	Önemsiz korozyon etkisi, yeterli Zn ile bakırın zararlı etkisi giderilir.
Zr	Tane inceltmede oldukça etkilidir. Si, Al ve Mn ile uyumsuzdur ve sıvıdan Fe, Al ve Si'yi temizler.	Ortam sıcaklığında çekme özelliklerini bir miktar artırır.	

* İ/M; İngot Metalurjisi

3.2. Yaşlandırma

Bazı magnezyum alaşımları alüminyum alaşımlarına göre yaşlanma mukavemetlenmesine az yanıt vermesine karşın bu işleme uygundur. Çökelme işlemleri magnezyumda oldukça komplekstir ve tam anlamıyla anlaşılmış değildir. Çizelge 3.4’de endüstriyel olarak kullanılan magnezyum alaşımlarında muhtemel çökelti oluşturma ve çökelek özellikleri verilmiştir. Şekil 3.1’de ise bazı magnezyum AZ alaşım grubunun yaşlandırma davranışı gösterilmektedir. Magnezyum kafesi ile uyumlu olan DO_{19} (Mg_3Cd) kristal yapısı ile düzenli hegzagonal çökelti oluşumu, çoğu alaşımlarda yaşlanma işleminin bir özelliğidir. Bu yapı, yaşlandırılmış Al-Cu alaşımlarında θ'' (GP-II bölgesi) olarak bilinen faza benzerdir ve bileşenlerin atomik boyutlarında büyük fark olduğu alaşımlarda genellikle bulunmaktadır. Bu faz, oluştuğu magnezyum alaşımlarında mukavemetlenmeye katkıda bulunur.



Şekil 3.1. Bazı magnezyum AZ alaşım grubunun yaşlandırma özellikleri (26)

Çizelge 3.4. Magnezyum alaşımlarında muhtemel çökelek oluşumu (11)

Alaşımlar sistemi	Çökelek oluşumu			
Mg-Al	SSSS	$\rightarrow$ (0001) düzleminde çekirdeklenmiş $Mg_{17}Al_{12}$ çökeltisi (uyumlu)		
Mg-Zn	SSSS	$\rightarrow$ GP bölgeleri Küre $// \{0001\}_{Mg}$ (uyumlu)	$MgZn_2$ Çubuk $\perp \{0001\}_{Mg}$ Hsp $a = 0,52 \text{ nm}$ $c = 0,85 \text{ nm}$ (uyumlu)	$MgZn_2$ $\rightarrow$ Mg_3Zn_2 Küre $// \{0001\}_{Mg}$ $(11\bar{2}0)_{MgZn_2} // (10\bar{1}0)_{Mg}$ Hsp, $a = 0,52 \text{ nm}$ $c = 0,848 \text{ nm}$ (yanı uyumlu)
Mg-Re	SSSS	$\rightarrow$ GP bölgeleri (Mg-Nd) plaka $// \{10\bar{1}0\}_{Mg}$ (uyumlu)	β'' $Mg_3Nd?$ hsp DO ₁₉ süperlatis plaka $\{0001\}_{\beta''} // \{0001\}_{Mg}$ $\{10\bar{1}0\}_{\beta''} // \{10\bar{1}0\}_{Mg}$	β' Mg_3Nd ymk plaka $a = 0,786 \text{ nm}$ $(011)_{\beta'} // (0001)_{Mg}$ $(\bar{1}\bar{1}1)_{\beta'} // (\bar{2}110)_{Mg}$ (yanı uyumlu)
Mg-Th	SSSS	β'' $Mg_3Th?$ Hsp DO ₁₉ süperlatis Küre $// \{10\bar{1}0\}_{Mg}$ (uyumlu)	β' Mg_3Th (i) β'_1 hegzagonal (ii) β'' Ymk (ikisi de yanı uyumlu)	β $Mg_{23}Th_6$ Ymk $a = 1,43 \text{ nm}$ (uyumsuz)
Mg-Ag-RE (Nd)	SSSS	Çubuksu $\rightarrow$ GP bölgeleri $\perp \{0001\}_{Mg}$ (uyumlu)	γ Hegzagonal $a = 0,963 \text{ nm}$ $// [0001]_{Mg}$ (uyumlu)	
		Elipsel $\rightarrow$ GP bölgeleri $// \{0001\}_{Mg}$ (uyumlu)	β Hegzagonal $a = 0,556 \text{ nm}$ $c = 0,521 \text{ nm}$ $(0001)_{\beta} // (0001)_{Mg}$ $(11\bar{2}0)_{\beta} // (10\bar{1}0)_{Mg}$	$Mg_{12}Nd_2Ag$ kompleks Hegzagonal (uyumsuz)

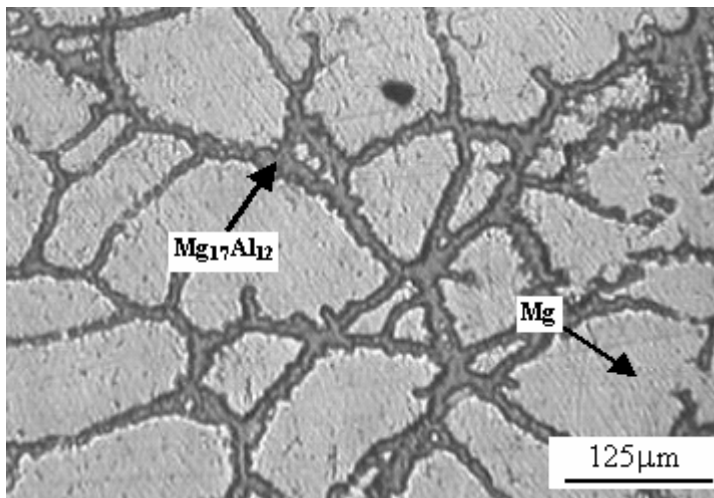
* SSSS: Aşırı doyurulmuş katı eriyik, * Latis: Kafes

DO₁₉ hücresi, magnezyum kristalinin a eksenini uzunluğunun iki katı a eksenine sahiptir. Oysa c eksenini aynıdır. Çökelek, $\{10\bar{1}0\}_{Mg}$ ve $\{11\bar{2}0\}_{Mg}$ düzlemleri boyunca uzanan $\langle 0001 \rangle_{Mg}$ yönlerine paralel çubuklar ya da plakalar olarak oluşur. Mg_3X bileşimi yapısında $(10\bar{1}0)$ ve $(11\bar{2}0)$ düzlemleri tamamen magnezyum atomlarından

oluşmaktadır. Böylece, sadece ikinci en yakın komşu bağlarının değişmesi gerektiği için bu düzlemler boyunca düşük enerjili arayüzey oluşumu beklenir. Bu yapısal özellik geniş sıcaklık aralığı üstünde nispeten kararlıdır ve gerçekleştiği magnezyum alaşımlarının sürünme direncini geliştirmektedir (11).

3.3. AZ91 Alaşımları ve Mg-Al sistemi

Sırasıyla ağırlıkça en fazla alüminyum, çinko ve mangan içeren AZ91 alaşımları 1,81 (g/cm³) yoğunluğa, 71 ısıl iletkenliğe(W/m K), 0,98 özgül ısısına (J/kg K), 26 (10⁻⁶/K) termal genleşme katsayısına, 596-568 °C katılma aralığına, iyi mekanik özelliklere ve dökülebilirliğe sahiptir. Ancak Mg-Al alaşımları geniş katılma aralığına sahiptir ve bu nedenle segregasyon, porozite ve sıcak yırtılma gibi döküm hatalarına karşı hassastır. Şu anda bu alaşımlar yüksek sıcaklıklarda (120 °C üzerinde) mekanik özelliklerinin düşmesinden dolayı oda sıcaklığı civarında kullanılmaktadır. Resim 3.1’de tipik AZ91 alaşımının mikroyapısı verilmektedir. Resimden de görüleceği üzere magnezyum ve alüminyum çoğunlukla tane sınırlarında basit kübik kristal (bkk) Mg₁₇Al₁₂ ötektiğini oluşturur. Bu nedenle alüminyum AZ91 alaşımının mekanik özelliklerini geliştirir. Çizelge 3.5’de AZ91 alaşımlarının kompozisyonu çizelge 3.6’da ise mekanik özellikleri verilmektedir (8, 19, 27).



Resim 3.1. %2 nital ile dağlanmış AZ91 alaşımının optik mikroyapısı

Çizelge 3.5. ASTM AZ91 alaşımları ve kompozisyonu (27)

AZ91 alaşımları	Kompozisyon						
	% Al	% Mn	% Zn	% Si	% Cu	% Ni	% Fe
AZ91A-F	8.3-9.7	Min.0.13	0.35-1.0	0.50	0.10	0.03	
AZ91B-F	8.3-9.7	Min.0.13	0.35-1.0	0.50	0.35	0.03	
AZ91C-T6	8.1-9.3	Min.0.13	0.40-1.0	0.30	0.10	0.01	
AZ91D-F	8.3-9.7	Min.0.15	0.35-1.0	0.10	0.030	0.002	Mak.0.005
AZ91E-T6	8.1-9.3	0.17- 0.35	0.4-1.0	0.20	0.015	0.001	Mak.0.005

* F; Die casting (Basınçlı metal kalıba döküm),

* T6; Sand casting and Permanent mold casting (Kuma ve sürekli kalıba döküm)

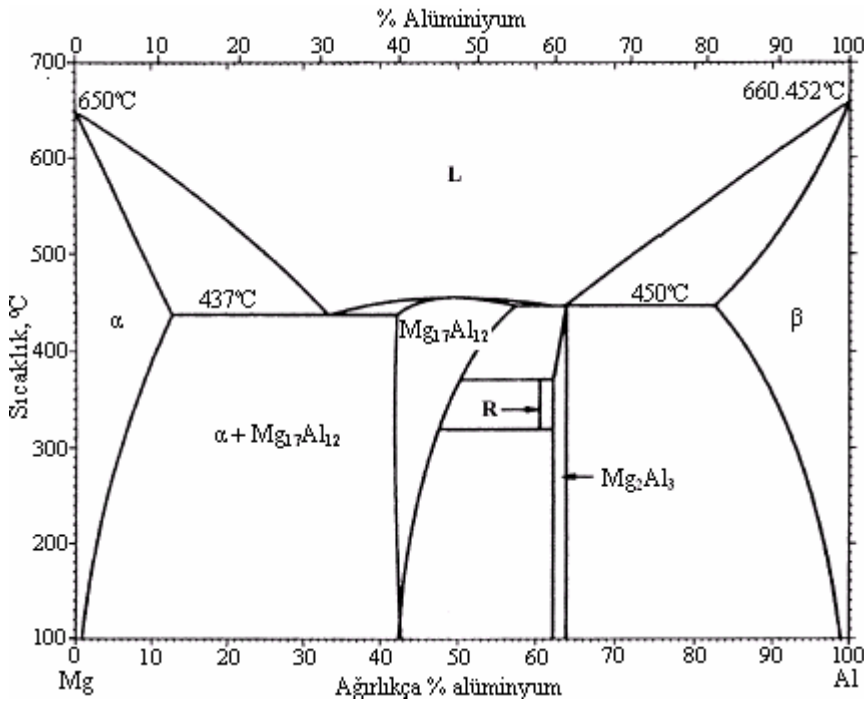
Çizelge 3.6. ASTM AZ91 alaşımlarının mekanik özellikleri (27)

AZ91 alaşımları	Yoğunluk	Elastik Modülü	Çekme Mukv.	Akma dayanımı	Uzama	Sertlik	Kesme Mukv.
	(1000 kg/m ³)	(GPa)	(Mpa)	(Mpa)	(%)	(HB5 00)	(Mpa)
AZ91A-F	1.81	44.8	230	150 (165)	3	63	140
İşlem			F	F	F	F	F
AZ91B-F	1.81	44.8	230	150 (165)	3	63	140
İşlem			F	F	F	F	F
AZ91C-T6	1.81	44.8	275	195 (145)	6	66	145
İşlem			T6	T6	T6	T6	T6

Not: Parantez içersindeki değerler basma akma dayanımını göstermektedir.

Şekil 3.2’de magnezyum-alüminyum faz diyagramı görülmektedir. Diyagramda üç ara faz mevcuttur. Bu fazlar kompleks kübik yapısıyla Mg_2Al_3 ($a = 2.8239$ nm), α -Mn kübik yapısıyla $Mg_{17}Al_{12}$ ($a = 1.056$ nm) ve peritektoid reaksiyon ürünü rombohedral düz çizgi bileşiği R (ϵ , $a=1.03625$ nm)’dir (28). Ötektik sıcaklıkta maksimum alüminyum çözünübilirliği ağırlıkça yaklaşık %13 alüminyumdur. Magnezyum ve intermetalik bileşik $Mg_{17}Al_{12}$ arasında ötektik, ağırlıkça yaklaşık %33 alüminyumdan oluşmaktadır. Tüm ticari magnezyum alaşımlarda alüminyum

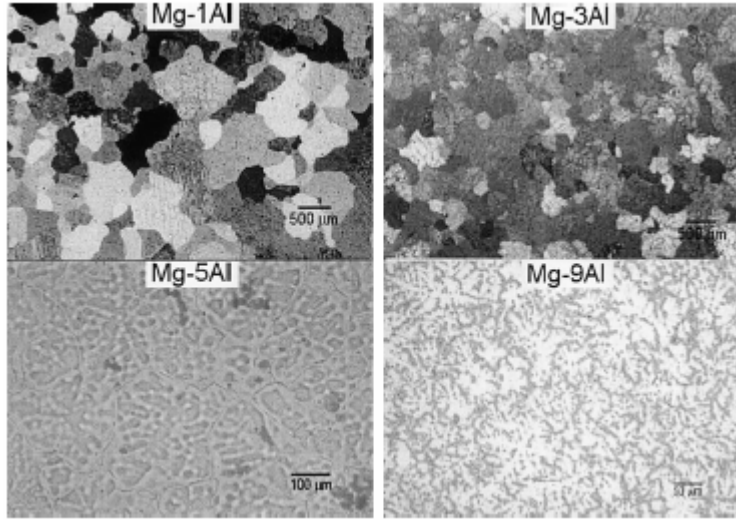
miktarı maksimum katı çözülebilirlik sınırının altında kullanılır ve alaşımlar bu yüzden primer α -Mg fazıyla katılaşırlar. Bu alaşımların denge mikroyapıları %100 α -Mg'dir ancak dengesiz şartlarda normal olarak katılaşma süresince yarı kararlı ötektik oluşur ve döküm mikroyapısında Mg-Al alaşımlarında ağırlıkça % 2 alüminyum azaldığı görülür.



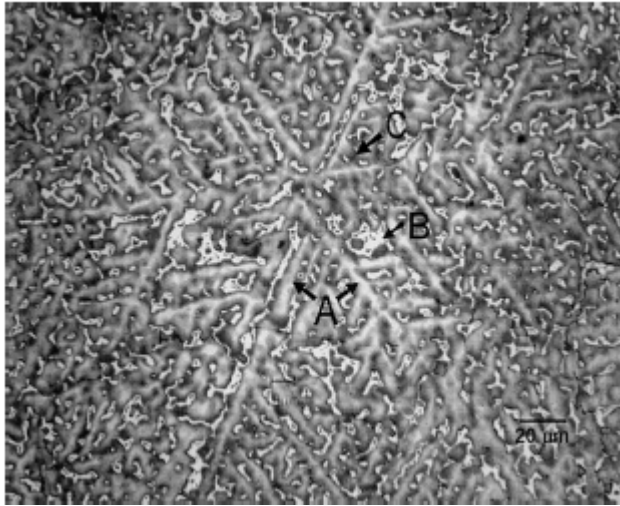
Şekil 3.2. Magnezyum-alüminyum faz diyagramı (19)

Mg-Al alaşımları katılaştığında primer dentrit ve ötektikten oluşan yapıya sahiptir bu oluşum alüminyum içeriğine bağlı olarak değişir. Bu durum Resim 3.2 (a)'da verilmektedir. Yapıda % alüminyum arttıkça oluşan dentritik yapı rahatlıkla görülebilmektedir. Küçük miktarda alüminyum ilavesi, primer fazın hüreselden dentritik yapıya doğru morfolojik değişikliğine neden olur. Rozet'e benzer küre şeklindeki eş eksenli taneler zengin alüminyum katı eriyiği ile dentrit kolları arasında oluşur. Alüminyum miktarı % 5'den daha fazla artırıldığında, dentrit kolları arasında ötektik faz gölcükleri ile dentritler gelişmeye başlar ve alüminyum daha da artırıldığında tamamen dentritik yapı elde edilir. Mg-Al alaşımlarına çinko, manganez, silisyum ve nadir toprak elementleri gibi alaşım elementlerinin az

miktarlarda ilave edilmesi bu elementlerin primer fazın çekirdeklenmesinden sonra ikincil fazı oluşturmak için çoğunlukla segragasyonundan dolayı primer fazın çekirdeklenmesinde etkisi az olmaktadır.



(a)



(b)

Resim 3.2. Artan alüminyum miktarına göre Mg-Al sisteminde dentritik yapının oluşumu. (a) %1, 3, 5 ve 9Al ile sürekli kalıba dökülmüş (b) Mg-%15Al alaşımında elde edilen dentritlerin optik görüntüsü (19)

Alüminyum miktarının artmasıyla birlikte dentritik yapının tamamen geliştiği rahatlıkla görülebilmektedir. Resim 3.2.(b)'de alaşımın mikroyapısı ağırlıkça % 9 alüminyum alaşımına benzemektedir, fakat dentritik yapı % 9 Alüminyum alaşımına

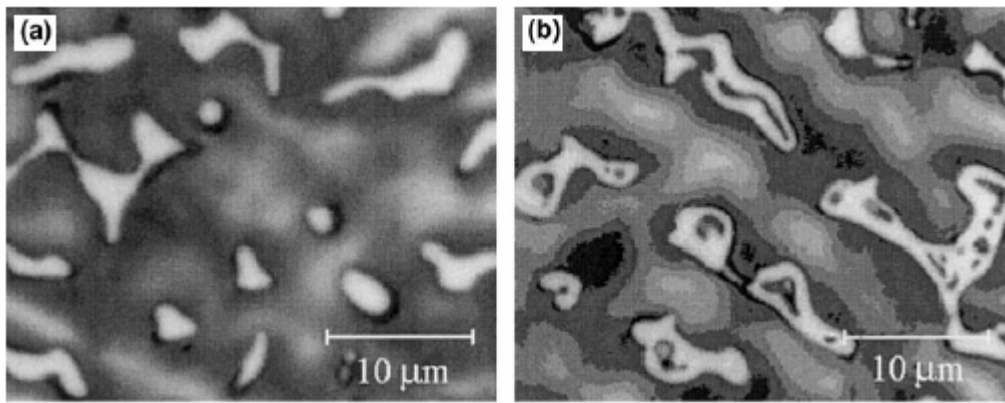
göre daha net görülebilmektedir. Magnezyum dentritleri karakteristik simetrisi altı kat olan forma sahiptir (Resim 3.2.(A)). Dentritler arasındaki beyaz faz ikincil ötektik faz $Mg_{17}Al_{12}$ (B) ve dentritler arasındaki koyu bölgeler zengin-alüminyum katı eriyiğidir (Resim 3.2.(C)). Zengin katı eriyiğin bazıları $Mg_{17}Al_{12}$ fazı içinde oluşur.

Mg-Al alaşımlarının katılaşması 600-650°C aralığında, saf magnezyumun ergime noktasından Mg-9Al'un sıvı sıcaklığına doğru primer α -Mg'un çekirdeklenmesiyle başlar. Sonraki katılaşma, 437 °C'de elde edilen Mg-Mg₁₇Al₁₂ reaksiyonu ile ötektik fazın oluşumunu içermektedir. Mg-Al alaşımlarında oluşan tipik mikroyapıda (Resim 3.2 (b)) ikincil kollarla primer α -Mg dentritlerinin (Resim 3.2 (A)) gelişimi rahatlıkla görülebilmektedir. Mg-Al faz diyagramına göre ötektik fazın alüminyum miktarının ağırlıkça % 13'e ulaştığında görünmesi beklenilir. Ancak yukarıda da bahsedildiği gibi dengesiz soğuma şartlarında ötektik miktarı az gözükcektir.

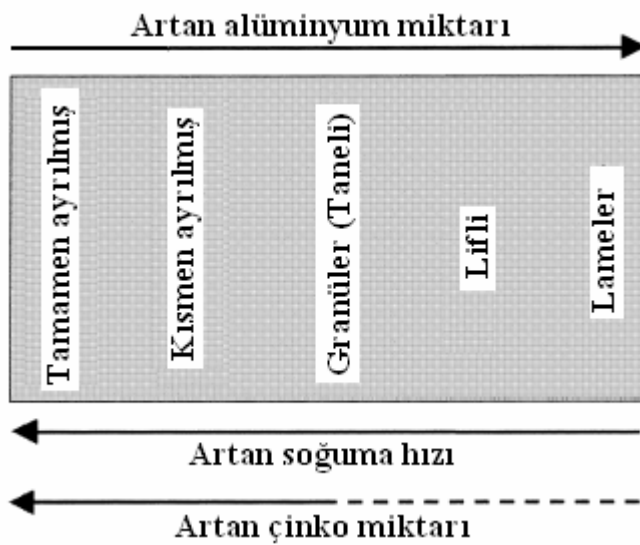
Basınçlı metal kalıba döküm AZ91, AM50 ve AM60 genel ticari magnezyum alaşımlarıdır ve bu nedenle önemli ötektik miktarına sahiptirler. Bu alaşımlarda ötektik katılaşmanın anlaşılması iki ana sebepten dolayı önemlidir. Birincisi, katılaşma sonucu, son mikroyapıda bu alaşımların hem sünekliğini hem de sürünme dayanımını etkileyen daha kırılğan β -Mg₁₇Al₁₂ fazının dağılımını, şekli ve boyutunu kontrol eder. İkincisi, katılaşma işleminin son aşaması olan dentritler arası beslemenin olduğu önemli aşamada, ötektik büyüme besleyebilirliği etkiler ve büyük basınç farklılıkları dentritik ağları içinden sıvı çekilmesini gerektirir. Ötektik büyüme modunda ki fark, sıvıyı dentritik ağ içinden kolaylıkla çekebilmesiyle büyük etkiye sahiptir ve bu nedenle de bu alaşımlarda porozite oluşumuna neden olmaktadır.

%10'un altında alüminyum içeren Mg-Al sisteminde ötektik morfoloji, genelde tamamen ya da kısmen bölümlenmiş olarak görülürken alüminyum miktarıyla alaşım ötektik kompozisyona (%33Al) yaklaştığında düzenli lameler ya da lifli ötektik mikroyapıya sahiptir. Resim 3.3'de tamamen ve kısmen bölümlenmiş iki ötektik mikroyapı verilmektedir. Alüminyum ve çinko miktarı ile soğuma hızının sürekli kalıba dökülmüş alaşımların ötektik morfolojisinde nasıl bir etkide bulunduğu Şekil

3.3'de görülmektedir. Ötektik, alüminyum miktarının artmasıyla az bölünlenmiş iken çinko miktarı ve soğuma hızının artmasıyla daha fazla bölünlenmiştir. Kompozisyonun ve soğuma hızının ötektik morfolojideki etkisi üzerine ana mekanizma katılaşma süresince oluşan alt soğuma ile ilişkilendirilmiştir. Bu mekanizmanın anlaşılması Mg-Mg₁₇Al₁₂'nin modifikasyonu için yapılan araştırmalara yol göstermiştir.

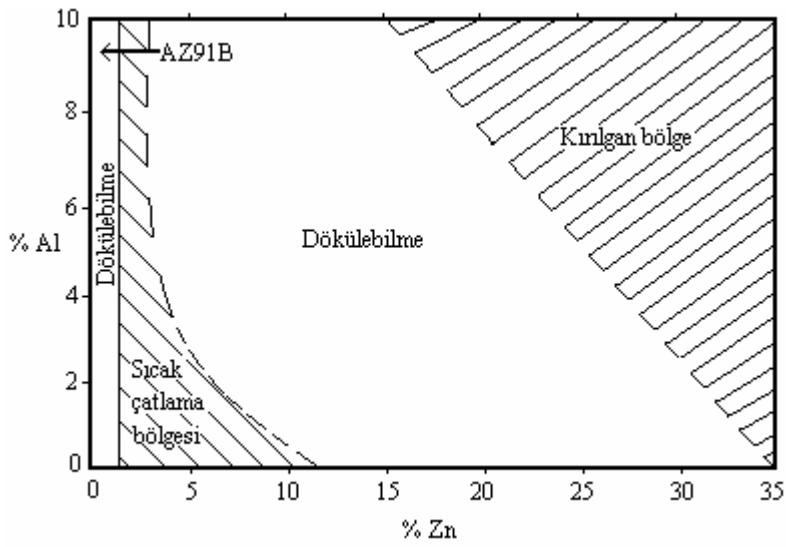


Resim 3.3. Ötektik üstü Mg-Al alaşımlarında ötektik morfoloji (19). Tamamen (a) ve kısmen (b) bölünmüş ötektik yapıda en açık bölgeler β -Mg₁₇Al₁₂ fazı, en koyu bölgeler alüminyumca zengin α -Mg ve gri bölgeler ise primer α -Mg dentritleridir



Şekil 3.3. Sürekli kalıba dökülmüş ötektik üstü Mg-Al alaşımlarında alüminyum ve çinko miktarıyla soğuma hızının ötektik morfolojide etkisi (19)

Mg-Al alaşım sisteminde çinkonun, katılaşma sırasında sıcak çatlama davranışını artırması nedeni ile ilavesi sınırlanmaktadır. Ancak bir miktar mukavametlenmeye neden olur (şekil 3.4). Çinko düzeyi alüminyum miktarı ile zıt olarak hareket eder. AZ91 ve AZ63 gibi iki ticari alaşım nispeten yüksek yorulma dayanımı sergileyen alaşımlardır. Bu alaşımlar ikili Mg-Al alaşımlarından daha geniş kullanım alanı bulmaktadır.



şekil 3.4. Mg-Al-Zn basınçlı metal kalıba döküm alaşımlarının muhtemel bileşim değerleri (11)

Mg-Al alaşımlarının geniş katılaşma aralığı ve dşkk ötektik hacim miktarı nedeniyle ince parçalar dklelebilmektedir. Ancak, bu avantaj aynı zamanda bu alaşımların ötektik segregasyon, porozite ve sıcak yırtılma hatalarına karşı hassaslığını artırır. Döküm parametrelerinin kontrol edilmesiyle bu hataların neden olduğu zararlar minimize edilebilir. Ancak bu hataların oluşumunu önceden tespit edebilmek ve sonrasında engelleyebilmek için Mg-Al alaşımlarının mekanik davranışları ve katılaşma özellikleri hakkında daha fazla araştırma yapılmaya ihtiyaç vardır.

4. MAGNEZYUM ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER

Yakıt tasarrufu sağlamak, araç emisyonlarını minimize etmek, üretimde çeşitliliği artırmak, aynı zamanda güvenliği, güvenilirliği, kaliteyi ve dayanıklılığı sürdürmek amacıyla oluşan ihtiyaç yeni malzeme arayışlarının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu durum kuşkusuz hem varolan hem de kritik uygulamalarda kullanılacak yeni nesil malzemeler için ihtiyaç duyulan gelişmelerden biridir. Bu gelişme metal matris kompozitler olarak adlandırılan yeni metalik malzemeler sınıfının ortaya çıkmasını sağlamıştır. Otomotiv, uzay ve havacılık uygulamalarında ve günlük kullanım amaçlı dikkat çeken metal matrisli kompozitler (MMK'ler) sınıfından biriside parçacık, whisker ve kısa fiber ile takviye edilmiş magnezyum esaslı kompozit malzemelerdir

Günümüzde MMK sistemleri çeşitli boyutlarda gelişim safhasındadır. Son 20 yılda araştırmaların çoğu alüminyum esaslı MMK'ler çevresine odaklanmış ve çoğu uluslararası toplantılarda tartışma konusu olmuştur. Karşılaştırma yapıldığında, magnezyum esaslı kompozitlerin üretim ve özellikleri konusunda araştırma çabaları oldukça sınırlı kalmıştır. Ancak, otomotiv ve havacılık uygulamaları için düşük ağırlıkta parçalara gereksinimin artması çoğu magnezyum alaşımlarıyla ilgili araştırma programları için motivasyon olmuştur. Ayrıca magnezyum MMK'lerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalarda, alüminyum MMK'ler ile ilgili verilerin de etkisi olmuştur (4, 29, 30).

4.1. Üretim Yöntemleri

Alüminyum MMK malzemeler için kullanılan üretim yöntemlerinin tümü magnezyum MMK'ler için de uygulanabilmektedir. Bu üretim yöntemleri sıvı parçacıkların karıştırılması (sıvı metal karıştırma yöntemi), basınçlı ve basınçsız sıvı metal emdirme (infiltrasyon), kapiler emdirme, toz metalurjisi, ekstrüzyon, kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme, difüzyon bağlama ve atomizasyon tekniği gibi üretim yöntemleridir. Çoğunlukla magnezyum esaslı kompozitler döküm yöntemiyle üretilmektedir (8).

4.2. Takviye Elemanlarının Rolü ve Türleri

Bir çok hafif metal uygulamalarında kullanılan malzemelerin yüksek rijitlik ve düşük termal genleşme özelliklerine sahip olması gerekmektedir. Magnezyum bu özellikleri sağlamamaktadır ve bu problemi çözmek için magnezyum esaslı MMK'ler üretilmiştir. Bu kompozitler daha iyi aşınma direncine, yüksek dayanıma, yüksek sürünme direncine ve düşük yoğunluğa sahiptir. Ayrıca işlenebilirlikleri de iyidir. Ancak takviyesiz magnezyum ve alaşımlarına göre dökülebilirlikleri düşüktür (3, 8).

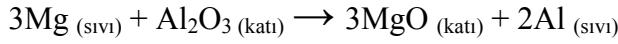
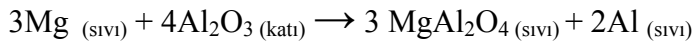
Magnezyum esaslı kompozitlerin üretiminde, takviye malzemeleri genellikle seramik olup fiber ya da parçacıklar şeklinde kullanılmaktadır. Genel takviye elemanları B, B₄C, C, SiC ve Al₂O₃ gibi takviye elemanlarıdır. Bu takviyeler fiber, whisker, parçacık ve plaka şeklinde kullanılmaktadır, ancak magnezyum kompozitlerle yapılan çalışmaların çoğunda sürekli fiber takviye kullanılmıştır. Mg/SiC parçacık ve Mg/Al₂O₃ whisker takviyeli kompozitler otomotiv uygulamalarında kullanımı görülürken Mg/B ve Mg/grafit fiber ve son zamanlarda çalışılan Mg/B₄C parçacık takviyeli kompozitler uzay uygulamalarında dikkat çeken kompozitlerdir (31).

4.3. Matris/Takviye Arayüzey Reaksiyonları

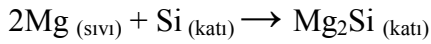
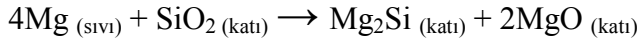
MMK'lerin katılaşması süresince mikroyapının oluşumu çoğunlukla dört faktörden etkilenir: takviyelerde çekirdeklenme, katılaşmayla takviyeyi öne itme, sıvıda takviye çökmesi ve takviyeler ile matris arasında kimyasal reaksiyon. Bugüne kadar MMK'ler üzerinde yapılan çalışmaların çoğu takviye ve matris arayüzey reaksiyonu ile ilgili olmuştur.

Magnezyum esaslı MMK'ler de magnezyum ve takviye arasındaki yüksek kimyasal ilgi, alüminyum esaslı MMK'lere göre iyi arayüzey bağı ile sonuçlanmaktadır. Bazı magnezyum matrisleri ile takviye elemanları birbirine olan kimyasal ilgiye bağlı olarak daha iyi bir arayüzey bağı oluşturur. Ancak bu kimyasal ilgi, ergitme ve döküm işlemlerinde yüksek sıcaklık nedeniyle şiddetli reaksiyonlar oluşturduğu için üretimde bazı sınırlamalara neden olmaktadır (8, 31).

Magnezyum matrisli kompozitlerde reaksiyon ürünleri, takviye ile matris arasında meydana gelen Mg_2Si , MgO ya da $MgAl_2O_4$ spineli gibi ara fazlardır. Alüminyum matrisli kompozitlerden farklı olarak SiC ve karbon takviyesi içeren magnezyum kompozitte kararlı bir karbür oluşmadığı için takviye kaybı problemi görülmez. Al_2O_3 takviyeli magnezyum ana malzemedeki reaksiyonlar spinel ya da oksit şeklinde elde edilir. Bu reaksiyonlar aşağıda verilmektedir.



Bu reaksiyonlar sırasıyla 727 °C'de $\Delta G = -215\text{kJ/mol}$ ve $-117,4\text{kJ/mol}$ serbest enerjiye sahiptir ve her ikisi de kararlı oksitlerdir. Mg/SiC kompozit sisteminde arayüzeyde Mg_2Si oluşur. Bu, muhtemelen SiC takviye malzemesinde serbest silisyum ve SiO_2 bulunması nedeniyle. Mümkün iki tip reaksiyon mevcuttur; ancak, bu reaksiyonların hızı kompozit üretim yöntemine bağlıdır.



Örneğin sıkıştırılmalı döküm (squeeze casting) ve vakumlu emdirme yöntemlerinde sıvı magnezyum ön şekil verilmiş fiberler içersine emdirilir. Sıvı ile fiberlerin temas zamanı sıkıştırılmalı dökümde, vakumlu emdirme yönteminden daha kısadır. Bu yüzden ilk durumda arayüzey reaksiyonuna eğilim nispeten düşüktür. Ticari saf magnezyumda katılaşma hemen hemen tek bir zamanda gerçekleşip, alaşımlardan daha dar katılaşma aralığı ve kısa temas zamanı gösterirken geniş katılaşma aralığına sahip alaşımlarda katılaşma daha uzun olacak ve bu nedenle sıvı-takviye temas zamanı da uzun olacaktır. Bu nedenle, bu gibi durumlar, arayüzeyde oluşacak olan reaksiyonun miktarını belirlerler. Ancak parçacık karıştırılmalı magnezyum döküm kompozitlerde işlem en az bir saat sürer. Bu durumda SiC parçacıkların kimyasına bağlı olarak büyük reaksiyon bölgeleri oluşabilir.

SiO₂ kaplanmış karbon fiber takviyeli döküm magnezyum kompozit malzemede magnezyum ve karbon fiberlerin yüzey kaplaması arasında kimyasal reaksiyon nedeniyle Mg₂Si ve MgO oluşmuştur. Mg-%9Al/B₄C kompozit arayüzeyinde karbonca zengin bir tabaka meydana geldiği görülmüştür. Alüminyum içeren karbon takviyeli magnezyum alaşımlarında Al₄C₃ fazı oluşumuyla karbon fiberlerin bir miktar çözünmesine neden olduğu da aynı zamanda tespit edilmiştir. Bu tür kompozitlerde arayüzey reaksiyonları sonucu oluşan oldukça kırılgan karbürler, oksitler ve nitrürleri engellemek ve takviye kaybını azaltmak için bazı teknikler geliştirilmiştir. Bunlar;

- takviye yüzeyinin kaplanması
- kompozit üretiminin ve sıcaklığın kontrolü
- alaşım elementleri ilavesiyle takviye kararlılığının artırılmasıdır (31).

4.4. Mg/SiC Kompozit Sistem

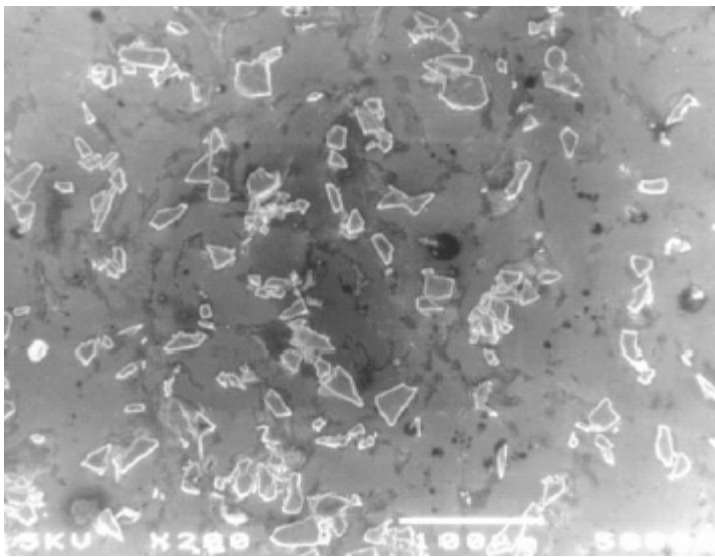
Bu kompozitler ile ilgili geçmişte sınırlı çalışma yapılmıştır. Ancak yapısal uygulamalarda düşük yoğunluklu magnezyum matrisli kompozitlere duyulan ihtiyaç son zamanlarda bu araştırmaları hızlandırmıştır. SiC takviyeli magnezyum esaslı kompozitlerde takviye fiber, whisker ve parçacık şeklinde kullanılmaktadır. Bu kompozitler sıvı emdirme, sıkıştırılmalı döküm, toz metalurjisi ve karıştırma döküm yöntemleri ile üretilmektedir. Ancak maliyet nedeniyle son zamanlarda çalışmalar, SiC parçacık ile karıştırma döküm yöntemine odaklanmıştır. Magnezyum ana malzemeye SiC takviye ilavesi ile malzemenin özellikle elastik modülünde ve çekme dayanımında artış elde edilmektedir (31).

SiC whisker takviyeli magnezyum kompozit malzemenin dayanım değerleri, SiC parçacık takviyeli magnezyumdan daha yüksektir. Ancak whiskerslerin ana malzemede homojen dağılımı zordur. SiC whisker'den hazırlanan önşekilde (preform) sıvı metal emdirme yönteminin kullanılması, whiskerlerin belirli bölgelere yığılması (kümeleşme) problemine neden olmuştur. Toz metalurjisi yönteminde ise uygulanan

ekstrüzyon sırasında SiC fiberlerin kırıldığı görülmüştür. Bu etkilerin her ikisi de mekanik özelliklerin düşmesine neden olmuştur (8).

SiC parçacıkları ve magnezyum ana malzeme arayüzeyinde oluşan reaksiyon ürünlerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Magnezyumun yüksek kimyasal ilgisi nedeniyle SiC parçacıkları, üretim şartlarına bağlı olarak nano kristalli arayüzeyssel filmi MgO parçacıklarıyla (10-70 nm çapında) ana malzemeden ayrılmaktadır. Bu filmler 500 nm üzerinde kalınlığa ulaşır ve arayüzeyde çatlama ihtimalini artırır. MgO, Al_2O_3 'in oksit indirgemesinden oluşabildiği gibi üretim işlemi sırasında sıcaklığın bir sonucu olarak SiC yüzeyinde oksit oluşumundan ortaya çıkabilir. Oksit filmine ek olarak kompozitte ikincil faz Mg_2Si ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazı gözlemlenmiştir. İnce parçacıklar şeklindeki Mg_2Si , magnezyum matrisi ve SiC yüzeyinde ki SiO_2 arasında meydana gelen reaksiyondan kaynaklandığı tespit edilmiştir (33).

Resim 4.1'de toz metalurjisi ile üretilmiş %10 SiC_p takviyeli AZ91 alaşımının SEM'de (Scanning Electron Microscopy) çekilmiş mikroyapısı gösterilmektedir. Çizelge 4.1'de ise bu alaşımda, farklı boyutlarda %10 SiC_p kullanılması ile elde edilen mekanik özellikler verilmektedir.



Resim 4.1. SiC_p takviyeli AZ91 alaşımının SEM mikroyapısı (33)

Çizelge 4.1. SiC_p takviyeli AZ91 alaşımasının mekanik özellikleri (33)

SiC boyutu (µm)	%0,2 Deneme dayanımı (MPa)	Elastik modulus (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AZ91	150	42	190	1,15
15	120	44,5	135	0,47
20	117	45,1	120	0,24
25	117,5	42,15	127,5	0,33
38	110	42	120	0,45
50	105	49,8	110	0,23

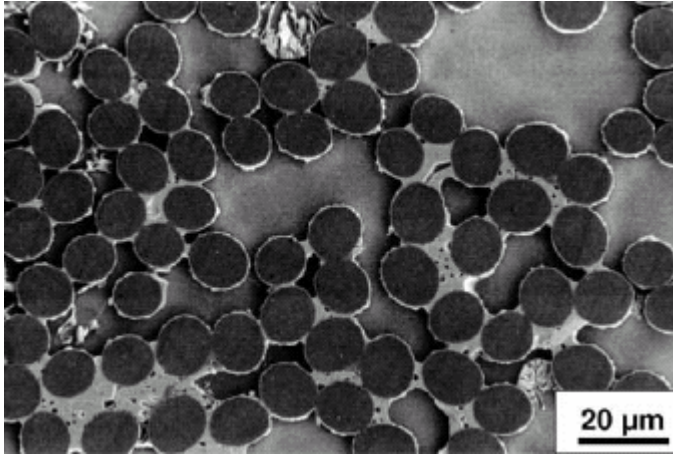
SiC parçacık takviyeli magnezyum kompozitlerde bileşenler arasındaki bağlanmanın adhesiv karaktere sahip olduğu saptanmıştır. Bu tür arayüzey bağlanma tipi, sıvı magnezyum tarafından SiC'ün yüksek ıslatılabilirliği ve sıvı magnezyumda SiC'ün yüksek kararlılığı ile ilgilidir. Ancak alaşım elementlerinin hazırlanmasında ve üretim sırasında işlem parametrelerinin yanlış seçilmesi magnezyum ve SiC parçacıkları arasında adhesiv bağlanmayı olumsuz yönde etkileyebilmektedir (34).

4.5. Mg/Karbon ve Mg/Grafit Kompozit Sistem

Karbon ve grafit fiber takviyeli magnezyum esaslı kompozitler yüksek özel dayanıma, rijitliğe ve düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Bir çok avantaja sahip bu kompozit malzemelerde karbon ve grafit fiber takviyeler iyi elektriksel ve ısı iletkenlik ve düşük termal genleşme katsayısı ile yüksek fiziksel özelliklere sahiptir. Sıvı üretim metotları nispeten kolaylık ve düşük maliyet sağlamaktadır. Çoğunlukla bu kompozitler basınçlı emdirme yöntemi ile üretilmektedir. Resim 4.2'de döküm tekniği ile üretilmiş %50 süreksiz P100S karbon fiber takviyeli AZ91D alaşımı matrisli kompozitin SEM mikroyapısı verilmektedir (35).

MMK'ler de karbon takviyenin kullanılması ile karbon ve matris arasında reaksiyon oluşumu ve galvanik korozyon problemi mevcuttur. Arayüzeyde kimyasal reaksiyon, alüminyum, titanyum ve demir gibi alaşımlar için şiddetlidir. Bu nedenle karbon takviye bu ana malzemeler için çok kullanışlı değildir. Örneğin karbon takviyeli

alüminyum matrislerde Al_3C_4 reaksiyon ürünü higroskopik (suya ilgi duyan)'tir ve sulu ortamlarda hızla korozyon oluşmaktadır. Ancak alüminyum ihtiva eden magnezyum alaşımlarında da çok fazla olmamakla birlikte aynı fazın oluştuğu ve oluşan bu ürünün magnezyum kompozitin mekanik özellikleri üstünde çok fazla bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan karbon takviyeli magnezyum esaslı kompozitlerde magnezyum karbür oluşturmaz. Bu durum, karbon takviyeli magnezyuma olan ilgiyi artırmaktadır.



Resim 4.2. P100S Karbon fiber takviyeli AZ91D alaşımlarının parlatılıp dağlanarak elde edilmiş SEM görüntüsü (36)

Mg/Grafit kompozitlerin üretiminde en önemli zorluk magnezyumun ıslatılabilirliğinin zayıf olmamasıdır. Bu problemin üstesinden gelmek için fiberlerin kaplanması çalışılmıştır. Kaplama sağlanmasıyla sıvı metalin fiberleri ıslattığını ve aynı zamanda fiberlerin üretim sırasında kimyasal reaksiyonla kayba uğramasının engellendiği gözlemlenmiştir. Grafit fiberlerin kaplanması için kimyasal buhar biriktirme (CVD) ile TiB_2 ve SiO_2 kaplamalar çalışılmıştır. Bu çalışmalarla iyi ıslatma ve bağlanma ile sonuçlanan oksitlenmemiş SiO_2 kaplayıcı elde edilirken T300 (PAN; Poli-Akrol-Nitril) fiber yüzeyinin kaplanması ile iyi sonuç elde edilmemiştir. TiB_2 kaplı P100 grafit fiberle takviye edilmiş difüzyon bağlama AZ91 ve AZ31 kompozitlerde üretim ve ısıl işlem sırasında arayüzey reaksiyon bileşikler oluşmamıştır. EDX analiz sonuçları her iki kompozitte ara fiber boşluklarında çözünen zayıf bölgeler ve arayüzey yakınında katı alüminyumca zengin bölgeleri

tespit etmiştir. Bu durum arayüzeylerde alüminyumun tüketiminin meydana geldiğini göstermektedir. TEM inceleme sonuçları fiber-matris arayüzeyi yakınında yoğun dislokasyon altyapısını ortaya çıkarmıştır. SiO_2 ve TiB_2 kaplı grafit fiber takviyeli bu kompozitlerin analiz özelliklerinde yüksek çekme dayanıma sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Yüzey kaplama yerine sıkıştırılmalı döküm yöntemi kullanıldığında Mg/grafit fiber kompozitte büyük arayüzey reaksiyonunun oluşmadığı ve belirlenemeyen ancak muhtemelen Al_3C_4 olduğu tahmin edilen bir bileşiğin olduğu tespit edilmiştir.

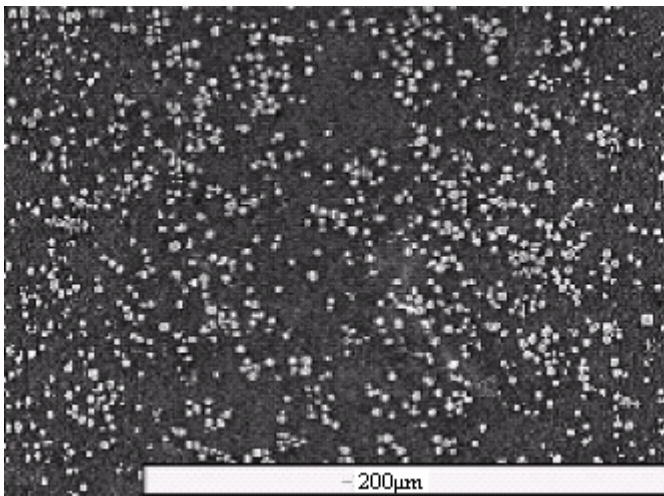
Sıvı emdirme yöntemi ile üretilmiş SiO_2 kaplı P55 fiber takviyeli saf magnezyum, ZE41 ve AZ91 matrisli kompozitlerde ZE41/P55 kompozit boylamsal yönde 289 MPa ve enine yönde 75 MPa çekme dayanımına sahip iken AZ91/P55 kompozitin boylamsal yönde 586 MPa ve enine yönde 44,85 MPa çekme dayanımı ile en iyi özelliklere sahip olduğu kanıtlanmıştır. Ana malzemede seryum ve lantanum gibi nadir toprak elementleri bulunduğu bu elementler ZE41/P55 kompozitte büyük oksitler oluşturmak için arayüzeye difüz etmiştir. Amorf silika kaplama, AZ91 ve saf magnezyum kompozitlerin arayüzeyinde ince taneli MgO tabakaya dönüşmüştür. Bu aynı zamanda fiber reaksiyon bölgesi arayüzeyi yakınında elde edilen çatlak oluşumunu başlatmıştır. Ancak bu ince taneli MgO, AZ91 kompozit malzemenin özelliklerinde artışın da nedeni olduğu rapor edilmektedir (31, 37).

4.6. Mg/TiC Kompozit Sistem

Mg/TiC genelde sıvı emdirme yöntemiyle, titanyum ve karbon tozlarının karıştırılıp daha sonra sıvı magnezyumun bu takviye üzerine (basınçsız infiltrasyon) ya da sıvı içersine takviyenin basınçla emdirilmesi ile (basıncılı infiltrasyon) üretilmektedir. Basınçsız infiltrasyon yöntemiyle önceden karıştırılmış Ti_p ve C_p potanın dip kısmına yerleştirilir. Toz karışımının üzerine ise magnezyum matris malzemesi ingot halinde yerleştirilir ve daha sonra tozlar koruyucu atmosfer altında (argon, azot gibi) ısı verilerek sıvı metalin kendi kendine bu takviye parçacıklarına infiltrasyonu sağlanır (38).

Son yıllarda SHS (Self-propagating High-temperature Synthesis, yüksek sıcaklıkta kendiliğinden yayımlı kimyasal bileşim) yöntemiyle TiC üretimi çalışılmaktadır. Aynı zamanda yakma sentezi olarak ta bilinen SHS, yüksek saflıkta ürün, düşük işlem maliyeti, enerji ve zamanda tasarruf ve verimlilik gibi avantajlara sahiptir. Islatabilirliği geliştirmek için toz karışımlarına alüminyum tozu da eklenmektedir. SHS yönteminde TiC partikülleri alüminyum içerisinde reaksiyon yoluyla (in-situ) oluşmuştur. Bu yöntem ile magnezyum kompozitlerde alüminyumla kaplanmış TiC parçacıkları yüzey özelliklerini iyileştirerek ıslatabilirliği önemli derecede geliştirmektedir.

SHS yönteminde TiC-Al master alaşımını elde etmek için parçacık şeklinde titanyum, alüminyum ve karbon tozları kullanılır. Bilyalı öğütme yöntemiyle hazırlanan toz karışımına basınç altında soğuk izostatik sıkıştırma yapılmaktadır. Daha sonra elektrikli direnç fırınında vakum altında ısıtılmaktadır. Bu şekilde alüminyum içerisinde in-situ TiC partikülleri elde edilmiştir. Resim 4.3'de SHS yöntemi ile üretilmiş TiC takviyeli AZ91/TiC döküm kompozitin SEM görüntüsü, Çizelge 4.2'de ise yine bu kompozitten elde edilen mekanik sonuçlar verilmektedir. Sonuç olarak bu yöntemle daha küçük takviye partikülleri, iyi ıslatabilirlik ve alaşımsız magnezyuma göre daha iyi sertlik, aşınma direnci ve çekme dayanımı sağlanır (39).



Resim 4.3. AZ91/ % 10 TiC döküm kompozitin SEM mikroyapısı (39)

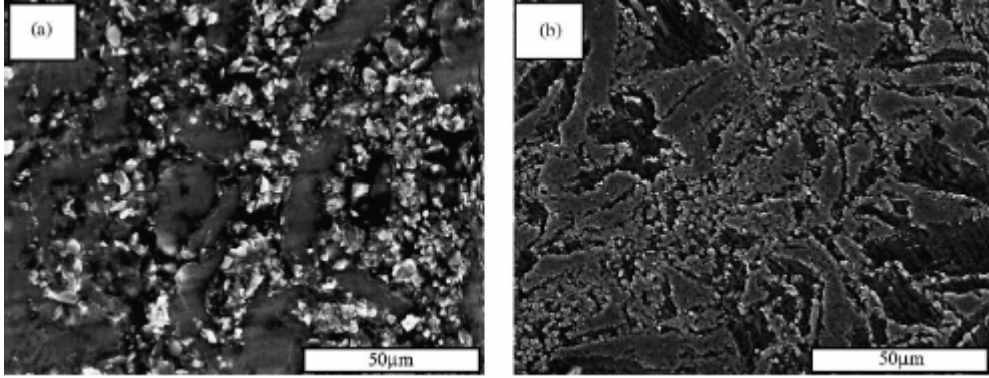
Çizelge 4.2. Ortam sıcaklığında, dökülmüş halde ki AZ91 ve AZ91- %10 TiC (ağırlıkça) kompozitin mekanik özellikleri (39)

Malzeme	Sertlik (HB)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AZ91	60	160	9
AZ91- % 10 TiC	83	214	4

4.7. Mg/B₄C Kompozit Sistem

Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılan takviye elemanlarından birisi de B₄C'dür. B₄C partikül takviyeli magnezyum kompozitler düşük yoğunluğa sahip sert, dayanıklı ve rijit malzemelerdir. Hem bulunduğu ana malzemede hem de diğer takviyeler için kaplama olarak kullanıldığında ıslatabilirliği önemli ölçüde geliştirmektedir ve ısıtılma işlemi süresince ana malzeme/takviye arayüzey reaksiyonunu azaltmaktadır. Ayrıca Mg-Al sisteminde çekirdeklenmeyi artırarak heterojen Mg₁₇Al₁₂ çökeltisi sağlar. Mg/B₄C kompozitler çoğunlukla plazma biriktirme, difüzyon bağlama ve toz metalurjisi ile üretilmektedir. Toz metalurjisi yöntemi 500 °C üstündeki sıcaklıklarda borun aktifliği nedeniyle tercih edilmektedir (31, 40).

Resim 4.4'de hacimce % 10 ve % 20 B₄C takviyeli toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Mg/B₄C kompozitin tipik mikroyapıları görülmektedir. Takviye ile ana malzeme tozlarının farklı boyutlarda olması homojen olmayan bir yapı meydana getirebilmektedir. Bu durum saf magnezyum ile B₄C tozlarındaki büyük boyut farklılıklarına yorumlanmaktadır. Bu kompozitte magnezyum döküm ingotuna göre minimum mikro-gözenek, daha yüksek sertlik ve aşınma direnci elde edilmiştir. Saf magnezyum döküm için Brinell (HB) sertlik değeri 32,3 iken Mg/%10B₄C'de 44,0 ve Mg/%20B₄C'de ise 133,3 olarak elde edilmiştir. Ayrıca yapılan X-ışını analizlerinde Mg/B₄C kompozitte MgO ve MgB₂ fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir (40).



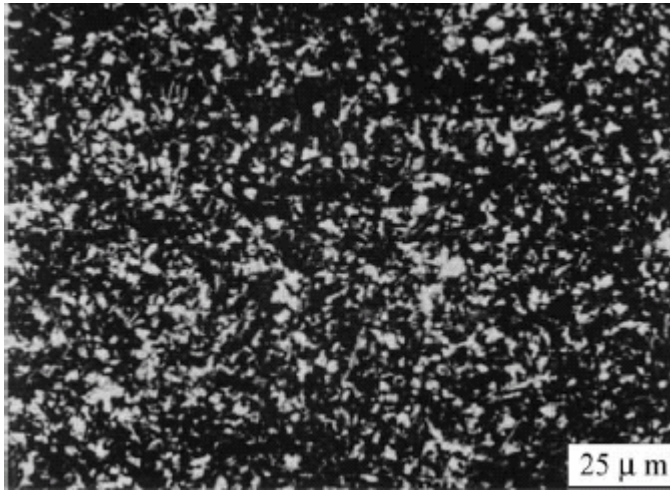
Resim 4.4. T/M yoluyla üretilen B_4C/Mg kompozitlerin SEM mikroyapıları. Hacimce %10 (a) ve %20 (b) B_4C ile takviye edilmiş (40)

4.8. $Mg/Al_{18}B_4O_{33}$ Kompozit Sistem

Son on yıla kadar alüminyum borat ($Al_{18}B_4O_{33}$) whisker ile takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitler kapsamlı olarak çalışılmış ve bazı $Al/Al_{18}B_4O_{33}$ kompozit parçaları otomobil motorlarında kullanılmıştır. Ancak, $Al_{18}B_4O_{33}$ ile takviyeli magnezyum kompozitler ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır. Günümüzde $Al_{18}B_4O_{33}$ takviye elemanı, magnezyum esaslı kompozitlere kazandırdığı avantajlar nedeniyle ilgi çekmektedir. $Al_{18}B_4O_{33}$ whisker, yüksek dayanım, elastik modülü ve düşük termal genleşme katsayısına sahiptir ve SiC takviye elemanı ile mukayese edilecek özelliklere sahiptir. Belki de en önemlisi SiC 'ün maliyeti karşısında kullanımını sınırlandırırken, $Al_{18}B_4O_{33}$ daha ucuz olması bu tür takviyenin tercih nedeni olarak söylenebilir.

$Al_{18}B_4O_{33}$ takviyeli alüminyum kompozitler için yapılan geçmişteki araştırmalar, üretim ve ısıtılma süresince $Al_{18}B_4O_{33}$ whiskerin ana malzeme ile kolayca tepkimeye girdiğini göstermiştir. Örneğin, $Al_{18}B_4O_{33}$ whisker magnezyum ihtiva eden alüminyum alaşımlarında $520\text{ }^{\circ}C$ 'de ve alüminyum ile $730\text{ }^{\circ}C$ 'de tepkimeye girer. Bu reaksiyon, whisker kaybına neden olur ve takviye verimliliğini nispeten azalır. Bu yüzden $Al_{18}B_4O_{33}$ whisker takviyeli magnezyum kompozitin geliştirilmesinde karşılaşılan problem, üretim ya da sonraki servis işlemleri sırasında arayüzey reaksiyonu olmaktadır. Ancak şu ana kadar $Al_{18}B_4O_{33}$ whisker takviyeli magnezyum kompozitlerin arayüzey davranışlarında az bilgi mevcuttur.

Resim 4.5’de sıkıştırırmalı döküm ile üretilmiş MB15(Mg-Zn-Zr)/Al₁₈B₄O_{33w} kompozitin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Ana malzeme ve takviye arasında arayüzey reaksiyonu sonucu sürekli üniform ve kararlı MgO tabakası oluşmuştur. Oluşan bu tabaka sonraki arayüzey reaksiyonlarının ilerlemesini önlemektedir. Ayrıca MgO, whisker yüzeyinde kaplanması düzenli ve dar olan bir tabakadır. Bu kompozitte düşük arayüzey reaksiyon hızı, üniform ve yoğun MgO reaksiyon katmanında sınırlı difüzyon kanallarının bulunmasında kaynaklanmaktadır (41, 42).



Resim 4.5. Sıkıştırırmalı döküm MB15/Al₁₈B₄O_{33 w} kompozitin optik mikroskop görüntüsü (42)

Çizelge 4.3’de AZ91 alaşımı ile birlikte %30 Al₁₈B₄O₃₃ whisker takviyeli normal AZ91/Al₁₈B₄O₃₃ kompoziti ile ısıtıl işlemli iki AZ91/Al₁₈B₄O₃₃ kompozitinin çekme testi sonuçları verilmektedir. AZ91 alaşımına Al₁₈B₄O₃₃ ilave edilmesiyle akma dayanımı, çekme dayanımı ve elastik modülünün de artış gerçekleşirken % uzama önemli derecede düşmektedir. 400 °C sıcaklığa maruz kalma sonrası kompozitin değişmeyen arayüzey reaksiyon katmanı ilişkisinden dolayı çekme özelliklerinde ısıtıl işlemin az etkisi vardır. Kompozit, 100 saat 250 °C’de tutulma sonrası çekme dayanımı ve elastik modülünde az miktarda artış göstermektedir. Bu durum, matriste Mg₁₇Al₁₂ çökeleklerinin neden olduğu yaşlandırma etkisine bağlanmaktadır (41).

Çizelge 4.3. AZ91 alaşımı ile AZ91/Al₁₈B₄O₃₃ kompozitlerin ortalama çekme özellikleri (41)

Malzeme	Durumlar	% 0,2 Akma dayanımı ($\sigma_{0,2}$, MPa)	Çekme dayanımı (σ_b , MPa)	% Uzama (ϵ , %)	Elastik modülüs
AZ91	Döküm	90 (2)	188 (3)	11,72 (0,05)	45 (1)
AZ91/Al ₁₈ B ₄ O ₃₃	Döküm	266 (13)	352 (5)	0,97 (0,07)	67 (2)
AZ91/Al ₁₈ B ₄ O ₃₃	250 °C/100 saat	270 (11)	368 (6)	0,96 (0,05)	71 (4)
AZ91/Al ₁₈ B ₄ O ₃₃	400 °C/50 saat	261 (10)	353 (9)	0,96 (0,02)	65 (3)

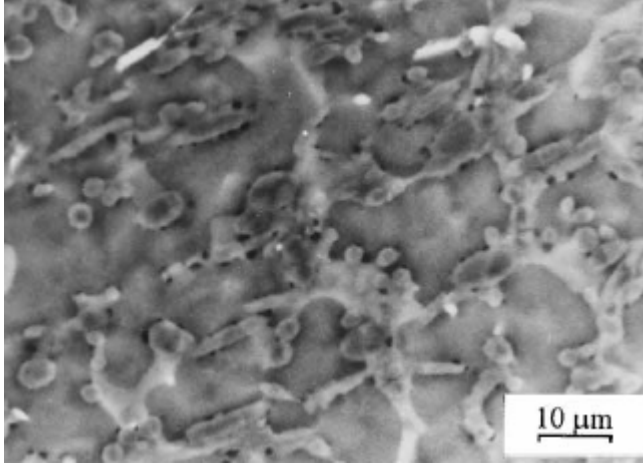
4.9. Mg/Al₂O₃ Kompozit Sistem

Al₂O₃ (alumina) parçacık ve fiber takviyeli magnezyum MMK'ler için bir çok çalışma yapılmaktadır. Geçmişte Al/Al₂O₃ kompozitler ile ilgili yapılan çalışmalar bu kompozit malzemelere yol göstermiştir. Alüminyum matrislere göre magnezyum ve alaşımları Al₂O₃ takviyesi ile daha iyi ıslatabilirliğe sahiptir. Termodinamik olarak Al₂O₃, magnezyum ile MgAl₂O₄ spineli ya da MgO oluşumu ile sonuçlanan kimyasal reaksiyona karşı kararlı değildir. Magnezyum kompozit üretiminde ticari Al₂O₃ fiber önşekiller ile inorganik bağlayıcı olarak müllit (3Al₂O₃.2SiO₂) kullanıldığında magnezyum, silika ile daha güçlü reaksiyon göstermektedir.

Resim 4.6'da sıkıştırırmalı döküm ile üretilmiş %20 Al₂O₃ kısa fiber takviyeli AZ91/Al₂O₃ kompozitin TEM (Transmission Electron Microscopy) mikroyapısı verilmektedir. Çizelge 4.4'de ise DMD (Disintegrated Melt Deposition; atomize edilmiş sıvı biriktirme) yöntemi ile üretilen farklı partikül boyutlarında % 1,1 Al₂O₃ takviyeli Mg/Al₂O₃ kompozitinin mekanik özellikleri verilmektedir. Bu yöntem ile yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir.

İntermetalik faz çökeltileri fiberler ve/veya inorganik bağlayıcı üzerinde çekirdeklenmeye eğilim gösterir. Mg/Al₂O₃ kompozitlerin üretiminde (örneğin; sıkıştırırmalı döküm) sıvı magnezyum ile fiberlerin kısa süreli teması gereklidir. Bu durum çalışma sıcaklığını oldukça sınırlamaktadır. Fiber-matris reaksiyon düzeyi çalışma sıcaklığına bağlıdır. Alumosilikat fiberler (%50 Al₂O₃, %50 SiO₂)

magnezyum ile tamamen reaksiyona girer. Örneğin ana malzemede kimyasal reaktivitesi yüksek alaşım elementlerinden nadir toprak elementleri ya da zirkonyum kullanıldığı takdirde takviye-matris arayüzeyinde segregasyon oluşmaktadır.



Resim 4.6. %20 Al₂O₃ kısa fiber takviyeli sıkıştırılmalı döküm ile üretilmiş AZ91/Al₂O₃ kompozitin TEM mikroyapısı (43)

Çizelge 4.4. %1,1 Al₂O₃ takviyeli Mg/Al₂O₃ kompozitinin mekanik özellikleri (44)

Malzeme	Sertlik		%0,2 Deneme dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)
	Makro (15HRT)	Mikro (HV)		
Mg/0,00 Al ₂ O ₃	37,1 ± 0,7	40 ± 0,2	97 ± 2	173 ± 1
Mg/Al ₂ O ₃ (50nm)	64,6 ± 0,8	65,9 ± 0,9	175 ± 3	246 ± 3
Mg/Al ₂ O ₃ (0,3 µm)	59,4 ± 0,6	52 ± 0,8	200 ± 1	256 ± 1
Mg/Al ₂ O ₃ (1,0 µm)	63,8 ± 0,5	58,8 ± 0,5	209 ± 1	242 ± 3

Yapılan çalışmalarda, hem QE22 (Mg-2,5Ag-2,5Nd) hem de Mg-2,5Nd alaşımlarının hacimce %20 Al₂O₃ (saffil) fiber takviyesi ile oda sıcaklığında ve 200°C’de iyi çekme dayanımına sahip olduğu bulunmuştur. Nd ilavesi ile fiber-matris arayüzeyinde Nd segregasyonun, matris ve fiber arasında ki yüksek reaksiyonu engellediği tahmin edilmektedir. AZ91 matrisli tamamen kısa fiber Al₂O₃ takviyeli pistonlar üretmiştir. Bu kompozit parça yüksek sıcaklıklarda dayanımını kaybetmiştir. Ancak QE22 ve Mg-Nd ikili alaşım matrisi ile en iyi sonuçları elde edilmiştir (8).

5. Mg/Mg₂Si ESASLI KOMPOZİT MALZEMELER

Son zamanlarda düşük yoğunluğa ve yüksek sertlik ve dayanıma sahip Mg₂Si (magnezyum silisit) takviyeli magnezyum esaslı MMK malzemelere ilgi artmaya başlamıştır. Yapısal uygulamalarda yüksek potansiyele sahip bu kompozitlerde Mg₂Si takviyesi genellikle parçacık şeklinde kullanılmaktadır. Üretiminde ise sıvı karıştırma, toz metalurjisi ve mekanik alaşımlama (MA) tekniklerinin kullanımı yaygındır. MA ile üretilen Mg/Mg₂Si kompozitlerde karıştırma süresi ve Mg₂Si yüzde oranının artması ile akma dayanımında artış elde edilmektedir. Bunun yanında Mg₂Si fazı, mekanik alaşımlama da çok ince tane yapısı oluşturmaktadır. Tane boyutu, Mg₂Si dağılım partikülleri ile sınırlanarak mukavemetlendirme sağlamaktadır ve magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini oldukça etkilemektedir. Bu yüzden MA tane boyutunu küçültmek için uygun bir işlemdir. Ancak magnezyumun yüksek aktifliği nedeniyle magnezyum alaşımlarının mekanik alaşımlama üzerine araştırılması sınırlanmıştır.

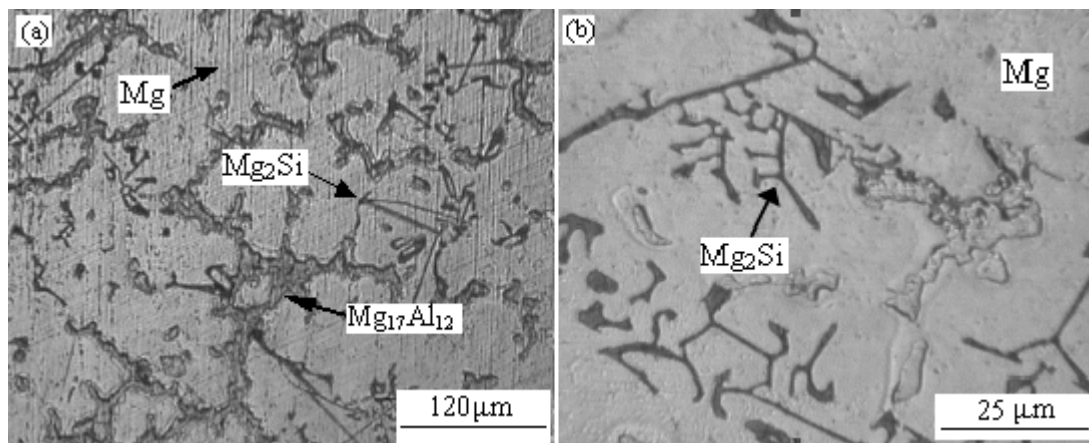
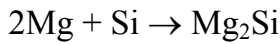
Mg₂Si takviye elemanının reaksiyon yoluyla elde edildiği (in-situ) Mg/Mg₂Si esaslı kompozit malzemelerde, Mg₂Si takviye elemanı yüksek çalışma sıcaklıklarında az bozunduğunda dolayı termodinamik olarak daha kararlıdır. Ayrıca ana malzemede Mg₂Si dağılımı uniform'dur ve ana malzeme-takviye arayüzeyi uygun olduğu için arayüzey bağı daha güçlüdür. Bu nedenle bu kompozitlerde yüksek mekanik özellikler elde edilmektedir (4, 45, 46) .

5.1. Metaller Arası Bileşik Mg₂Si Fazı

Silisyumun magnezyumda çözünabilirliği %0,003'dür ve bu yüzden çözelti halindeki silisyum magnezyumla reaksiyona girerek Mg₂Si fazını oluşturmaktadır (47). % 36 alüminyum ve % 63,9 magnezyum bileşiminden oluşan bu faz, 1085 °C gibi oldukça yüksek ergime sıcaklığına, 1,9 g/cm³ yoğunluğa, 460 HV_{0,3} yüksek sertliğe, 120 GPa yüksek elastik modüle, 7,5 x 10⁻⁶ K⁻¹ düşük termal genleşme katsayısına, yüksek akma dayanımına ve dengeli arayüzeye sahiptir. Bu intermetalik faz oldukça kararlıdır ve yüksek sıcaklıklarda tane sınırı kaymasını engelleyebilmektedir. Mg₂Si

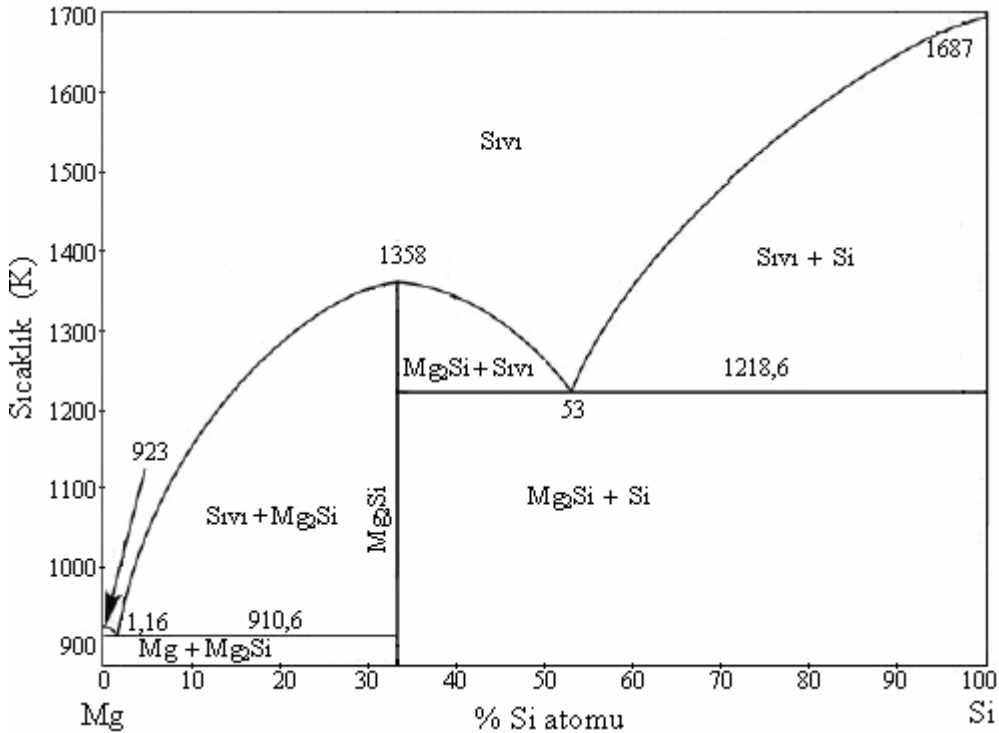
fazı, Çin harfine benzer bir şekle sahiptir ve dengeli (steykometrik) silisit olmasıyla kullanıldığı malzemenin dayanımını ve sertliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu faz, CaF_2 tipi yüzey merkezli kübik kafese ve 0,6351 nm kafes sabitine sahiptir. Yarı iletkenidir ve 227°C 'den 500°C 'ye değişen sıcaklıklarda termoelektriksel enerji dönüşümleri için umut veren bir malzemedir. Bu malzemenin diğer avantajları ise kendisini oluşturan bileşenlerin yerkabuğunda bol olması ve üretiminde çevre için zararlı olmamasıdır.

Mg_2Si takviyeli kompozitlerin üretiminde genellikle Mg-Al alaşım grubu ana malzeme olarak tercih edilmektedir. Ancak Mg_2Si fazı, yapısı nedeniyle (boyut, şekil, dağılım) ana malzemede sık sık zayıf mekanik özelliklere neden olmaktadır. Bu nedenle Mg_2Si boyut ve şekli üzerine birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarla fazın yapısı istenen şekle getirildiğinde ana malzemede oldukça yararlı intermetalik bileşik olarak katkıda bulunmaktadır. Resim 5.1'de in-situ AZ91/ Mg_2Si kompozitte Çin harfi şeklindeki Mg_2Si fazının farklı büyütmelerde ki optik görüntüleri verilmektedir. Aşağıdaki reaksiyona göre katılaşma süresince sıvıda Mg_2Si fazı oluşur (2, 4, 46, 48, 49).

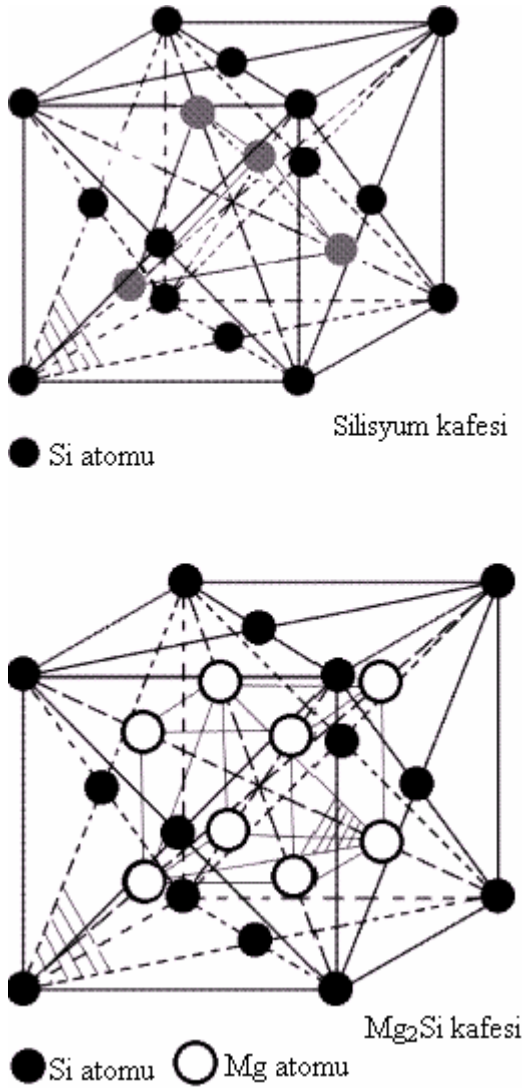


Resim 5.1. In-situ AZ91/ Mg_2Si kompozit malzemede Çin harfi şeklindeki Mg_2Si fazının optik mikroskop görüntüsü

Şekil 5.1’de Mg-Si faz diyagramı verilmektedir. Saf magnezyumun kaynama noktası ile Mg_2Si fazının ergime sıcaklığı hemen hemen birbirine yakındır. Bu nedenle sıvı işlemleri sırasında Mg_2Si fazının kristalleşmesi ihtimali vardır. Burada Mg_2Si fazının düz çizgi bileşiği olduğu görülebilecektir. Bu nedenle Mg_2Si fazı tek bir sıcaklık aralığında katılaşmakta ya da erimektedir (49). Şekil 5.2’de ise silisyum ve Mg_2Si fazının kristal kafes yapısı verilmektedir. Silisyum, YMK kafes yapısının değişik formu olan elmas kübik yapıya sahiptir (a). Her ne kadar silisyum ve Mg_2Si kristalleri uzay grubunda sırasıyla farklı $fm\bar{3}m$ ve $fd\bar{3}m$ olmasına rağmen her ikisi de yüzey merkezli kübik yapıya aittir. Silisyum kristali, dört silisyum atomunun $(000; \frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2};)$ pozisyonlarını ve diğer dört silisyum atomun da kübik içinde $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}; \frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4};)$ pozisyonlarını işgal ettiği A4 (koordinasyon sayısı dört olduğu) yapıya sahiptir. Silisyum kafesinde ve diğer dört magnezyum atomunda pozisyonlar $(\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}; \frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}; \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}; \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4})$ ’da olduğunda kübik içindeki sekiz magnezyum atomunun dördü, dört silisyum atomunun yerini alır. (a)’da verilen açık grimsi renkte ki silisyum atomları (b)’de verilen magnezyum atomları tarafından işgal edilir ve böylece birim hücrede dört silisyum atomuna karşın sekiz magnezyum atomu bulunur (50).



Şekil 5.1. Magnezyum-silisyum denge diyagramı (49)

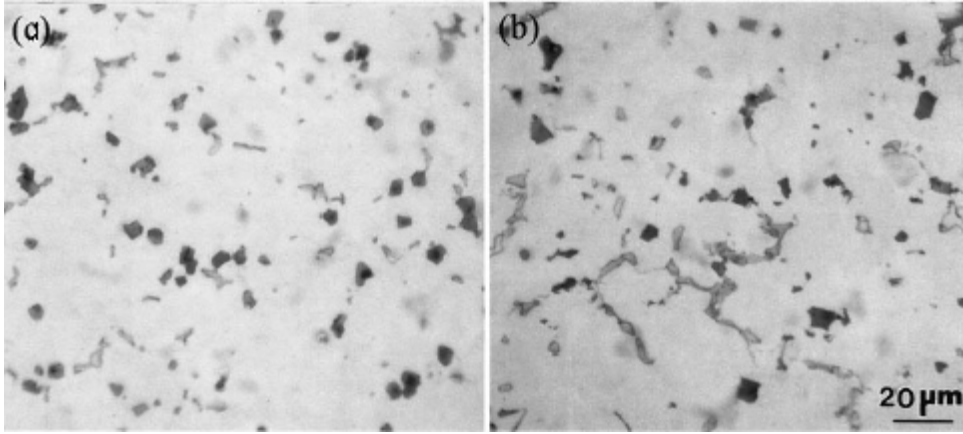


Şekil 5.2. Silisyum ve Mg₂Si fazının kafes yapısı (50)

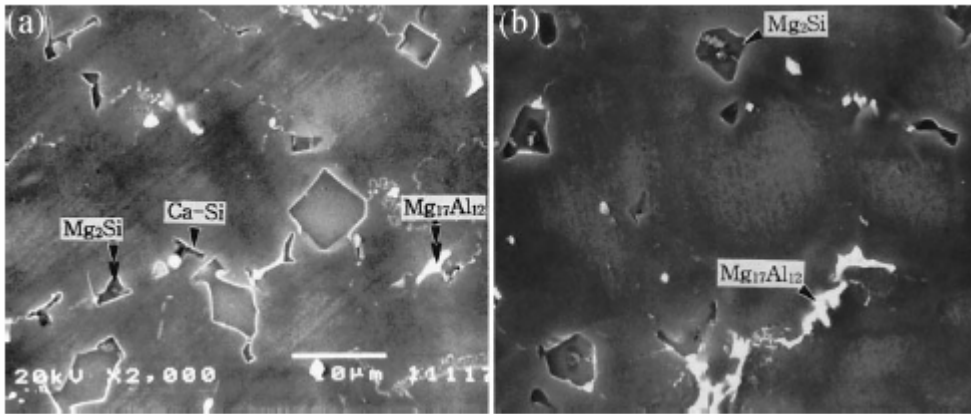
5.2. Poligonal Mg₂Si Şekli Oluşturmada Bazı Elementlerin Etkisi

Magnezyum ve alaşımlarında kalsiyum (Ca), fosfor (P) ve Sb (antimon) gibi element ilaveleri ile birlikte Mg₂Si partiküllerinin şekli Çin harfinden poligonal şekle değişmektedir. Küçük miktarlarda fosfor ilavesi Mg₂Si fazı için etkili çekirdekleyicidir, ancak üretim esnasında yanma ve duman oluşturması söz konusudur. Aynı zamanda fosfor ilave miktarının kontrolü de zordur (48, 51). Kalsiyum, antimon ve fosfor poligonal Mg₂Si oluşturmada hemen hemen aynı etkiye sahiptir. Resim 5.2 ve 5.3’de kalsiyum ve aynı etkide bulunan fosfor ilavesi ile

poligonal Mg_2Si morfolojisine sahip sıkıştırılmalı döküm ile üretilmiş Mg-5Al-1Zn alaşımının optik ve SEM mikroyapıları görülmektedir. Yine aynı numunelerden elde edilen çekme testi sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Mukayese edildiğinde fosfor ve kalsiyum bulunduran alaşımlarda akma dayanımı aynı iken en son çekme dayanımı, % uzama ve kırılma tokluğu değerleri gelişmiştir. Mg_2Si parçacıklarının içersinde sık sık küçük parçacıklar bulunması dikkat çekmiştir. Bu parçacıklar muhtemelen Mg_2Si fazı için çekirdeklenme yeri olarak etkide bulunmaktadır (48).



Resim 5.2. Mg-%5Al-%1Zn-%0,7Si alaşımının optik mikroskop görüntüsü (%0,03 P (a) ve %0,2 Ca (b) ilave edilmiş) (48)

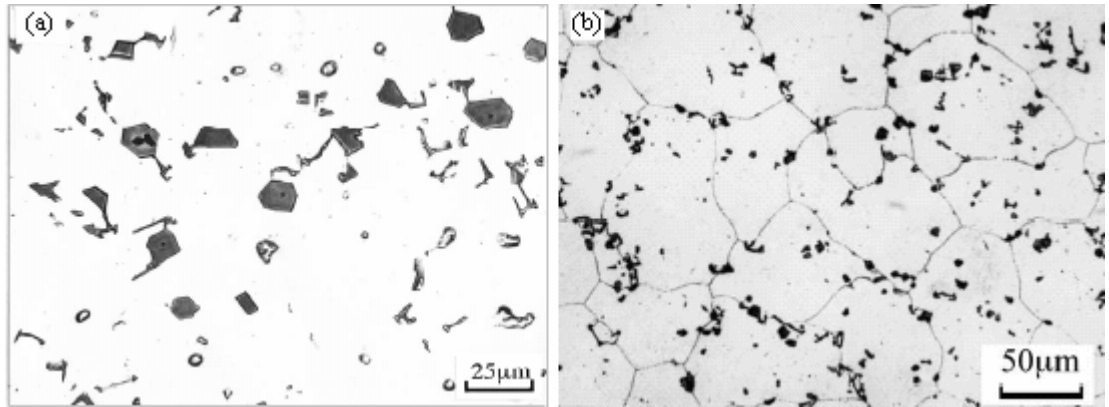


Resim 5.3. Mg-%5Al-%1Zn-%0,7Si alaşımının SEM mikroyapısı (%0,03 P (a) ve %0,2 Ca (b) ilave edilmiş) (48)

Çizelge 5.1. Sıkıştırılmalı döküm Mg-%5Al-%1Zn-%0,75Si-X alaşımının çekme özellikleri (48)

Malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kırılma tokluğu (MPa√m)
5Al-1Zn-0,75Si	194	116	5,6	18,4
5Al-1Zn-0,75Si-0,2Ca	213	116	7,3	21,9
5Al-1Zn-0,75Si-0,03P	208	112	6,9	22,1

Resim 5.4’da sıvı karıştırma tekniği ile üretilmiş ve sürekli kalıba dökülmüş in-situ %0,5 Ca ilaveli Mg-6Zn-1Si kompozit malzeme ile birlikte sürekli kalıba dökülmüş ve ısıtıl işlem uygulanmış %0,5 Sb ilaveli in-situ Mg-%5Al-%1Zn görülmektedir. (a)’da Mg-6Zn-1Si alaşıma %0,5 kalsiyum ilavesi yapılarak Mg_2Si parçacıklarının tamamen poligonal olması sağlanmıştır. Mg-%5Al-%1Zn numunesi üzerinde yapılan EDX (Energy Dispersive X-ray Spectrometer) analizi ile çekirdeklerin magnezyum, silisyum ve kalsiyumca zenginleştiği tespit edilmiştir (51). Çizelge 5.2’de farklı oranlarda kalsiyum bulunduran Mg-6Zn-1Si kompozitinden elde edilen mekanik özellikler verilmektedir.



Resim 5.4. Ca ve Sb ihtiva eden magnezyum alaşımları. (a) Mg-6Zn-1Si-0,5 Ca ve (b) Mg-5Al-1Zn-1Si-0,5 Sb alaşımlarının optik mikroyapıları (2, 51)

Silisyum ihtiva eden magnezyuma kalsiyum ilavesi ile birlikte $CaSi_2$ (kalsiyum silikat) oluşumu söz konusudur. Mg_2Si ile $CaSi_2$ arasındaki oryantasyon ilişkisinin kırınım kalıbı deneyinden $[111]Mg_2Si//[001]CaSi_2$ ve $(\bar{1}01)Mg_2Si//(110)CaSi_2$ olduğu

ortaya çıkmıştır. CaSi_2 partiküllerinden poligonal Mg_2Si parçacıklarının çekirdeklenmesi, kalsiyumun modife etmede oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Çekirdek oluşumunda, Mg_2Si kristal kafesini oluşturan magnezyum ve silisyum atomları ile heterojen CaSi_2 çekirdek sınır enerjisi çekirdeklenmeyi sağlamaktadır. Bu durum iki kristal kafes yapısının yüzey özelliklerine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Heterojen çekirdeklenmede tek ölçüt, iki faz arasındaki çekirdeklenme düzlemleri uyumsuzluğunun %15'den küçük olmasıdır (2, 48).

Çizelge 5.2. Mg-6Zn-1Si-xCa alaşımlarının mekanik özellikleri (2)

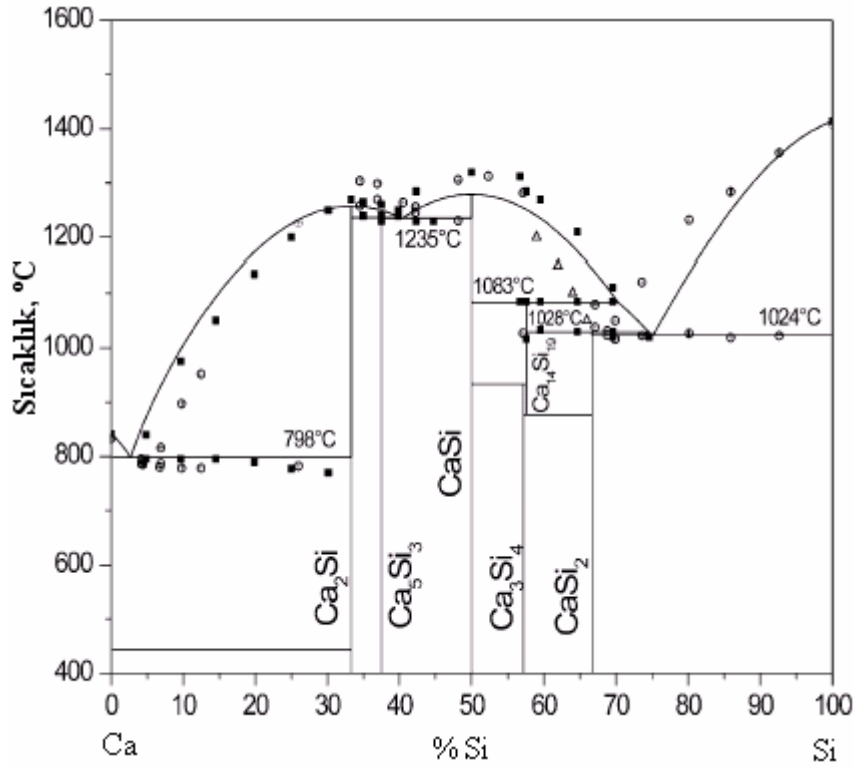
Malzeme	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kırılma tokluğu A_k (J)
Mg-6Zn-1Si	183	135	5,8	6
Mg-6Zn-1Si-0,1Ca	213	149	5,1	8
Mg-6Zn-1Si-0,25Ca	220	161	5,2	10
Mg-6Zn-1Si-0,5Ca	197	146	4,5	7

Çizelge 5.3'de CaSi_2 parçacıkları üzerinde Mg_2Si çekirdeklenmesinde bazı olası kristolografik oryantasyonlar için hesaplanan düzlemsel uyumsuzluk sonuçları verilmektedir. Görülebilecektir ki, Mg_2Si fazı ve CaSi_2 fazı arasında oryantasyon ilişkisi $(0001)_{\text{CaSi}_2} // (111)_{\text{Mg}_2\text{Si}}$, olduğunda (%13,41) uyumsuzluk en azdır. Bu yüzden CaSi_2 bu oryantasyon ilişkisi ile Mg_2Si fazı için heterojen çekirdekleyici görevi yapmaktadır.

Çizelge 5.3. Mg_2Si ve CaSi_2 fazları arasındaki düzlemsel uyumsuzluk (δ) değerleri (2)

Eşdeğer arayüzey	$(0001)_{\text{CaSi}_2} // (100)_{\text{Mg}_2\text{Si}}$			$(0001)_{\text{CaSi}_2} // (110)_{\text{Mg}_2\text{Si}}$			$(0001)_{\text{CaSi}_2} // (111)_{\text{Mg}_2\text{Si}}$		
$[h\ k\ i]_{\text{CaSi}_2}$	$[\bar{1}2\bar{1}0]$	$[\bar{1}100]$	$[\bar{2}110]$	$[\bar{1}2\bar{1}0]$	$[\bar{1}100]$	$[\bar{2}110]$	$[\bar{1}2\bar{1}0]$	$[\bar{1}100]$	$[\bar{2}110]$
$[h\ k\ i]_{\text{Mg}_2\text{Si}}$	$[110]$	$[010]$	$[\bar{1}10]$	$[001]$	$[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$	$[\bar{1}10]$	$[10\bar{1}]$	$[11\bar{2}]$	$[01\bar{1}]$
$\theta (^{\circ})$	0	15	30	0	5,26	30	0	0	
$\delta_{\substack{[h\ k\ i]_{\text{CaSi}_2} \\ [h\ k\ i]_{\text{Mg}_2\text{Si}}}}$	%13,59			%25,87			%13,41		

Şekil 5.3’de farklı deneysel çalışmalardan elde edilmiş kalsiyum ve silisyum denge diyagramı verilmektedir. Diyagramda üç ikili faz Ca_2Si , CaSi , CaSi_2 ve 782, 1259 ve 1023 °C’de ise üç ötektik reaksiyon mevcuttur. Bu fazların ergime sıcaklıkları Ca_2Si için 1305 °C ve CaSi için 1315 °C iken CaSi_2 için 1033 °C’dir ve bu faz peritektik olarak oluşmuştur (2, 52).



Şekil 5.3. Farklı çalışmalardan elde edilmiş kalsiyum-silisyum denge diyagramı (52)

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Alaşım Hazırlığı

Daha öncede bahsedildiği gibi AZ91 alaşımları sağladığı yüksek avantajları nedeni ile kullanım açısından magnezyum alaşımları içerisinde en çok tercih edilen malzemedir. Bu çalışmada AZ91 magnezyum alaşımı ana malzeme olarak tercih edilmiştir. Deneylerde AZ91 alaşımı ile birlikte farklı özelliklere sahip beş döküm parça üretilmiştir. Metalik silisyum tozları, sıvıda Mg_2Si fazını oluşturmak için ilave edilirken kalsiyum ise Mg_2Si fazının inceltilmesinde etkin çekirdekleyici olan $CaSi_2$ fazını oluşturmak için ilave edilmiştir. Çizelge 6.1’de deneysel çalışmalarda seçilen malzemeler ve üretim şartları verilmektedir.

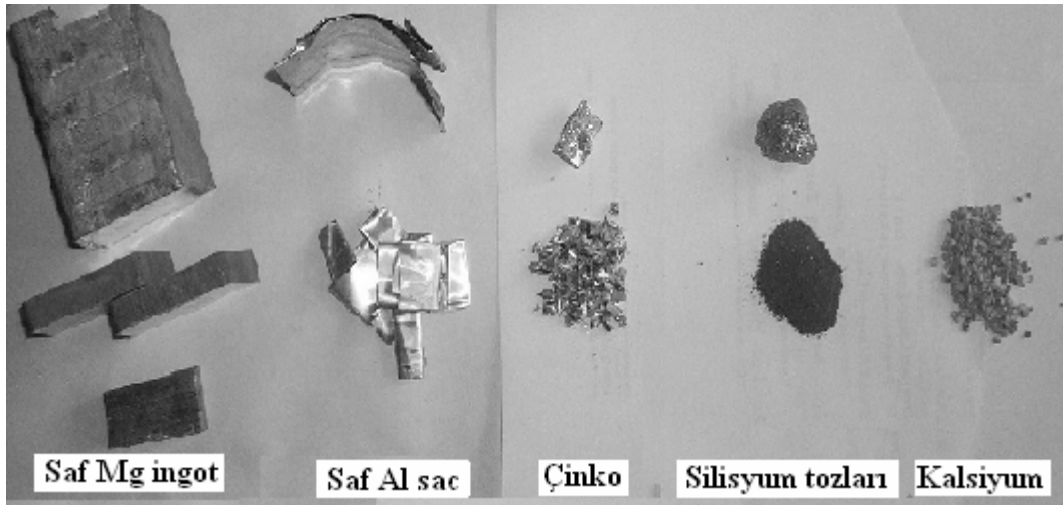
Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve üretim şartları

Numune No	Bileşim (% Ağırlık)	Üretim şartları	
1	Mg-%9Al-%1Zn	İşlemsiz	Ergitme ve oda sıcaklığında katılaştırma
2	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si		Ergitme ve oda sıcaklığında katılaştırma
3	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca		Ergitme ve oda sıcaklığında katılaştırma
4	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca	İşlemlili	Katılma sonrası 355°C’de 16 saat ısıtma işlemi
5	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca		Katılma sonrası tekrar ergitme, karıştırma ve oda sıcaklığında katılaştırma
6	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca		20°C suda katılaştırma

Döküm parçalar, magnezyum ana malzeme sıvısına Al, Zn, Si ve Ca alaşım ilaveleri yapılarak hazırlanmıştır. Bu alaşımların ön hazırlık aşamasında ki durumu Resim 6.1’de görülmektedir. Ergitme işlemlerinde hazırlanacak malzemenin ağırlığına göre alaşımlandırma amacıyla magnezyum, alüminyum ve çinkodan parçalar kesilmiş ve hassas terazide tartımlar yapılmıştır. Metalik silisyum ise mümkün olduğunca ince

toz haline getirilmeye çalışılmıştır. Bu sayede silisyumun pota dibine çökmesi nispeten azalırken silisyumun sıvı ile temas-yüzey alanı (difüzyonun kolaylaşması için) artırılarak Mg_2Si ve $CaSi_2$ fazlarının oluşumu hızlandırılmıştır. Burada önemli bir husus ise kalsiyum parçacıklarının atmosfer ile teması ettiğinde oksitlenmesidir. Bu nedenle kalsiyum parçacıkları tartım öncesi ve sonrası mümkün olduğunca rutubetsiz ortamlarda muhafaza edilmiştir.

Ergitmelerde kolaylık sağlaması açısından Zn, Si ve Ca parçacıkları alüminyum folyo içersinde muhafaza edilmiştir. Bu ilaveler ve özellikle alüminyum parçaları öncelikli olarak ergitme ocağının üstünde ocağın kendi sıcaklığı ile ısıtılarak sıvıya bu şekilde ilave edilmiştir. Bu ön ısıtma sayesinde ilaveler sırasında sıvının soğuyarak sıvı işlem süresinin uzaması nispeten engellenmiştir.



Resim 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan alaşım malzemelerinin ön hazırlık aşaması

6.2. Ergitme ve Ergitme Sonrası İşlemler

Resim 6.2’de ergitmede kullanılan ocağın (thermocouple’sız) görüntüsü verilmektedir. Düşük miktarlarda malzeme ergitilebilen bu ocakta kullanılmak üzere iki farklı şekilde pota (Ç1010 çeliği) hazırlanmıştır. Bu potalar aynı zamanda kalıp amaçlı olarak ta kullanılmıştır. Katılaştırma işlemleri potalar içersinde yapılarak döküm

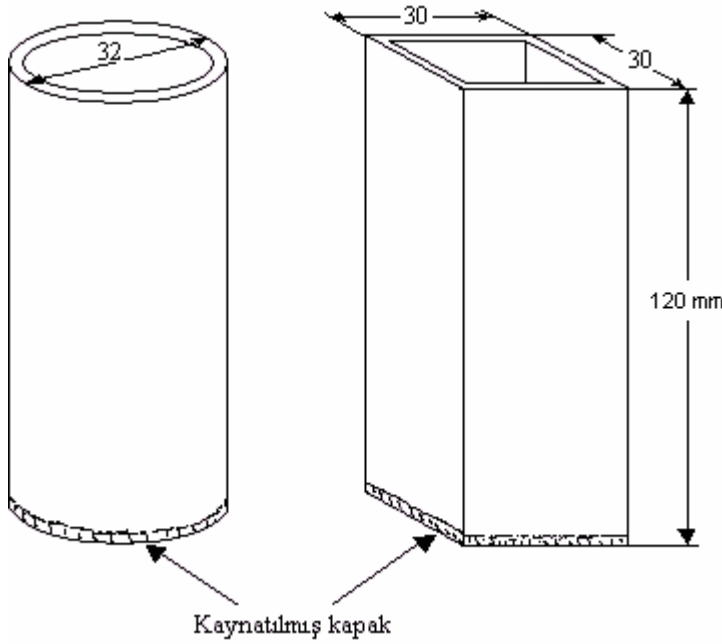
parçalar bu potaların kesilmesi ile çıkartılmıştır. Bu nedenle ergitmede kullanılan potalar bir defaya mahsus kullanılmıştır. Bu potalar şematik olarak Şekil 6.1’de verilmektedir. Ergitmede %99,8 saflıkta magnezyum ile birlikte saf alüminyum ve çinko kullanılmıştır. Magnezyumun ergimesi tamamlandığında sırasıyla alüminyum ve çinko sıvıya ilave edilmiştir. Kalsiyum ilavesinin yapıldığı durumlarda öncelikli olarak AZ91 sıvısına kalsiyum ilave edilmiş, sıvı bir süre karıştırıldıktan sonra silisyum tozları ilave edilerek tekrar karıştırma yapılmıştır. Karıştırma bittikten sonra yüzey örtücü sıvı yüzeyine serpmek suretiyle sıvının oksitlenerek yanması engellenmiştir. Tuz karışımlarından oluşan bu örtücünün bileşimi Çizelge 6.2’de verilmektedir.

Çizelge 6.2. Ergitmede kullanılan Magrex 60 yüzey örtücüsünün kimyasal bileşimi

Tuzlar	KCl	NaCl	BaCl	CaCl	MgCl
% Ağırlık	1,24	19,04	16,45	21,60	40,80



Resim 6.2. Deneylerde kullanılan ergitme ocağı



Şekil 6.1. Ergitmede pota ve katılaştırılmada ise kalıp amaçlı kullanılan çelik profillerin şematik gösterimi

6.2.1. İşlem uygulanmış döküm parçalar

Çizelge 6.1’de verilen işlemsiz döküm parçalar ergitme ve ergitme sonrası farklı şartlar altında işlemlere tabi tutulmuştur. Isıl işlem için, havada soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca döküm parçası SFL marka kutu tipi fırında 355°C’de 16 saat ısıl işleme tabi tutulmuş ve işlem sonrası oda sıcaklığında soğutulmuştur. Yeniden ergitme döküm parçası, oda sıcaklığında soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca parçasının yeniden ergitilmesiyle elde edilmiştir. Bu parça, sıvı hale gelir gelmez karıştırılarak bir süre beklendikten sonra oda sıcaklığında soğutulmuştur. Hızlı soğutma işlemi için AZ91+1Si+0,3Ca sıvısı pota ile birlikte 20°C’de ki su içersine daldırılarak soğutulmuştur.

6.3. Karakterizasyon İçin Numune Hazırlama

6.3.1. Mikroskopik inceleme numunesi

Panasonic dijital kamera bağlantılı PRIOR marka optik mikroskopta ve “EDX” analiz yapabilen JSM-5600 marka SEM cihazında mikroyapı incelemeleri için

döküm parçaların farklı bölgelerinden numuneler kesilmiştir. Daha sonra bu numuneler sıcak gömme cihazında bakalit ile gömülerek zımpara işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Zımpara işleminde sırasıyla 220, 400, 800 ve 1200 numaralı grid SiC zımparalar kullanılırken parlatma işleminde ise elmas keçe ile 1 mikron'luk elmas pasta solüsyonu kullanılmıştır. Parlatma işlemi sonrasında numuneler nital (%2 HNO₃ + %98 CH₃OH) çözeltisi ile dağlanarak mikroskopik incelemelere hazır hale getirilmiştir.

Zımparalama işlemi sırasında kullanılan su nedeniyle magnezyumda oksitlenme, dolayısıyla numune yüzeyinde matlaşma olduğundan, bundan sonraki parlatma ve daha sonraki işlemlerde numunenin suyla olan temasından kaçınılmış ve mümkün olduğunca numuneler rutubetsiz ortamlarda saklanmaya çalışılmıştır.

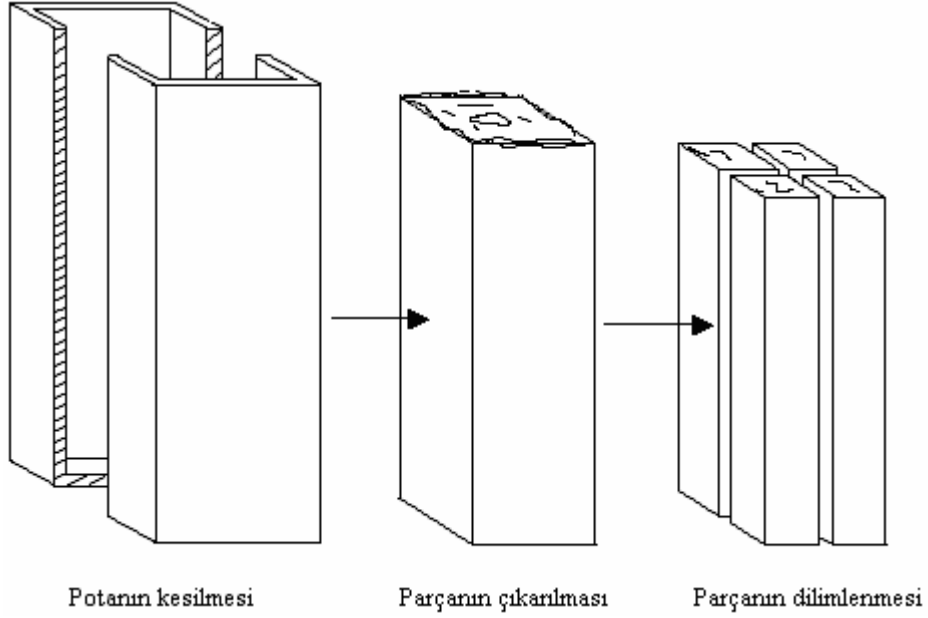
6.3.2. Sertlik testi numunesi

Mikroyapı incelemelerinde kullanılan numuneler aynı zamanda sertlik testleri içinde kullanılmıştır. Sertlik testi, Instron-Wolpert marka sertlik cihazında 2,5 mm çelik bilya ile 62,5 ve 187,5 Kg yükte Brinell test metodu ile gerçekleştirilmiştir. Bu testte, her bir numuneden sekiz kez olmak üzere elde edilen sertlik ölçüm değerlerinin ortalaması alınmıştır.

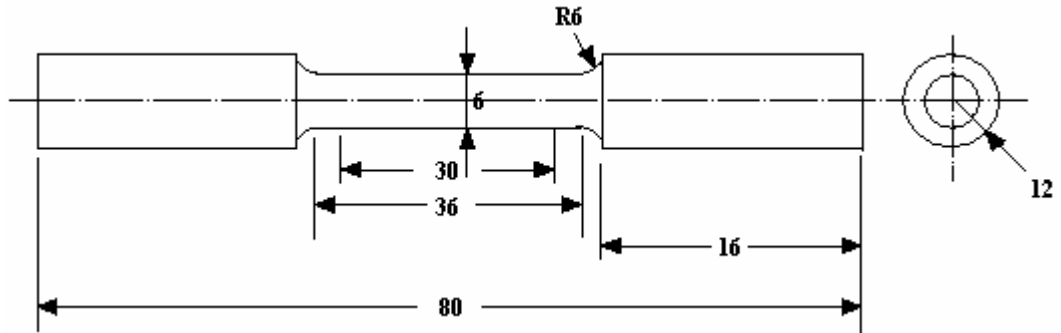
6.3.3. Çekme testi numunesi

Çekme testi için, 30x30xort.110mm (Şekil 6.2) ebatlarında elde edilen döküm parçaların her birinden dört adet çekme test çubuğu elde edilmiştir. Pota içersinde katılan numune, daha sonra potanın ortadan ikiye kesilmesiyle çıkarılmıştır. Potadan çıkarılan numune tel erozyonu ile Şekil 6.2'de görüldüğü gibi dik yönde dört eşit parçaya dilimlenmiştir. Elde edilen dikdörtgen şeklindeki parçalar tornalanarak 10 mm çap'a yuvarlatılmıştır. Bu parçalar, CNC torna tezgahında Şekil 6.3'de verilen ölçülerdeki (ASTM E 8M, Cilt 3.01, Sayfa 82) çekme test numunesine dönüştürülmüştür. Üretilen her farklı malzeme için ortalama beş adet çekme çubuğu

kullanılmıştır. Bu numuneler 12 KN'luk ALŞA marka çekme cihazı ile 1 mm/dk hızla çekilerek teste tabi tutulmuştur.



Şekil 6.2. Çekme test çubuğunu elde etmede kullanılan yöntem



Şekil 6.3. Çekme test çubuğu ebatları (mm) (ASTM E 8M)

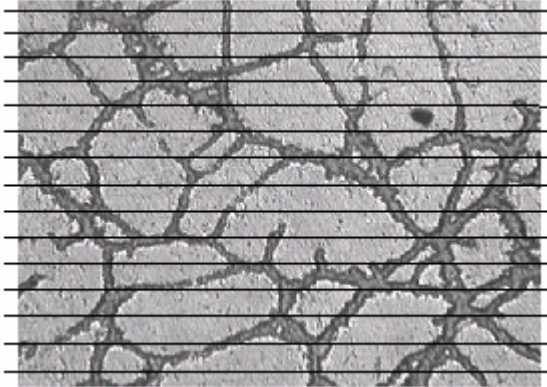
6.3.4. X-Işını ve EDX analiz numunesi

X-Işını analizlerinde normal AZ91+1Si+0,3Ca alaşımı kullanılmıştır. Analiz için bu numune ince talaş haline getirilmiştir. EDX analizi ise JSM 5600 SEM cihazında optik mikroyapı incelemelerinde kullanılan numuneler üzerinde yapılmıştır.

6.4. Takviye ve Tane Boyutu Hesabı

Mikroyapı resimleri üzerinde takviye ve tane boyutu hesabı yapılmıştır. Yöntem olarak çizgisel kesişme metodu kullanılmıştır. Bu metotta kullanılan hesaplama formülü aşağıda verilmektedir. Örnek mikroyapıda görüleceği gibi çizgiler yatay olarak yerleştirilmiştir. Çizgi sayısı fazla tutularak hata payının azaltılması sağlanmıştır. Takviye elemanı boyutu hesaplamaları, Mg_2Si fazlarının tane gibi düşünülmesi ile yapılmıştır

$$TB \text{ (Tane veya Takviye Elemanı Boyutu)} = \frac{L_t \times V_f}{M \times N_p} \times 1,776 \quad [6.1]$$



L_t = Çizgilerin toplam uzunluğu

N_p = Tane kesim sayısı

M = Büyütme

L_f = Tane uzunluğu

V_f = İkincil faz oranı

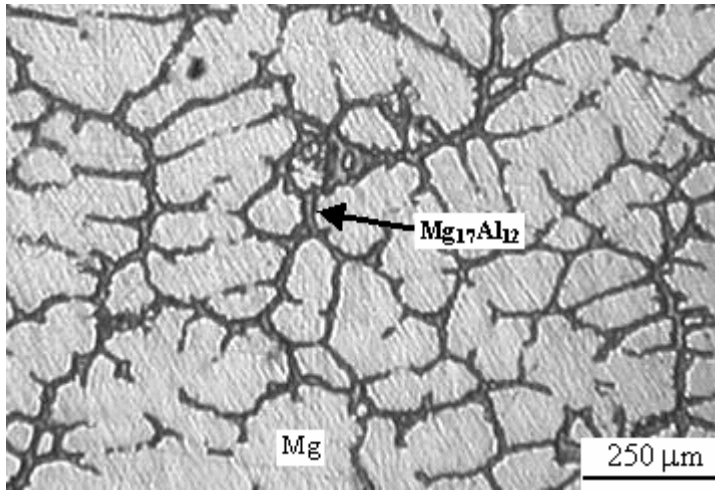
$$V_f \text{ (İkincil faz oranı)} = \frac{L_f}{L_t} \quad [6.2]$$

7. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Mikroyapı Sonuçları ve Tartışma

7.1.1. AZ91 numunesi

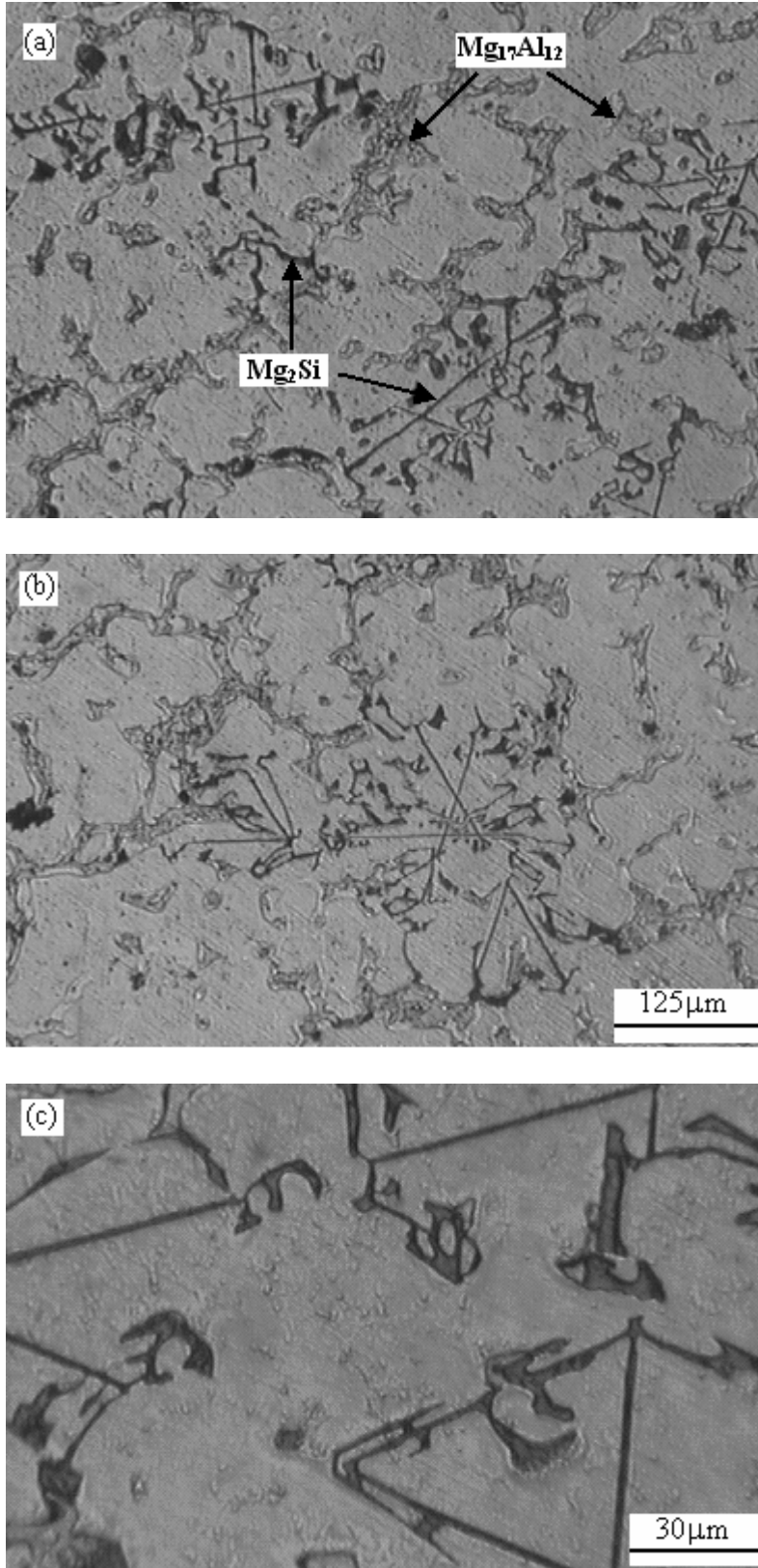
Kompozit malzeme üretiminde ana malzeme olarak seçilen ve alaşım olarak hazırlanan AZ91 alaşımının mikroyapısı Resim 7.1’de verilmektedir. Oda sıcaklığında soğutma işlemi uygulanan bu deney numunesi mikroyapısında, dentritik katılaşma sonrası oluşan dentrit kolları tipik tane yapısını oluşturmaktadır. Tane sınırlarında, mikroyapıda ok ile gösterildiği gibi $Mg_{17}Al_{12}$ ağı görülmektedir. Taneler daha çok bu ötektik faz tarafından çevrilmiştir.



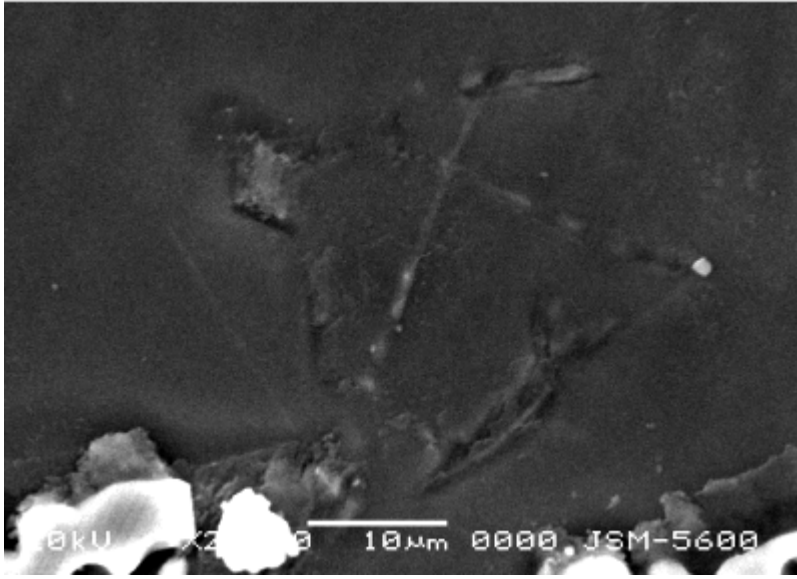
Resim 7.1. Tipik AZ91’in X50 büyütmede ki mikroyapısı

7.1.2. AZ91+1Si numunesi

Oda sıcaklığında soğutulmuş AZ91+1Si numunesinin optik mikroyapısı Resim 7.2 ve yine aynı numuneden elde edilen SEM görüntüsü ise Resim 7.3’de verilmektedir.



Resim 7.2. AZ91+1Si numunesinin farklı büyütmelerde ki mikroyapısı (X100(a, b) ve X400(c) büyütme)

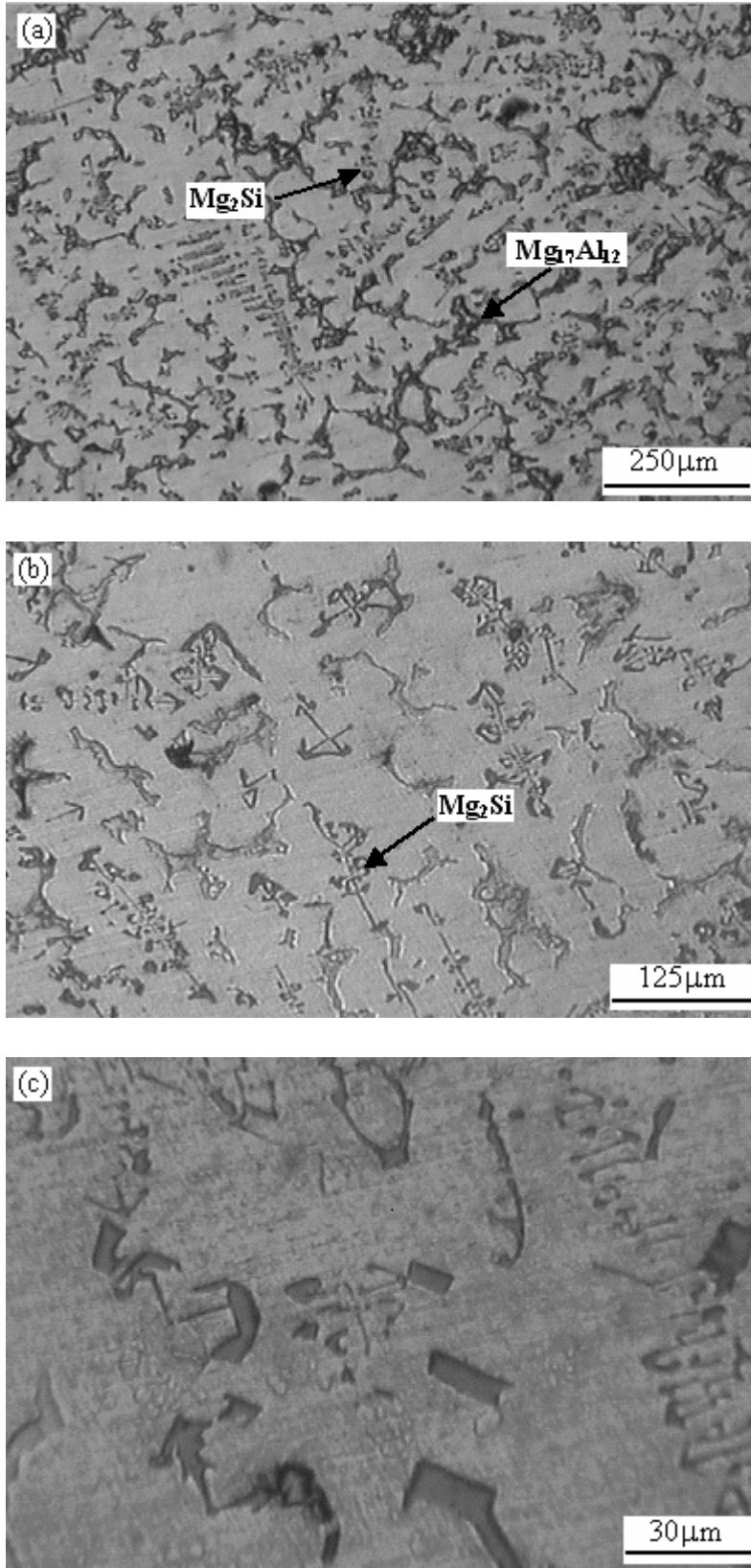


Resim 7.3. AZ91+1Si numunesinin SEM görüntüsü

AZ91 alaşıma %1 silisyum ilavesi sonucunda alaşım içerisinde Çin harfi şeklinde Mg_2Si oluşmuştur. Bu oluşumun yapı içerisinde oldukça yaygın şekilde bulunduğu ve mikroyapıda kolaylıkla ayırt edile bilindiği görülebilmektedir. Mg_2Si fazı, bazı bölgelerde kaba şekillerde görülürken bazı bölgelerde ise daha küçük parçacıklar şeklinde görülmektedir. Bu durum, sıvı işlem süresine, karıştırma işlemine ve katılaştırma şartlarına bağlı olarak mikroyapının farklılaşmasına bağlanabilir.

7.1.3. AZ91+1Si+0,3Ca numunesi

Resim 7.4’de oda sıcaklığında soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütmelerdeki optik mikroskop mikroyapıları verilmektedir. Mikroyapılarda AZ91+1Si alaşıma %0,3 kalsiyum ilave edilmesi ile Mg_2Si fazının boyutlarında kolayca fark edilir şekilde küçülme veya incelmenin olduğu tespit edilmiştir. Burada, Mg_2Si fazının incelmesi, silisyum ile kalsiyum arasındaki reaksiyon ile oluşan heterojen çekirdekleyici $CaSi_2$ fazı ile sağlanmıştır.



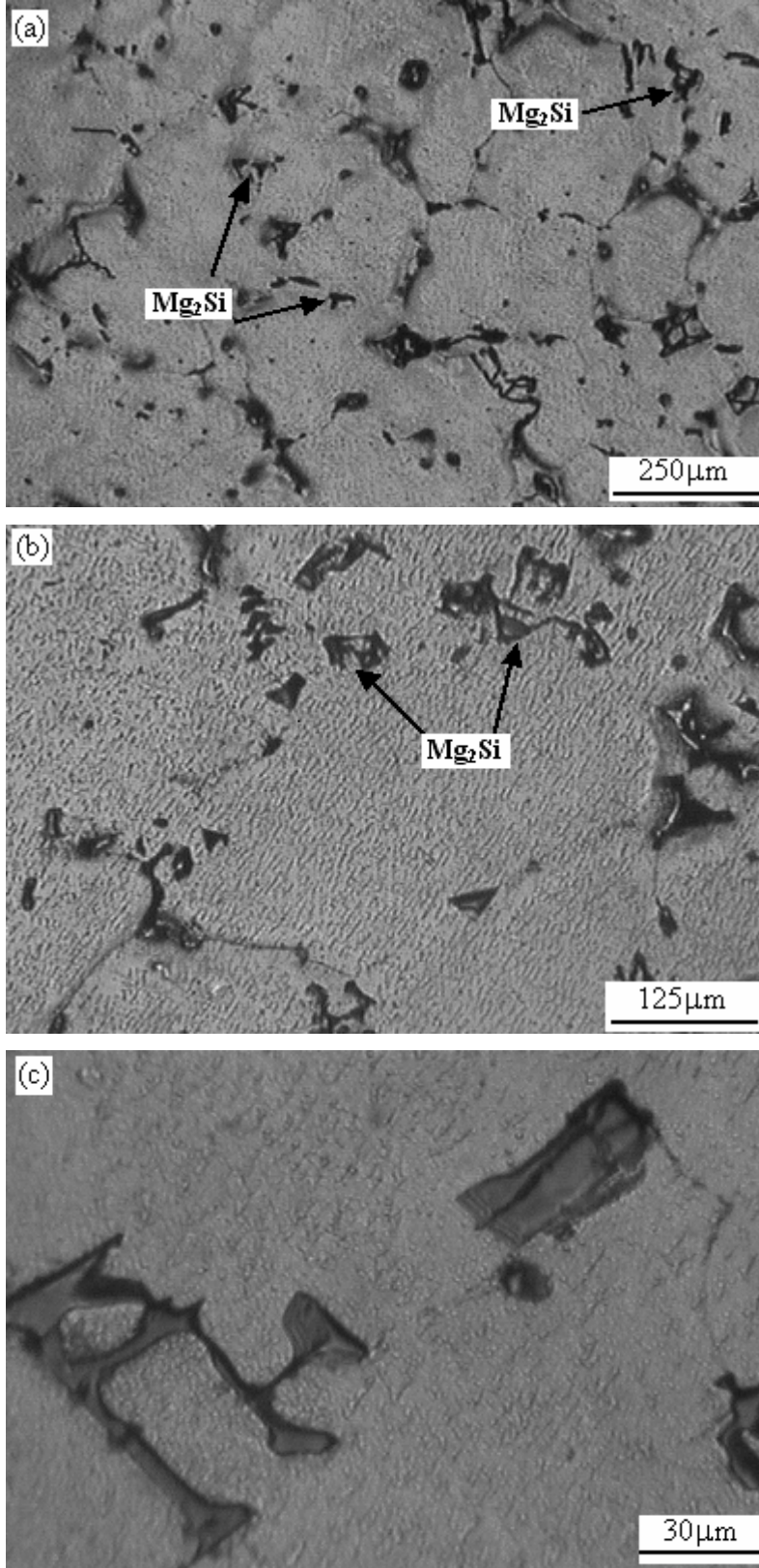
Resim 7.4. AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütmelerde ki mikroyapısı (X50(a), X100(b) ve X400(c) büyütmeye)

CaSi_2 kristal kafes yapısıyla Mg_2Si (YMK) ile benzerlik göstermektedir. Her iki fazın sahip olduğu kafes uyumu, Mg_2Si için daha düşük enerjili çekirdeklenme yüzeyleri sağlar. Çin harfi yapısıyla sıvıda gelişen kaba Mg_2Si fazı bu sayede nispeten küçülmüştür. X ışını analizinde (Bkz. Şekil 7.1) CaSi_2 fazının oluştuğu, Mg_2Si fazının ise CaSi_2 üzerinde çekirdeklenmesi nedeniyle tespit edilemediği görülmüştür.

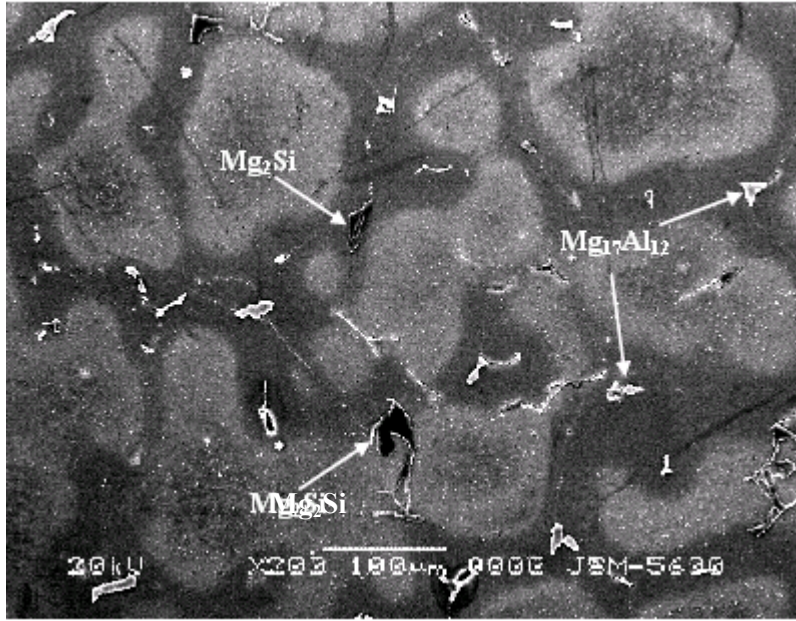
Takviyenin $\text{AZ91}+1\text{Si}$ alaşımına göre daha homojen olarak dağıldığı söylenebilir. Ancak ısıtılma işlem ve yeniden ergitme numunesine göre nispeten düşük homojenlik söz konusudur.

7.1.4. Isıl işlem görmüş $\text{AZ91}+1\text{Si}+0,3\text{Ca}$ numunesi

Oda sıcaklığında soğutulmuş $\text{AZ91}+1\text{Si}+0,3\text{Ca}$ döküm parçasının 355°C 'de 16 saat ısıtılma işlem görmesi ile elde edilen numunelerin optik mikroyapı Resim 7.5'de, SEM görüntüsü ise Resim 7.6'da verilmektedir. Daha önce $\text{AZ91}+1\text{Si}+0,3\text{Ca}$ numunesinde Mg_2Si fazının boyutları küçülürken (Bkz. Resim 7.4) ısıtılma işlem ile birlikte bu küçülme bir miktar artmıştır. Ancak uygulanan uzun süreli ısıtılma işlem, tane boyutunun ilk duruma göre hemen hemen iki kat artmasına neden olmuştur.



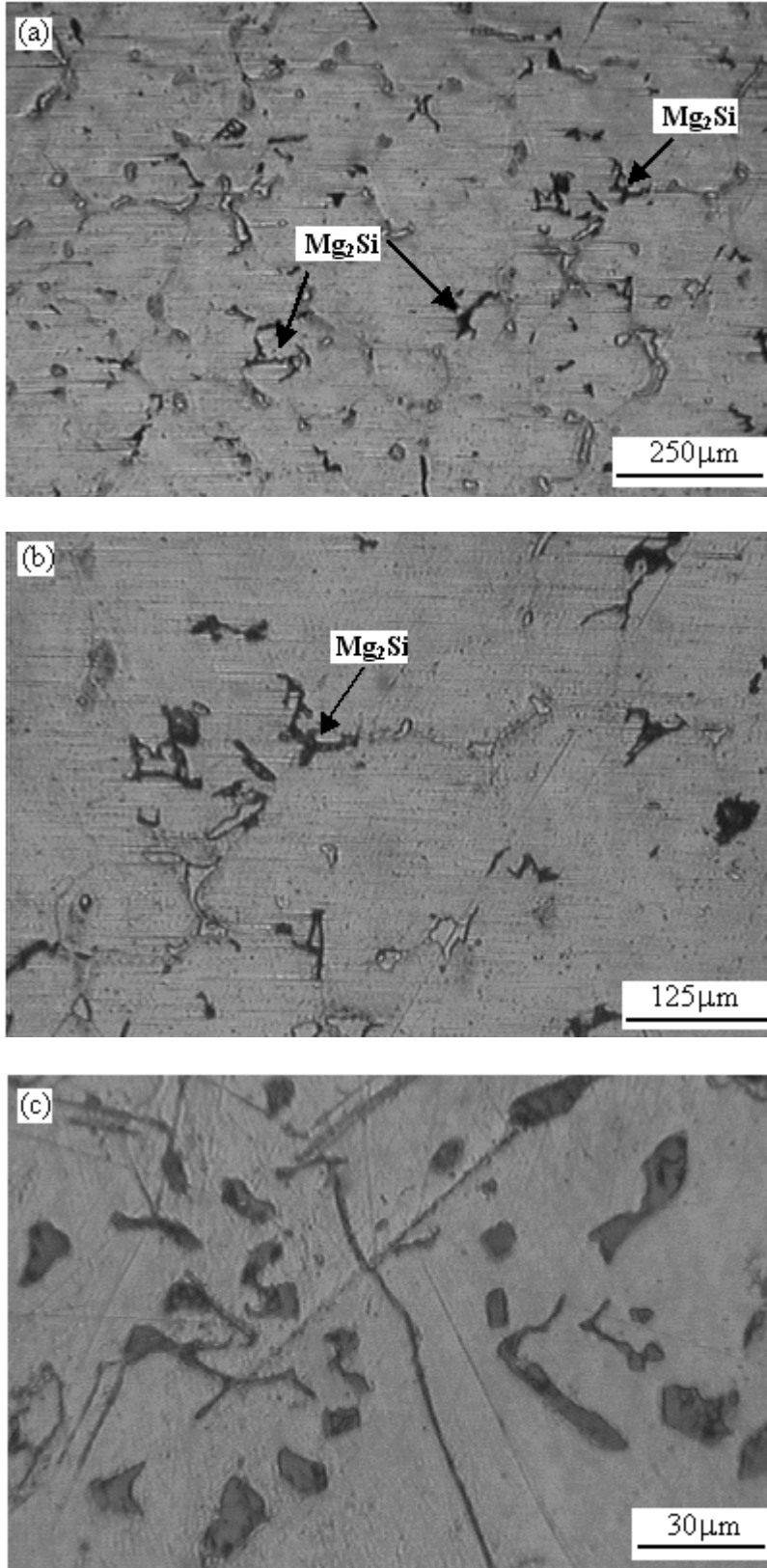
Resim 7.5. Isıl işlemlı AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütmelerde ki mikroyapısı (X50(a), X100(b) ve X400(c) büyütme)



Resim 7.6. Isıl işlemlı AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin SEM mikroyapısı

7.1.5. Yeniden ergitilmiş AZ91+1Si+0,3Ca numunesi

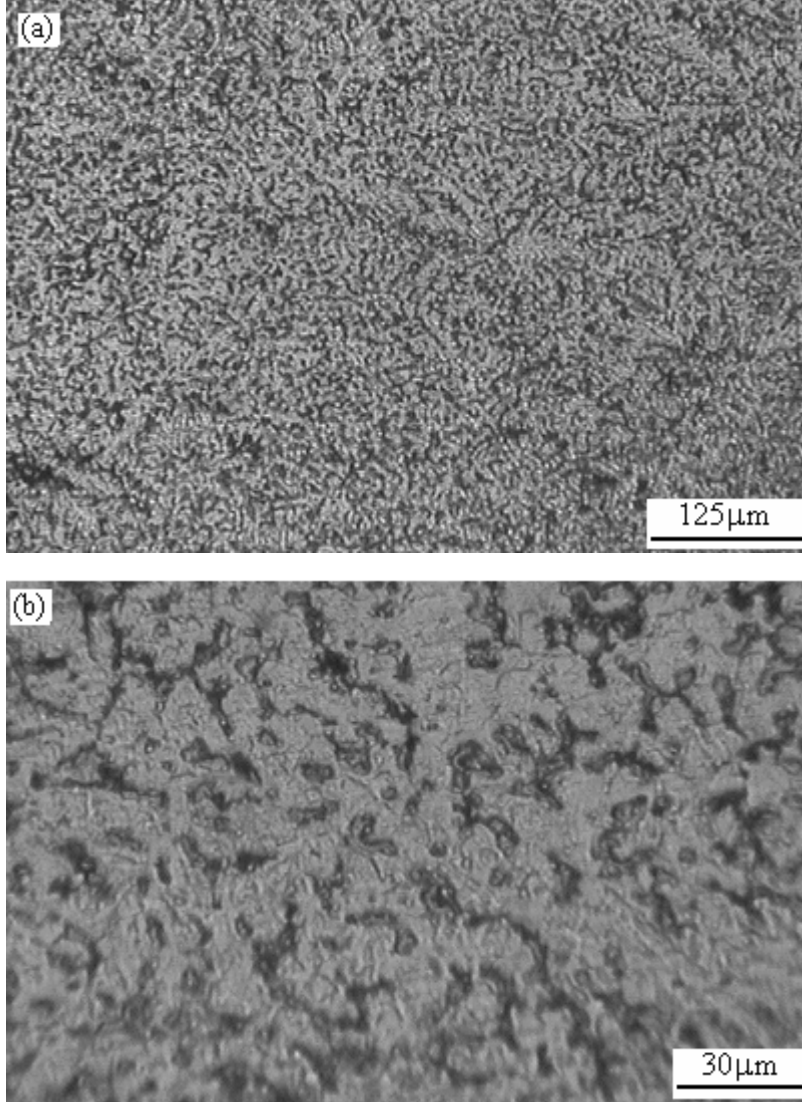
Bu çalışmada elde edilen optik mikroyapı görüntüleri Resim 7.7’de verilmektedir. AZ91+1Si+0,3Ca döküm parçanın yeniden ergitilmesiyle elde edilen numunelerin mikroyapılarında, karıştırma ile birlikte Mg_2Si fazlarının kırılarak dağıldığı tespit edilmiştir. Bu durumun teyit edilmesi için AZ91+1Si+0,3Ca döküm parçası ergitildikten sonra karıştırılma yapılmadan oda sıcaklığına soğutulmuş ve mikroyapıda Mg_2Si fazlarının karıştırma yapılan yeniden ergitilmiş döküm parçaya göre biraz daha kaba olduğu tespit edilmiştir.



Resim 7.7. Yeniden ergitilmiş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütmelerde ki mikroyapısı (X50(a), X100(b) ve X400(c) büyütme)

7.1.6. Suda soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesi

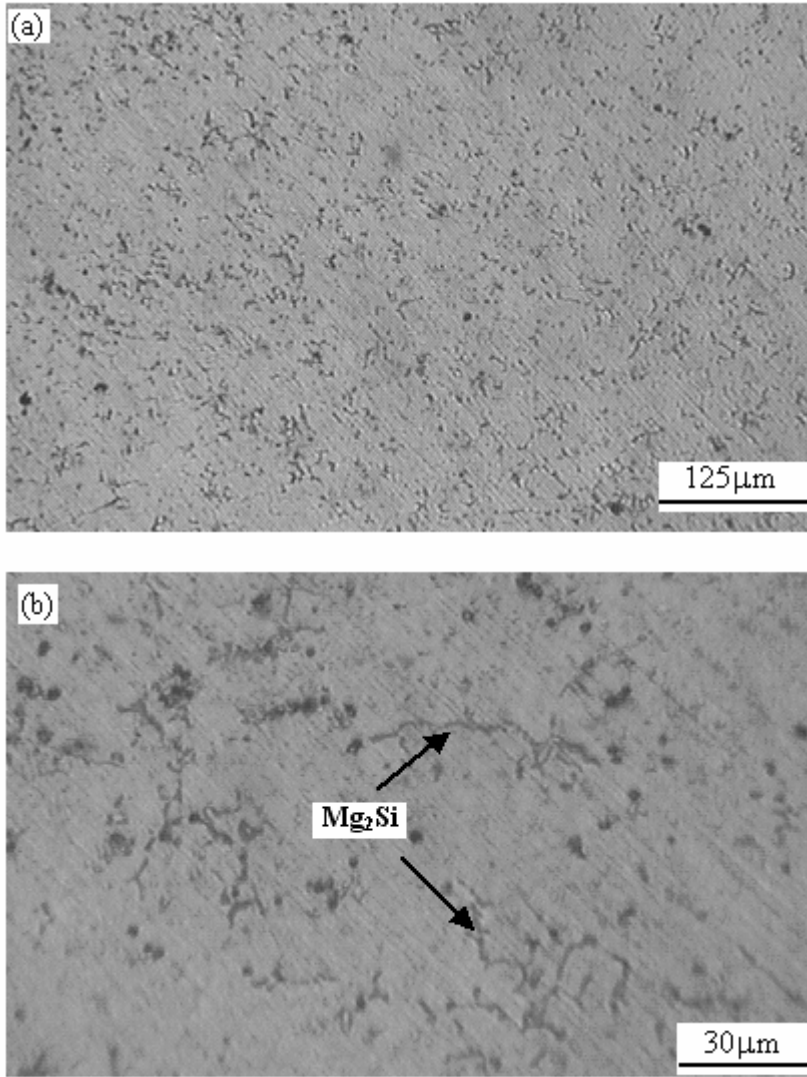
AZ91+1Si+0,3Ca alaşım sıvısının 20°C’de ki suda soğutulmasıyla elde edilen optik mikroyapılar Resim 7.8 ve 7.9’da verilmektedir.



Resim 7.8. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütmelerde ki mikroyapısı (X100(a) ve X400(b) büyütme)

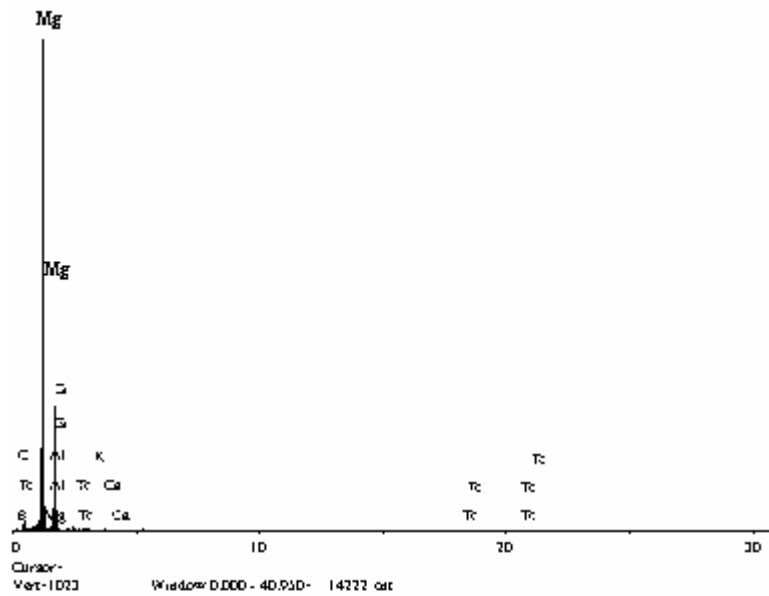
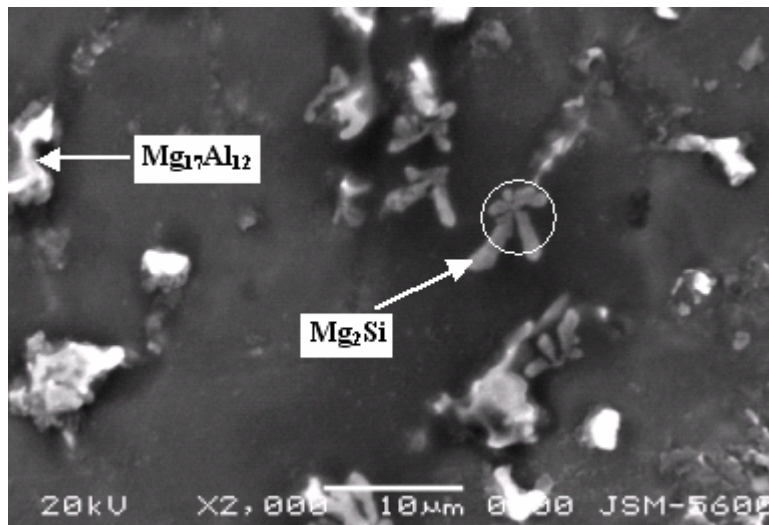
Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesi %2’lik nital ile dağlandığı takdirde tane sınırlarında ki Mg₂Si fazları, tane sınırlarının belirginleşmesi nedeniyle optik mikroskopta tespit edilememiştir. Bu nedenle Resim 7.9’da verilen numunelerde dağlanma yapılmamıştır. Böylelikle Mg₂Si fazları mikroyapıda rahatlıkla tespit

edilebilmiştir. Bu kompozit malzemedede, Mg_2Si fazı çoğunlukla tane sınırlarında bulunmaktadır. Bu durum, hızlı soğuma ile birlikte çok sayıda tanenin oluşması ve oluşan bu taneler tarafından Mg_2Si fazlarının tane sınırlarına doğru itilmesiyle açıklanabilir. Ayrıca bu kompozitte Mg_2Si fazlarının dağılımı açısından en homojen mikroyapı elde edilmiştir.



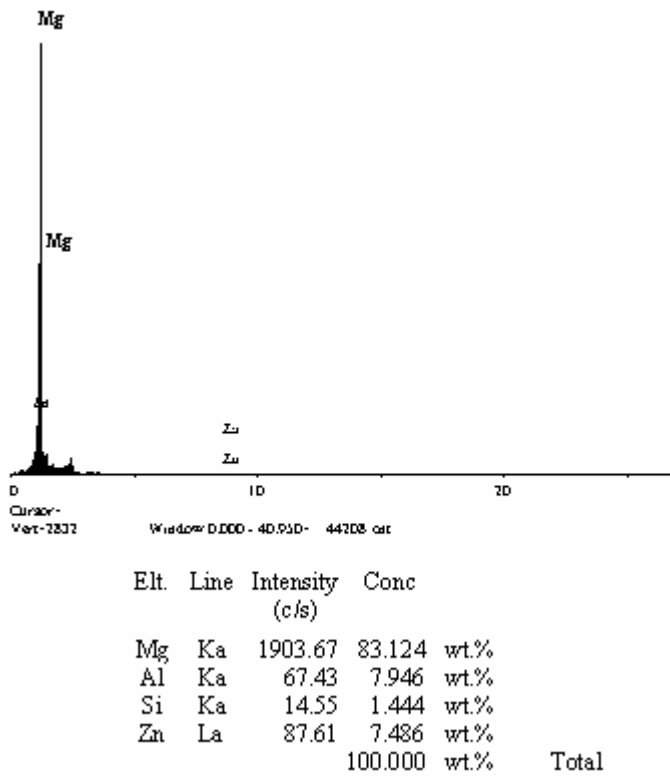
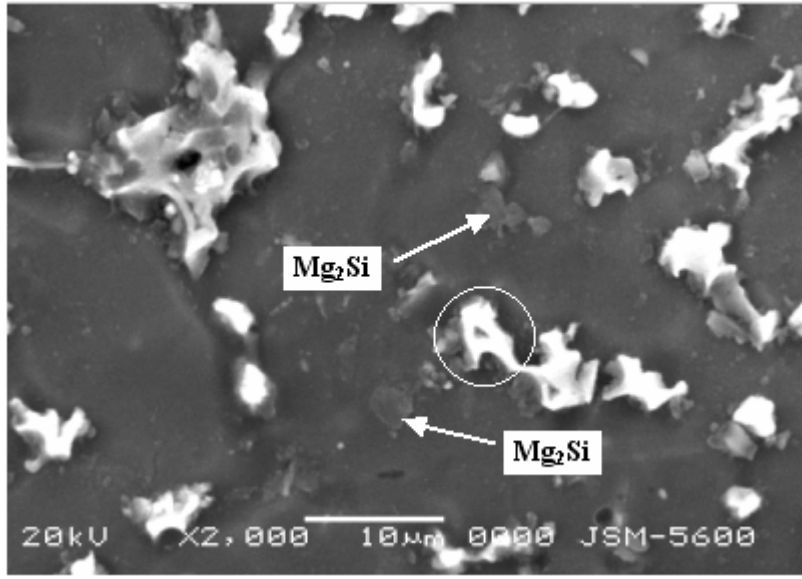
Resim 7.9. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin farklı büyütmelerde ki mikroyapısı (X100(a) ve X400(b) büyütme) (dağlanmamış)

Resim 7.10 ve 7.11’de SEM görüntüsü ile birlikte EDX analiz sonuçları ise verilmektedir. EDX analizleri SEM mikroyapı resimleri üzerinde işaretli olan bölgeden alınmıştır.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc	
B	Ka	0.00	0.000	wt.%
C	Ka	0.04	0.000	wt.%
O	Ka	15.97	0.000	wt.%
F	Ka	0.24	0.000	wt.%
Mg	Ka	798.85	62.361	wt.%
Al	Ka	0.59	0.115	wt.%
Si	Ka	226.63	37.050	wt.%
K	Ka	0.85	0.130	wt.%
Ca	Ka	2.21	0.344	wt.%
			100.000	wt.%
				Total

Resim 7.10. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin SEM görüntüsü ve işaretli bölgede bulunan Mg₂Si fazının EDX analizi sonucu



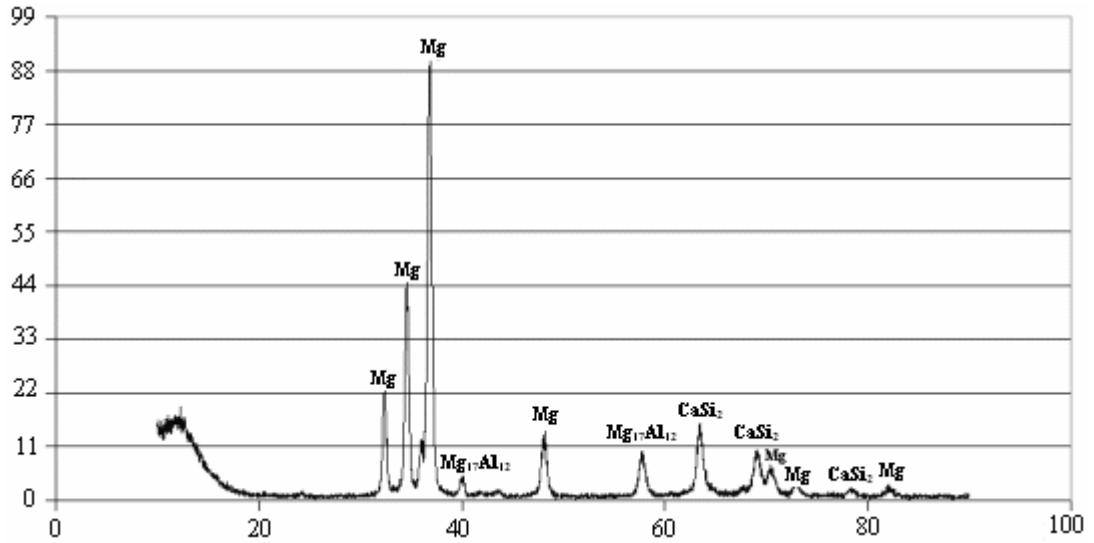
Resim 7.11. Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca numunesinin SEM görüntüsü ve işaretli bölgede bulunan $Mg_{17}Al_{12}$ ötektiğinin EDX analizi sonucu

Hızlı soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca alaşımının oldukça küçük tane ve takviye boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Özellikle takviye boyutu diğer deney

numuneleri ile karşılaştırıldığında önemli derecede küçülmüştür. Bu ince parçacık şeklinde ki oluşum, hızlı soğuma ile sıvıda oluşan Mg_2Si fazının büyümesi için gerekli olan zamanın sınırlanması şeklinde açıklanabilir. Mekanik özelliklerde en yüksek değerler yine bu numunede elde edilmiştir.

7.2. X-Işını Analizi Sonuçları ve Tartışma

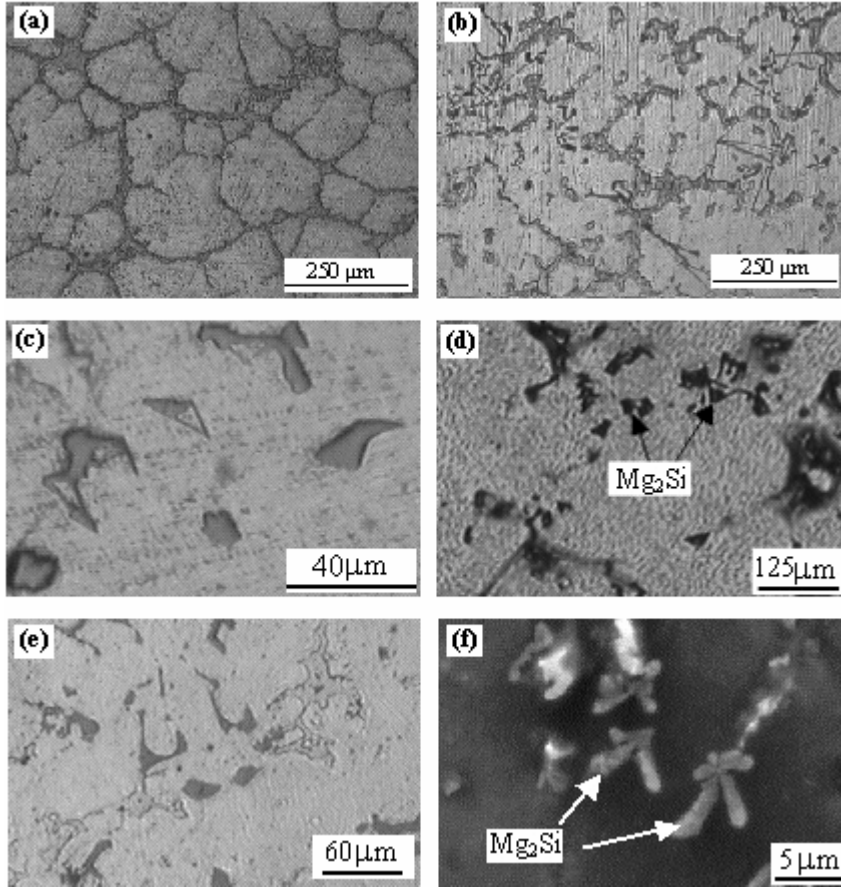
Şekil 7.1’de oda sıcaklığında soğutulmuş AZ91+1Si+0,3Ca alaşımının X-Işını analiz sonucu verilmektedir. Analizde kullanılan numunelerin daha önce yapılan mikroyapı incelemelerinde Mg_2Si fazı mevcut iken analiz sonuçlarında bu faz görülmemektedir. Çünkü Mg_2Si , $CaSi_2$ çekirdekleyicisi üzerinden büyümektedir ve bu nedenle birleşik fazlarda ki Mg_2Si fazının tespiti zorlaşabilmektedir.



Şekil 7.1. AZ91+1Si+0,3Ca alaşımından alınmış X-Işını analizi

7.3. Tane ve Mg_2Si Boyutu Sonuçları ve Tartışma

Mikroskopik incelemelerden elde edilen mikroyapı resimleri üzerinde tane ve Mg_2Si boyutları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan örnek mikroyapı resimlerinden bazıları Resim 7.12’de, tane ve Mg_2Si faz boyutu ölçüm sonuçları ise Çizelge 7.1’de verilmektedir.



Resim 7.12. Tane ve Mg_2Si boyutu hesaplamalarında kullanılan bazı mikroyapı resimleri (1(a), 2(b), 3(c), 4(d), 5(e) ve 6(f) no'lu numuneler) (f) SEM görüntüsüdür)

AZ91+Si alaşımına kalsiyum ilavesinin yapılması ve bunun yanında farklı üretim şartlarının uygulanması Mg_2Si fazını ve tane boyutunu değiştirmiştir. İşlemsiz alaşımlarda ortalama tane boyutu $\sim 102 \mu m$ 'dur. Ancak farklı üretim şartlarında ki (işlemlili) alaşımlarda tane ve Mg_2Si boyutlarında farklılıklar gözlemlenmiştir. İşlemsiz AZ91+Si+Ca alaşımına göre değerlendirilecek olursa işlemlili alaşımların tümünde Mg_2Si boyutu küçülmüştür. Tane boyutu yeniden ergitme numunesinde çok fazla değişmez iken uzun süreli ısıl işlem uygulanan numunede tane büyümesi gerçekleşmiştir. Ölçümlerde bulunan değerler karşılaştırıldığında, suda soğutulan numunede en küçük tane ve Mg_2Si boyutu elde edilmiştir. Normal şartlarda hızlı soğutma işlemi malzemelerin tane yapısını inceltmektedir. Ancak, burada diğer bir etken ise Mg_2Si fazının tanelerin önünde bariyer oluşturarak tanelerin büyümesini

engellemesidir. Bu numunede, işlemsiz AZ91+Si+Ca alaşımına göre tane boyutu ~ %84, takviye boyutu ise ~ %74 küçülmüştür.

Çizelge 7.1. Deneysel çalışmalarda elde edilen tane ve Mg₂Si boyutu

Bileşim (% Ağırlık)		Tane boyutu (μm)	Mg ₂ Si boyutu (μm)
İşlemsiz	Mg-%9Al-%1Zn	110	-
	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si	97	-
	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca	100	25
İşlemli	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca (Isıl işlem görmüş)	194	21
	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca (Yeniden ergitilmiş)	98	20
	Mg-%9Al-%1Zn-%1Si-%0,3Ca (Hızlı soğutulmuş)	16	6,5

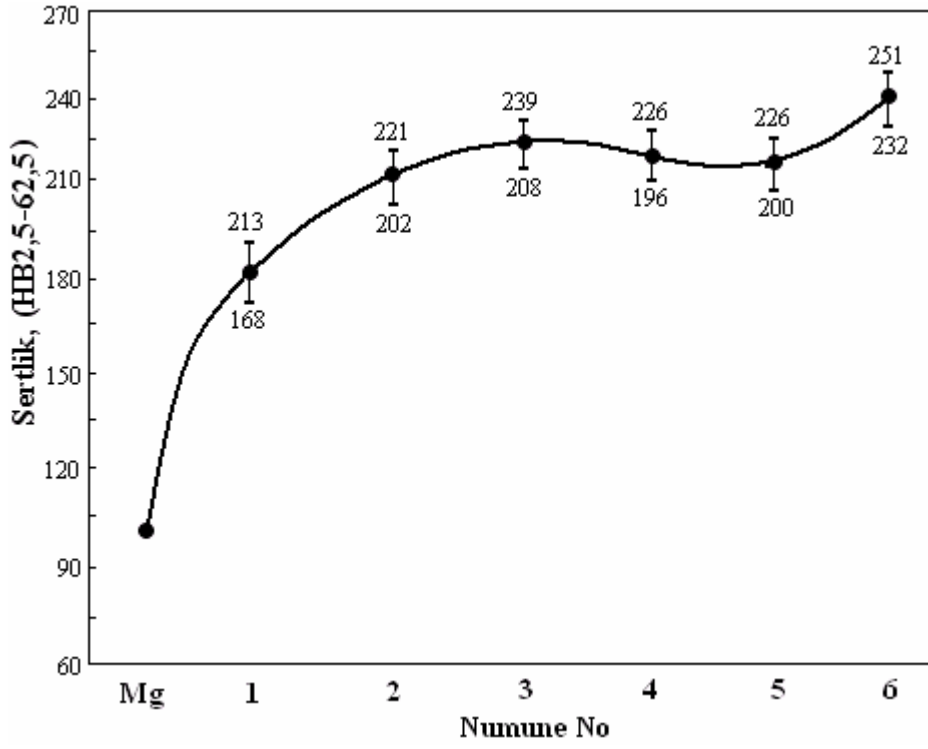
7.4. Sertlik Deneyi Sonuçları ve Tartışma

Çizelge 7.2’de her deney numunesi için 62,5 ve 187,5 kg’lık uygulanan yük ile elde edilen Brinell sertlik değerleri verilmektedir. Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de ise bu yük değerleri saf magnezyumun sertlik değeri ile birlikte grafik olarak verilmektedir. Grafikte her numunenin minimum ve maksimum sertlik değerleri de standart sapma ile birlikte verilmektedir.

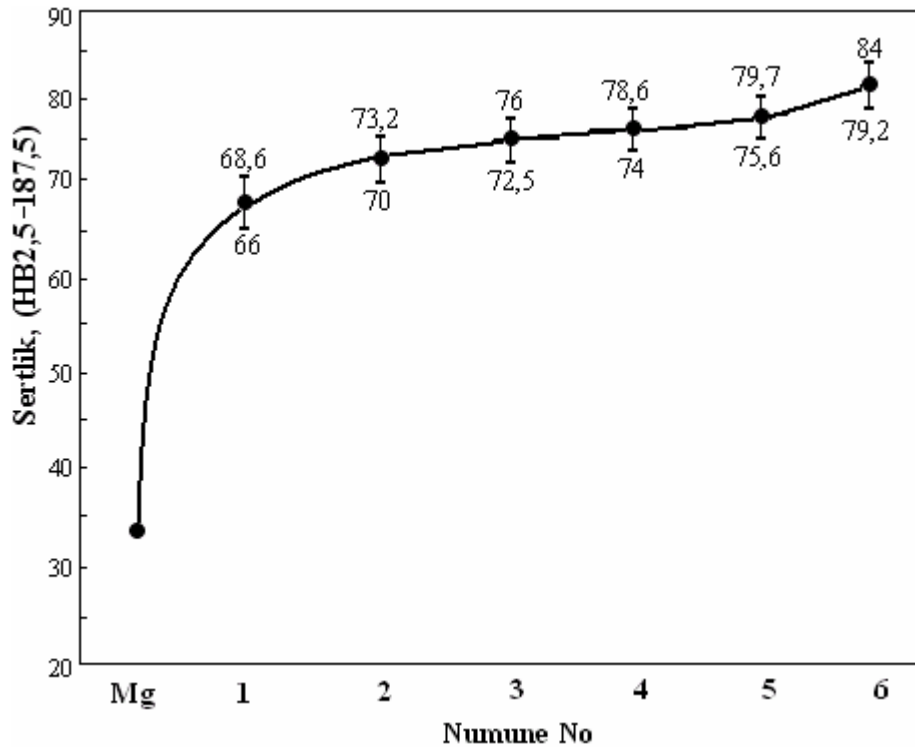
Daha öncede belirtildiği gibi Mg₂Si oldukça sert bir bileşiktir ve bu nedenle bulunduğu malzemenin sertliğini ve kırılgenliğini artırmaktadır. Deneysel çalışmalarda %1 silisyum ilavesi ile ana malzemede Mg₂Si takviye oranı yaklaşık %3’dür ve AZ91 alaşımının sertliğini artırdığı görülmektedir. En yüksek sertlik değeri hızlı soğutma numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, Mg₂Si fazı ve nispeten tane boyutunda ki küçülmenin bir sonucudur.

Çizelge 7.2. Deneysel çalışmalarda elde edilen Brinell sertlik ölçüm sonuçları

Setlik Ölçümleri (HB _{2,5} –62,5 Kg)									
Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8	Ortalama
1	168	171	173	175	181	183	200	213	183
2	202	203	208	214	217	219	220	221	213
3	208	209	217	219	220	223	237	239	221,5
4	196	204	212	218	219	227	234	226	217
5	200	203	214	216	218	219	224	226	215
6	232	234	236	242	243	244	248	251	241
Setlik Ölçümleri (HB _{2,5} –187,5 Kg)									
Numune No	1	2	3	4	5	6	7	8	Ortalama
1	66	66,7	67	67,7	68	68,2	68,5	68,6	67,6
2	70	70,5	71,2	71,3	71,6	72,2	72,4	73,2	72
3	72,5	73	73,1	73,7	74	74,2	75,9	76	74
4	74	75	75,4	76,1	76,4	77	78,1	78,6	76,3
5	75,6	76	76,4	77	77	78,7	79	79,7	77,4
6	78,8	79,2	79,8	80,9	81	82,4	83,5	84	81,2



Şekil 7.2. 62,5 Kg yük uygulanan numunelerin sertlik grafiği



Şekil 7.3. 187,5 Kg yük uygulanan numunelerin sertlik grafiği

Çizelge 7.3’de bazı çalışmalardan elde edilen farklı takviyeler ile güçlendirilmiş AZ91 alaşımı için sertlik değerleri verilmiştir. Bu sertlik değerleri ile Çizelge 7.2’de verilen değerler karşılaştırıldığında ~%3 Mg₂Si takviye elemanının AZ91 alaşımının sertliğini fark edilir derecede artırdığı görülecektir.

Çizelge 7.3. Bazı çalışmalardan elde edilmiş farklı takviye elemanı bulunduran AZ91 alaşımı esaslı kompozitlerin sertlik değerleri

Alaşım	Üretim yöntemi	Takviye türü	Sertlik (HR15T)		Ref. No
AZ91	Mekanik alaşımlama (in-situ)		Mekanik alaşımlama işlem süresi		(4)
			5 saat	10 saat	
		%5 Mg ₂ Si	79	85	
		%10 Mg ₂ Si	81	87	
		%15 Mg ₂ Si	83	-	
AZ91	Metal kalıba döküm	%10 TiC	83		(38)
AZ91	Toz metalurjisi	%8 SiC _p	75,1		(53)

7.5. Çekme Test Sonuçları ve Tartışma

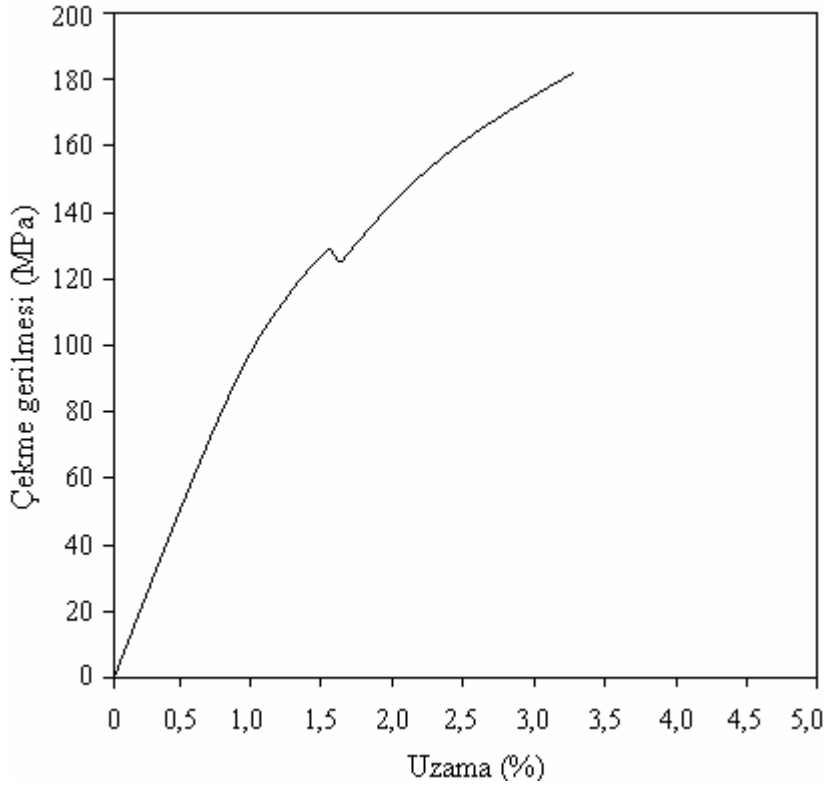
Çizelge 7.4’de çekme testi sonuçları verilmektedir. AZ91 alaşımı için çekme dayanımı değeri 84 MPa olarak bulunmuştur. Bu alaşıma silisyum ilave edildiğinde çekme dayanımı değeri artarken, kalsiyum içeren AZ91+1Si alaşımı ile işlemlenmiş parçalarda ise bu değer daha da arttığı görülmüştür. Bu artış, sıvıya kalsiyum ilave edilmesinin ve farklı üretim şartlarının bir sonucudur. Küçük ve ince parçacıklar şeklinde ki Mg₂Si fazları ana malzeme içerisinde dağılım mukavemetlenmesi sağlayarak mekanik özellikleri geliştirmektedir. Diğer taraftan kalsiyum, Mg₂Si fazları için birçok çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak bu fazların küçülmesini ve poligonlaşmasını sağlarken aynı zamanda Mg₂Si fazlarının dağılımı açısından daha homojen mikroyapı da meydana getirmektedir.

Üretilen deneysel malzemelerde en yüksek çekme dayanımı değeri hızlı soğutulmuş AZ91+Si+Ca kompozitinde elde edilmiştir. Şekil 7.4’de bu kompozit malzemedan elde edilen gerilme/uzama eğrisi verilmektedir. Hızlı soğuma ile birlikte tane boyutlarının oldukça küçülmesi bu numunede tane sınırı sayısının artmasına neden olmuştur. Dolayısıyla, katılaşma sırasında Mg_2Si fazlarının taneler tarafından tane sınırlarına doğru itilmesi bu fazların diğer deney numunelerine göre ana malzemede daha homojen dağılımını sağlamıştır. Tane sınırlarında bulunan bu fazlar dislokasyon hareketlerini nispeten önlerken asıl önemlisi, tane sınırı kaymasını yavaşlatmaktadır. Sonuç olarak hızlı soğutma uygulanan kompozit malzemede tane küçülmesi ve tane sınırlarında Mg_2Si fazlarının bulunması mukavemetlenmeyi artırmıştır.

Çizelge 7.4. Deneysel çalışmalardan elde edilen çekme testi sonuçları

Numune No	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
1	-	84	3,1
2	-	99	1,4
3	89	105	2,6
4	76	-	2,5
5	85	111	2,7
6	128	180	3,5

Tipik AZ91 döküm alaşımının % uzaması 3,1 olarak bulunmuştur. Aynı alaşıma %1 silisyum ilavesi yapıldığında % uzama azalırken, kalsiyum ilavesi ile birlikte farklı üretim yöntemleri kullanıldığında % uzama değerinin arttığı tespit edilmiştir. En fazla % uzama değeri hızlı soğutulmuş numunede elde edilmiştir. Bu numunede daha önce de bahsedildiği gibi en küçük tane ve Mg_2Si boyutu elde edilmiştir.



Şekil 7.4. Hızlı soğutulmuş kompozit malzemenin gerilme/uzama eğrisi

Çekme testinden elde edilen değerlerin döküm alaşımı için düşük olması beklenebilir. Bu durum gayet normaldir. Çünkü, klasik döküm işlemi diğer üretim yöntemlerine göre daha fazla mikroyapı hatalarına (gaz boşluğu, mikro çatlaklar, sıcak yırtılma, kirlilik vs.) sahiptir. Yapılan deneysel çalışmalar özellikle kirlilik açısından değerlendirildiğinde oldukça fazla problem teşkil etmektedir. Bu kirlilikler pota ve diğer ekipmanlardan ya da alaşım ilavelerinden kaynaklanabilmektedir. Ancak burada asıl önemli etken henüz ergimeyen magnezyumun yüzeyinde başlayıp sıvı işlemleri süresince devam eden MgO kirliliklerinin bulunmasıdır. Sıvı magnezyuma alaşım ilaveleri yapılırken ya da karıştırılma esnasında bu oksit kirlilikler sıvıya karışır. Diğer bir etken ise yüzey örtücü ile birlikte bazı kalıntıların sıvıda çökmesi ve çökelirken sıvıyı kirletmesi olabilir. Dolayısıyla çekme testinde bu tür kirlilikler kırılma ve kopma bölgesini tayin edebilmektedir.

7.7. Genel Sonuçlar

1. AZ91 alaşımına %1 silisyum ilavesinin yapılması ile birlikte hacimsel olarak ~%3 Mg_2Si olduğu ve bu oluşum ile alaşımın sertlik ve dayanımda artış sağlandığı, sünekliğinde ise düşüşün gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
2. Sıvıya kalsiyum ilavesi ile birlikte $CaSi_2$ fazının olduğu X-ışını analizlerinde de tespit edilmiştir. Oluşan bu faz, Mg_2Si için heterojen çekirdekleyici olarak etkiye bulunmuştur.
3. Kalsiyum ilavesi, Mg_2Si fazının Çin harfi şeklinde oluşumu yerine daha küçük boyutlarda ve nispeten poligonal bir şekilde oluşumuna neden olmuştur. Mg_2Si fazının şekli ve boyutunda ki bu değişim ile birlikte ana malzeme içerisinde daha homojen dağılım sağlanmıştır.
4. AZ91 alaşımının sünekliği silisyum ilavesi ile birlikte azalırken, kalsiyum ilavesi yapıldığında ve bunun yanında farklı üretim şartları uygulandığında süneklik değerlerinin arttığı görülmüştür.
5. İşlemlili alaşımlarda, uygulanan üretim yöntemine göre Mg_2Si ve tane boyutunun değiştiği tespit edilmiştir. Isıl işlem uygulanmış numunede Mg_2Si fazı küçülmüş ancak tane büyümesi gerçekleşmiştir. Yeniden ergitilmiş numunede tane boyutu çok fazla değişmemekle birlikte karıştırmanın etkisiyle Mg_2Si fazları kırılarak parçalara ayrılmış ve bununla birlikte ana malzeme içerisinde daha homojen dağılım göstermiştir. En küçük Mg_2Si ve tane boyutu ise hızlı soğutulmuş parçada elde edilmiştir.
6. Hızlı soğutma uygulanmış kompozit malzemede mekanik özellikler açısından en yüksek değerler elde edilmiştir. Bu parçada, Mg_2Si fazının oluşan taneler tarafından tane sınırlarına doğru itildiği ve mikroyapının bu fazlar açısından en homojen dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Anon., Magnesium Information, <http://www.members.tripod.com/Mg-/mggen.htm> (2005).
2. Guangyin, Y., Manping, L., Wenjiang, D., Inoue, A., “Microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Si based alloys”, *Materials Science and Engineering*, A357: 314-320 (2003).
3. Luka, P., Trojanova, Z., Chmelik, F., and Rudajevova, A., “Changes in the microstructure of magnesium composites estimated by non-destructive methods”, *Int. J. of Materials & Product Technology*, 18: 57-69 (2003)
4. Lu, L., Thong, K., K., Gupta, M., “Mg-based composite reinforced by Mg₂Si”, *Composites Science and Technology*, 63: 627–632 (2003)
5. Lu, L., Lim, C., H., Y., Yeong, W., M., “Effect of reinforcements on strength of Mg9%Al composites”, *Composite Structures*, 66: 41–45 (2004).
6. Yan, C., Ye, L., Mai, Y., W., “Effect of constraint on tensile behavior of an AZ91 magnesium alloy”, *Materials Letters*, 58: 3219-3221 (2004).
7. Büyük Larouse Sözlük ve Ansiklopedisi, Milliyet Gazetesi, 15: 7657-7658 (1986).
8. Cahn, R., W., Haasen, P., Kramer, E., J., “Structure and properties of nonferrous alloys”, *Materials Science and Technology*, 8: Matuchan, K., H., Almany, 117-206 (1996).
9. Singh, R., R., K., “The Role of Microstructure in Localized Corrosion of Magnesium Alloys”, *Metallurgical and Materials and Transactions A*, 35A: 2525 (2004).
10. Luo, A., A., Balogh, M., P., and Powell, B., R., March, “Creep and microstructure of magnesium-aluminum-calcium based alloys”, *Metallurgical and Materials and Transactions A*, 33A: 567 (2002).
11. Polmear, I., J., “Light Alloys - Metalurgy of the light metals”, *Metallurgical and Materials Science*, Prof. Hancock, P., Prof. Honeycombe, R., W., K., *Monash University*, London, 127-145 (1981).
12. İnternet: Willman Industries Inc., Properties of Magnesium, http://www.castingsource.com/AdRedir.asp?url=http://www.willmanind.com/&image=images/ads/willman_banner.gif 8-10 (2004).
13. Kazdal, Z., H., “Magnezyum alaşımları: otomotiv endüstrisinde uygulaması ve geleceği”, *TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi*, Kocaeli, (1999).

14. Australian Greenhouse Office, “Synthetic Use in Non-Montreal Industries; Metals processing - Magnesium and alloys”, **Report, ISBN 1-876536-79-9**, Avustralya, 7-9 (2000).
15. İnternet: Anon., refining and casting, <http://www.magnesium.com/w3/data-bank/article.php?mgw=64&magnesium=69> (2004).
16. Clow, B., B., “Production Methods, The magnesium outlook”, **Magnesium Technology Proceedings of London Conference**, London, 1-17 (1986).
17. Hagg, M., -B., “Purification of chlorine gas with membranes an integrated process solution for magnesium production”, **Separation and Purification Technology**, 21: 261–278 (2001).
18. İnternet: Noranda Inc., Reactivity of Magnesium, <http://www.climatevision.gov/sectors/magnesium/pdf/-magnesiumsf6emissions.pdf> , USA, (2004).
19. Dahle, A., K., Lee, Y., C., Nave, M., D., Schaffer, P., L., StJohn, D., H., “Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys”, **Journal of Light Metals 1**, 61-72 (2001).
20. Lorimer, G., W., “Structure –property relationships in cast magnesium alloys”, **Magnesium Technology Proceedings of London Conference**, İngiltere, 47-48 (1986).
21. Qian, M., StJohn, D., H., Frost, M., T., “Characteristic zirconium-rich coring structures in Mg–Zr alloys” , **Scripta Materialia**, 46: 649–654 (2002).
22. Qian, M., StJohn, D., H., Frost, M., T., “Heterogeneous nuclei size in magnesium-zirconium alloys”, **Scripta Materialia**, 50: 1115–1119 (2004)
23. Qian, M., Cao, P., 2004, “Discussions on grain refinement of magnesium alloys by carbon inoculation”, **Scripta Materialia**, In Press (2004).
24. Ozan, N., “Magnezyum alaşımlarının eritilmesi ve kuma dökümü”, **Ankara Sincan Küçük İşletmeleri Geliştirme Merkez Müdürlüğü**, Ankara (1987).
25. Askeland, D., R., “The Science and Engineering of Materials, 1”, Çeviren Dr. M. Erdoğan, M., **Nobel Yayın Dağıtım**, 3.baskı, Ankara, (1998).
26. İnternet: Magnesium, “MMat 380”, **Lights Metals Lecture 19**, [www.mmat.ubc.ca/courses/mmat380/lectures/2004/Lecture%2019Amagnesium\(Complete\).pdf](http://www.mmat.ubc.ca/courses/mmat380/lectures/2004/Lecture%2019Amagnesium(Complete).pdf) 8-10 (2005).
27. İnternet: Efunđa Engineering Fundamentals, magnesium alloy, http://www.efunda.com/materials/alloys/magnesium/list_magnesium.cfm?m=cas&Page_Title=Magnesium%20Alloys%20for%20Castings&C=magnesium&P=casting, (2004).

28. Singh, D., Suryanarayana, C., Mertus, L., Chen, R.-H., “Extended homogeneity range of intermetallic phases in mechanically alloyed Mg–Al alloys”, *Intermetallics*, 11:373–376 (2003).
29. Seshan, S., Jayamathy, M., Kailas, S., V., Srivatsan, T., S., “The tensile behavior of two magnesium alloys reinforced with silicon carbide particulates”, *Materials Science and Engineering*, A363: 345–351 (2003).
30. Saravanan, R., A., Surappa, M., K., “Fabrication and characterisation of pure magnesium-30 vol.% SiC_p particle composite”, *Materials Science and Engineering*, A276: 108–116 (2000).
31. Inem, B., “The development of the structures and properties of magnesium matrix silicon carbide reinforced composites”, doctor of philosophy, *School of Materials University of Leeds*, İngiltere, 40-43, 57-64 (1993).
32. Cai, Y., Taplin, D., Tan, M., J., and Zhou, W., “Nucleation phenomenon in SiC particulate reinforced magnesium composites”, *Scripta Materialia*, 41: 967–971 (1999).
33. Chua, B., W., Lu, L., Lai, M., O., “Influence of SiC particles on mechanical properties of Mg based composite”, *Composite Structures*, 47: 595-601 (1999).
34. Braszczyńska, K., N., Lityńska, L., Zyska, A., Baliga, W., “TEM analysis of the interfaces between the components in magnesium matrix composites reinforced with SiC particles”, *Materials Chemistry and Physics*, 81: 326–328 (2003).
35. Wu, F., Zhu, J., “Morphology of second-phase precipitates in carbon fiber and graphite fiber reinforced magnesium based metal matrix composites”, *Composites Science and Technology*, 57: 661-667 (1997).
36. Stevens, M., R., Todd, R., Papakyriacou, M., “The effect of thermal cycling on the properties of a carbon fibre reinforced magnesium composite”, *Materials Science and Engineering*, A397: 249–256 (2005).
37. Clyne, T., W., Metal Matrix Composites: Metal Matrix Composites: “Matrices and Processing”, *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*, 1-14 (2001).
38. Dong, Q., Chen, L., Q., Zhao, M., J., Bi, J., “Synthesis of TiC_p reinforced magnesium matrix composites by in situ reactive infiltration process”, *Materials Letters*, 58: 920– 926 (2004).
39. Jiang, Q., C., Li, X., Wang, H., Y., “Fabrication of TiC particulate reinforced magnesium matrix composites”, *Scripta Materialia*, 48: 713–717 (2003).

40. Jiang, Q., C., Wang, H., Y., Ma, B., X., Wang, Y., Zhao, F., “Fabrication of B₄C particulate reinforced magnesium matrix composite by powder metallurgy”, *Journal of Alloys and Compounds*, In Press, (2004).
41. Zheng, M., Y., Wu, K., Liang, M., Kamado, S., Kojima, Y., “The effect of thermal exposure on the interface and mechanical properties of Al₁₈B₄O₃₃W/AZ91 magnesium matrix composite”, *Materials Science and Engineering*, A372: 66–74. (2004).
42. Zheng, M., Wu, K., Liang, H., Kamado, S., Kojima, Y., “Microstructure and mechanical properties of aluminum borate whisker-reinforced magnesium matrix composites”, *Materials Letters*, 57: 558-564 (2002).
43. Svoboda, M., Pahutova, M., Kucharova, K., Sklenicka, V., Langdon, T.G., “The role of matrix microstructure in the creep behaviour of discontinuous fiber-reinforced AZ91 magnesium alloy”, *Materials Science and Engineering* A324: 151–156 (2002).
44. Hassan, S., F., Gupta, M., “Effect of particulate size of Al₂O₃ reinforcement on microstructure and mechanical behavior of solidification processed elemental Mg”, *Journal of Alloys and Compounds*, In Press (2005).
45. Wang, H., Y., Jiang, Q., C., Li, X., L., Wang, J., G., “In situ synthesis of TiC/Mg composites in molten magnesium”, *Scripta Materialia*, 48: 1349–1354 (2003).
46. Lu, L., Lai, M., O., and Hoe M., L., “Formation of nanocrystalline Mg₂Si and Mg₂Si dispersion strengthened Mg-Al alloy by mechanical alloying”, *NanoStructured Materials*, 10: 551-563 (1998).
47. Chen., C., Y., Tsao, C., Y., A., “Spray forming of silicon added AZ91 magnesium alloy and its workability”, *Materials Science and Engineering*, A 383: 21–29 (2004)
48. Kim, J., J., Kim, D., H., Shin, K., S., and Kim, N., J., “Modifacation of Mg₂Si morphology in squeeze cast Mg-Al-Zn-Si alloys by Ca or P addition”, *Scripta Materialia*, 41: 333–340 (1999).
49. Yoshinaga, M., Lida, T., Noda, M., Endo, T., Takanashi, Y., “Bulk crystal growth of Mg₂Si by the vertical Bridgman method”, *Thin Solid Films*, 461: 86–89 (2004).
50. Hengcheng, L., Yu, S., Guoxiong., S., “Restraining effect of strontium on the crystallization of Mg₂Si phase during solidification in Al-Si-Mg casting alloys and mechanisms”, *Materials Science and Engineering*, A358: 164-170 (2003).
51. Yuan, G., Y., Liu, Z., L., Wang, Q., D., Ding, W., J., “Microstructure refinement of Mg-Al-Zn-Si alloys, *Materials Letters*, 56: 53-58 (2002)

52. Gröbner, J., Chumak, I., Fetzner, R., S., “Experimental study of ternary Ca–Mg–Si phase equilibria and thermodynamic assessment of Ca–Si and Ca–Mg–Si systems”, *Intermetallics*, 11: 1065-1074 (2003).
53. Lim, C., Y., H., Lim, S., C., Gupta M., “Wear behaviour of SiCp-reinforced magnesium matrix composites”, *Wear*, 255: 629-637 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Ayhan DEMİR 1979 yılında Samsun ili Vezirköprü ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Nazım Akçan İlkokulunda, ortaöğrenimini Doğantepe Lisesinde tamamlamıştır. 1998 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü Döküm Öğretmenliği Programını kazanmış ve 2002 yılı haziran döneminde mezun olduktan sonra aynı dönem içersinde Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.