

154453

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİSYUM KARBÜR TAKVİYELİ Al-Si MATRİKSİLİ
KOMPOZİT MALZEMELERİN MİKROYAPILARININ ve
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

154453

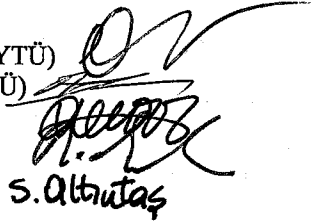
Makina Yük. Müh. İbrahim ŞAHİN

FBE Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi
Tez Danışmanı
Jüri Üyeleri

: 07 Ekim 2004
: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN (YTÜ)
: Prof. Mehmet Emin YURCİ (YTÜ)
: Prof. Dr. Erhan ALTAN (YTÜ)
: Prof. Dr. Niyazi ERUSLU (İTÜ)
: Prof. Dr. Sabri ALTINTAŞ (BÜ)


S. Altıntaş

İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	14
2. KOMPOZİT MALZEMELER	24
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	24
2.1.1 Matriks Malzemesine Göre	24
2.1.1.1 Polimer Matriksli Kompozit Malzemeler	25
2.1.1.2 Seramik Matriksli Kompozit Malzemeler	25
2.1.1.3 Metal Matriksli Kompozit Malzemeler	25
2.1.2 Takviye Çeşidine Göre	25
2.1.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	25
2.1.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler	26
2.1.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler	26
2.2 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları	26
3. METAL MATRİKSİLİ KOMPOZİT MALZEMELER	28
3.1 Matriks Malzemeleri	28
3.2 İlave Edilen Takviye Malzemeler	31
3.2.1 Sürekli Fiber Takviyeler	32
3.2.2 Kısa Fiberler	32
3.2.3 Viskerler	33
3.2.4 Partikül	33
3.2.5 Tel	35
3.3 Üretim Yöntemleri	35
3.3.1 Katı Faz Üretim Yöntemleri	35
3.3.1.1 Toz Metalurjisi Yöntemi	36
3.3.1.2 Difüzyon Bağlı Yöntemi	37
3.3.2 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri	37
3.3.2.1 Sıvı Metal İnfiltrasyon Yöntemi	37
3.3.2.2 Sıkıştırma Döküm Yöntemi	38
3.3.2.3 Metal Püskürtme Yöntemi	39

3.3.2.4	Karıştırma Döküm Yöntemi	40
3.4	Mekanik Özellikler	40
3.4.1	Elastiklik Modülü	40
3.4.2	Çekme Dayanımı	42
3.4.3	Kırılma	45
3.4.4	Yorulma	46
3.4.5	Aşınma	47
4.	METAL MATRİKSİLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞSIZ ŞEKİLLENDİRİLME YÖNTEMLERİ	50
4.1	Ekstrüzyon	50
4.2	Haddeleme	51
4.3	Dövme	52
5.	METAL MATRİKSİLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI	54
5.1	Havacılık ve Uzay Endüstrisi	54
5.2	Otomotiv ve Taşımacılık	55
5.3	Spor ve Eğlence	56
5.4	Elektrik ve Elektronik Endüstrisi	57
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA	59
6.1	Alüminyum Matriksli Kompozit Malzemenin Hazırlanması	59
6.1.1	Sıkıştırma Döküm Yöntemi	59
6.1.2	Gravite Döküm Yöntemi	60
6.2	Alüminyum Matriksli Kompozit Malzemelerin Ekstrüzyon Yöntemiyle Şekillendirilmesi	61
6.3	Uygulanan Isıl İşlem	61
6.4	EDX Analizi	62
6.5	Mikroyapı İncelemesi	62
6.6	Yoğunluk ve Porozite Değerlerinin Belirlenmesi	62
6.7	Ultrasonik Ses Hızı Ölçümü ile Elastiklik Modülünün Belirlenmesi	63
6.8	Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	67
6.8.1	Çekme Deneyi	68
6.8.1.1	Numune Hazırlanması	68
6.8.1.2	Deneyin Yapılışı	68
6.8.2	Çentik Darbe Dayanım Deneyi	68
6.8.2.1	Numune Hazırlanması	68
6.8.2.2	Deneyin Yapılışı	69
6.8.3	Sertlik Deneyi	69
6.8.3.1	Numune Hazırlanması	69
6.8.3.2	Deneyin Yapılışı	69
7.	DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	70
7.1	EDX Analizi Sonuçları	70
7.2	Mikroyapı Özellikleri	72
7.3	Yoğunluk ve Porozite Değerleri	88
7.4	Ultrasonik Ses Hızı Ölçümü Yardımıyla Belirlenen Elastiklik Modülü	93
7.5	Mekanik Özellikler	97

7.5.1	Çekme Dayanımı Özellikleri	97
7.5.2	%Uzama Özellikleri.....	102
7.5.3	Çentik Darbe Dayanımı Özellikleri.....	104
7.5.4	Sertlik Değerleri.....	109
8.	SONUÇLAR.....	115
KAYNAKLAR.....		119
ÖZGEÇMİŞ.....		123



SİMGE LİSTESİ

A_K	Çentik-darbe deneyinde kırılan kesit alanı
b	Burgers vektörü
E	Elastiklik modülü
E_f	Fiberin elastiklik modülü
E_m	Matriksin elastiklik modülü
G	Kayma modülü
I_S	Kırma işi
K_{Ic}	Gerilme yoğunluk faktörü
$m_{AlSi7Mg2}$	Matriks malzemesinin ağırlığı
m_h	Numunenin havadaki ağırlığı
m_s	Numunenin sudaki ağırlığı
m_{SiC}	Silisyum karbürün ağırlığı
P_c	Kompozit malzemedeki yük
P_f	Fiberdeki yük
P_m	Matriksteki yük
V_c	Kompozit malzemenin hacimsel oranı
V_f	Fiberin hacimsel oranı
V_m	Matriksin hacimsel oranı
V_L	Boyuna ses hızı
V_T	Enine ses hızı
α_K	Tokluk
μ	Poisson oranı
$\rho_{AlSi7Mg2}$	Matriks malzemesinin yoğunluğu
ρ_d	Deneysel yoğunluk
ρ_{SiC}	Silisyum karbürün yoğunluğu
ρ_t	Teorik yoğunluk
σ_c	Kompozit malzemenin dayanımı
σ_f	Fiber dayanımı
σ_m	Matriks dayanımı

KISALTMA LİSTESİ

BSEI	Geri Yansımali Görüntü (Back Scattering Electron Image)
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapour Deposition)
EDX	Enerji Dağınim Analizi (Energy Dispersion Analysis)
LEFM	Lineer Elastik Kırılma Mekanigi
MMK	Metal Matriksli Kompozit
NDE	Tahribatsiz Muayene ile Değerlendirme (Non-destructive Evolution)
PM	Toz Metalurjisi
ROM	Karışimlar Kuralı (Rule of Mixtures)
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TEM	Transmission Electron Microscope
TOFL	Boyuna Ses Hızı Geçiş Süresi (Time of Flight-Longitudinal)
TOFT	Enine Ses Hızı Geçiş Süresi (Time of Flight-Transverse)



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1 Toz metalurjisi yönteminin temel aşamaları	36
Şekil 3.2 Sıkıştırma döküm yöntemi	39
Şekil 3.3 MMK’de kullanılan takviye çeşidi oranıyla elastiklik modülündeki değişim	41
Şekil 6.1 Sıkıştırma döküm kalıbının şematik şekli	60
Şekil 6.2 Ekstrüzyon çubuğunun imalatı	61
Şekil 6.3 Ultrasonik ses hızı ölçüm düzeneği şeması	66
Şekil 6.4 Osiloskop ekranında yankıların görünümü	66
Şekil 6.5 Standart çekme deneyi çubuğu	68
Şekil 6.6 V çentikli standart Charpy deney parçası	69
Şekil 7.1 Sıkıştırma dökümle üretilen %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü	70
Şekil 7.2 1 numaralı noktadaki EDX analizi	71
Şekil 7.3 2 numaralı noktadaki EDX analizi	71
Şekil 7.4 3 numaralı noktadaki EDX analizi	71
Şekil 7.5 4 numaralı noktadaki EDX analizi	72
Şekil 7.6 5 numaralı noktadaki EDX analizi	72
Şekil 7.7 Gravite döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	75
Şekil 7.8 Gravite döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	75
Şekil 7.9 Gravite döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	76
Şekil 7.10 Gravite döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	76
Şekil 7.11 Gravite döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	77
Şekil 7.12 Gravite döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	77
Şekil 7.13 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen AlSi7Mg2 alaşımının SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	78
Şekil 7.14 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan AlSi7Mg2 alaşımının SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	78
Şekil 7.15 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	79
Şekil 7.16 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	79
Şekil 7.17 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	80
Şekil 7.18 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	80
Şekil 7.19 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	81
Şekil 7.20 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	81
Şekil 7.21 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit	

malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	82
Şekil 7.22 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	82
Şekil 7.23 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	83
Şekil 7.24 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	83
Şekil 7.25 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	84
Şekil 7.26 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	84
Şekil 7.27 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	85
Şekil 7.28 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	85
Şekil 7.29 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	86
Şekil 7.30 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	86
Şekil 7.31 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	87
Şekil 7.32 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)	87
Şekil 7.33 Kompozit malzemelerin deneysel yoğunluk değerleri	90
Şekil 7.34 %Porozite değerlerinin deneysel yoğunluk değerleri ile değişimi	90
Şekil 7.35 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan gravite döküm numunelerinde %porozite değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	91
Şekil 7.36 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde %porozite değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	92
Şekil 7.37 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde %porozite değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	92
Şekil 7.38 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen boyuna ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	94
Şekil 7.39 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen enine ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	94
Şekil 7.40 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen boyuna ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	95
Şekil 7.41 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen enine ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	95
Şekil 7.42 Elastiklik modülünün ağırlıkça %SiC ile değişimi	96
Şekil 7.43 Gravite döküm numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	98
Şekil 7.44 T6 ısıtma işlemi uygulanan gravite döküm numunelerinde çekme dayanımı	

değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	98
Şekil 7.45 Sıkıştırma döküm numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi.....	99
Şekil 7.46 T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	100
Şekil 7.47 Ekstrüzyon numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi.....	100
Şekil 7.48 T6 ısıtma işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	101
Şekil 7.49 Isıl işlemsiz numunelerde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimlerinin karşılaştırılması.....	101
Şekil 7.50 T6 ısıtma işlemi uygulanan numunelerde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimlerinin karşılaştırılması.....	102
Şekil 7.51 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan gravite döküm numunelerinde %uzama miktarlarının ağırlıkça %SiC ile değişimi.....	103
Şekil 7.52 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde %uzama miktarlarının ağırlıkça %SiC ile değişimi.....	103
Şekil 7.53 Isıl işlemsiz ve T6 ısıtma işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde %uzama miktarlarının ağırlıkça %SiC ile değişimi.....	104
Şekil 7.54 Gravite döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	106
Şekil 7.55 T6 ısıtma işlemi uygulanan gravite döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi.....	106
Şekil 7.56 Sıkıştırma döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	107
Şekil 7.57 T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	107
Şekil 7.58 Ekstrüzyon numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	108
Şekil 7.59 T6 ısıtma işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi.....	108
Şekil 7.60 Isıl işlemsiz numunelerde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.61 T6 ısıtma işlemi uygulanan numunelerde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması.....	109
Şekil 7.62 Gravite döküm numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi .	111
Şekil 7.63 T6 ısıtma işlemi uygulanan gravite döküm numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	111
Şekil 7.64 Sıkıştırma döküm numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	112
Şekil 7.65 T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	112
Şekil 7.66 Ekstrüzyon numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	113
Şekil 7.67 T6 ısıtma işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi	113
Şekil 7.68 Isıl işlemsiz numunelerde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması.....	114
Şekil 7.69 T6 ısıtma işlemi uygulanan numunelerde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması.....	114

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Metal matriksli kompozit malzemelerde kullanılan Al alaşımı esaslı matriks malzemeleri.....	29
Çizelge 3.2 Al esaslı bazı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.....	30
Çizelge 3.3 Seramik partiküllerin özellikleri.....	34
Çizelge 3.4 Bazı MMK'lerin özellikleri.....	43
Çizelge 6.1 Etial-140'ın kimyasal bileşimi	59
Çizelge 7.1 Ağırlıkça SiC oranlarının hacimsel oran olarak karşılıkları.....	88
Çizelge 7.2 Image Analyzer ile tespit edilen bölgesel SiC partikül oranları.....	88
Çizelge 7.3 Deneysel yoğunluk ve hesaplanan porozite değerleri	89
Çizelge 7.4 Ultrasonik yöntemle ölçülen ses hızları ve elastiklik modülleri	93
Çizelge 7.5 Kompozit malzemelerin çekme dayanımı ve %uzama değerleri	97
Çizelge 7.6 Kompozit malzemelerin darbe dayanım ve tokluk değerleri	105
Çizelge 7.7 Kompozit malzemelerin sertlik değerleri	110



ÖNSÖZ

Kompozit malzemeler, farklı gruptaki malzemelerin iyi özelliklerini, tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Üretim yönteminin seçimi yanında, matriks ile takviye malzemesinin uyumu önemli olduğundan, matriks malzemesi olarak seçilen Al-Si alaşımı için uygun olan ve arayüzeylerde istenmeyen intermetalik bileşiklerin oluşumunda en az etkiye sahip takviye malzemesi silisyum karbür partikülleridir.

Tez çalışmamda bana her türlü desteği sağlayan tez danışmanım sayın hocam Prof.Dr.Ayşegül AKDOĞAN'a, kompozit malzeme üretiminde yardımcı olan sayın Doç.Dr.Ali KALKANLI'ya, ultrasonik ses hızı ölçüm deneylerinde yardımlarını esirgemeyen sayın Doç.Dr.C.Hakan GÜR'e, yine şekillendirme işlemlerinde ve deneylerde firmalarının imkanlarından faydalanmamı sağlayan Ertaş Isı ve Onat Alüminyum yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bana her türlü desteği veren aileme ve tüm arkadaşlarıma da sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



ÖZET

Metal matriksli kompozit malzemelerin sahip olduğu özellikler nedeniyle kullanım alanlarının gün geçtikçe yaygınlaşması araştırmacıların ilgisini çektiğinden, çalışmamızda AlSi7Mg2 matriksli, ortalama 23 µm çapında ve ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında SiC partikülleri içeren kompozit malzemeler, gravite ve sıkıştırma döküm yöntemleriyle üretilerek, bir kısmına T6 ısıt işlemleri uygulanmıştır. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen bir grup malzeme ise, önce sıcak şekillendirme işlemine, daha sonra T6 ısıt işlemine tabi tutulmuştur. Böylece hazırlanan değişik katılaşma aralığına sahip kompozit malzemelerin; mikroyapıları, sertlik değerleri, ultrasonik ses hızı ölçme yöntemiyle elastiklik modülleri ile çekme dayanımı ve darbe dayanım değerlerindeki değişimler araştırılmıştır.

Sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilen malzemelerde porozitenin yok denecek kadar az olması, mekanik özelliklerin iyileşmesine neden olmuştur. SiC oranının %5'ten %10'a yükselmesi çekme dayanımını artırırken, %15 oranındaki ilavesinde ise, matriks içindeki SiC partiküllerinin kırılması nedeniyle çekme dayanımının düştüğü saptanmıştır. Bununla birlikte, artan SiC oranı ile elastiklik modülünün artmasına karşın, darbe dayanım değerlerinde düşme görülmüştür. 450°C'de 23:1 ekstrüzyon oranında uygulanan sıcak ekstrüzyon işleminin eş eksenli matriks yapısı oluşturduğu ve SiC partiküllerinin matriks içinde homojen dağılımına sebep olduğu, mikroyapı görüntülerinden anlaşılmıştır. Uygulanan ısıt işlemin malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirici etkisinin, özellikle sıcak ekstrüzyon ile şekillendirilmiş malzemelerde daha fazla olduğu, mekanik özelliklerin artan SiC oranıyla artış gösterdiği ve %15 SiC oranında ise, sertlik değerinin 103 HB, çekme dayanımının 204 MPa ve kırma işinin 7,25 J olarak maksimum değerlere ulaştığı saptanmıştır.

AlSi7Mg2 matriks ve ağırlıkça farklı oranlarda SiC ilavesiyle üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin, literatürde çalışılan Al alaşımı matriksli kompozit malzeme özellikleriyle benzerlikler gösterdiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Metal matriksli kompozit, sıkıştırma döküm, ekstrüzyon, çekme dayanımı, ultrasonik ses hızı.

ABSTRACT

Metal matrix composite materials have received considerable attention because they have been being used in wide range thanks to their superior properties. Therefore, in this thesis, AlSi7Mg2 matrix composite materials which contain 5, 10 and 15 wt% SiC particles of average diameter 23 μm , were produced by gravity and squeeze casting methods and then the T6 heat treatment was applied. A group of materials which was produced by squeeze casting method, was carried out the hot forming process and then T6 heat treatment. Microstructures, hardness, elastic modulus values by ultrasonic velocity measurements, tensile strength and impact strength variation of composite materials with various solidification space were investigated.

Rareness of porosities in the materials which were produced by squeeze casting method improves the mechanical properties. It is observed that increasing the ratio of SiC from 5 wt% to 10 wt% had improved the tensile strength; however the tensile strength decreases in the ratio of 15 wt% because SiC particles in the matrix get fractured. Increasing SiC ratio causes a better elastic modulus, but a worse impact strength. It was seen at micrographs that hot extrusion process at 450°C with an extrusion ratio of 23:1 forms an equiaxed matrix structure and a homogeneous distribution of SiC particles in the matrix. Improvement effect of the heat treatment for mechanical properties of materials is more effective in the materials which were formed by hot extrusion. The mechanical properties improve as SiC ratio increases. When SiC ratio is 15 wt%, hardness of 103 HB, tensile strength of 204 MPa and fracture value of 7,25 J were measured as their maximum values.

It is observed that microstructures and mechanical properties of composite materials which were produced by addition SiC particles in various weight ratio in AlSi7Mg2 matrix, had similar the properties Al alloy matrix composite materials that had been being studied by many researchers in the literature.

Keywords: Metal matrix composite, squeeze casting, extrusion, tensile strength, ultrasonic velocity.

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler, malzeme alanındaki ilerlemelere bağlıdır. Çalışılan alan ne olursa olsun, malzemeye olan bağımlılık, gelişmede sınırlamalara neden olmaktadır. Bu itibarla kompozit malzemeler, malzemelerin sürekli olarak geliştirilebilmesi açısından önem taşımaktadır.

Kompozit malzemeler aslında yeni bir malzeme çeşidi değildir. Tabiat, kompozit malzeme örnekleriyle doludur. Örneğin hindistan cevizi palmyesinin yaprağı, fiber takviye kavramını kullanmada öncü olmuştur. Tahta, odunsu matriks içerisindeki selüloz fiberlerden oluşmuş fiberli bir kompozit yapıdır. Selüloz fiberler, yüksek çekme dayanımına sahiptirler, fakat çok esnekler, yani düşük rijitliktedirler. Buna rağmen odunsu matrikse rijitlik kazandırmak için fiber olarak katılırlar. Kemik, vücudun çeşitli üyelerinin ağırlığına destek veren bir diğer doğal kompozit malzeme örneğidir. Fosforlu kaya tuzu olarak isimlendirilen apatit, mineral matriks içerisine yerleştirilmiş kısa ve yumuşak doku fiberlerinden meydana gelmiştir. Doğal olarak oluşmuş bu kompozit malzemelere ilaveten, çok yaygın ve uzun zamandır kullanılan birçok mühendislik kompozit malzemeleri vardır. Lastik içerisindeki siyah karbon, kuma katılan Portland çimentosu veya asfalt karışımı ve reçine içerisindeki karbon fiberler yaygın olarak kullanılan örneklerdir.

Kompozit malzemelerin ilk olarak ayrı bir bilim alanı olarak görülmesi, 1960'ların başlarına rastlar. Kompozit malzemeleri geliştirme çabaları için yapılan toplu araştırmalar ise 1965'te başlamıştır. 1960'ların başlarından bu yana, havacılık, enerji ve inşaat gibi farklı alanlarda daha hafif, daha güçlü ve daha rijit malzeme ihtiyacının artması, yüksek performanslı, daha iyi malzemelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Kompozit malzemeler, ayrı ayrı her bir elemanı ulaşılamayan bir performans sağlayan ve optimum bir tasarımda, özellikleri açısından ihtiyaca cevap veren bir malzeme grubudur. Diğer bir deyişle kompozit malzemeler, düşük ağırlık ve maliyette tasarruf arayanlar ile her bir uygulama için farklı bir malzeme yaratmak isteyen tasarımcı-analizcileri etkileyerek, tasarım mühendisliğinde olağanüstü bir hareketlilik başlatmıştır.

Yirminci yüzyılın üçüncü çeyreğinde, B, C, SiC ve Al_2O_3 gibi, son derece yüksek elastiklik modülüne sahip, ileri fiberler olarak isimlendirilen malzemeler ortaya çıkmış ve polimer, metal ve seramik matrikslerin güçlendirilmesi için kullanılmışlardır. Fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mekanik dayanıma sahip olmaları ve rijitliklerinden dolayı, partikül takviyeli kompozit malzemelere kıyasla daha önem kazanmışlardır. Ancak, fiberli bir yapının,

esasen fiber yönünde dayanımının yüksek olduğu unutulmamalıdır. Özel amaçlı fiberli kompozit üretmek de hedeflenebilir. Örneğin, iletken bir matrikse yerleştirilmiş son derece ince filamentlerin kullanılmasını gerektiren süper iletkenlerde, aşınma veya korozyon dirençli bir yüzey elde edilebilmesi için tabakalı bir yapının kullanılması zorunludur (Chawla, 1998).

Metal matriksli kompozit (MMK) malzemeler, uygun matriks ve takviye malzemesi seçimiyle, yüksek mekanik dayanım, daha yüksek elastiklik modülü, yüksek aşınma direnci, daha yüksek çalışma sıcaklığı, düşük ağırlık, daha iyi yorulma dayanımı, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik ile düşük ısıl uzama katsayısı gibi üstün özelliklere sahiptirler.

Bakırla takviye edilmiş çelik tel şeklindeki metal matriksli kompozit malzemeler, tarihsel açıdan, ilk sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeler arasındadır. 1960'ların sonlarında yapılan ilk çalışmaları, havacılık endüstrisindeki yüksek performans ihtiyaçları teşvik etmiştir. Maliyet gözetmeksizin yapılan bu geliştirme çabalarında, performans başlıca rolü oynamıştır. Yüksek mekanik dayanım ve yüksek elastiklik modülüne sahip takviye malzemesi olan B fiberlerle, hem metalik hem de polimer matriksli kompozit malzemeler geliştirilmiştir. C fiberler zayıf ıslatma kabiliyeti ve fiber dayanımının azalması nedeniyle, sıvı fazda üretim yöntemleriyle Al matriksli kompozit malzeme üretimi için uygun olmamış, yalnız polimer matriksli kompozit malzemelerde kullanılmıştır. Bu nedenle MMK'lerin gelişmesi, katı fazda üretim yöntemlerine doğru yönelmiştir. Sıvı fazda üretimde ise, işlem esnasında Al ve Mg alaşımlarıyla reaksiyona engel olmak ve ıslatmayı kolaylaştırmak amacıyla, B ve C fiberler için yüzey kaplamaları geliştirilmiştir (Rawal, 2001).

Partikül takviyeli hafif metaller, çok iyi fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı, malzeme üreticileri ve kullanıcıların dikkatini çekmişlerdir. Yayınlanan çalışmaların çoğunda, düşük yoğunluk, geniş alaşımlama olanağı, ısıl işleme yatkınlığı ve işlem esnekliği nedeniyle, Al esaslı kompozit malzemeler üzerinde durulmuştur. Otomotiv, ulaşım ve inşaat endüstrilerindeki uygulamalar için maliyet de ana faktörlerden birisidir. Matriks olarak Al alaşımlarının kullanılması, düşük maliyet ve taşıma kolaylığını da içine alan bazı avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. 1960'lardan beri Al alaşımlı otomotiv parçalarının, dökme demirin yerini aldığı görülmektedir. Toyota Motor Company, 1983 başında, MMK'lerin ilk ticari uygulaması olarak dizel motor pistonunu üretmiştir (Kervorkian, 1998).

Aerospace Metal Composites Limited şirketi, 1984'ten beri, kompozit malzeme üretiminde toz metalurjisi yöntemini geliştirmektedir. İmal edilen parça yelpazesi, yüksek kaliteli Al/SiC partiküllü MMK'lerin üretimine başlanmasıyla, lityum içeren alaşımların da sayesinde

büyümektedir (amc-mmc.co.uk).

Japonya'da 1981'de hükümetin emriyle, bir araştırma-geliştirme programı başlatılmıştır. Endüstri, akademik alan ve ulusal enstitüler, bu proje üzerinde çalışmışlar ve metal, seramik ve polimer alanında araştırmalar yapmışlardır. Bunlar, kompozit malzeme araştırmaları için de bir temel oluşturmuştur. Bu proje 10 yıllık bir planda gerçekleştirilmiştir. MMK malzeme için, matriks malzemesi olarak Al ve Ti alaşımı, takviye malzemesi olarak da SiC ve Al_2O_3 fiberler ve diğer birçok malzeme seçilmiştir. Araştırma esas olarak, üretim ve şekillendirme teknolojisi ile tasarım teknolojisi yönünde olmuş ve bu araştırmaların sonuçları, enerjiyle ilgili cihazlar ve uzay araçlarında kullanılmışlardır (Noguchi ve Takahashi, 1997).

1989'da Honda şirketi, Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya'da benzinli motorlarda silindir bloğunda yeni bir MMK teknolojisi uygulamış; Al ve Al esaslı MMK malzemeden silindir bloğu imal etmiştir. Önceki Al motorlarla karşılaştırıldığında, ağırlıkta %20'ye varan bir azalma, dökme demirden yapılmış bir silindir bloğuyla karşılaştırmada ise %50'lik bir ağırlık azalması sağlanmıştır (Kervorkian, 1998).

Attia'nın (1993) çalışmasında, Al-Si alaşımına, uygun miktarlarda %99,7 ticari saflıktaki Al katılarak ağırlıkça %5 ve %12 Si içeren Al-Si alaşımları hazırlanmıştır. Bu alaşımlar, ağırlıkça %3, %6 ve %9 SiC ile takviye edilerek, karıştırma döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretilmiştir. Döküm sonrası %3 SiC içeren kompozit malzemelerin mikroyapıları incelendiğinde yapının, Si'li ötektik içeren SiC'li birincil Al dendritlerden oluştuğu görülmüştür. Saf bir birincil Al dendrit ağı oluşturmak için, ergiyikte yüksek soğutma oranından faydalanılmış ve böylece homojen bir SiC dağılımı elde etmek mümkün olmuştur. Uygulanan teknik, uygun arayüzey bağına ulaşmada başarılı olmuştur. Hatta, SiC'ye ön ısıtma yapılması, matriks ile takviye arasındaki ısıl iletkenlik dengesizliğinin azalmasında etkili olmuştur. Matriks ile takviye arayüzeyi, MMK malzemelerin mekanik özelliklerinde kritik bir rol oynamaktadır. Benzer şekilde, arayüzey olgusu ve ıslatma kabiliyeti, bu malzemelerin üretimlerinde önem taşımaktadır. Ağırlıkça %SiC oranı ve matriksteki Si miktarının artmasıyla, elastiklik modülü, akma ve kopma gerilmelerinde artış olduğu, fakat gerinimde düşme olduğu tespit edilmiştir.

Nguyen vd.'nin (1994) yaptığı bir çalışmada, karıştırma döküm yöntemiyle, 13 μm ortalama çapındaki SiC partiküller, %10, %20 ve %30 oranlarında, A356 (%7 Si ve %0,3 Mg) alaşımı matrikse katılarak kompozit malzeme üretilmiştir. Porozitesiz bir içyapı elde etmek amacıyla 100 MPa basınç altında katılaştırılmıştır. Daha sonra 480°C'de 9:1 ekstrüzyon oranıyla

ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş ve 20 mm çaplı çubuklar elde edilmiştir. Ekstrüzyonla şekillendirilen kompozit malzemelerin mikroyapıları incelendiğinde, SiC partiküllerin yapıda homojen olarak dağıldığı, fakat ekstrüzyon işleminin bir sonucu olarak, ekstrüzyon çubuğunun eksenini boyunca yönlendiği tespit edilmiştir. Numuneler 585°C'de 40 dakika tavlandığında, mikroyapısının tamamen küresel hale geldiği görülmüştür. Birincil alüminyumca zengin fazın kürecikleri açıkça ayırt edilebilmiş ve SiC partiküller, işlem sıcaklığında ergiyik halde bulunan ötektik bölgede toplanmışlardır. Bu numuneler için ergiyiğin hacimsel oranı, tüm SiC partikülleri içine alacak kadar yeterli büyüklüktedir.

Buarzaiga ve Thorpe (1994), 5-10 µm arasında çapa sahip SiC partikül ile takviyeli A356 Al alaşımı matrisli kompozit malzemenin, döküm sonrası mikroyapısını incelemiştir. A356 alaşımına SiC partikül ilavesinin, ikincil fazların, özellikle Si fazının dağılımını ve morfolojisini etkilediğini ve $\text{FeMg}_3\text{Si}_6\text{Al}_6$ intermetalik fazının hacimsel oranını değiştirdiğini saptamışlardır. Bu değişimin derecesi SiC miktarıyla orantılıdır. Hacimce %10 SiC partikül içeren kompozit malzeme, ötektik bileşende dağılmış olan partikülleriyle, takviyesiz alaşımın tipik yapısal özelliklerini sergilemektedir. Bununla birlikte, hacimce %20 SiC partikül içeren kompozit malzeme, takviyesiz alaşımla daha az benzerlikler göstermektedir. Partikül dağılımı oldukça homojendir, fakat partikül toplanmaları da görülmektedir.

Lee vd. (1996), 9-10 µm çapında hacimce %15 SiC partikül içeren döküm A356 Al alaşımı matrisli kompozit malzemenin mikroyapıları ve kırılma davranışlarını incelemiştir. Duralcan tarafından üretilen kompozit malzemede yüksek soğutma oranı elde etmek amacıyla, küçük bir bakır kaba yeniden döküm işlemi yapılmıştır. Ayrıca, 75 MPa basınçla sıkıştırma döküm yöntemi uygulanarak da kompozit malzeme üretilmiş ve 550°C'de 2 saat çözeltiye alma ve 130°C'de 20 saat suni yaşlandırma ile T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Duralcan kompozit malzemesinin mikroyapısı incelendiğinde, SiC partiküller, tanelerarası bölgelerde büyük miktarda segregasyonlar oluşturmuşlardır. Homojen olmayan takviye dağılımı, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini de etkilemektedir. Tekrar dökülen ve sıkıştırma döküm yapılan kompozit malzemeler ise, homojen bir SiC ve ötektik Si partikül dağılımına sahiptir. Bu mikroyapısal değişim, tekrar döküm işleminde daha hızlı soğutma oranı nedeniyledir. Bununla birlikte, ötektik Si partiküllerin daha fazla değişime uğraması, sıkıştırma dökümde açıkça görülmektedir. A356 Al-SiC_p kompozit malzemesinde, az da olsa porozite mevcuttur. Porozite miktarı, sıkıştırma döküm yapılan kompozit malzemede, katılaşma esnasında uygulanan yüksek basıncın etkisiyle önemli derecede azalmaktadır.

Hanada vd.'nin (1997) yaptığı bir çalışmada, 0,4 μm çapında hacimce %10 ve %20 oranlarında SiC partikül ile AA8090 Al-Li alaşımı matriks tozları, 500 d/dak hızda, 2-3 saat mekanik olarak karıştırılmış ve 300°C'de 432 MPa basınçla sıcak presleme yapılarak kompozit malzeme üretilmiştir. Daha sonra 500°C'de 50 mm/dak hızında, 10:1, 20:1 ve 40:1 oranlarında ekstrüzyonla şekillendirilmiştir. 520°C'de 52,5 dakika çözeltiye alınan bu kompozit malzemelere, 190°C'de 3-6 saat suni yaşlandırma yapılmıştır. Çekme deneyi sonucunda, farklı ekstrüzyon oranlarında, Al-Li/SiC_p kompozit malzemesinin çekme dayanımı özellikleri değişiklik göstermiştir. Hacimce SiC partikül oranının artmasıyla, elastiklik modülü de artmıştır. Ekstrüzyon oranının artmasıyla, elastiklik modülündeki değişim miktarı az olmuştur. T6 ısıt işleminin ise, kompozit malzemenin çekme dayanımının yükselmesini sağlarken, uzama değerlerinde düşmeye neden olmuştur. TEM incelemesi sonucunda, artan ekstrüzyon oranıyla, tane yapılarının yeniden billurlaştığı ve ince taneli olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 40:1 gibi yüksek ekstrüzyon oranındaki şekillendirmede yeniden billurlaşma ve tane büyümesi görülmüştür. Yüksek deformasyon miktarının, büyük bir sıcaklık artışına sebep olduğu düşünülmektedir. Ekstrüzyonla şekillendirilen bu kompozit malzeme, birçok dislokasyona sahiptir ve matrikste çökeltiler meydana gelmemiştir. Artan ekstrüzyon oranı ile Al-Li matriksin yeniden billurlaştığı ve SiC partiküllerin dağılımında iyileşmeler olduğu görülmüştür. Ekstrüzyon oranının daha fazla artması ise, tane boyutunun büyümesine ve SiC partikülleri ile arayüzeyin hasarına sebep olduğundan, özelliklerde düşüşler meydana gelmiştir.

Sternowsky vd.'nin (1997) yaptığı bir çalışmada, matriks malzemesi olarak AA6061 Al alaşımı, takviye malzemesi olarak SiC partiküller kullanılmıştır. Matriks malzemesi 10 μm , 30 μm ve 40 μm olmak üzere üç farklı partikül boyutunda, takviye malzemesi ise 5 μm ve 75 μm partikül boyutunda seçilmiştir. Üretim yöntemi olarak toz metalurjisi, şekillendirme için ekstrüzyonun seçildiği bu çalışma ile mekanik özellikler üzerine partikül boyutunun etkisi incelenmiştir. Uygun boyuttaki partiküller ile yapılan birleştirme, homojenliğin iyileşmesine ve daha yüksek malzeme dayanımına neden olmuştur. Basma deneyinde, hacimsel olarak SiC oranının artmasıyla, sıkıştırılabilirliğin azaldığı görülmüştür. Bu durum, SiC'nin plastik deformasyona direnç göstermesi ve basma sırasındaki daha yüksek sürtünme etkileri ile açıklanabilmektedir.

Cöcen (1997), hacimce %9, %13, %17 ve %26 oranlarında SiC partikülle takviyeli AlSi5 matriksli kompozit malzemenin çekme deneyleri ile uzama, kesit daralması ve plastik akma eğrilerinden yararlanarak deformasyon sertleşmesi üsteli gibi şekil değiştirme özelliklerini

incelemiştir. Döküm yöntemi ile üretim sonrası kompozit malzemelere ekstrüzyon işlemini uygulamıştır. Ekstrüzyona tabi tutulan numunelerde en yüksek uzama oranının %23,8'le matriks alaşımında olduğunu saptamıştır. Döküm ve ekstrüzyon numuneleri üzerinde yaptığı çekme deneyleri sonucunda yapılan değerlendirmede önemli farklılıklar gözlemiştir. Ekstrüzyon sonrası şekil değiştirme miktarları, döküm numunelere oranla yaklaşık olarak 4-8 kat artış göstermiştir. En düşük şekil değişimine sahip AlSi5/SiC/26p kompozit malzemenin uzama oranı %0,69'dan ekstrüzyon sonrası %5,5 değerine çıkmıştır. Tüm kompozit malzemelerde aynı şekilde gözlenen bu değerlerdeki iyileşmeler, termomekanik işlemlerin kompozit malzemelerin sünekliği üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymaktadır. Bundan da termomekanik işlemlerde, genel olarak kompozit malzemelerin mikroyapısının daha homojen hale geldiği, döküm sonrası yapıda oluşan dendritik iç yapının kırılarak ortadan kalktığı, gözeneklerin azaldığı ve bunun sonucunda sünekliğin iyileştiği anlaşılmaktadır.

Tjong vd.'nin (1997) çalışmasında, Al-12Si alaşımına %2, %4, %6 ve %8 hacimsel oranlarında SiC partikül katılarak karıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemeye T6 ısıtıl işlemi uygulanmıştır. Al-12Si alaşımının makro Vickers sertliği, SiC partikül miktarının artışıyla az da olsa artmıştır. Örneğin Al-12Si alaşımının sertliği 103 HV iken, hacimce %8 SiC partikül içeren MMK'nin sertliği 112 HV olmuştur.

Sui vd. (1997), Al-Si alaşımı (ZL-109) ve Zn-Al alaşımı (ZA-27) matriksli kompozit malzeme üretmişler ve takviye malzemesi olarak SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, C ve B₄C partiküllerini kullanmışlardır. Al alaşımı matriksli kompozit malzemeler santrifüj döküm, Zn alaşımı matriksli kompozit malzemeler ise sıkıştırma döküm yöntemi ile üretilmiştir. Numuneler üzerinde yapılan sertlik deneyleri sonucunda, seramik partiküllerin ilavesiyle, Brinell sertlik değerlerinin arttığı ve sertlik değerine en yüksek etkiyi B₄C partikülünün yaptığı tespit edilmiştir. Takviyesiz Zn alaşımının sertliği 116 HB iken, 20 µm çapında, hacimce %10 B₄C ile takviye edilen kompozit malzemenin sertliği 135 HB olmuştur.

Tokaji vd. (1999) çalışmalarında, toz metalurjisi ile üretilen ve sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanan, 2024 Al alaşımı matriksli ve 5 µm, 20 µm ve 60 µm çapında ağırlıkça %10 SiC partikül içeren kompozit malzemelerde mikroyapı incelemesi yapmışlardır. Ekstrüzyon doğrultusuna dik ve paralel kesitlerde yapılan incelemeler sonucunda, SiC partiküllerin, ekstrüzyon doğrultusuna doğru zayıf bir yönelme eğiliminde olduğu görülmüştür.

Park vd. (1999), püskürtme döküm yöntemiyle, SiC partikül takviyeli Al-Si alaşımı matriksli kompozit malzeme üretmişlerdir. Mikroyapı incelemesi sonucunda, partiküllerin

damlacıkların içerisine nüfuz ettiğini ve kompozit mikroyapısında homojen dağıldığını görmüşlerdir. Bu kompozit malzemenin sıcak ekstrüzyonu sonucunda, olası kırılmalar nedeniyle, ötektik Si fazının boyutları küçülmüştür. SiC partiküllerinin homojen dağılımının, 25:1'lik yüksek ekstrüzyon oranı ile etkilenmediğini belirlemişlerdir.

Seo ve Kang'ın (1999) yaptığı bir çalışmada ise, SiC partikül takviyeli 6061 Al alaşımı matriksten, karıştırma ve sıkıştırma döküm yöntemleriyle üretilen kompozit malzemeye, sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Karıştırma ve sıkıştırma döküm yöntemleriyle üretilen bloklar incelendiğinde; içyapıda görülen hatalar, yani toplanmalar, porozite ve büzölmeler nedeniyle, takviye edilmemiş Al alaşımının kopma dayanımının, takviye edilmiş malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu saptanmıştır. Hacimsel olarak %10 oranında SiC partikül içeren Al matriksli kompozit malzemenin, hacimsel olarak %5 SiC partikül içeren kompozit malzeme ile karşılaştırılmasında, kopma dayanımında 40 MPa'lık bir artış olduğu, fakat %15'lik SiC'li kompozitte aynı kaldığı görölmüştür. Bunun nedeni, partikül takviyelerin homojen bir dağılım göstermeyişi ve matriks ile takviye arasındaki arayüzeyin yeterli dayanıma sahip olmayışdır. Ekstrüzyon işlemi sonucunda ise, partikül dağılımı daha homojen bir hale gelmiş ve sertlik de partikül oranı ile lineer bir artış göstermiştir. Yine ekstrüzyon işlemi ile şekillendirme sonucunda partikül toplanmaları azalmış ve arayüzey bağı dayanımı artmıştır.

Göl'ün (1999) yaptığı çalışmada, %10, %15 ve %20 hacimsel oranlarında, 16 µm, 23 µm ve 30 µm çapındaki SiC partikülle takviyeli saf Al, Al-%10Si ve Al-%5Si-%3Cu matriksli kompozit malzemeler karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiştir. Kompozit malzeme özelliklerini iyileştirmek için kontrol edilen malzeme ve işlem değişkenleri; ergiyik sıcaklığı, karıştırma hızı, takviye malzemenin ön işlemi, alaşımın kimyasal bileşimi ve Mg içeriğidir. Karıştırma hızı ve Mg içeriğinin artışı ile kompozit malzemenin karışmış partikül oranı ve porozite seviyesi artmıştır. Porozite seviyesi; çekme özellikleri, sertlik ve aşınma direncini etkilemektedir. Takviye malzemesi boyutu ve hacimsel orandaki değişimi porozite miktarını etkilediğinden, çekme dayanımı değeri değişmektedir. Takviye malzemesi boyutunun küçölmesi ve hacimsel oranının artması, porozite miktarını arttırmış ve dayanım değeri düşmüştür. Hacimce %10 SiC oranına sahip kompozit malzemede önemli derecede porozite bulunmazken, %15 ve %20 SiC oranlarında ise takviye büyüklüğünün azalması ile porozite şiddetli bir artış göstermiştir. Hacimce %10 SiC içeren kompozit malzemede partikül büyüklüğü azalırken, çekme dayanımı artmış, %15 ve %20 SiC oranlarında ise düşmüştür.

Kennedy ve Wyatt'ın (2000) yaptığı çalışmada ise, 10 μm SiC partikül ve ağırlıkça %99,7'lik ticari saflıktaki Al matriksten oluşan kompozit malzeme, üç farklı yöntem ile üretilmiştir. İlk olarak toz metalurjisi yöntemi ile üretim yapılmıştır. Elde edilen bu malzeme ergitilmiş ve dökme demir kalıp içerisine dökülerek silindirik bloklar üretilmiştir. Daha sonra, üretilen bu bloklar, ekstrüzyonla şekillendirilerek çubuk haline getirilmişlerdir. Döküm ve toz metalurjisi ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi sonucunda benzerlikler olduğu, fakat ergitilmiş toz metalurjisi ile üretilen malzemelerde aşırı partikül toplanmaları ile dayanım ve süneklikte önemli düşüşler olduğu tespit edilmiştir. Ekstrüzyon işlemi uygulanması sonucunda, döküm malzemedeki homojenlik iyileşmiştir. İncelenen tüm kompozit malzemelerde, ekstrüzyon işlemi ile tane yapısı incelmış ve uzamıştır; ekstrüzyon yapılmamış malzemelerle karşılaştırıldığında, daha az porozite söz konusudur. Uygulanan ekstrüzyon sonucunda, partikül toplanmasının sona ermesi ve porozitenin ortadan kalkmasıyla kompozit sünekliği artış göstermiş ve taneler ekstrüzyon yönünde uzamıştır.

Kang vd.'nin (2000) çalışmasında, karıştırma döküm yöntemiyle üretilen %15 Al_2O_3 fiber takviyeli 6061 Al alaşımı matriksli kompozit malzemeye, 3,06; 5,44 ve 8,51 ekstrüzyon oranlarında ve 2 mm/dak hızında sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Sıcak ekstrüzyon yapılmış kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin, uzama haricinde, matriks malzemesinden daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca, matriks içerisinde fiber takviyenin dağılımının, karıştırma dökümüne göre daha homojen olduğu saptanmıştır. Ekstrüzyon oranının artmasıyla, fiber yönlenmesinin iyileştiği, fakat fiber kırılmalarının çok daha aşırı olduğu belirlenmiştir. Artan ekstrüzyon oranı ile birlikte çekme dayanımında da artma olmuştur; bunun sebebinin, mikroyapısal yoğunluğun ve arayüzey bağının iyileşmesi olduğu anlaşılmaktadır. Çekme dayanımı ve sertliği, sabit gerinim oranlı kalıp kullanıldığında, daha büyük oranda iyileşme göstermiştir. Yapılan çalışmada, 5,44'lük kritik ekstrüzyon oranında, maksimum dayanım 465 MPa olarak elde edilirken, matriks alaşımının çekme dayanımı ise 310 MPa olmuştur.

Duralcan şirketi tarafından yapılan bir araştırmada, Al-%4,5Cu-%1,5Mg alaşımına, farklı oranlarda 10,7 μm çaplı SiC partiküller katılmış ve döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, akma ve çekme dayanımlarının, artan SiC oranı ile artış gösterdiği saptanmıştır. Bu kompozit malzemelere uygulanan T6 ısıtım işlemi ile akma ve çekme dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir (Kaczmar vd., 2000).

Bindumadhavan vd. (2001a), 47 μm ortalama SiC partikül takviyeli A356 Al alaşımlı matrisli kompozit malzemeyi, ergiyik karıştırma tekniğiyle üretmişlerdir. Bu malzemenin mikroyapısı incelendiğinde, hacimsel SiC oranının artışıyla, SiC partikül dağılımının daha homojen hale geldiği görülmüştür.

Hashim vd.'nin (2002) yaptığı incelemede, partikül takviyeli kompozit malzemelerde, partiküller genellikle, dendritler arasını veya ikincil dendritik dalların boşlukları arasını doldurmuşlardır. Bu nedenle, çok daha ince boşluklar veya çok daha ince matriks tane boyutu, daha iyi partikül dağılımı meydana gelmiştir.

Spigarelli vd'nin (2002) yaptığı çalışmada, %20 oranında Al_2O_3 partikül takviyeli 6061 Al alaşımı matrisli kompozit malzeme karıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş ve sıcak ekstrüzyon işlemiyle 80 mm çaplı çubuklar elde edilmiştir. Ekstrüzyon sonrası kompozit malzemenin mikroyapısı incelendiğinde, eş eksenli, yeniden billurlaşmış ince tanelerin ve hem tane sınırlarında hem de tane içlerine yerleşen nispeten yüksek oranda çökeltilerin meydana geldiği saptanmıştır.

Borrego vd. (2002), toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, hacimce %15 SiC visker içeren 6061 Al alaşımı matrisli kompozit malzemenin mikroyapısı ve tekstürüne ekstrüzyon sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Kullanılan Al partiküllerinin boyutu 20-50 μm arasında, SiC viskerleri ise 0,3-0,6 μm çapında ve 5-15 μm uzunluğundadır. Toz metalurjisi ile 40 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda silindirik kompozit parçalar üretilmiş ve 0,3 mm/s ekstrüzyon hızıyla ve 27:1 ekstrüzyon oranıyla ekstrüzyon işlemine tabi tutularak, 8 mm çapında ve yaklaşık 1000 mm uzunluğunda çubuklar elde edilmiştir. Mikroyapı incelemesi sonucunda, özellikle yüksek sıcaklıklarda ekstrüzyonla şekillendirilen kompozit malzemelerde, Al matrisi içerisinde SiC takviye malzemesi homojen bir dağılım göstermiş, daha düşük sıcaklıklarda ise toplanmalar meydana gelmiştir. SiC takviyenin önemli bir miktarı eş eksenli partiküller şeklinde küçülmüştür. Ekstrüzyon işlemi sırasında SiC viskerler, hem ekstrüzyon eksenini boyunca hem de rastgele yönlendirilmişlerdir. Yönlendirilmiş viskerlerin oranı, ekstrüzyon geometrisi ve ekstrüzyon sıcaklığı ile etkilenmiştir. Ekstrüzyon sıcaklığının artışı, yönlendirilmiş viskerlerin daha iyi dizilmesini sağlamıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında, metal matriksli kompozit malzemelerin üretiminde matriks malzemesi olarak alüminyum alaşımlarının ve takviye malzemesi olarak da matriks malzemesi ile iyi bir uyum gösteren SiC'nin kullanımının yaygın olduğu görülmüştür. Bunun başlıca nedeni ise Al-Si alaşımlarının düşük yoğunluğa sahip olması ve SiC'nin ise en uygun

takviye malzemesi olmasıdır. Çoğu araştırmacı da kompozit malzeme üretim yöntemi olarak, sıkıştırma döküm yönteminin en iyi döküm yöntemi olduğunu belirtmektedir.

Tüm bilgilerin ışığı altında bu çalışmada, AlSi7Mg2 matriks malzemesine, ortalama 23 μm çapında SiC partikülleri ilave edilerek üretilen kompozit malzemeler ele alınmıştır. Bu amaç doğrultusunda daha iyi özelliklere sahip ve kullanım alanı daha fazla olabilen malzeme üretebilmek amacıyla, AlSi7Mg2 matriks malzemesi içerisine ağırlıkça %5, %10, %15 oranında SiC ilave edilerek gravite ve sıkıştırma döküm yöntemleri ile üç farklı bileşimde, 90 mm çapında ve boyunda silindirik bloklar elde edilmiştir. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzeme bloklarının bir kısmına 450°C’de 23:1 oranında sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Gravite döküm ve sıkıştırma döküm yöntemleriyle üretilen ve sıcak ekstrüzyon ile şekillendirilen kompozit malzemelerden hazırlanan numunelerin bir bölümüne de T6 ısıt işlemi uygulanmıştır.

Çalışma için hazırlanan kompozit malzemelerin mikroyapıları incelenmiş, çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı, sertlik gibi mekanik özellikleri deneysel yöntemlerle saptanmış, ayrıca ultrasonik ses hızı ölçümleri yardımları ile elastiklik modülleri hesaplanmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıda aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir.

Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise, makro ölçüde homojen olmalarına karşılık, mikro ölçüde heterojen malzemeler olduklarından kompozit malzeme sınıfına girmemektedirler (Demirkese, 1991).

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır (Ersoy, 2001):

- Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,
- Yorulma dayanımı,
- Aşınma ve korozyon direnci,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
- Isı iletkenliği veya ısı direnci,
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnci,
- Akustik iletkenlik, sönümleme kapasitesi,
- Yüksek rijitlik,
- Düşük ağırlık,
- Görünüm.

Bahsedilen bu özellikler, kompozit malzemelerin kullanımında büyük oranda önem kazanmaktadır. Örneğin Al matriksli kompozit malzemeler, Al alaşımları ile karşılaştırıldığında; %60'lık bir ağırlık tasarrufu sağlanırken, tokluk değerindeki artış %200'e ve dayanımdaki artış ise %100'e kadar olabilmektedir (cmt.ltd.com).

2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, kendisini oluşturan matriks malzemesine ve takviye çeşidine göre iki grupta incelenebilir.

2.1.1 Matriks Malzemesine Göre

Kompozit malzemeler, matriks malzemelerine göre polimer matriksli, seramik matriksli ve

metal matriksli kompozit malzemeler olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır.

2.1.1.1 Polimer Matriksli Kompozit Malzemeler

Polimer matriksli kompozit malzemeler, günümüzde mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır. Matriks malzemesi olarak epoksi reçineler ve polyesterler gibi termoset plastikler ile naylon, termoplastik polyesterler ve polikarbonatlar gibi termoplastikler kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak en çok cam, aramid ve C fiberler, bunun dışında asbest, mika, B, SiC ve Al_2O_3 fiberler de kullanılabilir.

2.1.1.2 Seramik Matriksli Kompozit Malzemeler

Genelde çok yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanım ve yüksek rijitliğe sahip olmalarına karşın, tokluk özellikleri olmayan seramikler, yüzeysel ve içyapı hataları nedeniyle, tehlikeli deformasyonlara eğilim gösterirler. Seramik matriksli kompozit malzemelerde SiC, Si_3N_4 ve Al_2O_3 yaygın olarak kullanılan matriks malzemeleridir. Takviye malzemesi olarak katılan fiberler sayesinde, tokluk özelliği kazanmaktadırlar.

2.1.1.3 Metal Matriksli Kompozit Malzemeler

MMK'lerde yaygın olarak kullanılan matriks malzemeleri, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metal ve alaşımlarıdır. Uygun takviye malzemesi ile üretilen yüksek dayanımlı MMK malzemeler geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

MMK'leri oluşturan matriks malzemeleri, takviye çeşitleri ve üretimleri ile ilgili bilgiler üçüncü bölümde ayrıntılı olarak verilmektedir.

2.1.2 Takviye Çeşidine Göre

Kompozit malzemeler, takviye çeşidine göre fiber takviyeli, partikül takviyeli ve tabakalı olmak üzere üç sınıfa ayrılabilirler.

2.1.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Yumuşak ve sünek matriks içerisine takviye malzemesi olarak katılan fiberler sayesinde, dayanımı ve elastiklik modülü yüksek kompozit malzemeler elde edilebilmektedir.

Fiber takviyeli kompozit malzemeler; sürekli fiber takviyeli, kısa fiber takviyeli ve rastgele düzlemsel olarak yönlendirilmiş kompozit malzemeler olarak sınıflandırılabilirler. Sürekli fiberler, çok yönlü dayanım artışı sağlamak için, çoklu filamentler veya dokunmuş örgü halinde kullanılabilir. Genellikle fiberler yönlendirildiği için, mekanik özellikler anizotropur.

Kısa fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan fiberler, yaklaşık 3-5 μm çapında ve 0,5-6 mm uzunluğunda olmaktadır. Matriks içerisindeki takviye malzemesinin hacimsel oranı %33 civarında olup, bu değerin üzerine çıkıldığında istenilen özelliklerin elde edilmesi zorlaşmaktadır.

Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozit malzemeler de kısa fiberlerden oluşmaktadır. Kompozit malzemede fiber yerleştirilmesi uygun bir şekilde yapılırsa, tüm yönlerde aynı mekanik özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

2.1.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Partikül takviyeli kompozit malzemelerde, ortalama partikül boyutu 1 μm 'den büyüktür ve hacimsel partikül oranı %25'ten fazla olmamaktadır. En çok kullanılan partikül malzemeleri SiC ve Al_2O_3 'tür. Burada yük, matriks ve partikül tarafından birlikte taşınır ve özellikler izotropdur. Bu kompozit malzemelerde matriks malzemesi metal, seramik ve polimerlerden meydana gelebilir.

Çoğunlukla döküm yolu ile üretilen bu çeşit kompozit malzemelerde partiküllerin karıştırılma zorluğu ve matriks tarafından ıslatılamama sorunu bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bunu giderebilmek amacıyla, partikül yüzeylerinin kaplanması yoluna gidilmektedir. Ayrıca, yapıya katılan Mg elementi sayesinde matriksin ıslatma kabiliyeti artırılabilir.

2.1.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Temel malzeme eksenleri doğrultusunda, değişik yönlerdeki tabaka ve katmanların üst üste konularak bir araya getirilmesi ile tabakalı kompozit malzemelerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Tabakalar, matriks içerisinde rastgele yönlendirilmiş fiberler, tek yönlü fiberler veya farklı fiber takviyelerden oluşabilir.

2.2 Kompozit Malzemelerin Uygulama Alanları

Kompozit malzemelerin üretilmesinde çok farklı malzemelerin kullanılması, uygulama alanlarının da genişlemesini sağlamaktadır. Başlangıçta, üretim maliyetlerinin çok yüksek olmaları nedeniyle, sadece uzay ve havacılık gibi maliyetin fazla dikkate alınmadığı uygulamalarda kullanılmışlardır. Fakat üretim yöntemlerindeki gelişmeler ve kompozit malzeme özelliklerinin daha iyi analiz edilebilmesi, uygulama alanlarının artmasını sağlamıştır. Günümüzde kompozit malzemeler, uzay ve havacılık alanlarının yanı sıra, otomotiv endüstrisi, taşımacılık, savunma sanayi, tekstil sanayi, endüstriyel ve tarımsal

araçların üretimi ve spor aletlerinin üretimi gibi endüstrilerde kullanılmaktadır.

Cam, C veya Kevlar (aramid) fiberleri ile takviye edilen polimer matriksli kompozit malzemeler, ticari ihtiyaçları karşılamak amacıyla tasarlanmış olup, kullanımları çok hızlı artmaktadır. Bu alanda asıl amaç, yüksek performanslı ve düşük üretim maliyetli, ihtiyaca cevap verebilen mühendislik malzemelerini üretmektir. Kompozit malzemelerin tasarımında yeni yöntemler bulunmakta ve Spectra ve Dyneema polietilen fiberleri gibi daha ucuz fiber takviyeli kompozit malzeme ve daha uygun üretim yöntemleri geliştirilmektedir.

Havacılık alanındaki kompozit uygulamalarına, hafif sivil uçaklar, helikopterler ve askeri uçaklar gibi daha birçok örnek verilebilir. Son yıllarda yakıttaki maliyet artışları, uçak ağırlığının düşürülmeye çalışılmasına sebep olmaktadır. C ve Kevlar fiber takviyeli kompozit malzemeler, önemli bir ağırlık düşüşü sağlamaktadır. Örneğin Al gibi metaller yerine kompozit malzemelerin kullanılmasıyla Boeing 757 ve 767 uçaklarında, yaklaşık olarak metalik yapı ağırlığının %25'i kadar bir ağırlık tasarrufu sağlanmıştır. Polimer matriksli kompozit malzemeler, özgül dayanım ve elastiklik modülünde de mükemmel değerlere sahiptirler. Yine bir diğer uçak cinsi olan DC-18'de 1 kg'lık bir ağırlık azalmasının, yılda 2900 litrelik yakıt tasarrufu sağladığı hesaplanmıştır. Otomobil yapısında da yaklaşık %33'lük bir ağırlık azalmasının sağlanabileceği tahmin edilmektedir. Bu sadece ana gövde yapısı olarak değil, aynı zamanda şaftlar ve yaprak yaylar gibi tekli parçaları ve amortisör gibi büyük montajlı yapıları da içermektedir.

Cam fiber takviyeli seramik matriksli kompozit malzemeler; tanklar, reaktörler, karıştırıcılar, boru sistemleri vb. için uygun malzemelerdir ve kimya endüstrisinde, kağıt endüstrisinde ve gaz arıtma donatımı olarak da kullanılmaktadır. Seramik matriksli kompozit malzemeler, havacılık ve otomobil konstrüksiyonlarında orta boyutlu birçok parçanın üretiminde oldukça iyi sonuçlar vermiştir (Wojciechowski, 2000).

3. METAL MATRİKSİLİ KOMPOZİT MALZEMELER

Günümüzde 80000 çeşitten fazla mühendislik malzemesi mevcuttur ve bu miktar hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu artışla birlikte metal matriksli kompozit malzemeler de geliştirilmektedir. İlk MMK malzemeler 1960'larda geliştirilmiş, fakat matrikse uygun takviye malzemelerin bulunması zorluğu ve üretim yöntemlerindeki problemler nedeniyle, bu malzemeler üzerinde fazla durulmamıştır. Son yıllarda MMK'ler, çok önemli gelişme göstermiştir. Uzay endüstrisi, bu malzemelerin kullanıldığı ilk sektör olmuştur. Yeni MMK malzemelerin bulunmasında, daha çok ekonomik öneme sahip olan otomotiv sektöründe ise, MMK malzemeler büyük miktarlarda üretim hacmine sahiptir (Eliasson ve Sandström, 1995).

Metal matriksli kompozit malzemeler, kendisini oluşturan metalsel malzemeye göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlamakta ve yüksek dayanım, yüksek rijitlik, ısı iletkenliği, aşınma direnci, sürünme direnci ve boyutsal kararlılık özellikleri göstermektedirler. Bir MMK'de matriks fazı monolitik bir alaşım, takviye malzemesi ise yüksek performanslı C, metal veya seramik katkılar olmaktadır (Foltz ve Blackmon, 1998).

MMK malzemelerin üretimlerinin çok daha zor olması ve daha ağır olmaları, polimer matriksli kompozit malzemelere göre dezavantajlarıdır. Avantajları ise şöyle sıralanabilir:

- MMK'ler polimerlere göre mekanik dayanımı yüksek ve tok malzemelerdir.
- MMK'ler daha yüksek sıcaklıklara dayanım gösterirler.
- MMK'ler nem almazlar, radyasyonla bozulmazlar, artık gaz çıkışı yapmazlar ve çoğunlukla yanmazlar.
- MMK'ler ısı ve elektriği iletirler.
- MMK'ler diğer metalik parçalarla kaynak edilebilirler.
- MMK'ler daha serttir ve aşınmaya karşı dirençleri daha yüksektir (Mortensen, 2001).

Metal matriksli kompozit malzemeler, dayanım/ağırlık oranı en düşük malzemelerden oldukları için, uzay sanayinde; uzay yapıları ve antenler, havacılık sanayinde; uçak gövdesi ve iç donanım parçaları, helikopter parçaları, kompresör kanatları ve türbin kanatları, otomotiv sanayinde; motor blokları, pistonlar, biyeller, akü plakaları vb. gibi parça imalatlarında kullanım alanı bulmaktadırlar (Aran, 1997).

3.1 Matriks Malzemeleri

Kompozit malzemelerde matriks, bağlayıcı eleman olarak görev yapmaktadır. Matriksin asıl fonksiyonu, yükü takviye malzemesine iletme ve dağıtmaktır. Yükün iletilmesi, matriks ile

takviye malzemesi arasındaki arayüzey bağına göre değişmektedir. Arayüzey bağı; matriks malzemesine, takviye çeşidine ve üretim yöntemine bağlıdır.

MMK malzemelerde matriks malzemesi olarak tüm metallerin kullanılması mümkün olmakla beraber, uygulamada genellikle hafif metaller tercih edilmektedir. Al ve alaşımları, bu metallerin başında gelmektedir. Ayrıca, Cu, Mg, Ti, Zn ve Pb da metal matriks malzemesi olarak kullanılmaktadır (cmt.ltd.com). Matriks malzemesi; oksitlenme ve korozyon direnci veya diğer özellikler de göz önüne alınarak seçilebilir (Huda vd., 1995).

Al ve alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olması, kolay şekillendirilebilmesi ve takviye malzemesi ile iyi uyum göstermesi nedeniyle en yaygın kullanılan matriks malzemesidir. Düşük yoğunluk, mükemmel dayanım, tokluk ve korozyon dirençleri nedeniyle havacılık alanında önemli uygulama alanları bulmaktadır. Özellikle Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu ve Al-Li alaşımları, çökeltme sertleşmesi gösterebilen çok önemli alaşımlardır (Chawla, 1998). MMK malzemelerde matriks malzemesi olarak en çok kullanılan Al alaşımları Çizelge 3.1’de verilmektedir (Kaczmar vd., 2000).

Çizelge 3.1 Metal matriksli kompozit malzemelerde kullanılan Al alaşımı esaslı matriks malzemeleri (Kaczmar vd., 2000)

Alaşım	Kimyasal bileşim
2014	Al-%5Cu-%0,7Mn-%0,7Si-%0,5Fe-%0,4Mg
2124	Al-%4Cu-%1,5Mg-%0,5Mn-%0,3Fe
6061	Al-%1Mg-%0,7Fe-%0,6Si-%0,25Zn
7075	Al-%5,5Zn-%2,5Mg-%1,5Cu-%0,4Si-%0,3Cr
8090	Al-%2,3Li-%1,2Cu-%0,7Mg-%0,1Cr

Seramik partikül takviyeli Al alaşımı matriksli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri; matriks özelliklerine, ıslatma kabiliyetine, takviye miktarına ve partikül takviyenin çapına bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 3.2’de, saf Al ve bazı Al esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir. En düşük çekme dayanımına sahip matriks alaşımında, en yüksek mekanik dayanım artışının sağlandığı anlaşılmaktadır (Kaczmar vd., 2000).

B/Al, teknolojik olarak kullanılan sürekli fiber takviyeli bir kompozit malzeme olup, uzay mekiğini yörüngeye oturtan uçağın gövdesindeki boru şeklindeki kirişler ve elektronik chip taşıyan çok katlı kartlardaki soğutucu plakalarında kullanılır.

Çizelge 3.2 Al esaslı bazı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (Kaczmar vd., 2000)

Matriks	Takviye ve hacimsel oranı (%)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Al	--	64	90	21
Al	SiC, 20	117	200	10
2014-T6	--	429	476	7,5
2014-T6	SiC, 10	457	508	1,8
2014-T6	Al ₂ O ₃ , 20	495	515	1,2
6061-T6	--	275	290	18
6061-T6	SiC, 15	290	340	5,5
6061-T6	SiC, 20	345	410	4,9
6061-T6	SiC, 30	380	435	1,8
6061-T6	Al ₂ O ₃ , 20	307	349	5,3
7091-T6	--	520	590	10,2
7091-T6	SiC, 20	500	560	1,8

SiC/Al kompozit malzemeleri takviyesiz Al'la karşılaştırıldığında, artan bir dayanım ve rijitlik sergilemelerine rağmen, ağırlık dezavantajı da yoktur. Ana metalin aksine kompozit malzeme, oda sıcaklığındaki çekme dayanımı değerini, 260°C'ye kadar sıcaklıklarda korumaktadır.

C/Al kompozit malzemenin gelişimi, 1960'larda dayanımı yüksek ve rijit karbon fiberlerin ticari uygulamalarıyla hızlanmıştır. C fiberler $-1,62 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar negatif ısıl uzama katsayısı ve 966 GPa'ya kadar elastiklik modülüne sahiptir. Bununla birlikte, C ve Al'ın birleşimi, kompozit üretebilmek açısından zor bir işlemdir. C ve Al arasındaki zararlı reaksiyon, ergiyik Al'ın karbonu ıslatmasının zayıf olması ve karbonun oksitlenmesi bu kompozit malzemelerin üretilmesinde önemli engellerdir (Foltz ve Blackmon, 1998).

Döküm Al-Si-Mg alaşımları, matriks malzemesi olarak özel bir grup oluştururlar. Bunlar, yüksek bir dayanım/ağırlık oranı gerektiren çok değişik uygulamalarda geniş oranda kullanılmaktadır. Bu alaşım sistemi, mükemmel döküm kabiliyeti, iyi yorulma özellikleri ve korozyon direnci sağlamaktadır. Ayrıca, döküm işlemi, dayanım ve sünekliğin en uygun birlikteliğini elde etmek için ısıl işlem olanağı sağlar. Isıl işlem, ötektik sıcaklığa yakın bir sıcaklıkta çözeltiye alma, sertleştirme ve doğal veya suni yaşlandırmanın birlikte yapılmasından oluşur. Isıl işlem sonrası çekme özelliklerindeki iyileşmeler, çözeltiye alma işleminden sonra, SiC partikül özelliklerindeki değişimler ve yaşlanma sırasında birincil

dendritleri içeren Mg_2Si çökeltilerinin dengesiz biçimlenmesi ile büyük oranda ilişkilidir. Dökümde ulaşılabilen özellikler, sıcaklık ve çözeltiye alma ile yaşlandırma işleminin süresiyle belirlenmektedir. Al-Si-Mg döküm alaşımlarının mekanik özellikleri, esasen, kimyasal bileşim, metalin ergitilmesi, döküm tekniği ve ısı işleme bağlıdır; dayanım, Si partikül özelliklerinin değişimiyle fazla etkilenmez. Çözeltiye alma süresi ile kopma dayanımı ve süneklik önemli derecede iyileşme gösterir.

A356 ve A357 alaşımlarının yüksek saflığından dolayı, sünekliği yüksektir ve ekstrüzyon işlemi, pürüzsüz yüzeyli mükemmel sonuçlar vermektedir. SiC takviyeli MMK'lerin sıvı faz yöntemleriyle üretilmeleri için uygun matriks malzemeleridir (Midling ve Grong, 1995).

Matriks malzemesi olarak kullanılan titanyum, yüksek dayanım/ağırlık ile elastiklik modülü/ağırlık oranlarına sahiptir. TiB ve TiC ile takviye edilen Ti alaşımlı kompozit malzemeler, jet motorlarında türbin ve kompresör bıçakları olarak ve uçak gövdesi parçalarının yapımında kullanılır, fakat pahalı bir malzemedir (Chawla, 1998).

Magnezyum ve alaşımları, çok hafif malzemeler grubunda yer alır. Mg alaşımları, bilhassa elastiklik modülü ve yoğunluğunun sağladığı avantajlı mekanik özellikleri nedeniyle, kompozit malzemelerde matriks malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. SiC partikülle takviye edilmiş Mg alaşımı esaslı kompozit malzemeler, $2,0-2,1 \text{ g/cm}^3$ gibi çok düşük bir yoğunluğa sahiptir ve takviye edilmemiş Mg alaşımlarına göre mekanik özellikleri %30-40 daha iyidir (Kaczmar vd., 2000).

Bakırın, elektrik iletkeni olarak her yerde kullanımı oldukça uygundur. Dökülebilir ve kolaylıkla şekillendirilebilir. Matriks malzemesi olarak bakırın başlıca uygulama alanlarından birisi, niyobyum esaslı süperiletkenlerdir (Chawla, 1998). İyi mekanik özelliklere sahip bir bakır esaslı kompozit malzemenin elektrik iletkenliği nispeten iyidir (Kaczmar vd., 2000).

3.2 İlave Edilen Takviye Malzemeler

Takviye malzemeleri, MMK'lerin dayanım, rijitlik ve ısıl dayanım kapasitelerini arttırmakta, fakat yoğunluğunu düşürmektedir. Takviyelerin asıl görevi, yük taşımaktır. MMK'ler, sürekli takviyeli kompozit malzemeler ve süreksiz takviyeli kompozit malzemeler olarak üretilirler. Bununla birlikte, takviye çeşitleri beş grupta toplanabilirler: sürekli fiberler, kısa fiberler, viskerler, partiküller ve metal tel. Tel dışındaki takviye çeşitleri; oksitler, karbürler ve nitrürler halindeki seramik malzemedendir ve hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanım ve rijitlikleri nedeniyle tercih edilirler. Yaygın olarak

kullanılan takviye malzemeleri SiC, Al₂O₃, TiB₂, B ve C'dir (Huda vd., 1995).

3.2.1 Sürekli Fiber Takviyeler

Kompozit malzemede sürekli fiberler, genellikle filament olarak isimlendirilir ve başlıca sürekli fiberler B, C, Al₂O₃ ve SiC malzemedendir. Çoklu filamentlerden oluşan takviye malzemeleri C, SiC ve Al₂O₃ fiberler içerirken, tek filamentli olanlar yalnızca B esastır. Çoklu filament içerenler, tekli filamentler halinde veya iki ya da üç boyutlu dokuma şeklinde olmaktadır.

B fiberler çoğunlukla bir tungsten çekirdek üzerinde, CVD yöntemiyle üretilirler. Yüksek sıcaklıkta, B ile metal matriks arasındaki reaksiyonu geciktirmek için, bazen SiC kaplı fiber veya bor karbür kullanılmaktadır. B fiberler, diğer fiberlerle karşılaştırıldığında, en büyük dayanımı gösterirler ve bu fiberlerle MMK üretimi nispeten kolaydır. Ancak yüksek maliyet, bu fiberlerin kullanımını kısıtlamaktadır. Al₂O₃ esaslı sürekli fiberler, DuPont (FP fiberi) ve Sumitomo tarafından üretilmektedir. FP fiberi, çok yüksek saflıkta ve büyük tane boyutludur; son derece gevrek ve kullanımı zordur, fakat daha iyi MMK malzeme özellikleri sağlamaktadır. Sumitomo'nun Al₂O₃ takviyeli Al matriksli kompozit malzemesi, artan sıcaklıkta basma dayanımında değişmelere yol açmayan, sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilmektedir ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

SiC tekli filament, tungsten veya C çekirdek kullanılarak CVD yöntemiyle üretilmektedir. Titanyum ilaveler içeren Tyranno isimli SiC fiber, dayanım, rijitlik ve şekillendirme özelliklerinin uygun kompozisyonu sayesinde, yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tyranno ile takviyeli MMK malzemeler, eksene dik doğrultuda yüksek bir dayanım sergilerler ve çoğunlukla havacılık endüstrisinde kullanılırlar. SiC ve Al₂O₃ fiberler, yüksek sıcaklığa dayanıklı kompozit malzemelerin imalatında kullanılmaktadır.

C fiberler, üretim esnasında fiber azalması nedeniyle, Al esaslı MMK'lerin üretilmesine uygun değildir (Huda vd., 1995). C fiber takviyeli Al alaşımı matriksli kompozit malzemelerde C fiberler, matriks alaşımıyla reaksiyon göstermeleri nedeniyle, Ni ve Cu kaplamalar yardımı ile reaksiyon eğilimi azaltılmaktadır (Pai vd., 1990).

3.2.2 Kısa Fiberler

Kısa fiberler, dizilmiş olarak uygulandığında, kompozit malzemelerde yüksek dayanım sergilerler. Yine de rastgele yönlenmiş kısa fiberler, Al matriksli kompozit malzemelerde bazen başarıyla kullanılmaktadır. Oksit haldeki fiberler, Saffil ve Kaowool, otomobil motoru

parçalarının takviyesinde kullanılırlar. ZrO_2 fiberler, Al matriksli kompozit malzemeler için uygun değildir. Kısa fiberler, sürekli fiberle karşılaştırıldığında dayanımları düşüktür; ateşe dayanıklı yalıtım amaçlı kullanılmaktadır ve daha ucuzdurlar (Huda vd., 1995).

Sürekli fiberle takviye edilmiş MMK malzemelerin üretimi birincil ve ikincil yöntemler açısından önemlidir. Birincil yöntemler genellikle mamul parçaların üretilmesinde başarısız olmaktadır. Bu nedenle, ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi geleneksel plastik şekillendirme yöntemleri ile kaynak ve lehimleme gibi birleştirme işlemlerinden oluşan ikincil şekillendirme işlemlerini gerektirmektedirler (Schwartz, 1992).

3.2.3 Viskerler

Viskerler, hemen hemen hiç kristal hatalara sahip olmayan, tek kristalli fiberler olarak nitelendirilirler. Metaller, oksitler, karbürler, halojenürler ve organik bileşimler içeren çok sayıda malzeme visker biçiminde, kontrollü şartlar altında hazırlanmaktadır.

Genellikle bir visker, merkez eksen boyunca uzanan tek bir dislokasyona sahiptir. Viskerin oluşturulmasında, CVD yöntemi yaygın olarak uygulanmaktadır. Artan sıcaklıklarda viskerlerin performansı, fiberlere göre çok daha iyidir. Çok iyi özgül mekanik özelliklerinden dolayı, MMK üretiminde viskerler kullanılmaktadır.

SiC , Si_3N_4 , C ve potasyum titanat viskerler içerisinde SiC viskerler, MMK takviyesi için en iyi şartları sağlarlar. SiC visker takviye malzemesi, maliyeti düşük bir malzeme olan pirinç kabuğundan üretilmektedir. SiC visker takviyeli Al, havacılık araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Huda vd., 1995).

3.2.4 Partikül

Metalsel alaşım matriksli kompozit malzemelerde partikül takviye olarak; metal karbürler (SiC , TaC , WC , B_4C), metal nitrürler (TaN , ZrN , Si_3N_4 , TiN), metal borürler (TaB_2 , ZrB_2 , TiB_2 , WB) ve metal oksitler (ZrO_2 , Al_2O_3 , ThO_2 , SiO_2) kullanılmaktadır (Kaczmar vd., 2000).

Partiküller, en yaygın ve en ucuz takviye malzemeleridir ve yapısal alanlardaki uygulamalarda, izotrop özelliğe sahip MMK'ler üretilmektedir. Başlangıçta, grafit tozuyla takviyeli Al alaşımı üretimi denenmiş, fakat sadece %10'a kadar düşük hacimsel oranlarda takviye malzemesi ile karışım yapılabilmektedir. Oksit, karbür, nitrür gibi seramik partiküller sayesinde, daha yüksek hacimsel oranlarda takviye malzemesi ile üretim yapılabilmektedir. Partiküllerin başlıca özellikleri Çizelge 3.3'te verilmektedir (Huda vd., 1995).

Çizelge 3.3 Seramik partiküllerin özellikleri (Huda vd., 1995)

Partikül	Boyut (μm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Kopma Dayanımı (GPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
C	40-250	1,6-2,2	20	910
SiC	15-340	3,2	3	480
SiO ₂	53	2,3	4,7	70
MgO	40	2,7-3,6	--	--
Si ₃ N ₄	46	3,2	3-6	360
TiC	46	4,9	--	320
BN	46	2,25	0,8	100-500
Mika	180	--	--	180
ZrO ₂	75-180	5,65-6,15	0,14	210
B ₄ C	40-340	2,5	6,5	480
TiO ₂	20	3,9-4,3	--	--
Al ₂ O ₃	40-340	3,97	8	460
Cam	30-120	2,55	3,5	110

C partikül takviyeli Al ve alaşımlarında, hem partikül ile matriks arasında karşılıklı etkileşim hem de arayüzeylerde reaksiyon bileşikleri görülmemektedir. Çoğunlukla, intermetalikler arayüzeylerden uzak kısımlarda hızlı bir şekilde meydana gelirler. Bununla birlikte, ötektik yapı bunlara her zaman bitişik bulunmaktadır (Pai vd., 1990).

Günümüzde Al alaşımlarıyla uygun bir ısı kararlılık gösteren SiC'den dolayı, Al alaşımlı matrikste SiC'den kısa fiberler, viskerler ve partiküller kullanılmaktadır. Ayrıca SiC, Al alaşımları ile iyi bir ıslatma kabiliyetine sahiptir.

Al alaşımlarının yoğunluğuna yakın yoğunluktaki SiC ilavesiyle, Al alaşımlı kompozit malzemenin elastiklik modülü ve kopma dayanımında büyük artışlar sağlanmaktadır. Al alaşımlarına C ve mika gibi yumuşak partiküllerin ilavesi dayanıma katkıda bulunmamakta, fakat aşınma direnci gibi özellikleri iyileştirmektedir. Benzer şekilde, Al alaşımlarına Zr partiküllerin takviyesi, kompozite gelişmiş bir aşınma direnci özelliği vermektedir. Bu durumlarda kullanılan partikül miktarı, yaklaşık ağırlıkça %5'tir ve daha yüksek miktarlar, mekanik özelliklerin daha da kötüleşmesine neden olmaktadır (Huda vd., 1995).

Dünyadaki partikül üretimine, partikül araştırmalarında en fazla gelişim gösteren Alcan şirketi ile ABD liderlik etmektedir. Bu araştırmalarda, %20'lik SiC partikülün, akma ve çekme dayanımında benzer yüzdelik artışlar gösterdiği bulunmuştur. Özellikle yoğunlukta bir değişme olmamasına rağmen, rijitlik %50'ye kadar artmaktadır. Kohara'nın yaptığı çalışmada, SiC partikül takviyeli Al matriksli kompozit malzemelerin, SiC visker takviyeli Al matriksli kompozit malzemeler kadar dayanıma sahip olmadığı belirlenmiştir. Bununla

birlikte, SiC partikül takviyeli Al matriksli kompozit malzemeler, aşınma direncine sahip malzemeler olarak yaygın kullanılmaktadır. Partikül takviye malzemeleri, sertlik, aşınma direnci ve basma dayanımı gibi özelliklerde destekleyici bir etki göstermektedir.

Partikül takviyeli kompozit malzemeler, yıllardır endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Elektronik endüstrisinde hassas değişken dirençli hatlarda ve yüksek hızlı kesici takım uçlarında kullanılan sermetler bunlara birer örnektir (Huda vd., 1995).

3.2.5 Tel

Metal filamentler tel diye isimlendirilir ve yüksek elastiklik modülüne sahiptirler. Bunların arasında molibden ve tungsten en yaygın kullanılanlarıdır. Şu anda paslanmaz çelik tel ile ilgili çalışmalar da vardır. Metalik filamentlerin başlıca dezavantajı ise, seramik viskerden daha yüksek yoğunluğa sahip olmalarıdır.

Yüksek çekme dayanımına sahip kompozit malzemelerin üretilmesinde, yüksek toklukları nedeniyle metalik filamentler kullanılmaktadır. Honda firması, sıkıştırma döküm yöntemiyle biyel üretiminde, hacimsel olarak %45 oranında çok ince paslanmaz çelik fiber takviye içeren Al alaşımı matriksli kompozit malzeme kullanmaktadır. Bu biyeler, eşdeğer dövme parçalardan, yaklaşık %40 daha hafiftir ve motor gücünün artırılması ile yakıt tasarrufunda çok büyük iyileşmeler sağlamaktadır.

Yüksek sıcaklıkta metal-metal reaksiyonunun fazla olması nedeniyle, kompozit malzemenin üretim problemleri ortaya çıkmaktadır (Huda vd., 1995).

3.3 Üretim Yöntemleri

MMK malzemelerin geleneksel yöntemlerle üretimi kolay değildir. Üretim yöntemleri, matriks, takviye malzemesi ve takviye çeşidine göre farklılıklar göstermekte ve genellikle iki grupta toplanmaktadır (Huda vd., 1995).

3.3.1 Katı Faz Üretim Yöntemleri

Katı fazdaki malzemeleri kullanarak MMK malzemelerin üretimi için çeşitli yöntemler vardır. Bunlar toz metalurjisi, difüzyon bağı, sıcak haddeleme, ekstrüzyon, çekme, patlamalı kaynak, pnömatik darbe vb. gibi yöntemlerdir. En yaygın olarak kullanılanları ise toz metalurjisi ve difüzyon bağı yöntemleridir.

3.3.1.1 Toz Metalurjisi Yöntemi

Toz metalurjisi (PM) yönteminde, metal ve seramik tozları birleştirilir. Genellikle, takviye malzemesi olarak partikül haldeki SiC, C, Ni, Ti ve Mo; matriks malzemesi olarak da Cu, Ni, Al, Co ve Ti esaslı alaşımlar ve çelikler kullanılmaktadır.

Toz metalurjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretimi, seramik partiküllerin ergiyik metal tarafından ıslatılmasındaki güçlük nedeniyle geliştirilmiştir. Metal tozları genellikle, atomize haldeki alaşımlı ve alaşımsız toz veya hızlı katılaştırılmış doğranmış şerit veya lamellerin karışımı şeklindedir. Kompozit malzemenin homojenliğinin sağlanması açısından, karıştırma aşaması önemlidir. Toz metalurjisi yönteminin temel aşamaları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Seramik partikül takviyeleri ve matriks tozları karıştırılarak kalıp içerisine yerleştirilir. Katı hal difüzyonu için ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılarak yüksek basınç altında sinterleme yapılır. Daha yoğun parçalar üretmek için karıştırma işleminden sonra doğrudan sıcak presleme yapılabilir. Sıcak presleme ile arayüzey bağı iyileştirmek ve partikül kırılmasını azaltmak bakımından daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Yapı içerisinde homojen bir dağılım sağlamak için metal toz ve seramik partikül boyutu önemli olmaktadır. Takviye edilmiş olan mamul, ekstrüzyon, dövme, haddeleme vb. gibi ikinci bir işlemden sonra MMK malzeme olarak kullanılır. Ekstrüzyon işlemi yaklaşık 20:1 veya daha yüksek oranda yapılmaktadır. Yüksek ekstrüzyon oranı; metalin metale temasına müsaade etmesi, partiküller arasında iyi bağ gelişimini sağlaması ve oksit filminin dağıtılması vb. için gereklidir. Yüksek ekstrüzyon oranında aynı zamanda, oluşan plastik akış, partikül topaklarının dağılmasını sağladığından, homojen dağılımı iyileştirmektedir. Bunun yanında hızlı katılaştırılmış tozlar kullanılmış ise, matriks ve takviye partiküllerinin zarar görmesinden kaçınmak için ekstrüzyon oranı ve sıcaklık dikkatli şekilde kontrol edilmelidir (Şahin, 2000). Ergitme ve döküm işlemi gerektirmemesi yönüyle bir ekonomiklik getirmesine karşılık, çok sayıda işlemden oluşması nedeniyle, pahalı bir yöntemdir (Aran, 1997).



Şekil 3.1 Toz metalurjisi yönteminin temel aşamaları

3.3.1.2 Difüzyon Bağı Yöntemi

Bu yöntem çoğunlukla, sürekli fiberle takviye edilmiş levha ve folyo halindeki MMK malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. İlk olarak, levha şeklindeki metal ve alaşımları ile fiber haldeki takviye malzemesi arasındaki difüzyonu arttırmak için kimyasal yüzey temizleme işlemi yapılır (Huda vd., 1995). Bunun için, matriks ve takviye malzemesinin yapışma yüzeyleri metalografik düzeyde parlatılır ve aseton veya etanol içerisinde temizlenir. Daha sonra fiberler, belirlenen yönlerde metal levha üzerine yerleştirilerek metal bir kalıp içerisine konur, sızdırmazlık sağlanır ve vakuma alınır. Genelde ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta difüzyon ile birleştirmenin gerçekleşmesi için preslenir. Difüzyon bağı yönteminde matriks malzemesi olarak Al ve Ti alaşımları, takviye malzemesi olarak da SiC, Al₂O₃, B ile C gibi tek filamentli fiber ya da fiber demetleri kullanılmaktadır (Şahin, 2000).

3.3.2 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Sıvı faz üretim yöntemleri; sıvı metal infiltrasyonu, sıkıştırma döküm, karıştırma döküm, basınçlı döküm, santrifüj döküm, vorteks yöntemi, metal püskürtme vb. gibi yöntemler olup, geleneksel döküm yöntemlerinin kompozit malzemeler üzerine uygulanması ile geliştirilmişlerdir. Bu yöntemlerde matriks alaşımına bağlı olarak, seramik takviye malzemesinin seçimi önemlidir. Matrikse uygunluğunun yanı sıra, yüksek elastiklik modülü ve dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek ergime sıcaklığı, ısı kararlılık, şekil ve büyüklük dikkate alınmalıdır. Birçok seramik partikül, ergiyik matriks tarafından ıslatılamamaktadır. Bu nedenle seramik partiküllerin ilavesi ve ergiyik içerisinde tutulması için ergiyiğe, ıslatmayı iyileştirici malzeme ilavesi veya karıştırmadan önce partiküllerin kaplanması gerekmektedir.

3.3.2.1 Sıvı Metal İnfiltrasyon Yöntemi

Sıvı metal infiltrasyon yöntemi, ergiyik metal ile fiber demetinin infiltrasyonu şeklinde uygulanmaktadır. Basit bir sıvı faz infiltrasyonu ile MMK'lerin üretilmesi kolay değildir; esas olarak, ergiyik metal tarafından seramik takviyenin ıslatılması zorluğu vardır. İnfiltrasyon öncesinde, ıslatmayı iyileştirmek ve reaksiyonları kontrol etmek için fiber kaplanması geliştirilmiştir. Duralcan işlemi olarak isimlendirilen, partikül takviye karışımı bir sıvı infiltrasyon yönteminde seramik partiküller ve ingot şekilli Al karıştırılır ve ergitilir. Ergiyik genellikle 600-700°C arasında, ergime sıcaklığının hemen üzerinde karıştırılarak ekstrüzyon bloğu, döküm kütüğü, haddeleme bloğu veya haddeleme kütüğünden birisi haline getirilir. Sıvı metal döküm yöntemiyle partikül takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan

Duralcan işlemi, 8-12 μm 'lik partikül kullanılarak gerçekleştirilir. Çok küçük partiküller, çok büyük arayüzey bölgesi ve böylece çok viskoz bir ergiyik meydana getirecektir. Döküm sınıfı MMK'lerde A356 gibi yüksek Si'li Al alaşımları, dövme MMK'lerde 6061 Al-Mg alaşımları kullanılmaktadır. Al_2O_3 partiküller döküm alaşımlarına uygunken, dövme Al alaşımlarında SiC partiküller kullanılmaktadır.

MMK'lerin üretiminde kullanılan bir başka sıvı metal infiltrasyon yöntemi de Lanxide'in Primex işlemidir. Bu işlemde, matriks ile takviye arasında reaksiyon oluşumunu önlemek amacıyla, Al-Mg alaşımı matriks malzemesi ve seramik takviye malzemesi kullanılmakta ve işlem azotça zengin bir ortamda, 750-1000°C arasında yapılmaktadır (Chawla, 1998).

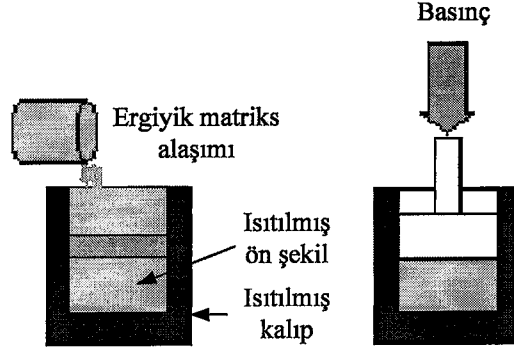
3.3.2.2 Sıkıştırma Döküm Yöntemi

Sıkıştırma döküm, sürekli kalıpta yüksek basınç altında katılaştırmanın gerçekleştirildiği bir üretim tekniğidir. Bu işlem, uygulanan hidrostatik basınç altında katılan ergiyik metalin tek bir operasyonda sürekli kalıba dökümle kalıpta sıkıştırmanın birarada uygulandığı bir işlemidir. Fikir başlangıçta 1878'de Chernov tarafından, katılaşmakta olan ergiyik malzemeye, buhar basıncı uygulanması şeklinde önerilmiştir. Ancak, yöntemin ticari hale getirilmesi son zamanlarda başarılıdır ve esas olarak Avrupa ve Japonya'da bu konuda yoğunlaşmıştır. Bu yöntem, takviyeli ve takviyesiz, yüksek hassasiyetli mühendislik parçalarının üretilmesinde kullanılmaktadır (Ghomashchi ve Vikhrov, 2000).

C, SiC, Al_2O_3 ve paslanmaz çelik fiber gibi çoğu takviye malzemesi, ergiyik metalle uygun bir şekilde ıslanmadıkları için, infiltrasyon yöntemiyle kompozit malzeme üretimi zordur. Buna karşılık, sıkıştırma döküm tekniğinde ergiyik metal, fiber demetlerinden oluşan ön şekil içerisine kuvvet yardımıyla emdirilir; bu arada absorbe olmuş ve sıkışmış gazlar da atılır.

Sıkıştırma döküm yöntemi (Şekil 3.2), metal bir kalıp içerisine yerleştirilen, ön ısıtma yapılmış, seramik fiber veya başka bir takviye malzemesinden oluşmuş ön şekle, kuvvet yardımıyla ergiyik metalin emdirilmesi ve böylece sıkıştırılan ergiyik metale yüksek basınç uygulanarak katılaştırılması işlemidir.

Ayrıca, visker veya partiküller ergiyik metalle, sıkıştırma döküm öncesinde karıştırılabilir. SiC, Al_2O_3 partikülleri ve Si_3N_4 viskerleri içeren Al alaşımı matriksli kompozit malzemeler bu şekilde üretilmektedir (Eliasson ve Sandström, 1995).



Şekil 3.2 Sıkıştırma döküm yöntemi

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kalitesini etkileyen işlem değişkenleri; kalıp ön ısıtma sıcaklığı, uygulanan basınç miktarı, ön şeklin sıkışmış yoğunluğudur. Ayrıca, infiltrasyon hızı ve takviyeler arası boşluk da işlemi etkileyen faktörlerdir. 70-100 MPa'lık basınçların uygulanmasıyla, katılma süresinin çok kısa tutulması nedeniyle, matriks ile takviye malzemesi arayüzeyinde reaksiyon meydana gelmemesi, boşluksuz ve yüksek dayanımlı kompozit malzemelerin elde edilmesini sağlar. Bu da çoğunlukla, her çeşit takviye ile kompozit malzeme üretimine olanak sağlar. Al_2O_3/Al , C/Mg , SiC_v/Al , $Si_3N_4_v/Al$ kompozit malzemeleri, bu yöntemle kolaylıkla üretilebilirler.

Crouch'a (1987) göre, sıkıştırma döküm, MMK parçalar için en uygun üretim yöntemidir. Otomotiv, havacılık, spor ve diğer alanlarda MMK'lerin kullanımındaki yıllık %12-15'lik artış oranı, sıkıştırma döküm gibi ileri üretim yöntemlerinin kullanımının faydasını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Yüksek basınç gerektirmesi ve parça boyutunda sınırlamalara neden olması bu yöntemin en büyük dezavantajı olmakla birlikte, pratik kullanımda sıkıştırma döküm yöntemi, kısa zamanda, karmaşık şekilli MMK parça üretimi için en verimli yöntemdir.

3.3.2.3 Metal Püskürtme Yöntemi

Partikül takviyeli MMK malzeme üretimi yapılabilen bu yöntemde, püskürtülecek olan matriks alaşıımı, bir pota içerisinde indüksiyonla ergitilir. Potaya basınç uygulanır ve metal, içerisine takviyelerin enjekte edilmesi ile aynı anda bir püskürtücü nozülünden fişkırtılarak, ön ısıtma yapılmış olan bir toplayıcı üzerinde katı bir çökelti oluşur. Biriktirilen çökelti soğuduğunda, daha sonraki haddeleme işlemi için altlıktan alınır. Donatım sadece, içi boş tüp,

mamul dövme parça, ekstrüzyon ingotu ve levhası imalatı için düzenlenebilir (Huda vd., 1995). Bu yöntemle, 10 kg/dak hızda, 200 kg ağırlığa varan ingotlar üretilmektedir. Matriksle takviyelerin temas süresi kısa olduğundan, arayüzeyde genellikle reaksiyon oluşmaması ve değişik takviye/matriks çiftleri için uygulanabilirliği yöntemin avantajıdır (Aran, 1997).

Metal püskürtme yönteminin türevi olan Osprey yönteminde ise partiküller, soygaz jeti ile birlikte püskürtülecek olan ergiyik matriks alaşımı içerisine verilmektedir. Püskürtülen bu takviyeli karışım, bir altlık üzerinde toplanmaktadır. Altlık hareketli olduğundan, hıza göre katman kalınlığı belirlenebilmektedir (Şahin, 2000).

3.3.2.4 Karıştırma Döküm Yöntemi

Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, süreksiz fiber, visker ve partikül takviyeli MMK malzeme üretimi için en ekonomik yöntem karıştırma döküm yöntemidir. İlk önce matriks metali veya alaşımı, ergime sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılır ve takviye malzemesi karışıma ilave edilir. Karıştırma işlemi, matriksin takviyeleri ıslatmasını sağlayacak arayüzey reaksiyonlarına kadar sürdürülür. Karışım daha sonra, ergime sıcaklığı üzerine ısıtılarak grafit kalıp içerisine boşaltılır. Yapıya dağılmış olan partiküller, karışımdaki birincil katı faz arasında tutulduğundan, yüzmeleri, çökelmeleri ve toplanmaları önlenmiş olur. İlave etme işleminden sonra daha düşük sıcaklıklarda karıştırma süresinin arttırılması, ıslanmaya yardım eder ve arayüzey bağının oluşumunu iyileştirir. Daha sonra, takviye içeren bu karışım, prese gönderilerek parça oluşturulur.

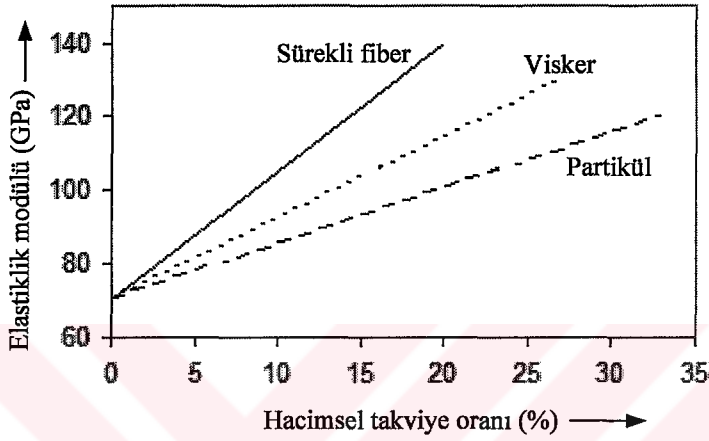
3.4 Mekanik Özellikler

3.4.1 Elastiklik Modülü

Tek doğrultuda sürekli fiberle takviyeli MMK malzemelerde, hacimsel fiber oranına bağlı olarak, fiber yönündeki elastiklik modülünde lineer bir artış meydana gelmektedir. Fiber yönündeki bu artış, karışımlar kuralına uyum gösterirken, fiberlere dik yöndeki elastiklik modülü artışı çok düşüktür. Partikül takviyelide de kompozit malzemenin elastiklik modülünde artış meydana gelir, ancak bu artış, karışımlar kuralıyla hesap edilenden çok daha düşüktür. Şekil 3.3'te, farklı şekillerdeki takviyeler ve değişik hacimsel takviye oranına bağlı olarak, bir MMK'de elastiklik modülündeki artış görülmektedir. SiC partikül takviyeli Al matriksli kompozit malzemelerin elastiklik modülü, takviye edilmemiş Al'a göre %50-100 oranında artmaktadır (Chawla, 1998).

Monolitik parçalara göre daha üstün mekanik özellikler göstermesinin yanısıra, süreksiz

takviyeli MMK'lerin diğer bir avantajı, sıcak ve soğuk şekillendirme şartlarında haddelme, ekstrüzyon, dövme vb. gibi geleneksel yöntemlerle şekillendirilebilmeleridir. Şekillendirme işlemleri sonucunda, mekanik, fiziksel ve kırılma özelliklerinde iyileşmeler gözlenir, fakat bazı durumlarda önemli düşüşler meydana gelebilir. Plastik deformasyon işlemleri, matriks metalinin mikroyapısında, partikül-matriks arayüzeyinde değişmelere, süreksiz seramik takviyenin yeniden dağılımına ve boyutsal değişimine sebep olduğundan mekanik performansı etkilemektedir.



Şekil 3.3 MMK'de kullanılan takviye çeşidi oranıyla elastiklik modülündeki değişim (Chawla, 1998)

Matriks alaşımıyla karşılaştırıldığında, talaşsız şekillendirilmiş MMK'ler, genellikle daha yüksek elastiklik modülüne sahiptirler. Elastiklik modülünde önemli bir artış, hem partikül hem de kısa fiber takviyelerle elde edilir. Genellikle elastiklik modülündeki artış, şekillendirilmiş kompozit malzemelerde karışımlar kuralına uyma eğilimindedir. Bu durum, ekstrüzyonla şekillendirilmiş, soğuk haddelenmiş ve soğuk dövme yapılmış MMK'lerde gözlenmiştir. Elastiklik modülünün, takviyenin hacimsel oranı ile çok fazla etkilendiği, partikül dağılımıyla ise daha az etkilendiği görülmektedir. Partikül boyutu ve şekil değişikliği, kompozit malzemenin elastiklik modülü ve diğer mekanik özelliklerinin belirlenmesi için önemlidir. Plastik deformasyon sırasında, partikül takviyede kırılma meydana gelir ve kırılma derecesi soğuk şekillendirmede, sıcak şekillendirmeye göre daha aşırı olur. Partikül kırılması, partikül boyutu ve boyutsal oranıyla da ilişkilidir (Subramanian vd., 1995).

Mohn ve Vukobratovich'in çalışmasında, SiC partikül oranının, AA 2124 Al matriksli kompozit malzemenin elastiklik modülü üzerine etkisi incelenmiştir. İnceleme T6 ısıtma işlem şartlarında yapılmış ve partikül oranının artmasıyla elastiklik modülünde artış saptanmıştır.

Dinwoodie vd.'nin çalışmasında ise, farklı oranlarda kısa Al_2O_3 fiberle takviyeli $\text{Al}_9\text{Si}_3\text{Cu}$ alaşımı matriksli kompozit malzemede, sıcaklığın artışıyla elastiklik modülünün düştüğü belirlenmiştir (Eliasson ve Sandström, 1995).

Jung vd.'nin (1999) yaptığı çalışmada, matriks malzemesi olarak kullanılan ortalama 20 μm çapındaki 2124 Al tozları ile 8 μm çapında ve %10, %20 ve %30 hacimsel oranlarında SiC tozları karıştırılarak, toz metalurjisi yöntemi yardımıyla kompozit malzeme üretilmiştir. Ayrıca hacimsel olarak SiC oranı sabit olarak %20 alınmış ve 3 μm , 8 μm , 25 μm ve 48 μm gibi farklı çaplardaki SiC partikül içeren kompozit malzemeler de üretilmiştir. Toz metalurjisi ile üretilen bu ingotlara 500°C'de, 70:1 oranında sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, hacimsel olarak SiC partikül oranının artmasıyla, elastik rijitliğin lineer olarak arttığı ve Poisson oranının düştüğü görülmüştür. Partikül boyutunun artması ise, arayüzey alanındaki ve dislokasyon yoğunluğundaki düşme nedeniyle, elastiklik modülünde az da olsa bir düşmeye sebep olmuştur.

3.4.2 Çekme Dayanımı

Bir MMK'nin dayanımının hesaplanması, elastiklik modülünün hesaplanmasından çok daha karmaşıktır. Dizilmiş bir fiber takviyeli kompozit malzemenin, fiber doğrultusunda bir P_c yükü altında olduğunu düşünelim. Bu yük, fiber ile matriks arasında paylaşılır. Böylece;

$$P_c = P_m V_m + P_f V_f \quad (3.1)$$

olur. Burada P_m matriksteki yük, P_f fiberdeki yüküdür. Bu eşitlik izogerinin (fiber, matriks ve kompozitteki gerininin aynı olması) şartlarında, şu karışımlar kuralı denklemine çevrilebilir.

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (3.2)$$

Burada σ gerilme, V hacimsel oran ve c , f ve m indisleri sırasıyla kompozit, fiber ve matriksi ifade etmektedir. Bu eşitlik yaygın olarak, "Karışımlar Kuralı (ROM)" olarak isimlendirilir ve buna göre kompozit malzemenin dayanımı, fiber ve matriks dayanımlarının hacimsel-ağırlıkça ortalamasıdır. Bu hesaplamada sorun, σ_f ve σ_m 'nin in situ değerlerine ihtiyaç duyulmasıdır. Eğer fiber esasen kırılma noktasına kadar elastikliğini korursa, kompozit malzemedeki fiber dayanımı σ_f , fiberin tek başına test edilmesiyle belirlenenle aynıdır. Özellikle seramik fiberler için geçerli olan bu durum metal matriks için söylenemez. Bunun nedeni, işlem esnasında metal matriksin, çeşitli mikroyapı değişikliklerine

uğrayabilmesi sonucu mekanik özelliklerinin değişebilmesidir. Bu yüzden, çoğunlukla seramik takviyeler, çoğu metal matriksten daha büyük ısıl uzama katsayısına sahiptir ve ısıl gerilmeler fiber ve matrikste ortaya çıkarak bir dizi olay meydana getirir:

- Sünek metal matriksin plastik deformasyonu (kayma, ikiz oluşumu, kavitasyon, tane sınırı kayması ve/veya göçü),
- Gevrek fiberin çatlaması veya yarılması,
- Arayüzeyde karşı bir reaksiyon,
- Fiber/matriks arayüzeyinde ayrılma.

Sürekli fiber takviyeli MMK'lerin tipik özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir (Chawla, 1998).

Çizelge 3.4 Bazı MMK'lerin özellikleri (Chawla, 1998)

Kompozit ve yön	Hacimsel fiber oranı (%)	Yoğunluk g/cm ³	$\sigma_{\max}$ (MPa)	E (GPa)
B/Al				
0°	50	2,65	1500	210
90°	50	2,65	140	150
SiC/Al				
0°	50	2,84	250	310
90°	50	2,84	105	--
SiC/Ti-6Al-4V				
0°	35	3,86	1750	300
90°	35	3,86	410	--
Al ₂ O ₃				
0°	60	3,45	690	262
90°	60	3,45	172-207	152
C/Mg alaşımı (Thornel 50)	38	1,8	510	--
C/Al	30	2,45	690	160

Partikül takviyeli kompozit malzemelerde dayanım mekanizmalarının işleyişine ait açıklamalarda ise bazı çelişkiler vardır. Araştırmacılar tarafından, sürekli fiber takviye kullanımında meydana gelen kaymayı geciktiren dayanım mekanizmalarının olmadığı partikül takviyeli kompozit malzemelerde, çeşitli yardımcı etkenler analiz edilmiştir. Buna göre, partikül takviyeli MMK'lerdeki dayanım mekanizmaları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Gb/l ile verilen Orowan mekanizması. Burada G matriksin kayma modülü, b matriksin Burgers vektörü ve l matriksin alanıdır.

- Tane ve alt tane dayanımı, Hall-Petch tipi bağıntı, yani $d^{-1/2}$ olarak dayanım değişimi. Burada d matriksteki tane ve alt tane boyutudur. Al için Hall-Petch eğimi k 0,1-0,15 arasındadır, yani çok düşüktür. Çelikler için k çok yüksektir. Böylece tane çapı $d < 10 \mu\text{m}$ önemli bir dayanım verirken, $d < 1 \mu\text{m}$ çok iyi bir dayanım verebilir.
- Matriksteki ısı gerinimli sertleştirme dayanımı $e_m = \Delta\alpha \Delta T$ ile verilmektedir. Teorik olarak, uygun olmayan ısı uzama katsayısıyla sonuçlanan dislokasyon yoğunluğu aşağıdaki gibidir:

$$\rho_{CTE} = (AeV_p) / b(1 - V_p)d \quad (3.3)$$

Burada A geometrik sabit, e ısıl uygunsuzluk gerinimi, d partikül alanı, b Burgers vektörü, V_p hacimsel partikül oranıdır. Benzer şekilde gerilme şöyle verilir:

$$\sigma_q = \alpha G b (\rho_{CTE})^{1/2} \quad (3.4)$$

Burada α sabit bir değerdir.

- Matriksin deformasyon sertleşmesi. Partiküller matriksin deformasyon sertleşmesi oranını etkilerler.

Böylece, tüm bu katkılardan kompozit malzemenin toplam dayanımını şöyle yazabiliriz:

$$\sigma_c = \sigma_0 + \sigma_{gb} + \sigma_q + \sigma_{WH} + \sigma_m \quad (3.5)$$

Burada σ_m matriks dayanımıdır.

Toz metalurjisi ile üretilen kompozit malzemelerde SiC partikül yüzeyindeki ince oksit, matrikse girebilir. Hacimsel olarak %20'lik $10 \mu\text{m}$ çaplı partikül için hesaplanan σ_0 yaklaşık 10 MPa 'dır. Tane sınırı dayanımına bunun katkısı aşağıdaki (3.6) denklemindeki gibidir.

$$\sigma_{gb} = k d^{-1/2} \quad (3.6)$$

Tane sınırı dayanımı, püskürtme döküm ve toz metalurjisi ile üretilen kompozit malzemelerde yüksek olabilir.

Partikül uçlarında çekme yükünü hesaba katan bir analiz (Nardone ve Prew), partikül takviyeli kompozit malzemenin akma dayanımı için aşağıdaki ifadeyi vermektedir:

$$\sigma_{yc} = \sigma_{ym} [1 + (L + t) / 4L] V_p + \sigma_{yb} (1 - V_p) \quad (3.7)$$

Burada σ_{ym} matriks malzemesinin akma gerilmesi, V_p hacimsel partikül oranı, L çekme

yüküne dik yöndeki partikül uzunluğu, t yüke paralel yöndeki partikül uzunluğudur (Chawla, 1998).

Bowles vd.'nin çalışmasında, Al_2O_3 fiber takviyeli $Al_{9,5}Si_3Cu$ alaşımı matriksli kompozit malzeme, sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş ve T6 ısıtılmasına tabi tutulmuştur. Hacimsel fiber oranının artışı ile akma ve çekme dayanımlarında artış, uzama miktarında ise düşüş gözlenmiştir (Eliasson ve Sandström, 1995).

Tjong vd.'nin (1997) yaptığı çalışmada, yaşlandırma sertleşmesi yapılabilen endüstriyel $Al-12Si$ alaşımına $10\ \mu m$ çaplı SiC partiküller katılmıştır. SiC partiküller $800^\circ C$ 'de 4 saat ısıtılmışlar ve matriks alaşımına hacimce %2, %4, %6 ve %8 oranlarında katılarak karıştırma döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretilmiştir. $Al-12Si$ alaşımı ve MMK'ler, T6 ısıtılma şartı altında test edilmişlerdir. T6 ısıtılma işlemi için takviyesiz alaşım ve kompozit malzemeler, $500^\circ C$ 'de 5 saat çözeltiye alınmış, suda sertleştirilmiş ve $185^\circ C$ 'de 12 saat suni yaşlandırma yapılmıştır. Çekme deneyi sonunda, $Al-12Si$ alaşımına düşük hacim oranlarında SiC partikül katılmasıyla, çekme dayanımında küçük bir azalma görülmüştür. Bunun nedeni, oda sıcaklığında çekme deformasyonu sırasında SiC partiküllerinin yük taşınamamasıdır. Oda sıcaklığında SiC partikül miktarının artmasıyla MMK'lerin kopma dayanımındaki azalma, çekme yükünün uygulandığı sırada partiküllerin kırılmasına bağlanmaktadır.

Tokaji vd. (1999), toz metalurjisi yöntemi ile ağırlıkça %10 SiC partikül takviyeli 2024 Al alaşımı matriksli kompozit malzeme üretmişlerdir. Gaz atomizasyonu ile 2024 Al alaşımı tozları SiC partikülleri ile karıştırılmış, soğuk halde birleştirilmiş ve sonra $495^\circ C$ 'de vakum altında gazı alınarak, $450^\circ C$ 'de sıcak presleme yapılmıştır. Aynı yöntem, takviyesiz alaşıma da uygulanmıştır. $430^\circ C$ 'de ekstrüzyon işlemine tabi tutularak, 35 mm çaplı çubuklar elde edilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde $5\ \mu m$, $20\ \mu m$ ve $60\ \mu m$ olmak üzere üç farklı boyutta partikül kullanılmıştır. Yapılan çekme deneyi sonucunda, %0,2 akma gerilmesi değerinin, SiC ilavesiyle ve partikül boyutunun artmasıyla azaldığı belirlenmiştir. Takviye malzemesi, en büyük partikül boyutlu kompozit malzeme dışındakilerde çekme dayanımını arttırmıştır. Uzama ve büzülmenin partikül boyutundan bağımsız olduğu gözlenmiş ve tüm durumlarda süneklik önemli derecede düşmüştür. Elastiklik modülü hemen hemen tüm kompozit malzemelerde aynı kalmış, takviyesiz alaşımla karşılaştırıldığında ise, %17'lik bir artış olduğu görülmüştür.

3.4.3 Kırılma

SiC partikül takviyeli Al matriksli kompozit malzemelerde kırılma şu şekilde meydana

gelmektedir: (i) Matriks-partikül arayüzeyi zayıfsa, arayüzeyde çatlak oluşabilir, (ii) arayüzey ve matriks güçlü ise, partiküller, kırılma gerilmesiyle yüklenip kırılabilir, (iii) matriks, arayüzey ve partikül dayanımından zayıf ise, kırılma matrikste, normal boşluk çekirdeklenmesi ve büyümesi şeklinde oluşabilir. Uygulamada partikül şekli, hacmi ve dağılımının farklı olması nedeniyle kompleks kırılma meydana gelebilir. Artan takviye hacimsel oranı ile uzama ve tokluk azalmaktadır. Tokluk, yaşlanma derecesine çekme uzamasından daha az duyarlıdır ve iri partiküller tokluk açısından faydalıdır (Gül, 1999).

Tokluk, kırılma işleminde enerji absorbe etmenin bir ölçüsü olarak görülür. MMK'lerin tokluğu, aşağıdaki faktörlere bağlıdır.

- Matriks alaşımının bileşimi ve mikroyapısı,
- Takviye malzemesinin çeşidi, boyutu ve yönlenmesi,
- Takviye dağılımı, porozite, segregasyon vb. gibi mikroyapı değişkenlerini etkileyen üretim yöntemi.

Kompozit malzemelerin düşük tokluk değerleri göstermesine, intermetalik partiküllerin çeşidi, homojen olmayan iç gerilmeler, partikül veya visker dağılımı sebep olmaktadır. SiC visker takviyeli Al matriksli kompozit malzemelerin tokluğunun ve T6 ısıtma işlemi uygulanmış 7075 Al alaşımının gerilme yoğunluk faktörü K_{Ic} değerinin iyileştirilmesi, daha saf matriks tozu, daha iyi bir karıştırma ve üretim sırasında uygulanan mekanik işlem ile sağlanır (Chawla, 1998).

3.4.4 Yorulma

Çevrimsel yük altında bir malzeme veya bir elemanın mekanik özelliklerinin kötüleşmesi yorulma olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemelerin bütün çeşitlerinin yorulma davranışlarını bilmek oldukça önemlidir. Kompozit malzemelerin yorulma davranışları, elastik rijitlik ve dayanım gibi özellikleri kadar bilinmemektedir. Bu bakımdan, kompozit malzemelerin yorulma davranışı için örneğin gerilme-çevrim (S-N) eğrileri veya lineer elastik kırılma mekaniği (LEFM) gibi geleneksel yaklaşımların uygulanması zordur. Bunun asıl sebebi, kompozit malzemelerin heterojen ve anizotrop özelliklere sahip olmalarıdır.

SiC veya Al_2O_3 partikül takviyeli Al alaşımı matriksli kompozit malzemeler, takviyesiz Al alaşımlarına göre gelişmiş yorulma özelliklerine sahip olabilmektedirler. Bu durum, Al alaşımlarının kullanılmasının düşünülmediği uygulamalarda, bu kompozit malzemeleri kullanılır hale getirmektedir. Genellikle kompozit malzemeler, S-N eğrisi davranışı ile ilgili olarak, gelişmiş yorulma davranışı gösterirler. Gerilme kontrollü çevrimsel yük ve yüksek

çevrimli yorulmada böyle bir iyileşme, kompozit malzemenin daha yüksek rijitliğe sahip olmasına bağlanmaktadır. Bununla birlikte, gerinim genliğine karşılık gelen çevrimler veya düşük çevrimli yorulma bakımından değerlendirilen kompozit malzemenin yorulma davranışı, takviyesiz alaşımlardan daha kötüdür. Bu durum, takviyesiz alaşımlar ile karşılaştırıldığında, kompozit malzemelerin daha düşük sünekliğe sahip olmaları nedeniyledir.

Partikül veya kısa fiberler, çatlağın kolaylıkla başlamasını sağlayan bölgelerdir. Bu davranışlar, takviyenin hacimsel oranı, şekli, boyutu ve en önemlisi takviye/matriks arayüzey bağı dayanımına bağlı olarak değişebilmektedir. Arı bir matriks alaşımı ile birlikte, optimum bir takviye boyutu ve hacimsel oranı seçmek, iyi yorulma özelliğine sahip kompozit malzemenin elde edilmesini sağlamaktadır (Chawla, 1998).

Süreksiz takviyeli MMK malzemelerde hasar başlangıcı, partikül boyutu, şekli, köşeli olması ve toplanması ile etkilendiğinden, MMK mikroyapısında gözle görülür değişmelerin meydana geldiği plastik deformasyon işlemiyle, yorulma özelliklerinin etkileneceğini söylemek uygundur. Plastik deformasyon işlemleri sonrası yorulma verilerinin azlığı nedeniyle, yorulma çatlağı büyüme direncinde plastik deformasyon işlemlerinin etkileri tam olarak bilinmemektedir. Bununla birlikte, eğer toplanmalar ortadan kaldırılır ve partiküller homojen olarak dağılırsa, yorulma çatlağı yayılma direnci iyileşir (Subramanian vd., 1995).

3.4.5 Aşınma

Aşınma, bir temel malzeme özelliğinden çok, malzemenin sisteme cevap verebilme yeteneğidir. Bir malzeme; ortam sıcaklığı, yükleme ve karşılık malzeme yüzey şartları gibi faktörler tarafından etkilenen yapışma, abrazyon aşınma, yorulma erozyonu ve oksidasyon gibi farklı mekanizmalar ile aşınabilmektedir. Bir yüzey diğerine yapıştığı ve daha sonraki hareketinde malzemelerden birinde kırılma meydana getirdiği zaman adhesiv aşınma meydana gelmektedir. Bir malzemenin yüzeyi, karşılıklı yüzeyler arasında bulunan sert serbest parçacığın hareketiyle plastik deformasyona uğrar veya çizilirse, abrazyon aşınma meydana gelir. Tüm aşınma mekanizmalarını etkileyen aşınma parametreleri şunlardır:

- Malzeme parametreleri: Bileşim, tane büyüklüğü, elastiklik modülü, ısı iletkenlik, deformasyon sertleşmesi derecesi,
- Ortam parametreleri: Sıcaklık, nem, kirlilik,
- Yağlama parametreleri: Yağlayıcı tipi ve kararlılığı.

Partikül takviyeli kompozit malzemelerin, alaşımlara göre en önemli üstünlüklerinden birisi aşınma özelliğidir. Özellikle otomotiv uygulamaları için bu özellik büyük önem taşımaktadır.

Birçok çalışma, süreksiz takviyeli kompozit malzemelerin abrazif aşınma özelliğinin, takviye edilmemiş alaşıma göre çok daha iyi olduğunu göstermektedir. Bununla beraber, abrazif aşınma, karmaşık bir işlem olup, takviye fazı, matriks, uygulanan yük, aşındırıcı gibi aşınma şartlarından etkilenebilmektedir. Süreksiz takviyeli Al matriksli kompozit malzemelerin abrazif aşınma direncinin, artan takviye boyutu ve azalan aşındırıcı büyüklüğü ile arttığı tespit edilmiştir.

Sürtünme kuvveti, özellikle abrazif aşınmada olmak üzere, aşınma davranışında önemli rol oynamaktadır. Genellikle daha yüksek sürtünme kuvveti oluşumu, daha kötü aşınma davranışını ifade etmektedir.

Banerji vd.'nin yaptığı bir çalışmada zirkonyum partiküller içeren Al-%11,8Si-%4Mg alaşımında aşınma direncinin, kompozit malzemenin sertliği ile doğrusal olarak arttığı tespit edilmiştir. Yu vd.'nin yaptığı çalışmada ise, kısa fiber takviyeli kompozit malzemelerde, fiber yönüne göre aşınma hızının bir miktar değiştiği belirlenmiştir (Gül, 1999).

Hacimsel olarak farklı oranlarda Al_2O_3 partikül takviyeli Duralcan kompozit malzemelerinde takviye oranının artışıyla, aşınma direncinin arttığı görülmüştür. AA6061-T6 matriks alaşımı ile karşılaştırıldığında, %15'lik Al_2O_3 partikül ilavesiyle, mm^3 cinsinden hacimsel kaybın %80 azaldığı tespit edilmiştir. Bu düşüş AA2014-T6 matriks alaşımı kullanıldığında da yaklaşık olarak aynıdır (Eliasson ve Sandström, 1995).

Tjong vd.'nin (1997) bir çalışmasında, %2, %4, %6 ve %8 hacimsel oranlarında SiC partikül Al-12Si alaşımına katılarak, karıştırma döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretilmiş ve T6 ısıtıl işlemi uygulanmıştır. Oda sıcaklığında yapılan kayma aşınması testleri ile Al-12Si alaşımına düşük hacimsel oranlarda SiC partikül katılmasının, aşınma kaybının azalmasında faydalı olduğu görülmüştür. MMK'nin ağırlık kaybı, SiC partikül miktarının artmasıyla azalma göstermiştir.

Kwok ve Lim'in (1999) yaptığı çalışmada, yüksek hızda bazı Al/SiC partiküllü kompozit malzemelerin aşınma ve yağlama özellikleri incelenmiştir. Al-%4,5Cu matriksli kompozit malzeme, mekanik alaşımlama ve toz metalurjisi yöntemleri ile üretilerek pin-on-disc aşınma testi uygulanmıştır. Uygulanan yüke göre aşınma oranı artmış, bununla birlikte, bu iki parametre arasında lineer bir bağıntı görülmemiştir. Belirli yük ve hız kombinasyonları altında, kompozit malzemeler hasara uğratılmıştır. Hasarın, pin malzemesinin büyük bir miktarının çok çabuk karşı yüzeye yapışmasıyla ortaya çıktığı görülmüştür. Bu durum meydana geldiğinde, testi sürdürmek artık mümkün olmamıştır.

Park vd. (1999), püskürtme döküm yöntemiyle üretilmiş ve ekstrüzyonla şekillendirilmiş SiC partikül takviyeli Al-Si alaşımı matriksli kompozit malzemenin, takviyesiz alaşıma göre gelişmiş aşınma direnci gösterdiğini saptamışlardır. Bu durum, püskürtme döküm malzemedeki daha ince Si fazı ve daha ince tane boyutu ile ilgilidir. Hacimsel SiC partikül oranının artması, aşınma direncini iyileştirmektedir. Al-Si ötektik alaşımının aşınma direnci, ötektik Si fazının şekli ve boyutuyla önemli derecede etkilenmektedir.

Bindumadhavan vd.'nin (2001b) yaptığı bir çalışmada, çift partikül boyutuna sahip MMK'lerin, aşınma ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bunun için, ergiyik karıştırma tekniği ile %3, %7, %11 ve %15 gibi farklı hacimsel oranlarda SiC partikül takviyeli A356 Al alaşımı matriksli kompozit malzeme üretilmiştir. Kompozit malzemeler tek partikül boyutlu (47 μm) ve çift partikül boyutlu (47 μm ve 120 μm) olmak üzere iki ayrı tipte üretilmişlerdir. Çift partikül boyutlu kompozit malzemede hacimsel partikül oranı %3'tür. Bu kompozitte partikül oranının yaklaşık %1'i büyük partikül boyutlu, %2'si ise küçük partikül boyutludur. Ball-on-disc yöntemiyle yapılan aşınma testleri sonucunda, tek partikül boyutlu kompozit malzemenin aşınma direncinin, SiC takviye ilavesinin artışıyla arttığı görülmüştür. Aşınma direncinde maksimum artış, %7 SiC içeren kompozitte meydana gelmiştir. Çift partikül boyutlu kompozit malzemeler ise, sabit hacimsel SiC takviye oranı için, yalnızca küçük boyutlu partikül içerenlerden daha yüksek aşınma direnci sergilemişlerdir.

Ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında SiC partikül takviyeli Al-Cu alaşımı matriksli kompozit malzeme üzerinde aşınma testi yapılmıştır. Pin-on-disc yönteminin kullanıldığı bu testte, pin numuneler MMK malzemeden yapılmış, çelik disk üzerine ise SiC ve Al_2O_3 esaslı iki farklı zımpara yapıştırılmıştır. Aşındırıcı boyutu ve uygulanan yük arttığında, matriksin ve kompozit malzemenin aşınma oranı artmıştır (Şahin, 2003).

4. METAL MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN TALAŞSIZ ŞEKİLLENDİRİLME YÖNTEMLERİ

Metalsel malzemeleri haddeleme, ekstrüzyon, dövme vb. gibi geleneksel talaşsız şekillendirme yöntemleriyle yapısal parça şekline getirmek son derece önemlidir. MMK malzemelerin talaşsız şekillendirilmesinde istenen sonucu elde etmek açısından, süneklik önemli bir özelliktir. Partikül ve kısa fiber takviyeli MMK'ler ise talaşsız şekillendirme işlemleri için uygun olmaktadır.

4.1 Ekstrüzyon

Döküm MMK malzemeler; homojen bir dağılım, porozite azalması ve daha ince tane yapısı elde etmek amacıyla ekstrüzyon yöntemi ile şekillendirilirler (Taha, 2001). Ekstrüzyonla şekillendirilen kompozit malzemelerin çekme dayanımı ve uzama değerleri, sıcak presleme ile üretilen kompozit malzemelerden daha yüksektir. Ekstrüzyon işlemi uygulanmış kompozit malzemelerin uzama miktarı iki kat daha yüksektir (Libin ve Jintao, 1998). Ekstrüzyon işlemi, takviye ile matriks malzemesi arasında yeni yüzeylerin oluşmasıyla, arayüzey bağının iyileşmesiyle, dendritlerin kırılmasıyla ve partiküllerin daha homojen dağılmasıyla mekanik özellikleri iyileştirmektedir (Yılmaz, 1997).

Ekstrüzyon yöntemi, tüm MMK'ler için kullanılan yaygın bir şekillendirme yöntemidir. Döküm yöntemi ile üretilmiş olan partikül takviyeli Al kompozit malzemenin ekstrüzyonu üzerine Jeffrey vd.'nin yaptığı bir çalışmada, anizotropi oluşumu ve takviye kırılması meydana gelmeksizin, yüksek hacimlerde şekillendirilmiş kompozit malzeme üretimi için, sıcak ekstrüzyonun uygulanabilir bir işlem olduğu ifade edilmektedir. Kompozit malzemelerin ekstrüzyon kabiliyeti, ekstrüzyon hızı, bitmiş yüzey, 16:1-425:1 ekstrüzyon oranı gibi parametreler açısından, takviye edilmemiş Al ile benzerlikler göstermektedir.

Kompozit malzemelerin ekstrüzyonunda göz önünde bulundurulması gereken nokta, çok yüksek kalıp aşınmasının meydana gelmesidir. Takviyelerin aşındırma özelliği nedeniyle, geleneksel takım çeliklerinden yapılmış kalıplarda aşırı aşınmalar meydana gelmekte ve bu durum kalıp maliyetini önemli derecede etkilemektedir. Araştırmacılar, %15 Al₂O₃ takviyeli 6061 Al alaşımı matriksli kompozit malzemedan çubuk ekstrüzyonunda çeşitli kalıp malzemeleri kullanmışlar ve sermetler, seramikler, süper alaşımlar, takım çelikleri şeklinde en iyiden kötüye doğru sıralama yapmışlardır.

Aynı kalıp malzemesi kullanılarak, aynı takviye malzemesine sahip çeşitli matriks

malzemelerinin aşındırma özelliğini değerlendirmek amacıyla yapılan çalışmalar da vardır. %15 Al₂O₃ takviyesiyle, 1060 Al alaşımıyla üretimde en az aşınma, 2014 alaşımıyla üretimde maksimum aşınma ve 6061 alaşımıyla üretimde ikisinin arasında bir aşınma meydana gelmiştir. Bu alaşımlarda hacimsel takviye oranının artmasıyla, kalıp aşınmasında da artış olduğu görülmüştür.

Brusethaug vd., 20 µm çaplı %15 SiC takviyeli A357 döküm Al alaşımının ekstrüzyon kabiliyeti üzerinde çalışmışlardır. Mamulde görünür şekilde ortaya çıkan yırtılma öncesindeki ekstrüzyon hızını bulmuşlardır. Çalışmalarında blokları farklı sıcaklıklarda ön tavlama tabi tutmuşlardır. Alıcı sıcaklığı 430°C’de sabit tutulmuş, ekstrüzyon oranı 40:1 alınarak, 16 mm çaplı çubuk imal edilmiştir. Blok sıcaklığının 430°C’den 500°C’ye yükselmesiyle, ekstrüzyon hızı ve basıncın lineer olarak azaldığını gözlemlemişlerdir. Ekstrüzyon sonrası, takviye edilmiş malzemenin tane yapısı yeniden billurlaşmış ve eş eksenli olmuştur. Ekstrüzyon mamulü olan çubuktaki takviye dağılımının homojen olması, bloğun aynı homojen dağılıma sahip olmasına bağlıdır. Kompozit çubuk, ekstrüzyon edilmemiş hali ile karşılaştırıldığında, daha yüksek süneklik özelliği göstermektedir (Subramanian vd., 1995).

4.2 Haddeleme

Harrigan vd., toz metalurjisi ile üretilen %15-30’luk SiC partikülle takviyeli 6061 Al alaşımı matriksli kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerinde sıcak haddelemenin etkilerini incelemişlerdir. Haddeleme ile kalınlıkta yaklaşık %80 gibi önemli bir redüksiyon sonrası, mekanik özelliklerin iyileştiğini ve bu durumun, metal-metal bağlarının iyileşmesinin bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir (Subramanian vd., 1995).

Lee ve Subramanian, hacimce %10 SiC takviyeli 6061 Al alaşımı matriksli kompozit malzemede, ekstrüzyon doğrultusuna dik doğrultu boyunca haddelemenin etkilerini araştırmışlardır. Partikül kırılması şekli, arayüzey ayrışması ve kompozit malzemede partikülün yeniden dağılımına, mekanik şekillendirmenin etkisini incelemişlerdir. Ekstrüzyonla şekillendirilen malzeme, aşırı bantlaşma ve partikül yığılması sergilemiştir. Kompozit malzemenin soğuk haddelenmesinde, %1-2’lik redüksiyonlu pasolarda bile, önemli bir kenar kırılması, partikül kırılması ve arayüzey bağı ayrışması ortaya çıkmıştır. Yaptıkları çalışmada, yaklaşık %10 redüksiyonlu paso ile yaklaşık 400°C’de sıcak haddeleme uygulanmıştır. Her paso sonrası numuneler, deformasyon sertleşmesinin etkilerini yok etmek için 415°C’de 5-7 dakika tavlannmıştır. Sıcak haddeleme, kenar kırılması olmadan yaklaşık %80 redüksiyonla yapılabilmektedir. İlaveten, partikül kırılması ve arayüzey bağı

ayrışması en aza indirgenmiştir. Soğuk ve sıcak haddeleme sonucunda partikül dağılımında bir fark görülmemiştir. Ekstrüzyonla şekillendirilen kompozit malzemelerin akma ve çekme dayanımları, kırılma uzaması gibi mekanik özellikleri, artan haddeleme redüksiyonu ile daha izotrop hale gelmiştir. Artan redüksiyonla bu özellikler, ekstrüzyon doğrultusu boyunca artmış; yaklaşık %50-60 redüksiyonda kompozit malzeme özellikleri izotrop olmuştur. Bu davranış, partikül kırılması, arayüzey bağı ayrışması ve partiküllerin yeniden dağılması ile açıklanmaktadır (Subramanian vd., 1995).

Morelli vd.'nin (2001) çalışmasında, %20 oranında, 5 μm , 7 μm , 23 μm gibi farklı partikül boyutunda SiC ile takviyeli Al-3,6Cu-1,9Mg-0,2Zr matrisli kompozit malzeme, toz metalurjisi ile üretilmiş ve ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilmiştir. Daha sonra T6 ve T8 ısıt işlemleri uygulanmıştır. T8 ısıt işlemi ile daha ince taneli ve daha homojen bir dağılım meydana gelmiştir Diğer yandan, T8 işleminde haddeleme aşamasının bir sonucu olarak, matrikste homojen bir dislokasyon dağılımı elde edilmiştir. En büyük partikül boyutlu takviyeleri içeren kompozit malzemelerin haddelenmesinde ise, partikül kırılmaları meydana gelmiş, böylece dayanım değerleri, takviyesiz matriks alaşımından düşük çıkmıştır.

4.3 Dövme

Dövme işlemi hemen hemen tüm MMK'lere uygulanan önemli bir talaşsız şekillendirme yöntemidir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen MMK'lerde dövme işlemi, poroziteyi azaltmaktadır. MMK'lerin talaşsız şekillendirilmesinde dövme yöntemini kullanırken, aşağıdakileri göz önünde bulundurmak önemlidir:

- Partikül veya kısa fiber takviye,
- Toz metalurjisi veya döküm yöntemleriyle üretim,
- Kum döküm veya sıkıştırma döküm,
- Kapalı veya açık kalıpta dövme,
- Sıcak veya soğuk dövme.

Parça şekli, hacimsel takviye oranı ve deformasyon miktarı gibi ilave detaylar da önem taşımaktadır.

Tezanos vd., bir parçanın farklı kısımlarında homojen olmayan redüksiyonlara ihtiyaç duyulduğunda, şekillendirme tekniği olarak dövme işlemini önermektedirler. Herhangi bir malzemenin dövme kabiliyetini, iç ve dış kısımlarda çatlama ve şekillendirilme hataları olmaksızın, büyük deformasyonlara uğrayabilme kapasitesi olarak tanımlamışlardır. %15

oranında 10-15 μm Al_2O_3 partikülle takviyeli 2014 Al alaşımlı matriksli kompozit malzemeye, farklı gerinim oranlarında, 450°C ve 500°C’de sıcak basma testi uygulamışlardır. MMK’nin dövme işinin, toplam deformasyonla lineer olarak arttığını ve bunun deformasyon oranına bağlı olduğunu bulmuşlardır. Dövme ile yüzey hataları ve çatlak olmaksızın üretim yapabilmek için, toplam deformasyon ve deformasyon oranının uygun bir kombinasyonunu elde etmek amacıyla, bu kompozit malzemenin dövme kabiliyeti haritasını geliştirmişlerdir (Subramanian vd., 1995).

Özben’in (2001) yaptığı çalışmada, ağırlıkça %5, %10 ve %15 SiC içeren Al-Si alaşımlı matriksli kompozit malzeme sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilmiştir. Sıkıştırma döküm sonrası dövme işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelerde, sertlik ve çekme dayanımı değerleri düşmüş, çentik darbe dayanımı yükselmiştir. Sertlik değerinin düşmesinde, tavlama ile oluşan yeniden billurlaşma sonucunda, dislokasyon yoğunluğunda meydana gelen azalma etkili olmuştur. Tavlama ve dövme sırasında, önceden mevcut olan gerilmeler azalmış ve matriks yapısı sünek hale gelmiştir. Yeniden oluşan ve küresel biçimdeki Mg_2Si çökeltilerin çok küçük boyutlarda olması, sertlik değerlerinin düşmesinde etkili olmuştur.

5. METAL MATRİKSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN UYGULAMA ALANLARI

Metal matriksli kompozit malzemeler günümüzde, uzay ve havacılık alanlarının yanı sıra, otomotiv endüstrisi, taşımacılık, savunma sanayi, endüstriyel ve tarımsal araçların üretimi, spor ve eğlence alanlarında kullanılmaktadır.

5.1 Havacılık ve Uzay Endüstrisi

Havacılık uygulamalarında, düşük yoğunluk ve ısı uzamanın yanı sıra, iletkenlik, yüksek rijitlik ve dayanım gibi özellikler asıl etkenlerdir. Bu alanda performans, maliyetten daha önemlidir. Sürekli fiber takviyeli MMK'ler, partikül takviyeli kompozit malzemelerden daha mükemmel performans sergilediklerinden, havacılık uygulamalarında daha fazla kullanılmaktadır. Havacılık dışındaki alanlarda maliyet ve performans önemlidir. Bu nedenle, partikül takviyeli MMK'ler, havacılık dışındaki alanlarda artan bir oranda kullanılmaktadır. MMK'lerin en büyük ticari uygulamaları, filamentli süperiletken kompozit malzemeler şeklindedir.

Bir parçanın ağırlığının azalması, havacılık alanındaki herhangi bir uygulama için başlıca itici etkidir. Örneğin sürekli C fiber takviyeli Al, Hubble teleskobunda dalga iletim direklerinde kullanılmaktadır, çünkü bu kompozit çok hafiftir ve yüksek bir elastiklik modülüne ve düşük ısıl uzama katsayısına sahiptir. MMK'lerin diğer havacılık uygulamaları, hafif fakat zehirli berilyumun yerini almasıdır. Örneğin US Trident füzesinde, berilyumun yerini SiC_p/Al kompozit malzemesi almıştır (Chawla, 1998). Sürekli fiber takviyeli Al matriksli kompozit malzemelere örnek olarak, roket kanatları ve roket gövdesi koruyucuları verilebilir. Koruyucularda, sürekli SiC fiberleri kullanılmaktadır. Bu uygulama için, düşük ağırlık son derece önemlidir, çünkü böylece roketin taşıma kapasitesini arttırmak mümkün olmaktadır. Pervaneler ve kompresör bıçaklarına bakıldığında, ağırlığın yanı sıra, sürünme özellikleri, yüksek elastiklik modülü ve yüksek dayanım önemlidir. Bu parçaların imalatında, sürekli SiC fiber takviyeli AA6061 Al alaşımı kullanılmaktadır. B fiber/Al matriks çubuklar, uzay mekiğinin gövdesinde destek vazifesi görmektedir. Bu çubuklar, pahalı B fiberlerle, difüzyon bağı yöntemiyle üretilirler ve pahalı malzemelerdir. Farklı bir B/Al bileşimi, jet motorlarının fan bıçaklarında kullanılmaktadır. Bu kompozit malzemedan bıçaklar Ti bıçakla karşılaştırıldığında, daha yüksek hız, kademe başına daha az bıçak, motor başına daha az kademe ve düşük maliyet sağlar. Sürekli C fiber takviyeli Al alaşımları, iyi bir yüksek sıcaklıkta çalışma kapasitesine sahiptir ve bu durum onları, izleyici roket kaplaması,

takviyeler ve füze rampası boruları için kullanılır hale getirir. Son derece hafif teleskop imalatında, teleskop direkleri ve destek çubukları, toz metalurjisi tekniğiyle yapılır ve sonra ekstrüzyonla boru şekline getirilir. Yüksek elastiklik modülü, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım özelliklerine sahiptirler. Diğer malzemelerle birleştirildiğinde, ısı yorulmadan kaçınmak için, düşük bir ısı uzama katsayısına da ihtiyaç vardır. AA6061-T6 alaşımından matriks malzemesine SiC viskerler ilave edilmektedir. Bunlar parçanın yük taşıması için boyuna doğrultuda yönlendirilmektedir. Teleskobun metal yansıtıcı optiklerinde, ince SiC partikül takviyeli Al matriksli kompozitten, toz metalurjisi ile üretilmiş parçalar kullanılmaktadır. Bu kompozit malzeme, düşük ısı uzama katsayısına sahiptir. Al matriksli kompozit malzemelerin bir diğer kullanım yeri, uçaklardaki rüzgar panelleridir. Matriks malzemesi AA6061 veya AA2124 alaşımı, takviye malzemesi ise %20-40 oranındaki SiC partikülleridir. Bunlar mamul halde üretilir veya blok halinde üretilip, örneğin ekstrüzyon ile şekillendirilir. Burada en önemli ihtiyaç, düşük ağırlıktır (Eliasson ve Sandström, 1995).

5.2 Otomotiv ve Taşımacılık

Bu alandaki önemli MMK uygulamalarından birisi, dizel motor pistonu başlıklarıdır. Bu uygulamada, piston başlarında, Al_2O_3 ve Al_2O_3+SiC kısa fiberlerinin birleşimi gerekmektedir. Geleneksel dizel motor pistonu, başlık kısmı Ni alaşımlı dökme demirden yapılmış Al-Si döküm alaşımındandır. Ni esaslı dökme demirin yerini Al matriksin almasıyla, daha hafif, aşınma direnci daha fazla ve daha ucuz bir mamul elde edilmiştir (Chawla, 1998). Piston başlıkları, piston eksenine dik düzlemlerde rastgele yönlendirilmiş süreksiz Al_2O_3 fiber takviyeli AlSiCu matrikslidir ve sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilirler. Böylece daha az yorulma hasarı ile sonuçlanan, düşük radyal uzama elde edilir. Yanma odası da çatlama ve erozyonu önlemek için takviye edilir. Segman yatakları ise, güvenilir baş kısımlar ve daha hafif piston elde etmek için takviye edilirler. Piston pernosu da yük taşıma kapasitesini geliştirmektedir. Fiber takviyeli segman yataklarıyla piston ağırlığı %10 azalmakta, fakat aşınma direnci düşmektedir. Bir biyel için önemli olan özellikler elastiklik modülü, yoğunluk ve yorulma direncidir. Hacimce %15 SiC takviyeli AA2014 veya AA6061 Al matriksli kompozit malzeme kullanılarak sırasıyla döküm, dövme ve talaşlı işleme sonucunda elde edilen biyelde, daha düşük bir maksimum aksenal yük mümkün olmaktadır (Eliasson ve Sandström, 1995). Otomotiv sektöründeki bir diğer uygulama, Honda'nın Prelude marka otomobilinde, silindir gömleğinde, C fiber ve Al_2O_3 fiber takviyeli Al alaşımı matriksten kompozit malzeme kullanılmasıdır (Chawla, 1998). Silindir gömleği üretiminde %3-5 Al_2O_3 takviyeli Al17Si alaşımı matriksten kompozit malzeme kullanılmasıyla, aşınma direnci

artmaktadır. Parça, partiküllerin homojen dağılımını ve böylece izotrop özellikler elde etmek için, toz metalurjisi yöntemiyle üretilmektedir Al matriksli kompozit malzemeden üretilen parçalara verilebilecek diğer örnekler fren diskleri ve fren kampanalarıdır. Bunlar partikül takviyeli olarak üretilmektedir. Böylece fren diskleri için önemli olan düşük ağırlık elde edilmiş olmaktadır. Ayrıca aşınma direnci iyileşmektedir ve iyi bir ısı iletimi sayesinde oluşan ısı uzaklaştırılmaktadır (Eliasson ve Sandström, 1995).

Kwon ve Goo'nun (2000) yaptığı bir çalışmada, %20 seramik partikül takviyeli Al matriksli kompozit malzemeden fren diskleri için uygun fren balatalarının, sürtünme ve aşınma karakteristikleri incelenmiştir. Fe esaslı malzemelere göre, seramik partikülle takviye edilmiş Al esaslı MMK malzemeden yapılmış olan fren disklerinin daha hafif olduğu ve kullanma şartları altında daha iyi bir sürtünme ve aşınma direnci gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Yüksek B_4C içeren AA5754 malzemeden, metal püskürtme yöntemiyle üretilen kompozit malzeme, nötron emme kabiliyeti nedeniyle, nükleer güç santrallerinde kullanılmaktadır. İyi ısıl iletkenlik, iyi korozyon direnci, yüksek elastiklik modülü, yüksek çekme dayanımı özellikleri ve düşük yoğunluk da bu seçimde önemli olmaktadır. Yatakların güçlendirilmesi için C fiberlerin kullanımı mümkündür. C, daha düşük sürtünme katsayısına sahip katı yağlayıcı olarak davranış gösterdiği için, aşınma direnci iyileşmektedir. Bu da yağlayıcısız yatakların kullanımını mümkün kılması açısından avantaj sağlamaktadır. Dönen parçalarla yapılan uygulamalarda düşük ağırlığın faydası açıktır. Motorlarda azalan kütsel kuvvetler, daha ince parçaların üretilmesini mümkün kıldığından, enerji tüketiminin de düşmesine sebep olmaktadır. Bir diğer uygulama, aşınma direncinin ve düşük ağırlığın önemli olduğu kış şartlarındaki yollarda kullanılan, bir Duralcan malzemesi olan %15 Al_2O_3 takviyeli AA6061'den dövme tekerlek çivilerinin üretimidir (Eliasson ve Sandström, 1995).

Partikül takviyeli Al matriksli kompozit malzemenin önemli bir potansiyel ticari uygulaması, otomotiv şaftlarının imalatıdır. Şaftın tasarımında, dinamik olarak kararsızlık doğuran hızın göz önünde tutulması gerekmektedir. Geometrik parametrelere bağlı olarak daha kısa şaft boyu ve daha büyük çap, daha yüksek bir kritik hız sağlarken, malzeme parametrelerine bağlı olarak daha yüksek özgül rijitlik, daha yüksek kritik hız sağlar. Sabit bir kritik hız korunduğunda, şaft geometrisinde uzunluk artışı veya çap küçültülmesi gibi değişiklikler yapılabilir. Şaft çapındaki düşüş, şasideki boşluk sınırlarından dolayı önemli olabilir.

5.3 Spor ve Eğlence

Partikül takviyeli, özellikle Al ve Mg gibi hafif MMK'ler, spor malzemeleri uygulamalarında

da kullanılmaktadır. Bu bakımdan, maliyet/kg uygulama için itici kuvvet olmaktadır. Mükemmel bir örnek, dağ bisikleti yapımında Duralcan partikül takviyeli MMK'lerin kullanılmasıdır. Bu bisikletler, yaklaşık %10 Al_2O_3 partikül içeren 6061 Al alaşımından ekstrüzyon borularından yapılmış bir gövdeye sahiptir. Başlıca avantajı, rijitlikteki artıştır (Chawla, 1998). %10 Al_2O_3 ile takviye edilmiş AA7005 alaşımı da ekstrüzyonla boru şekline getirilmiş bisiklet gövdesi için dikkate değer bir kompozit malzemedir. %20 SiC partikül takviyeli AA6061 alaşımı matriksli kompozit malzemeden ekstrüzyonla imal edilen tenis raketleri, grafit/epoksi raketle karşılaştırıldığında, daha düşük bir maliyetle, %25 titreşim azalması ve artan bir rijitlik sağlamaktadır. Golf sopası baş kısımları, %20 SiC partikülle takviyeli Al9Si alaşımı matriksli kompozit malzemeden üretilmektedir; burada sertlik ve düşük ağırlık önem taşımaktadır (Eliasson ve Sandström, 1995).

5.4 Elektrik ve Elektronik Endüstrisi

MMK'ler elektronik paket sistemlerinin (nüveler, taşıyıcılar, destekler) ihtiyaçlarını karşılamak için, optimal ısı ve fiziksel özelliklere sahip hale getirilebilir. Difüzyon bağı yöntemi ile üretilmiş sürekli B fiber takviyeli Al kompozit malzemeler, chip taşıyıcı tabakalı kartlarda, soğutucu plaka olarak kullanılmaktadır (Chawla, 1998). Mikrodalga ve elektronik paket sistemleri için ısı çevrim, birleştirilmiş parçalarda ayrılmalar nedeniyle, büyük hasarlara sebep olabilmektedir. Bu malzemeler $-65^{\circ}C$ ile $+125^{\circ}C$ arasında bir sıcaklık çevrimine maruz kalırlar. Bu amaçla kullanılan malzemeler, kullanım yerine göre farklı oranlarda SiC partikül içeren AA6061 Al alaşımı matriksten yapılmış kompozit malzemelerdir (Eliasson ve Sandström, 1995).

Al matrikste tek yönde dizilmiş C fiberler, fiber doğrultusu boyunca çok yüksek ısı iletkenlik sağlarlar. Fiberlere dik yöndeki iletkenlik, Al'ın yaklaşık 2/3'ü kadardır. C/Al kompozit malzemesi, örneğin bilgisayarlar için yüksek hızlı birleşik devre paketleri ve elektronik donanımlar için altlıklar gibi ağırlık azalmasının önemli olduğu yerlerde, ısı iletimi uygulamalarında, uygulama alanı bulabilmektedir (Chawla, 1998).

Cu-C kompozit malzemenin ısı iletimi nispeten yüksektir (195 W/mK) ve bu durum onun, yarı iletken esaslı elektrik güç elemanlarında ısının uzaklaştırılması için soğutucu eleman olarak pratik uygulamalarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Kaczmar vd., 2000).

Libin ve Jintao (1998), Çin'de MMK malzemeler üzerine bir araştırma yapmışlardır. Buna göre, Çin'de bu konuda yapılan çalışmalar laboratuvar ölçeğinde veya model denemeleri şeklindedir. MMK uygulamalarını etkileyen bazı faktörler; yüksek üretim maliyeti,

güvenilirlik vb.'dir. Birkaç pratik parça ve birçok simülasyon parça üretilmiş ve şekillendirilmiştir. SiC/Al matriksli kompozit malzemeden yapılmış birkaç parça pratik olarak kullanılmaktadır, fakat bunların çoğu, hala laboratuvar ölçeğindeki endüstriyel deneme uygulamalarıdır. Uydu yapımında kullanılan SiC fiber takviyeli Al matriksli uç kaplaması, C_p/Z1108 kompozit malzemesinden yapılmış motosiklet pistonu, SiC_f/LD2 malzemeden yapılmış tank pistonu, SiC_p/Al'dan yapılmış uydu yapısal parçaları, SiC_p/Al'dan yapılmış içten yanmalı motorun piston segmanı için silindirik yuvaların imalatı bu uygulamalardan bazılarıdır.



6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Alüminyum Matriksli Kompozit Malzemenin Hazırlanması

Deneysel çalışma için ülkemizde üretimi yapılmakta olan ve Etial-140 olarak isimlendirilen Al-Si alaşımı, matriks malzemesi olarak seçilmiştir (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1 Etial-140'ın kimyasal bileşimi

	%Cu	%Fe	%Si	%Zn	%Mn	%Mg	%Ni	%Al
Etial-140	0,10	0,60	11,5-13,5	0,10	0,40	0,10	0,10	Kalan

Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında SiC içeren MMK malzeme üretimi için, sıkıştırma döküm ve gravite döküm yöntemleri seçilmiştir. Matriks malzemesi içerisine %99,7 saflıktaki Al ilavesi ile farklı katılma aralığına sahip matriks alaşımlı kompozit malzeme elde etmek için, alaşımdaki Si oranının %11'den yaklaşık olarak %7'ye düşürülmesi amaçlanmıştır. Ayrıca ıslatmayı sağlamak amacıyla %2 oranında Mg ilave edilmiştir.

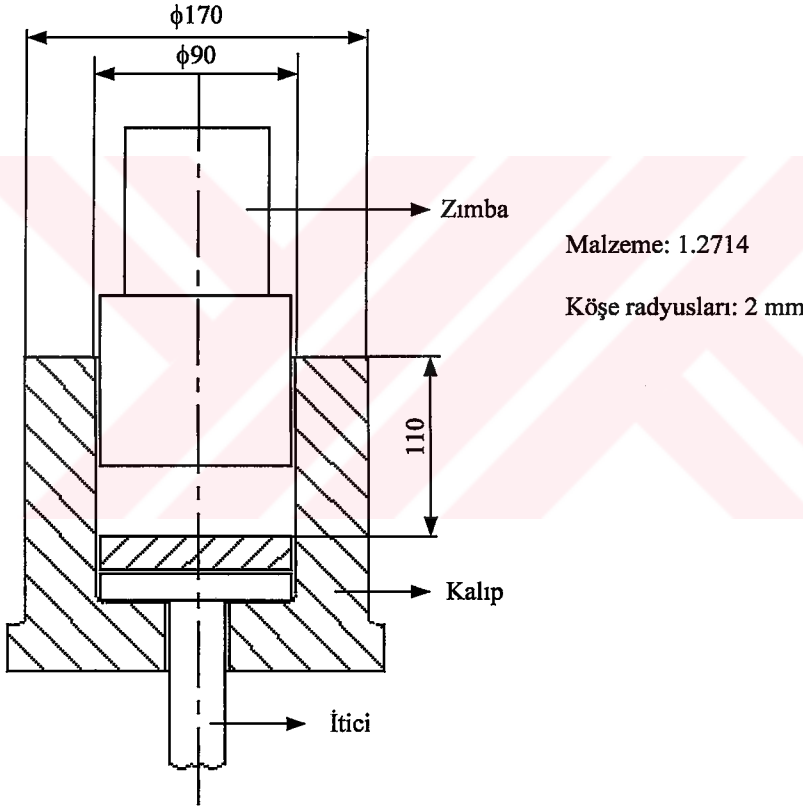
Kompozit malzeme üretimi için takviye malzemesi olarak, ortalama 23 μm çapındaki FEPA standardına göre 400 Mesh'lik (11-44 μm) yeşil renkli SiC partiküller seçilmiştir. Yoğunluğu 3,18 g/cm³ olan SiC partiküllerin sertliği yaklaşık olarak 9,5 Mohs olup, çok kırılğan bir özelliğe sahiptir. Çarpma ve vurmalara karşı duyarlıdır. Aşındırıcı malzeme olarak, sert metal ve seramik gibi malzemelerin, cam ve aside dayanıklı östenitik çeliklerin işlenmesinde kullanılır.

6.1.1 Sıkıştırma Döküm Yöntemi

Kompozit malzemeyi oluşturan matriks malzemesi ve takviye malzemesinin katılma sıcaklıklarının ve yoğunluklarının farklı olması nedeniyle, geleneksel döküm yöntemleriyle üretilmeleri sorunlu olmaktadır. Bunun yanısıra döküm işlemi, üretimin son aşaması değildir ve üretilen malzemede yüksek döküm kabiliyeti yanında yüksek işlenebilirlik özelliği de aranmaktadır. Gerek malzemenin işlenebilirlik özelliği, gerekse mekanik özellikleri malzemenin içyapısı ile doğrudan ilişkilidir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, yarı katı halde metal şekillendirme yöntemleri ile özellikle sıkıştırma döküm yöntemi uygulandığında, kompozit malzemelerin içyapılarında iyileşmeler sağlandığı gözlenmiştir (Erturan vd., 2000).

Çalışmamızda kompozit malzeme üretimi için sıkıştırma döküm yöntemi seçilmiştir.

İndüksiyon ocağına yerleştirilmiş olan pota içerisine Etial-140 konmuş ve saf Al ilave edilerek matriks alaşımının Si oranı yaklaşık olarak %7'ye düşürülmüştür. Ayrıca, ergitme sırasında, matriks malzemesi ile takviye malzemesi arasındaki ıslanmayı sağlamak amacıyla, %2 oranında Mg, ergiyik içerisine ilave edilmiş ve AlSi7Mg2 alaşımı hazırlanmıştır. Ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında SiC partikül takviyesi içeren kompozit malzeme üretmek amacıyla, hazırlanan ergiyik alaşıma, miktarları ayarlanan SiC partikülleri grafit çubuk ile sürekli karıştırılarak katılmışlardır. Daha sonra bu karışımın bir kısmı, Şekil 6.1'de görülen, 100°C'lik bir sıcaklığa ısıtılmış olan çelik kalıp içerisine boşaltılmış ve 100 MPa'lık bir basınçla hidrolik pres yardımı ile sıkıştırılarak katılaşması sağlanmıştır. Yağlayıcı olarak grafit tozu kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Sıkıştırma döküm kalıbının şematik şekli

Bu yöntemle, üç farklı oranda SiC partikül içeren, 90 mm çapta ve 90 mm boyundaki silindirik deney blokları üretilmiştir.

6.1.2 Gravite Döküm Yöntemi

Sıkıştırma döküm işlemi için hazırlanmış olan ergiyik haldeki kompozit malzeme karışımının diğer bir kısmı ise, 100°C'ye ısıtılmış metal kalıp içerisine gravite döküm yöntemiyle

dökülerek, 35 mm çaplı ve 200 mm boyunda silindirik çubuklar elde edilmiştir.

6.2 Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemelerin Ekstrüzyon Yöntemiyle Şekillendirilmesi

Hedeflenen bileşimlerde sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen MMK malzemelerin bir kısmı, sıcak ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilmişlerdir. SiC partiküllerinin, matris içerisinde homojen dağılımlarını sağlamak amacıyla, sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. İkincil şekillendirme olarak da isimlendirilen bu işlem için, %5, %10 ve %15 SiC içeren MMK bloklarından 4'er adedi kullanılmıştır. Her bir bileşime ait 4'er adet blok, önce 450°C'ye kadar tavllanmış, daha sonra alıcı içerisine arka arkaya konmuş ve 120 mm çapa şişirilmiştir. Ekstrüzyon işlemi, 850 ton kapasiteli yatay ekstrüzyon presinde gerçekleştirilmiştir ve ekstrüzyon basıncı 150 MPa, ekstrüzyon hızı 0,5 m/dak ve ekstrüzyon oranı 23:1 olarak alınmış, yağlayıcı olarak grafit tozu kullanılmıştır. Sıcak ekstrüzyon işlemi sonucunda, 25 mm çapında ve yaklaşık 3400 mm boyunda çubuklar elde edilmiştir. İşlemde kullanılan ekstrüzyon donatımı Şekil 6.2'deki fotoğrafta görülmektedir.



Şekil 6.2 Ekstrüzyon çubuğunun imalatı

6.3 Uygulanan Isıl İşlem

Sıkıştırma döküm ve gravite döküm yöntemleriyle üretilen ve sıcak ekstrüzyonla şekillendirilen malzemelerden hazırlanan numunelerin bir kısmına T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Bunun için numuneler 520°C'de 6 saat süre ile ısıtılarak çözeltiye alma işlemi uygulanmış ve oda sıcaklığındaki suya atılarak soğutulmuşlardır. Daha sonra 170°C'de 5 saat ısıtılan numuneler havada soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmıştır.

6.4 EDX Analizi

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen %5 SiC içeren kompozit malzemenin EDX analizi Jeol marka JSM5410LV modelindeki tarama elektron mikroskopunda yapılmıştır. %10 ve %15 SiC partikül içeren kompozit malzemelerin ve ekstrüzyonla şekillendirilen kompozit malzemelerin mikroyapılarında da aynı bileşiklerin meydana geldiği görülmüştür.

6.5 Mikroyapı İncelemesi

Sıkıştırma döküm ve gravite döküm ile üretilen ve ekstrüzyonla şekillendirilen kompozit malzemelerden alınan ısıtılmış ve T6 ısıtılmış işlemi uygulanmış olan numuneler metalografik incelemeye tabi tutulmuşlardır. Metalografik inceleme öncesinde numuneler, sulu ortamda 320, 400, 600, 800 ve 1000 mesh'lik zımparalarla zımparalanmıştır. Numuneler önce krom oksit tozu, sonra sırasıyla 6 µm ve 1 µm'lik elmas pasta kullanılarak parlatılmıştır. Dağlama işlemi, oda sıcaklığında 5-25 s sürede %0.5 HF, %1.5 HCl ve %2.5 HNO₃ karışımı ile yapılmıştır. Mikroyapı çekimleri Jeol marka JSM5410LV modelindeki SEM'de yapılmıştır.

6.6 Yoğunluk ve Porozite Değerlerinin Belirlenmesi

Hazırladığımız AlSi7Mg2 alaşımı ve bu alaşımdan elde edilen kompozit malzemelerin yoğunlukları teorik ve deneysel olarak hesaplanarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yoğunluk ölçümü için Archimedes prensibinden faydalanılmış ve 0,0001 g ölçüm hassasiyetine sahip tartı kullanılmıştır. Numunelerin havada ve saf su içerisindeki ağırlıkları ölçülmüş ve malzemelerin yoğunlukları (6.1) bağıntısına göre hesaplanmıştır.

$$\rho_d = \frac{m_h}{m_h - m_s} \quad (6.1)$$

Burada ρ_d deneysel yoğunluk (g/cm³), m_h numunenin havadaki ağırlığı (g), m_s numunenin sudaki ağırlığıdır (g).

Teorik ve deneysel yoğunluklar yardımıyla (6.2) bağıntısından, kompozit malzemenin porozite miktarı bulunmuştur.

$$\%Porozite = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t} \quad (6.2)$$

Burada ρ_t malzemenin teorik yoğunluğudur (g/cm³).

MMK'deki takviyenin hacimsel oranının belirlenmesinde kullanılan en yaygın yöntemler;

nokta sayma tekniği, metalografik görüntü analizi ve asitte çözündürme yöntemidir. Bunlardan nokta sayma tekniği, ASTM E562-83 standardında verilmiştir ve uygulanması için metalografik tekniklerle numunelerin hazırlanması gerekmektedir. Kare şeklinde bir ızgara modeli kullanılarak, partiküllerle ızgara kesişimlerinin sayısı bulunur. Sonuç, ızgaradaki toplam nokta sayısının, ızgara sayısına bölünmesiyle elde edilir. Ölçme hatalarını en aza indirmek için, birçok örnek alandan ortalama sonuçların alınması gerekmektedir. Bu yöntemin dezavantajı, çok zaman almasıdır.

Metalografik görüntü analizi, bilgisayar ekranında dijital olarak görüntü analizi ile yapılır. Belli bir bölgedeki takviyeler seçilerek, ekran üzerinde renklendirilir. Bilgisayar tarafından renkli bölgeler tüm alana oranlanarak hesap yapılır ve takviye malzemenin hacimsel oranı bulunur. Bu yöntemin avantajı, zaman tasarrufu sağlamasıdır.

Asitte çözündürme yönteminde ise, kompozit malzeme numunesi, dağlayıcı çözelti içerisine daldırılır. Bu çözelti, takviyelerin bulunmadığı yerlerdeki matriksi çözündürecek özellikte seçilir. Geriye kalan çözünmemiş seramik takviyeler kurutulur ve ağırlıkları ölçülür. Hesaplanan ağırlıkça takviye oranı, hacimsel orana çevrilir (Fang vd., 1999).

Yaptığımız çalışmada, kompozit malzemenin üretilmesi sırasında kullanılan alaşımlar ve SiC partikülleri ağırlık yüzdesine göre hazırlanmıştır. Fakat özellikle teorik yoğunlukların hesaplanmasında SiC partiküllerin hacimsel oranına ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, aşağıdaki (6.3) eşitliği yardımıyla ağırlıkça yüzde oranları, hacimsel yüzdelere çevrilmiştir.

$$Hacimsel \%SiC = \frac{\frac{m_{SiC}}{\rho_{SiC}}}{\frac{m_{SiC}}{\rho_{SiC}} + \frac{m_{AlSi7Mg2}}{\rho_{AlSi7Mg2}}} \times 100 \quad (6.3)$$

Burada m_{SiC} SiC ağırlığını (g), $m_{AlSi7Mg2}$ matriks malzemesinin ağırlığını (g), ρ_{SiC} SiC yoğunluğunu (g/cm^3), $\rho_{AlSi7Mg2}$ matriksin yoğunluğunu (g/cm^3) göstermektedir.

Bunun dışında, Leica marka mikroskopta Image Analyzer ile, sıkıştırma döküm numunelerde yapılan ölçümler sonucunda, bölgesel SiC partikül oranları tespit edilmiştir.

6.7 Ultrasonik Ses Hızı Ölçümü ile Elastiklik Modülünün Belirlenmesi

Birçok muayene sorununu çözmek için uygun bir yöntem olan ultrasonik test yöntemi, bir prob ile malzeme içerisine gönderilen ve algılanan yüksek frekanslı ses dalgalarının

kullanılması esasına dayanır. Malzeme içerisine gönderilen ve herhangi bir yansıtıcı yüzeyden yansıyıp gelen ses dalgalarının malzeme içinde katetmiş oldukları mesafeye karşılık gelen süre, osiloskop ekranının yatay ekseninde görülmür. Geçen süreye bağılı olarak ekranda görülen yankılar, eksenin sıfır noktasındaki çıkış yankısının yakınında ya da uzağında yer alırlar. Bu durumda, örneğın bir hata yankısı, arka duvar yankısının önünde yer alacaktır. Ultrasonik test yöntemi ile bir malzeme veya bir kaynak dikişinin kontrolünde pratik olarak izlenen yol basitçe aşağıdaki gibidir.

- Piezoelektrik özelliğı olan bir kristal ile ultrasonik frekans seviyesinde ses dalgalarının üretimi,
- Bu enerjinin su, yağ vb. uygun bir temas sıvısı ile test edilen malzemeye geçirilmesi,
- Malzeme içinde etkileşerek değışime uğrayan ses dalgalarının, yine kristal ile tespit edilmesi,
- Kristale geri gelen ses dalgalarının, uygun bir şekilde, örneğın katot ışın tütünde görünür hale getirilmesi,
- Görüntülerin değılendirilmesi (Akyüz ve Gümrükçüoğlu, 1999).

Son yıllarda geleneksel tahribatlı muayeneleri en aza indirgemek amacıyla ultrasonik ölçümlerle mekanik özelliklerin belirlenmesi, bir kalite kontrol yöntemi olarak yapılmaya başlanmıştır. Ultrasonik hız ölçümleriyle, dolaylı olarak mikroyapı değılendirilmesi de mümkün olmaktadır. Böylece, mikroyapı parametreleri ile ultrasonik değılendirme sonuçları arasında bir ilişki kurmak, çabukluk ve malzemelerin tahribatsız muayene ile kalite kontrolü açısından faydalı olabilmektedir. Malzemelerin tahribatsız muayenelerle değılendirilmesi (NDE) çalışmaları, Al matriksli kompozit malzemeler için de yapılmaktadır. Al matriksli kompozit malzemelerdeki küçük mikroyapı değışimini belirlemek için yapılan daha önceki çalışmalarda faydalı görülen ultrasonik yöntemler geliştirilebilir. Bununla birlikte, ultrasonik dalgaların yayılmasında mikroyapı parametrelerinin doğrudan etkisi hakkındaki bilgiler henüz yeterli değıildir.

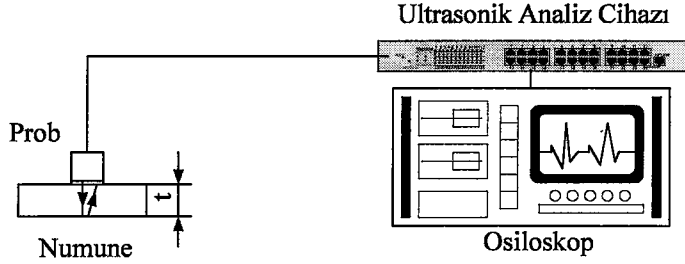
Fang vd.'nin (1999) yaptığı bir çalışmada, hacimsel olarak %10, %15 ve %20 Al₂O₃ içeren 6061 Al alaşımı matriksli kompozit malzeme, döküm yöntemiyle üretilmiş ve 200 mm çapında bloklar elde edilmiştir. Daha sonra sıcak ekstrüzyonla şekillendirilerek, 30 mm çaplı çubuklar imal edilmiştir. Archimedes yöntemi, metalografik görüntü analizi, X ışını kırınımı, asitte çözündürme ve ultrasonik test yöntemleriyle hacimsel takviye oranları bulunmuştur. Ultrasonik test yöntemiyle ultrasonik dalga hızları ölçülerek, Al matriksli kompozit malzemedeki seramik partiküllerin hacimsel oranı hesaplanmıştır. 5 MHz'lik, doğrusal ışınlı,

tek kristalli prob ile uzunlamasına dalgalar üretilmiştir. Asitte çözündürme ve ultrasonik test yöntemiyle, düşük sapmalarla asıl değere yakın hassasiyette değerler elde edilmiştir. Ultrasonik test yöntemi, zaman tasarrufu yönünden de avantajlıdır. Eğer MMK'deki porozite değerleri çok fazla değilse, bu yöntem hem hızlı hem de güvenilir bir yöntemdir.

Gür ve Ogel'in (2001) yaptığı çalışmanın konusu, SiC partiküllerin hacimsel oranı, boyutu ve dağılımı gibi mikroyapı parametrelerinin, Al matriksli kompozit malzemelerdeki ultrasonik dalga yayılımına etkisinin nasıl olduğunu belirlemektir. Bu amaçla SiC partikül takviyeli Al matriksli kompozit malzemeler, toz metalurjisi yöntemi kullanılarak, laboratuvar ölçeğinde üretilmiştir. Burada mikroyapı parametrelerinin istenilen şekilde olmasında, toz metalurjisi önemli bir avantaj sağlamaktadır. Tüm numuneler Al ve SiC tozlarından hazırlandığından, partikül takviyelerin hacimsel oranı ve boyutu bilinmektedir. Buna ilaveten, kaba taneli Al tozu kullanıldığında, oldukça fazla segregasyona sahip numuneler üretilebilmektedir. Tüm ultrasonik ölçümler sıcak presleme koşullarında yapılmıştır. Mikroyapıyı bozmamak için numunelere talaşsız şekillendirme işlemi uygulanmamıştır. Böylece, ölçümler mikroyapı özellikleri kesin olarak bilinen numuneler üzerinde yapıldığından, Al MMK'lerde mikroyapı ile ultrasonik yayılma ilişkisinde sapmanın daha az olacağı düşünülmektedir. Yapılan çalışma sonucunda Al-SiC kompozit malzemesinde ultrasonik hızın, SiC oranının artışı ile artış gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, sabit hacimsel takviye oranında, SiC boyutunun 10 μm 'den 40 μm 'ye çıkması halinde ultrasonik hızın etkilenmediği görülmüştür. Yüksek hacimsel takviye oranlarında, SiC partiküllerin homojen dağılımı, ultrasonik hızı önemli derecede etkilemiştir.

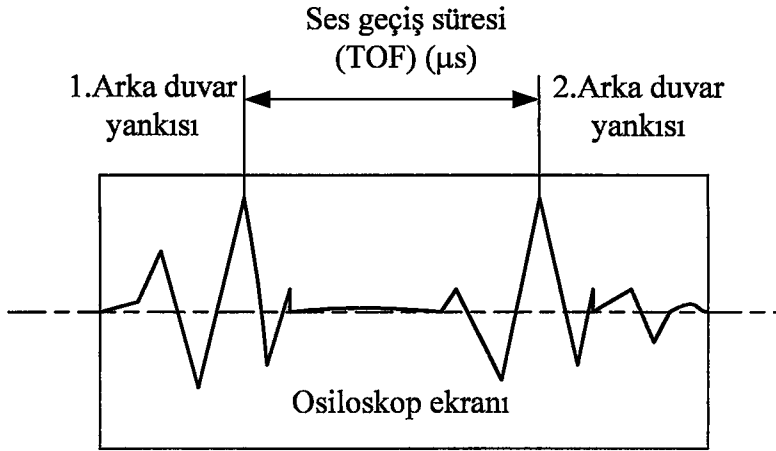
Gür'ün (2001) yaptığı bir başka çalışmada, hacimsel olarak %0, %5, %10 ve %20 oranlarında 10 μm çaplı SiC partikül takviyeli 25 μm ve 180 μm çaplı saf Al tozlarından, sıcak presleme ile kompozit malzeme üretmiştir. Her bir toz karışımına hacimsel olarak %5 oranında 50 μm çaplı Cu toz ilave etmiştir. Belirli partikül boyutlu bileşim için, hem enine hem de boyuna dalga hızlarının, kompozitteki SiC miktarının artışıyla yükseldiği belirlenmiştir. Hacimsel olarak %10'un üzerinde SiC içermesi durumunda, kompozit malzemeyi oluşturan elemanların partikül boyut oranı, ultrasonik hız için önemli bir etken olmaktadır. Yüksek bir Al/SiC partikül boyut oranı, Al tozlarının sınırları boyunca SiC segregasyonlarına sebep olmaktadır ve böylece, takviyenin homojen dağılımıyla ilgili olarak daha düşük ultrasonik hızlar elde edilmektedir. Ultrasonik hızlardaki bu düşüş, segregasyonlu yapıdaki mikro ölçekli porozite ile ilgilidir.

Yaptığımız çalışmada, sıkıştırma döküm ve ekstrüzyonla şekillendirilen parçalardan alınan dikdörtgen kesitli numuneler taşlanarak 0,03 mm toleransla yüzey paralelliği sağlanmış ve 320,400,600,800,1000 mesh'lik zımparalardan geçirilmiştir. Ultrasonik ses hızı ölçümü, darbe yankı tekniğiyle yapılmıştır. Ses hızı ölçümleri için, Şekil 6.3'te görülen düzenek kullanılmış, modeli 5052UAX50 olan Panametrics marka Ultrasonic Analyzer cihazı ve buna bağlı olan 150 MHz kapasiteli Gould DataSys 740 marka dijital osiloskoptan faydalanılmıştır.



Şekil 6.3 Ultrasonik ses hızı ölçüm düzeneği şeması

Her bir numunede boyuna ve enine ses hızı ölçümleri yapılmıştır. Boyuna dalga için 10 MHz, enine dalga için 5 MHz normal prob kullanılmıştır. Numune yüzeyi ile prob arasındaki arayüzde sabit bir temas sıvısı (boyuna dalgalar için makina yağı, enine dalga için bal) kalınlığı elde edebilmek amacı ile numune yüzeyindeki proba sabit bir kuvvet uygulanmıştır. Ses hızı, ultrasonik dalgaların, kalınlık boyunca paralel yüzeyler arasındaki gidiş geliş süresinin ölçülmesiyle belirlenmiştir. 1. ve 2. arka duvar yankılarının ilk tepe noktaları arasındaki geçiş süresi ölçülmüştür (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Osiloskop ekranında yankıların görünümü

Boyuna ses hızı ölçümü ile bulunan ses hızı geçiş süresi μs cinsinden TOFL ile enine ölçümle

bulunan ses hızı geçiş süresi ise TOFT ile ifade edilmiştir. Bulunan bu ses hızı geçiş süreleri ile aşağıdaki (6.4) ve (6.5) bağıntıları yardımıyla, boyuna ve enine ses hızları bulunmuştur.

$$V_L = \frac{2t}{TOFL} \times 1000 \quad (6.4)$$

$$V_T = \frac{2t}{TOFT} \times 1000 \quad (6.5)$$

Burada V_L ve V_T sırasıyla, boyuna ve enine ses hızları (m/s), t numunenin kalınlığıdır (mm) (Fang vd., 1999). Parçaların et kalınlıkları, saatli kumpas yardımıyla 0,02 mm hassasiyette mekanik olarak ölçülmüştür.

Daha sonra (6.6) bağıntısı yardımıyla malzemelerin Poisson oranları μ hesaplanmıştır:

$$\mu = \frac{0,5 - \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2}{1 - \left(\frac{V_T}{V_L} \right)^2} \quad (6.6)$$

Bulunan bu μ yardımıyla elastiklik modülünün hesaplanması için aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır. Bu iki bağıntı ile elde edilen sonuçlar birbirine eşittir.

$$E = 2\rho V_T^2 (1 + \mu) \quad (6.7)$$

$$E = V_L^2 \rho \left[\frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \right] \quad (6.8)$$

Burada E elastiklik modülü (GPa), ρ malzemenin yoğunluğudur (g/cm^3) (Gür, 2001).

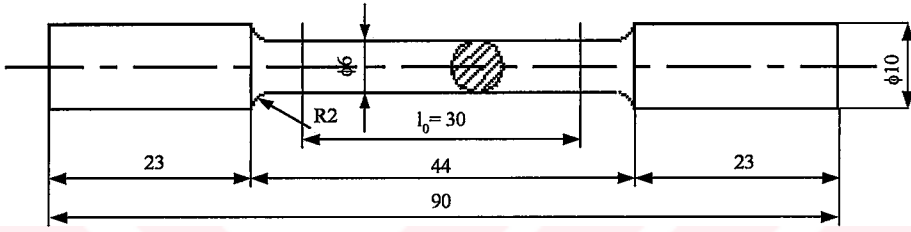
6.8 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Sıkıştırma döküm ve gravite döküm yöntemleriyle üretilmiş ve ekstrüzyonla şekillendirilmiş olan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çekme deneyi, çentik darbe dayanım deneyleri yapılmış ve Brinell sertlik deneyiyle sertlik ölçümleri yapılmıştır.

6.8.1 Çekme Deneyi

6.8.1.1 Numune Hazırlanması

Çekme deneyi için sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş olan bloklardan, gravite döküm yöntemiyle üretilmiş çubuklardan ve daha sonraki sıcak ekstrüzyon işlemi ile elde edilen çubuklardan TS 138 standardına uygun olarak, Şekil 6.5'te görülen boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Aynı şekilde T6 ısıt işlemleri yapılan parçalardan da çekme deneyi çubukları çıkarılmıştır.



Şekil 6.5 Standart çekme deneyi çubuğu

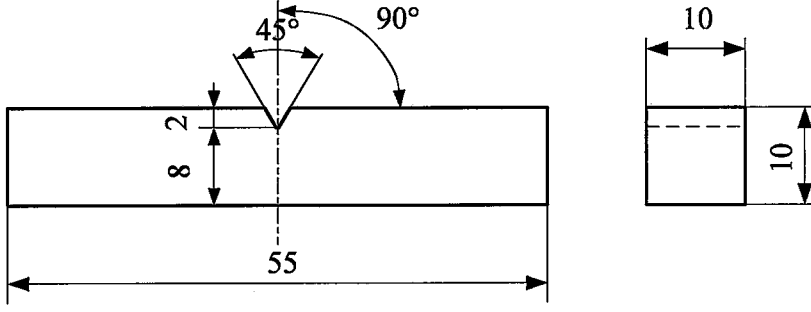
6.8.1.2 Deneyin Yapılışı

Çekme deneyleri, bir Japon firması olan Kyoto'nun, modeli Autograph AG-250kNG olan Shimadzu marka 250 ton kapasiteli çekme makinasında yapılmıştır. Çekme hızı olarak 1 mm/dak seçilmiştir. Her bir kompozit malzeme grubu için yapılmış olan deneylerden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak, kompozit malzemelerin çekme dayanımı belirlenmiştir.

6.8.2 Çentik Darbe Dayanım Deneyi

6.8.2.1 Numune Hazırlanması

Çentik darbe dayanımı için Charpy vurma deneyi yapılmıştır. Bunun için her bir malzeme çeşidinden, TS 269 standardına uygun olarak, Şekil 6.6'daki çentik darbe deney numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 6.6 V çentikli standart Charpy deney parçası

6.8.2.2 Deneyin Yapılışı

Çentik darbe deneyi oda sıcaklığında, 300 J kapasiteli Frank marka cihazda 150 J ile yapılmıştır. Cihazın göstergesinden joule cinsinden kırma işi I_s değerleri alınmıştır. Buna göre aşağıdaki formülden malzemelerin tokluk değerleri hesaplanmıştır.

$$\alpha_K = \frac{I_s}{A_K} \quad (6.9)$$

Burada α_K tokluk (J/cm^2) ve A_K (cm^2) kırılan kesitin alanıdır.

6.8.3 Sertlik Deneyi

6.8.3.1 Numune Hazırlanması

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilmiş olan bloklardan, gravite döküm yöntemiyle üretilmiş çubuklardan ve daha sonraki sıcak ekstrüzyon işlemi ile elde edilen çubuklardan ve T6 ısıtım işlemi yapılan parçalardan numuneler alınmıştır. Paralellik de göz önünde bulundurularak, 320, 400, 600, 800, 1000 mesh'lik zımparalardan geçirilmiş ve yüzey hassasiyeti sağlanmıştır.

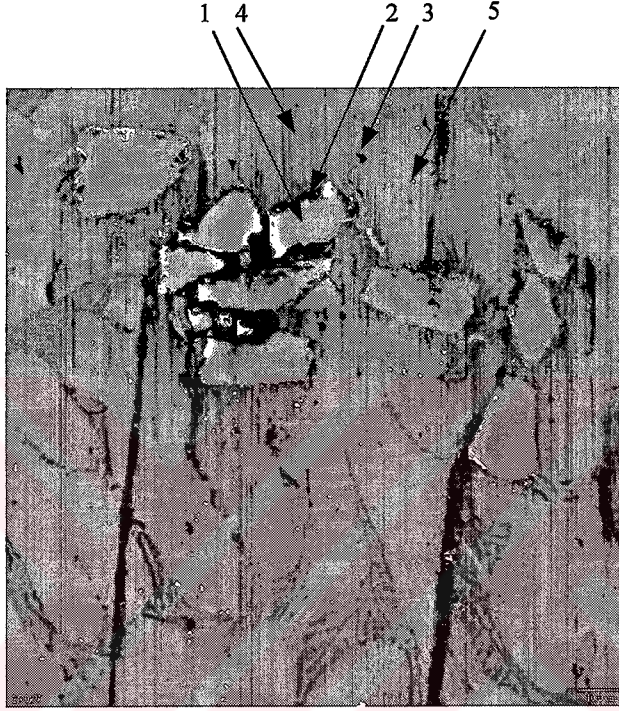
6.8.3.2 Deneyin Yapılışı

Hazırlanan numunelerin sertlikleri, Brinell sertliği cinsinden, Riecherter marka sertlik ölçme cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümü için 625 N'lik yük ve 2,5 mm bilye çapı kullanılmıştır.

7. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

7.1 EDX Analizi Sonuçları

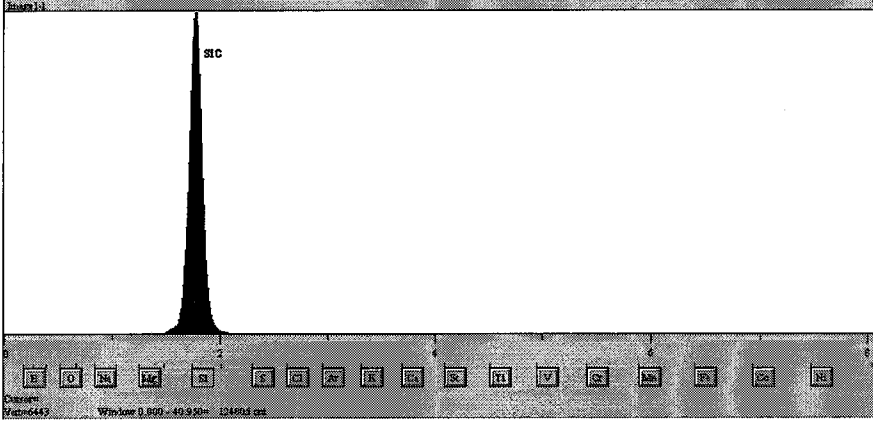
Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü Şekil 7.1’de verilmiştir. Bu alanda, 5 ayrı noktada yapılan EDX analizlerine ait sonuçlar Şekil 7.2-7.6’da gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Sıkıştırma dökümle üretilen %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü

EDX analizi sonucunda, 1 numaralı noktada, ağırlıkça %100 SiC bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 7.2). Matriks malzemesi ile SiC arayüzeyinde alınan 2 numaralı nokta Mg_2Si çöktisidir ve Mg, Si, Al ve O_2 içermektedir (Şekil 7.3). Termodinamik açıdan kararsız bir bölge olan matriks/partikül arayüzeyine, Mg kolaylıkla göç eder. Mg’nin yüksek reaksiyona girme özelliği nedeniyle, Mg_2Si gibi intermetalikler partikül yakınında çökme eğilimi göstermektedirler. Magnezyumca zengin bölgeler, magnezyumca zengin ergiyeğin düşük yüzey basıncı ve iyi ıslatma kabiliyeti ile ilgili olarak, porozite içermemektedirler (Kalkanlı ve Sarıoğlu, 1995). İçyapıdaki küçük siyah bölgeler üzerinde alınan 3 numaralı noktanın analizi sonucunda, Al, Si, Mg ve O_2 ’den meydana gelen Mg_2Si olduğu görülmektedir (Şekil 7.4). 4 numaralı nokta, matriks alaşımını meydana getiren Al ve Si’den ibarettir (Şekil 7.5).

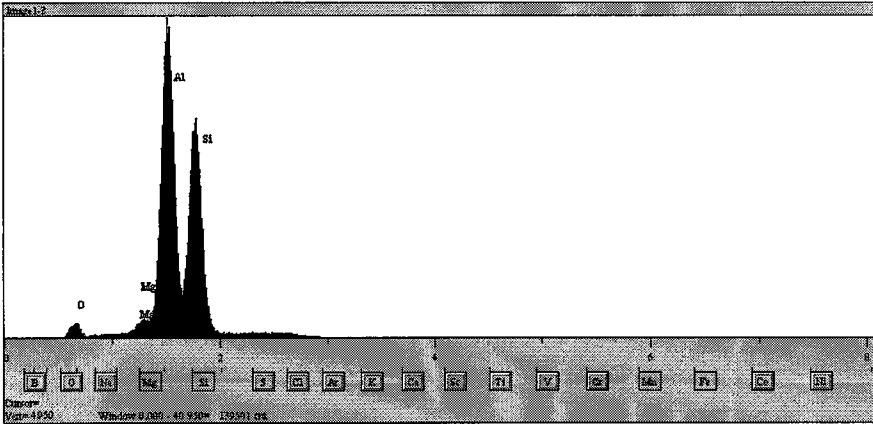
İçyapıda beyaz renkte görülen kısımlar üzerinden alınan 5 numaralı noktanın analizinde ise, demirce zengin β -AlFeSi intermetalik fazının varlığı görülmektedir (Şekil 7.6).



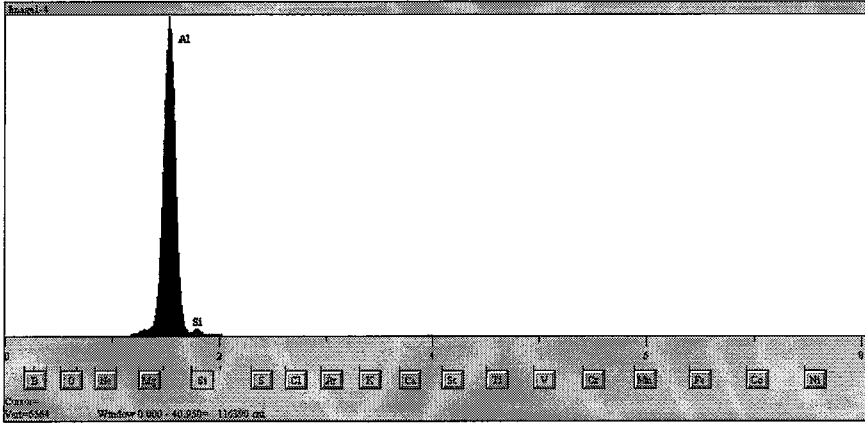
Şekil 7.2 1 numaralı noktadaki EDX analizi



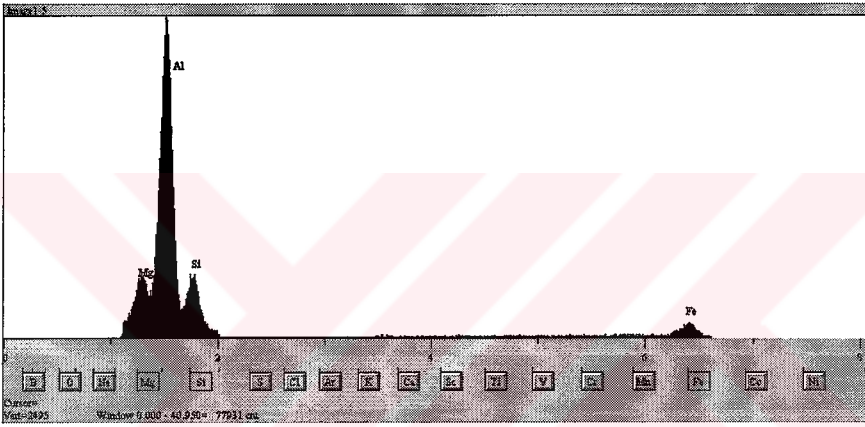
Şekil 7.3 2 numaralı noktadaki EDX analizi



Şekil 7.4 3 numaralı noktadaki EDX analizi



Şekil 7.5 4 numaralı noktadaki EDX analizi



Şekil 7.6 5 numaralı noktadaki EDX analizi

7.2 Mikroyapı Özellikleri

Gravite döküm ve sıkıştırma döküm yöntemleriyle üretilen ve ekstrüzyonla şekillendirilen, ısıt işlemsiz ve T6 ısıt işlemlili kompozit malzemelerin SEM ile çekilen mikroyapıları Şekil 7.7-7.32’de görülmektedir. Mikroyapı çekimleri, geri yansımali görüntü (back scattering electron image) olarak gerçekleştirilmiştir.

Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde yavaş soğuma nedeniyle, katılama sırasında SiC partiküllerin, en son soğuyan ötektik bölgelere itilmesi sözkonusudur. Partiküllerin toplanmasına neden olan bu durum, matriks içerisinde homojen olmayan dağılım ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca, SiC oranının düşük olmasının da homojen bir dağılım sağlamayı zorlaştırdığı görülmektedir. Yüksek oranda SiC içeren kompozit malzemedeki birçok katılama cephesinin var olması, SiC dağılımının homojen olmasını sağlamaktadır (Bindumadhavan vd., 2001). Bu nedenle %5 SiC içeren kompozit malzemenin mikroyapısı,

homojen olmayan SiC dağılımı sergilemektedir (Şekil 7.7). Bunun yanı sıra, gravite döküm yönteminin bir sonucu olarak, takviye ile matriks arayüzey bağının zayıf olması nedeniyle, arayüzeylerde boşluklar oluşmakta, bu da çekme dayanımı değerlerini düşürmektedir. Boşluk oluşumu, takviye oranının artması ile artış göstermektedir. Özellikle partiküllerin toplandığı kısımlarda, takviye ile matriks arasındaki boşluk oluşumu da artmaktadır (Şekil 7.9). SiC oranının %15'e çıkmasıyla, partiküllerin toplanması ve oluşan boşlukların miktarı artmıştır. Bu da yapıdaki porozite yüzdesinin artması anlamına gelmektedir (Şekil 7.11).

Gravite döküm yöntemi ile üretilen kompozit malzemelere uygulanan T6 ısıtma işlemi ile mikroyapıdaki Mg_2Si çökeltileri, difüzyon olayı nedeniyle küresel hale gelmekte, bu da kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin artmasını sağlamaktadır (Şekil 7.8, 7.10 ve 7.12). Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen plaka ve iğne şeklindeki intermetalik bileşikler, T6 ısıtma işlemi sonunda da yapıda kalmakta ancak, keskin köşeler yuvarlandığı için zararlı etkisi azalmaktadır. $\beta-AlFeSi$ intermetalik bileşiklerinin avantajı, döküm sırasında alaşımın kalıba yapışmasını önlemesidir.

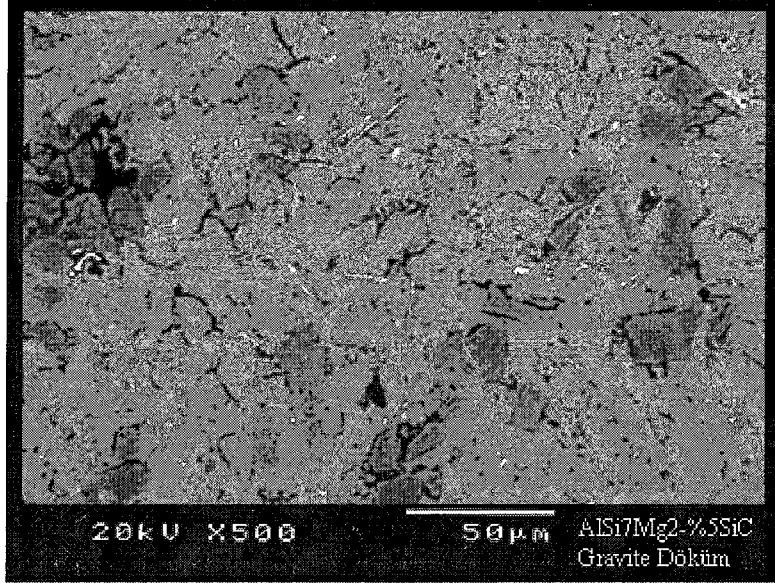
Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks alaşımı ve kompozit malzemelerin mikroyapıları Şekil 7.13-7.20'de verilmiştir. Mikroyapının, Si'li ötektik içeren SiC'li birincil Al dendritlerden oluştuğu görülmektedir. Saf bir birincil Al dendrit ağı oluşturmak için, ergiyikte yüksek soğutma oranından faydalanılmakta ve böylece daha homojen bir SiC dağılımı elde etmek mümkün olmaktadır (Attia, 1993; Lee vd., 1996). SiC partikül ilavesi, ikincil fazı oluşturan Si fazının dağılımını ve morfolojisini etkilemekte ve demirce zengin intermetalik fazın hacimsel oranını değiştirmektedir (Buarzaiga ve Thorpe, 1994). Matriks alaşımının mikroyapısında, Mg_2Si bileşiklerinin bölgesel olarak toplandığı ve Çin figürü şeklinde ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 7.13). Sıkıştırma döküm yönteminde uygulanan basınç nedeniyle, matriks malzemesi ile SiC takviye arayüzeyinde boşluk oluşumu oldukça azalmaktadır (Lee vd., 1996). Böylece porozitenin az olması, gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelere oranla, çekme dayanımı, çentik darbe dayanımı ve sertliğin yükselmesini sağlamaktadır. Matriks alaşımında Mg_2Si bileşiği yapı içerisinde bölgesel toplanmalar göstermesine rağmen, kompozit malzemelerde bir ağ şeklinde düzgün bir dağılım göstermektedir. SiC oranının artması, komşu tane sayılarının da artmasına neden olmaktadır. Bu da sıkıştırma dökümde uygulanan basınç nedeniyle, yüksek SiC oranlarında, SiC partiküllerin çatlamasına, hatta bazı bölgelerde parçalanmasına yol açmaktadır (Şekil 7.15 ve 7.17). %15 SiC içeren sıkıştırma döküm mikroyapısında görülen bu partikül çatlamaları ve parçalanmaları (Şekil 7.19), kompozit malzemenin çekme dayanımını düşürmektedir. Yapıda

plakalar halinde veya iğne şeklinde bulunan demirce zengin β -AlFeSi fazı nedeniyle, malzemenin sünekliği olumsuz etkilenmekte ve bu nedenle uzama değerleri düşmektedir.

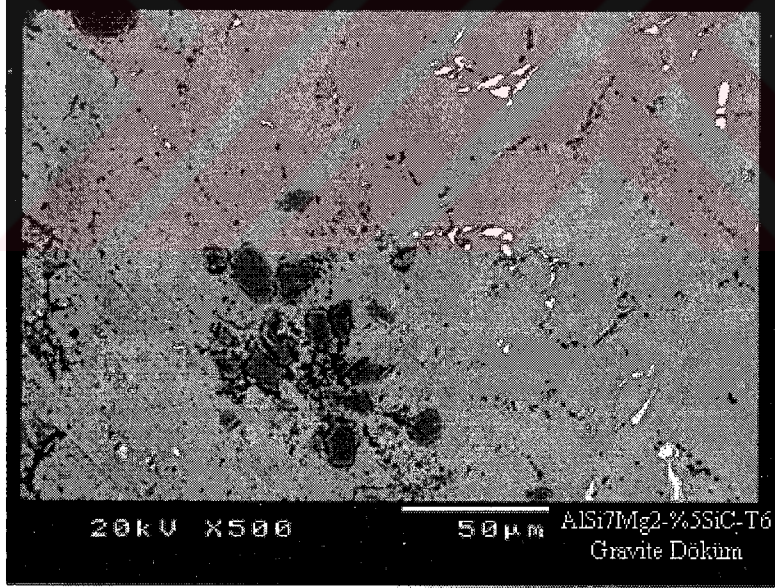
Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks malzemesine uygulanan T6 ısıtıl işlemi ile (Şekil 7.14), ısıtıl işlemsiz mikroyapıda bölgesel olarak toplanan Mg_2Si bileşikleri, yapı içerisinde düzenli bir ağ şeklinde dağılmakta ve difüzyon nedeniyle keskin köşelerden kurtulup küresel hale gelmektedir (Şekil 7.16, 7.18 ve 7.20).

Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelerde ekstrüzyon yönüne dik kesitteki mikroyapılar Şekil 7.21-7.26'da, ekstrüzyon yönüne paralel kesitteki mikroyapılar ise Şekil 7.27-7.32'de gösterilmektedir. Spigarelli vd.'nin (2002) Al_2O_3 partikülle takviyeli 6061 Al alaşımı matriksli kompozit malzemeye uyguladığı sıcak ekstrüzyon işleminde olduğu gibi, bizim çalışmamızda da mikroyapı, yeniden billurlaşmış, eş eksenli ince tanelerden ve hem tane sınırlarında hem de tane içlerinde yerleşen nispeten yüksek oranda çökeltiden meydana gelmektedir. Sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanması ile yapıdaki partikül dağılımının, sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelere oranla daha homojen bir hale geldiği görülmektedir (Şekil 7.21, 7.23 ve 7.25) (Nguyen vd., 1994; Kang vd., 2000; Borrego vd., 2002). Şekillendirme işleminde basınç uygulanması ile partikül kırılmaları oluşmaktadır. %15 SiC içeren kompozit malzemede daha yoğun olarak ortaya çıkan partikül kırılmaları nedeniyle, çekme dayanımı ve sertlik değerleri düşmektedir.

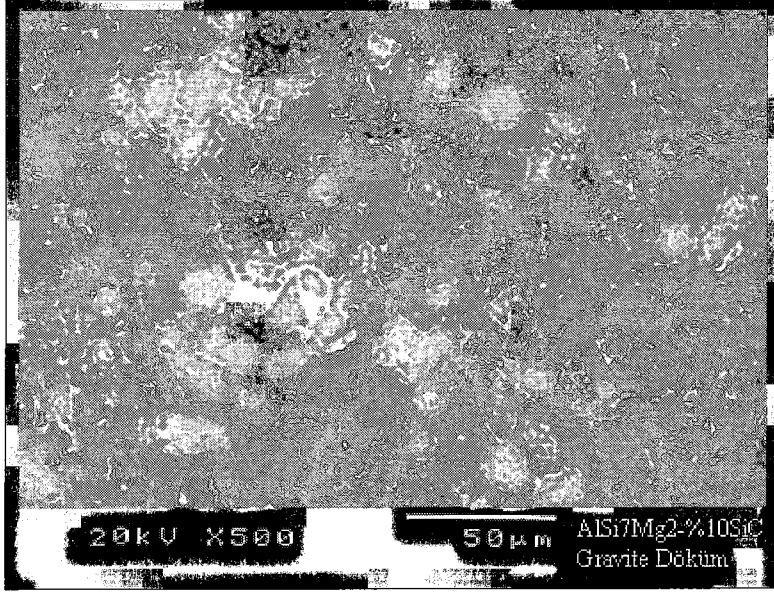
Tokaji vd. (1999) ve Nguyen vd.'nin (1994) yaptığı çalışmalarda, sıcak ekstrüzyon işlemi sonucunda, partiküllerin ekstrüzyon yönünde yönlendiği görülmüştür. Çalışmamızda da ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapılara bakıldığında, ekstrüzyon işleminin bir sonucu olarak, imal edilen çubuğun eksenli boyunca SiC partiküllerinin yönlendiği görülmektedir. Ayrıca Şekil 7.30'da görüldüğü gibi, ekstrüzyon işlemi, mikroyapıda bantlaşma oluşumuna neden olabilmektedir. Partikül kırılmaları nedeniyle oluşan boyut farklılıkları nedeniyle, kompozit malzeme içerisindeki partiküllerin aynı boyutta olmaması, bantlaşma oluşumuna sebep olmakta ve malzemelerin anizotropik özellikler göstermesine yol açmaktadır.



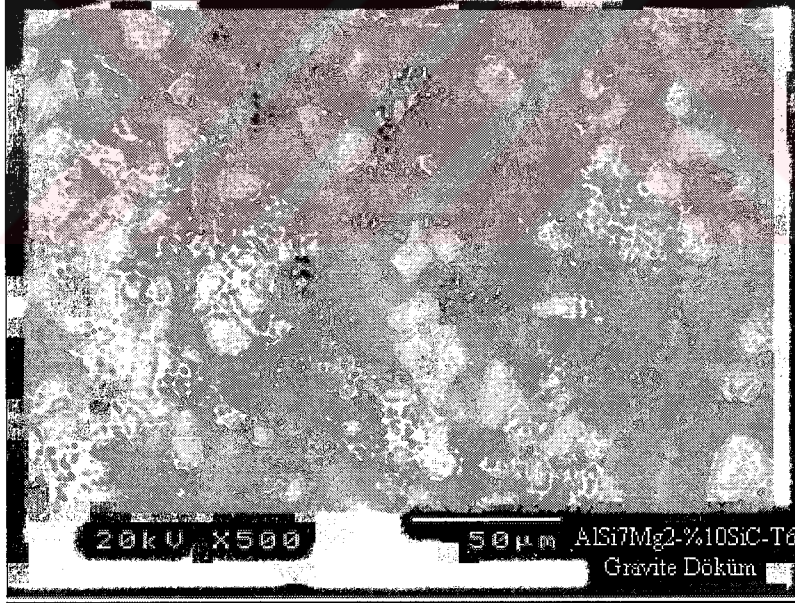
Şekil 7.7 Gravite döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



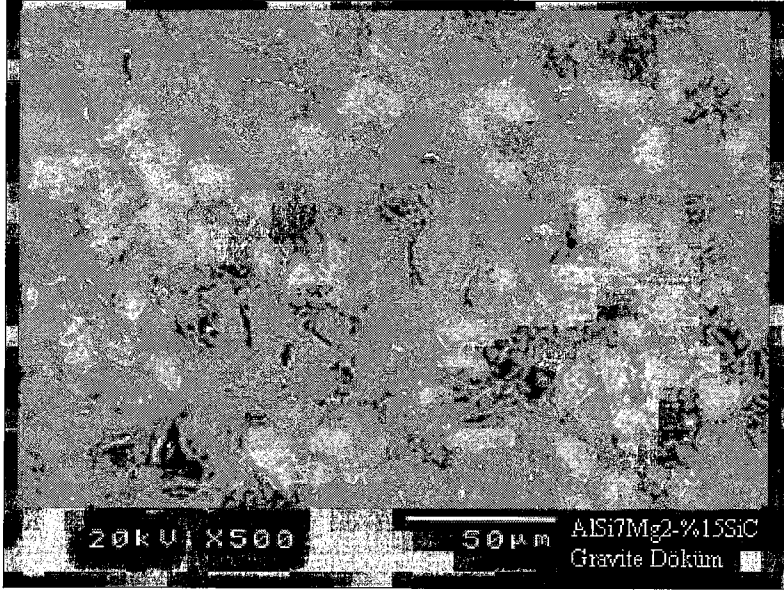
Şekil 7.8 Gravite döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıt işlemleri uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



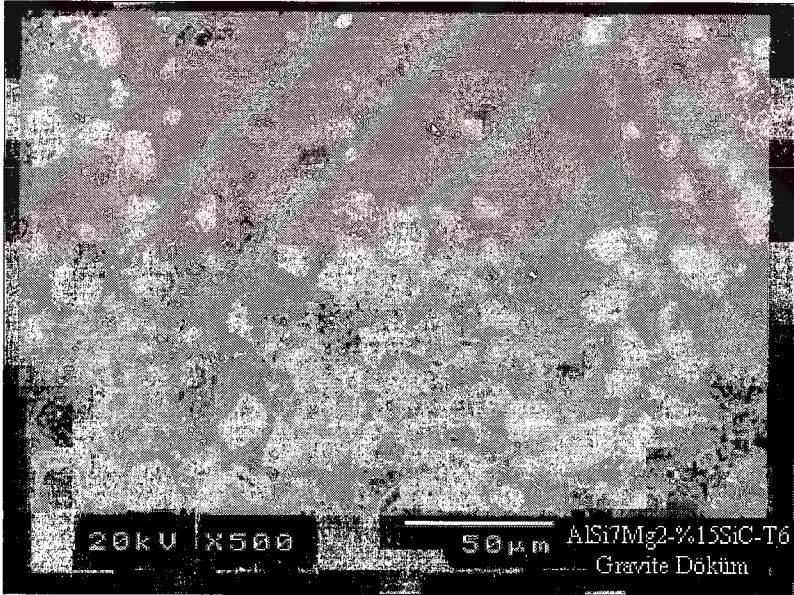
Şekil 7.9 Gravite döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



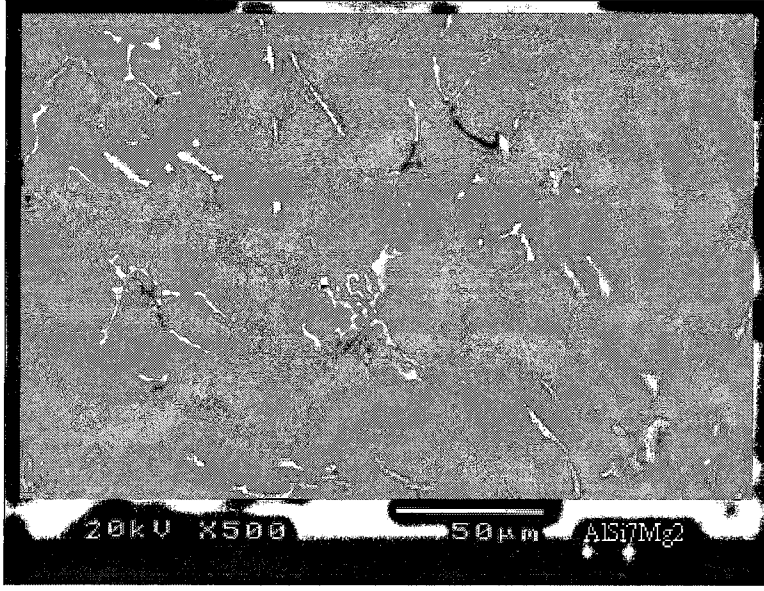
Şekil 7.10 Gravite döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıt işlemleri uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



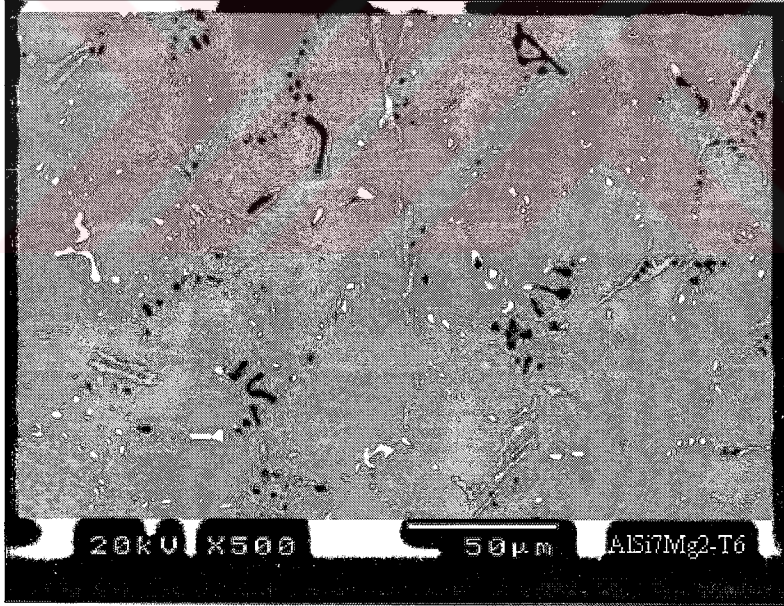
Şekil 7.11 Gravite döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



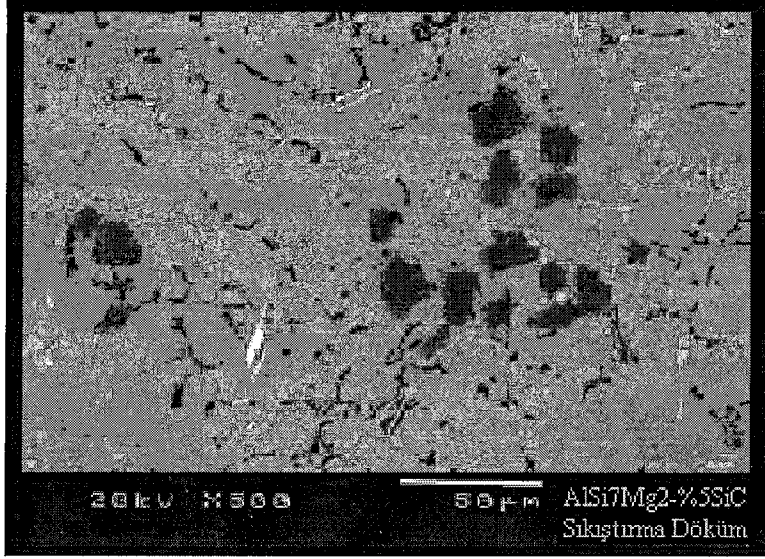
Şekil 7.12 Gravite döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıt işlemleri uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



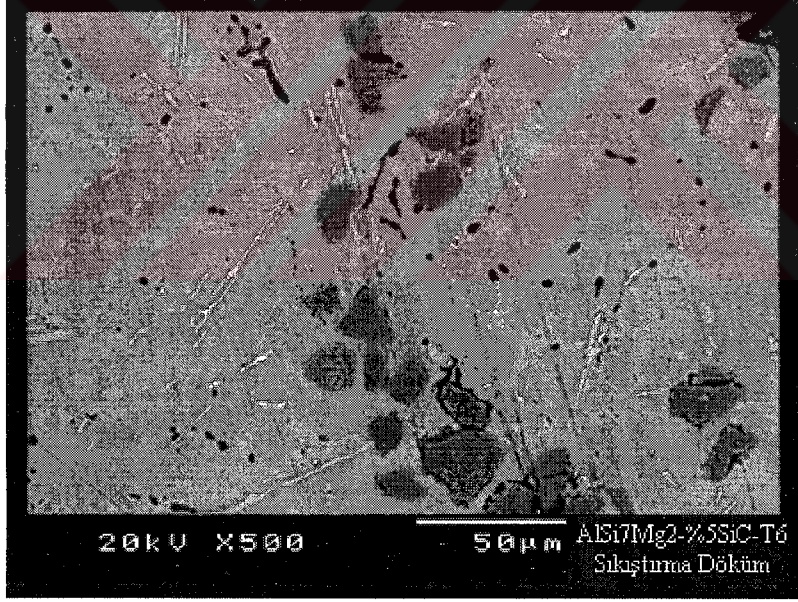
Şekil 7.13 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen AlSi7Mg2 alaşımının SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



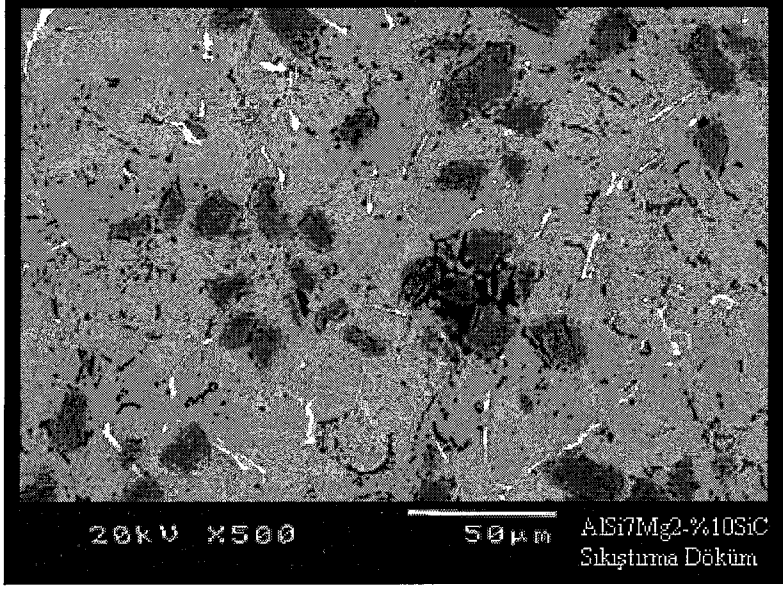
Şekil 7.14 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıt işlemleri uygulanan AlSi7Mg2 alaşımının SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



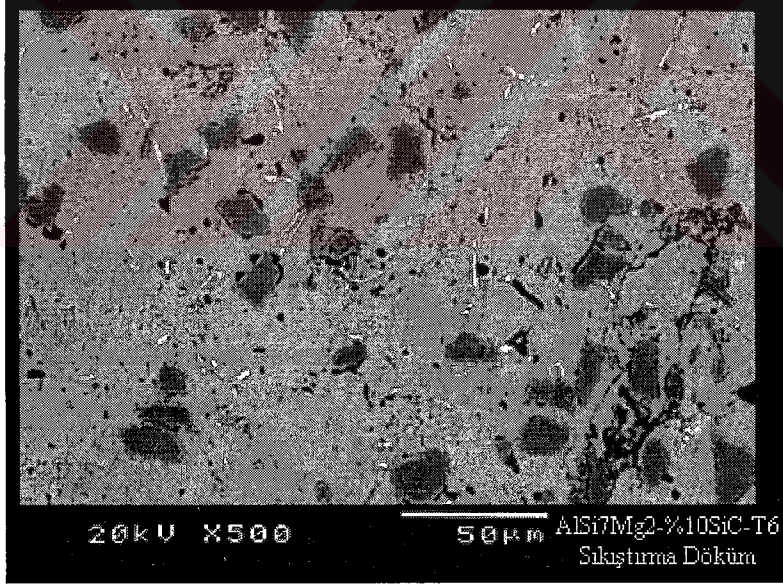
Şekil 7.15 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



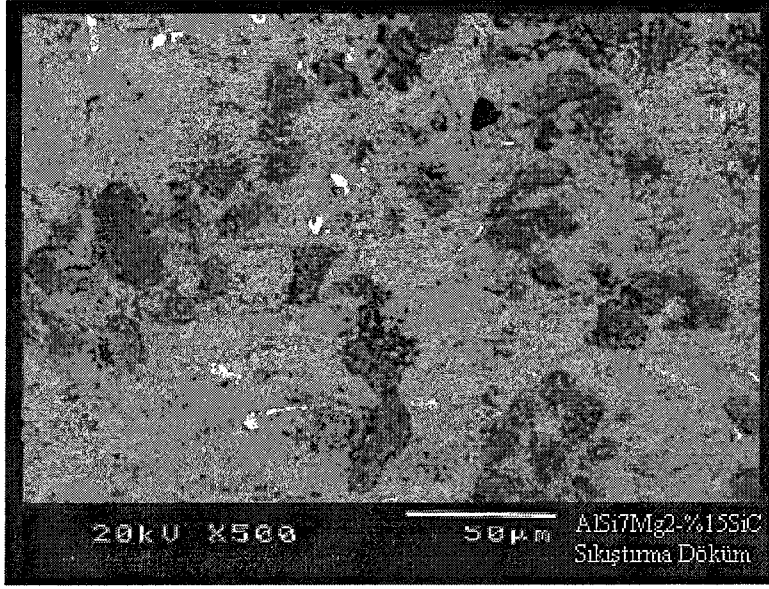
Şekil 7.16 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıt işlemleri uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



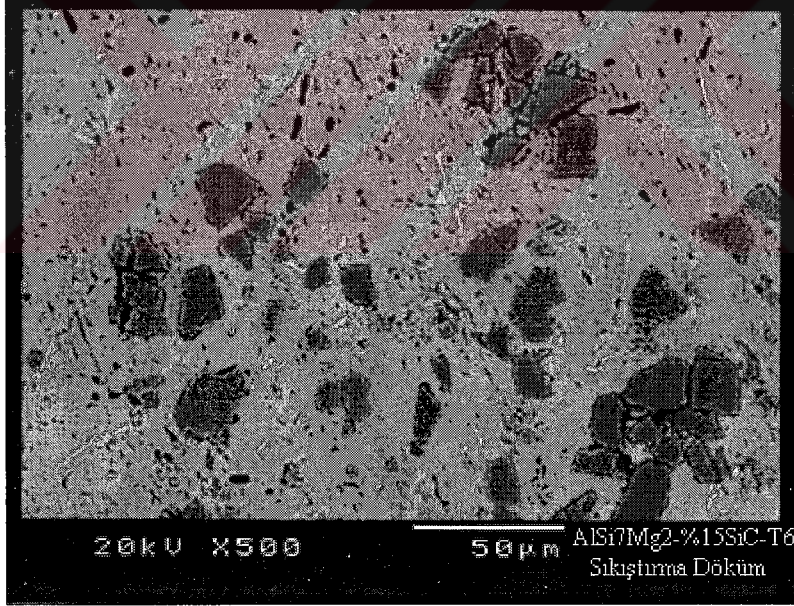
Şekil 7.17 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



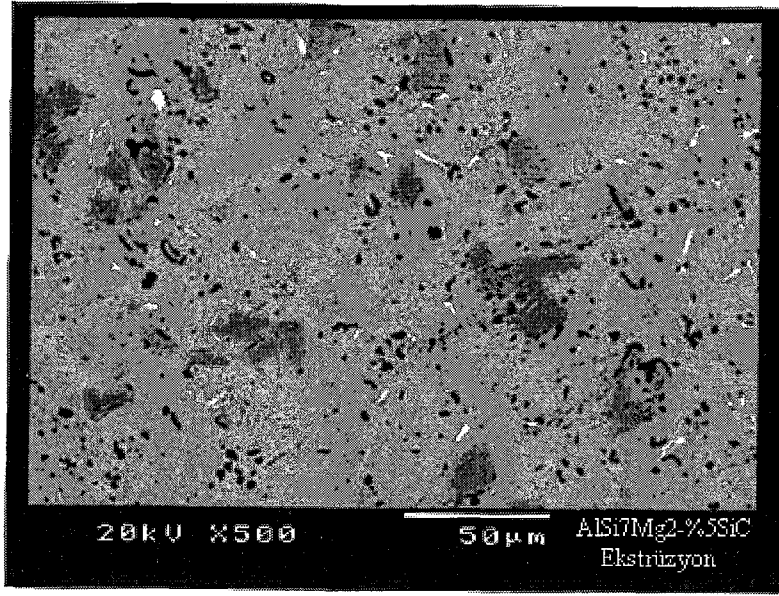
Şekil 7.18 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıt işlemleri uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



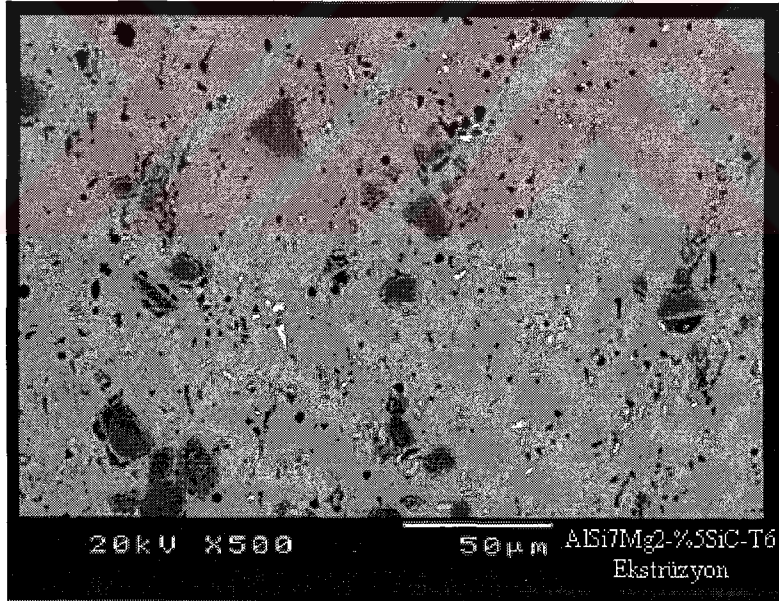
Şekil 7.19 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



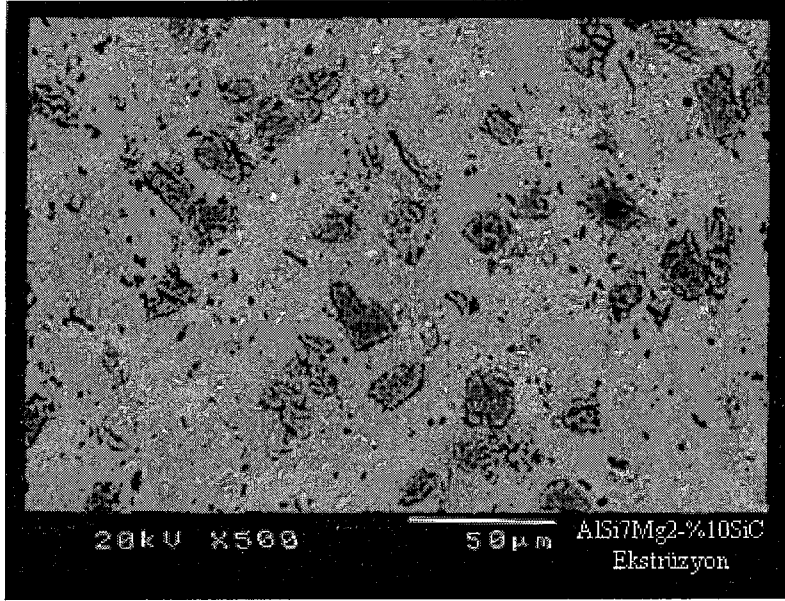
Şekil 7.20 Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve T6 ısıt işlemleri uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



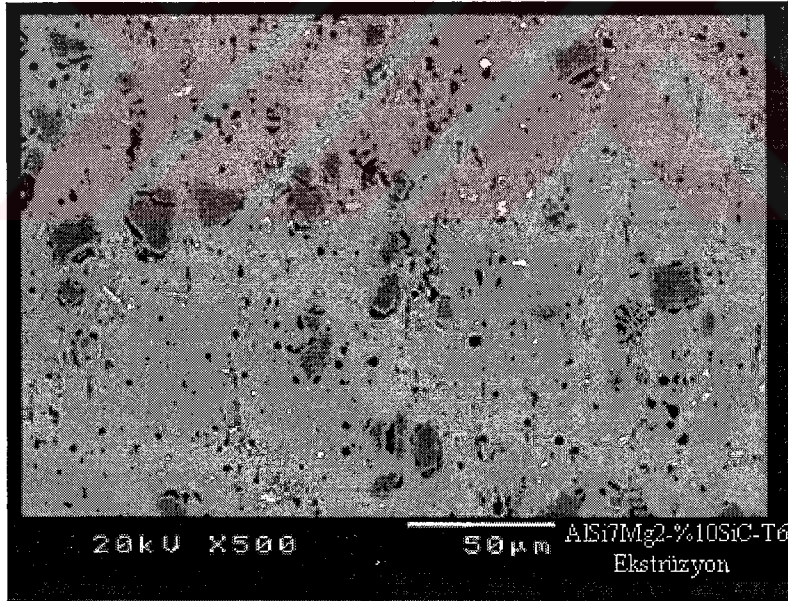
Şekil 7.21 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



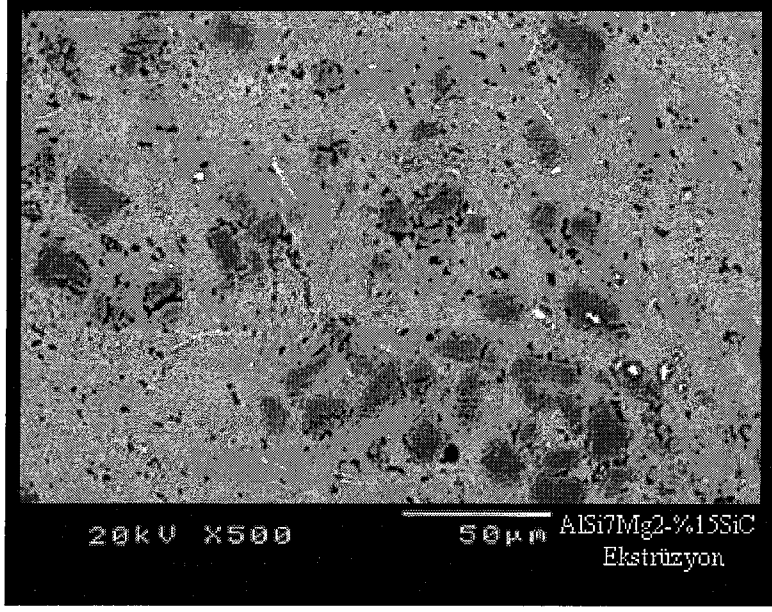
Şekil 7.22 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



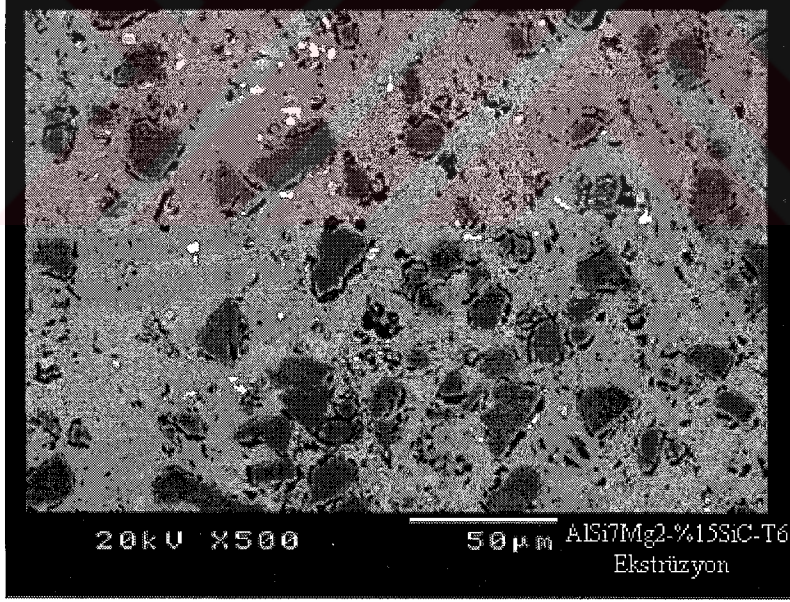
Şekil 7.23 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



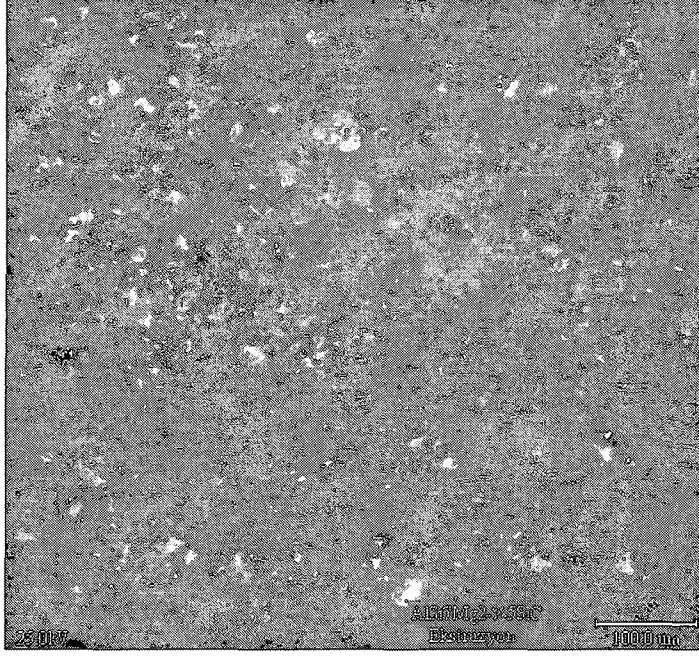
Şekil 7.24 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtım işlemi uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



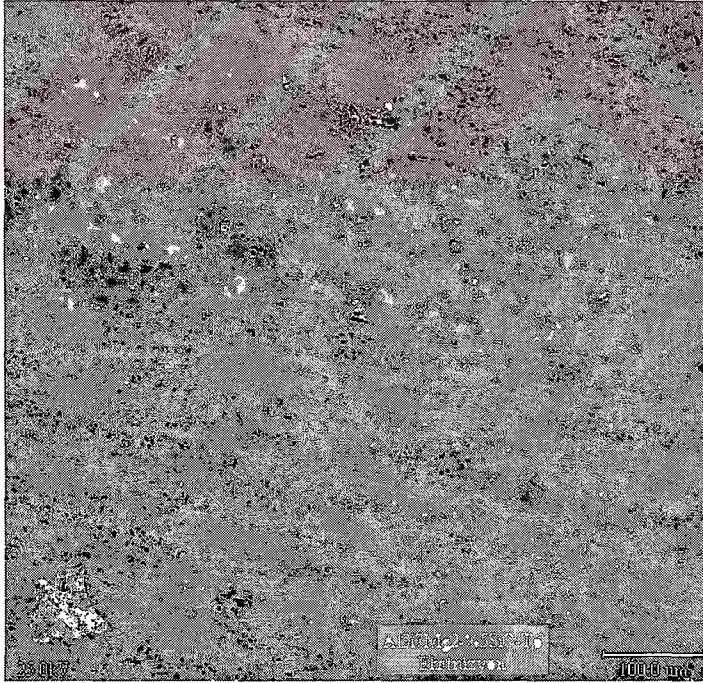
Şekil 7.25 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



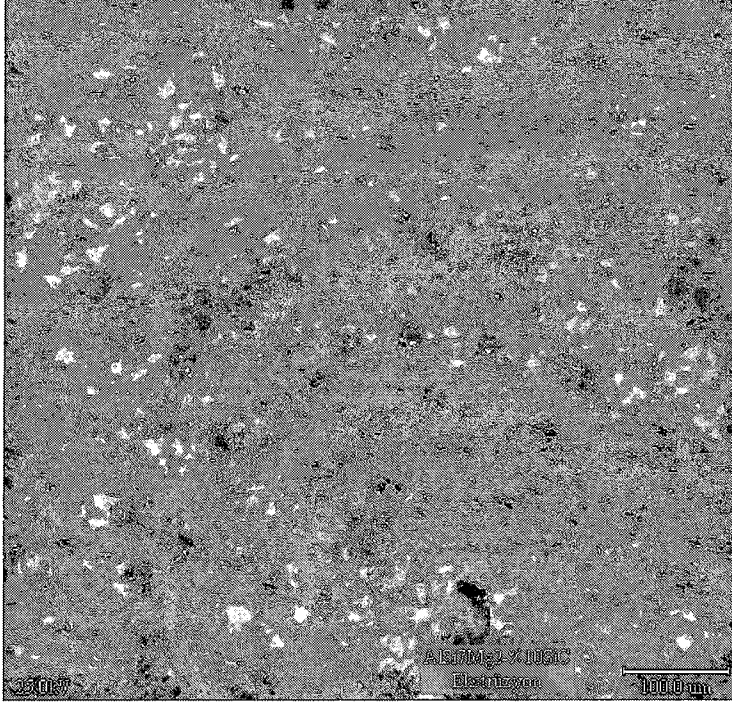
Şekil 7.26 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıt işlemi uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



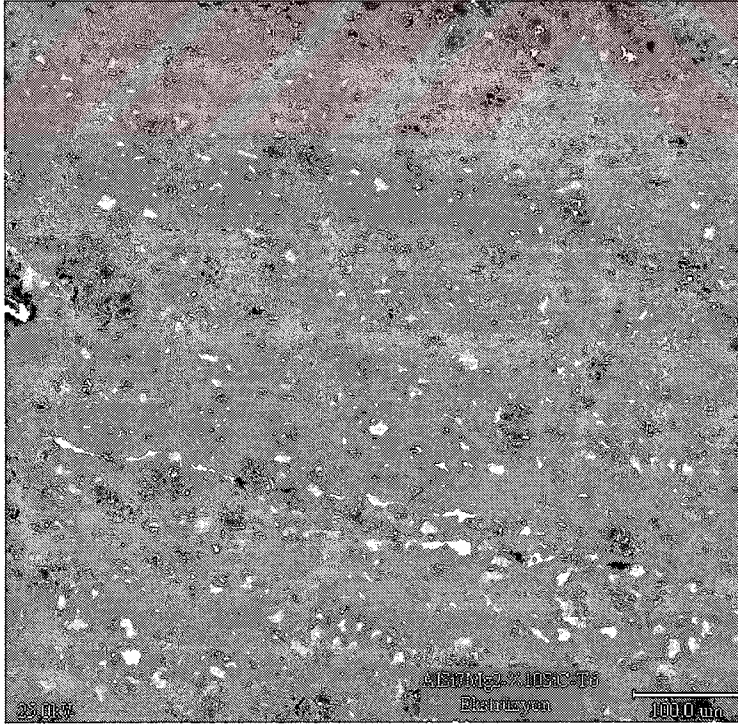
Şekil 7.27 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



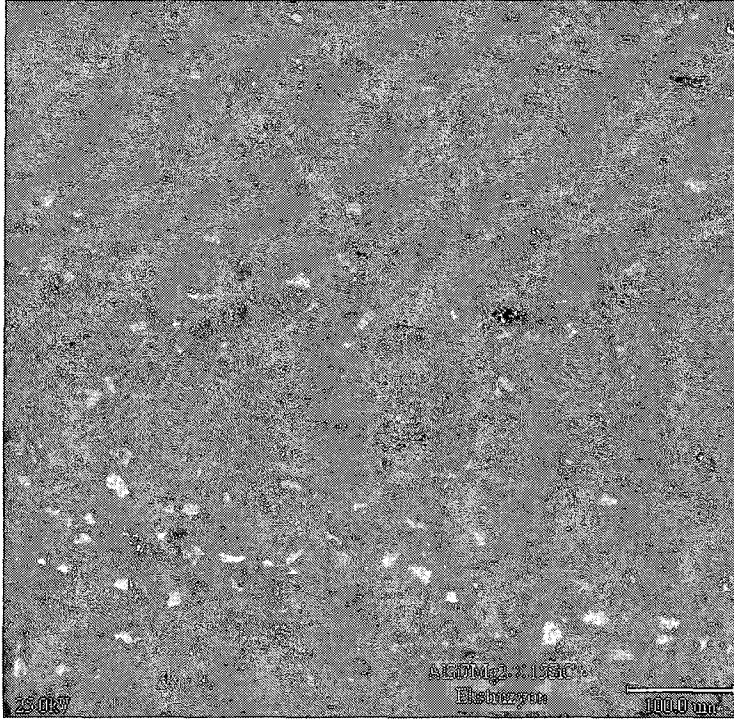
Şekil 7.28 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıt işlemi uygulanan, ağırlıkça %5 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



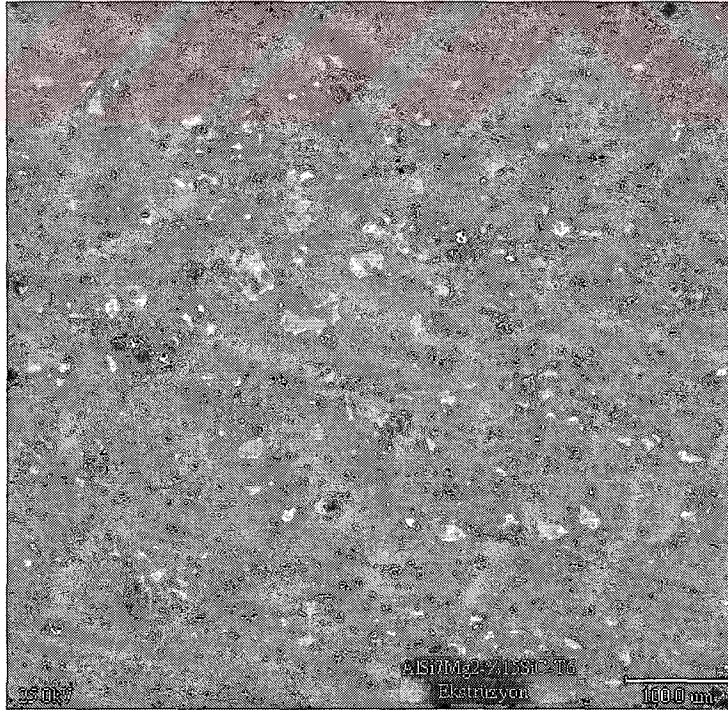
Şekil 7.29 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



Şekil 7.30 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıtma işlemi uygulanan, ağırlıkça %10 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



Şekil 7.31 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)



Şekil 7.32 Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen ve T6 ısıt işlemi uygulanan, ağırlıkça %15 SiC içeren kompozit malzemenin ekstrüzyon yönüne paralel kesitte SEM’de çekilmiş mikroyapı görüntüsü (BSEI)

7.3 Yoğunluk ve Porozite Değerleri

Karışımlar kuralı yardımıyla $AlSi7Mg2$ matriks alaşımının yoğunluğu $2,670 \text{ g/cm}^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu yoğunluk değeri yardımıyla, çalışmamız için üretilen kompozit malzemelerdeki ağırlıkça SiC oranlarının hacimsel oran olarak karşılıkları ve bu oranlara göre teorik yoğunlukları tespit edilmiştir (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1 Ağırlıkça SiC oranlarının hacimsel oran olarak karşılıkları

Ağırlıkça SiC oranı (%)	Hacimsel SiC oranı (%)	Teorik yoğunluk (g/cm^3)
5	4,80	2,695
10	9,74	2,720
15	14,58	2,744

Ayrıca, Leica marka Image Analyzer cihazı yardımıyla sıkıştırma döküm numunelerde tespit edilen bölgesel partikül oranları, ortalama değerleriyle birlikte Çizelge 7.2’de verilmiştir. Numunelerin mikroyapı görüntülerinde, belli bölgelerde SiC partiküllerinin toplandığı görülmektedir. Partikül oranlarının bölgesel olarak farklılık göstermesi, kompozit malzemelerin üretimi sırasında karıştırmanın yeterince iyi olmamasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 7.2 Image Analyzer ile tespit edilen bölgesel SiC partikül oranları

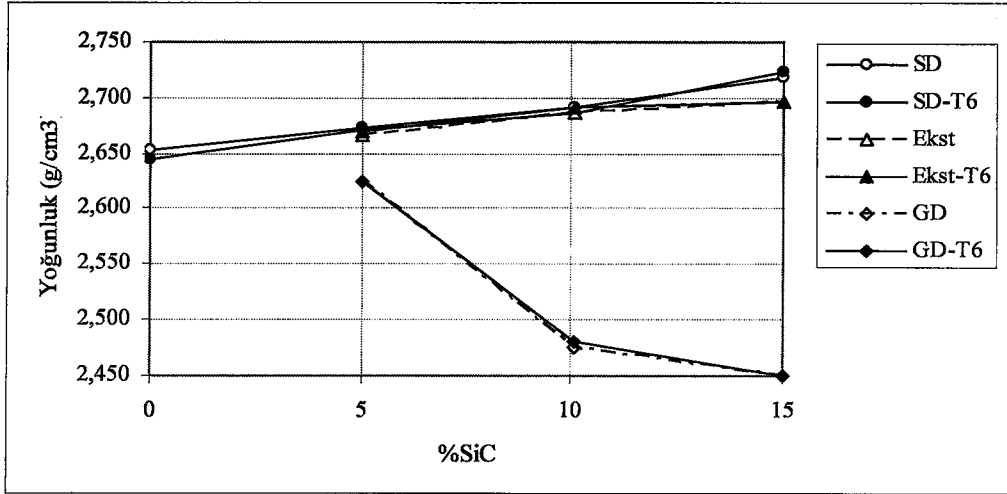
	%5SiC	%10SiC	%15SiC
Ölçüm No	Ölçülen %SiC	Ölçülen %SiC	Ölçülen %SiC
1	3,77	6,12	8,57
2	4,10	6,41	8,97
3	4,12	8,19	11,47
4	4,20	8,41	12,13
5	4,36	8,72	13,30
6	4,53	9,60	14,76
7	5,25	9,65	16,06
8	5,65	10,12	16,19
9	6,63	10,85	16,40
10	7,22	17,67	27,66
Ortalama	4,98	9,57	14,55

Archimedes prensibi ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen yoğunluk değerleri ve porozite yüzdeleri Çizelge 7.3’te verilmiştir.

Çizelge 7.3 Deneysel yoğunluk ve hesaplanan porozite değerleri

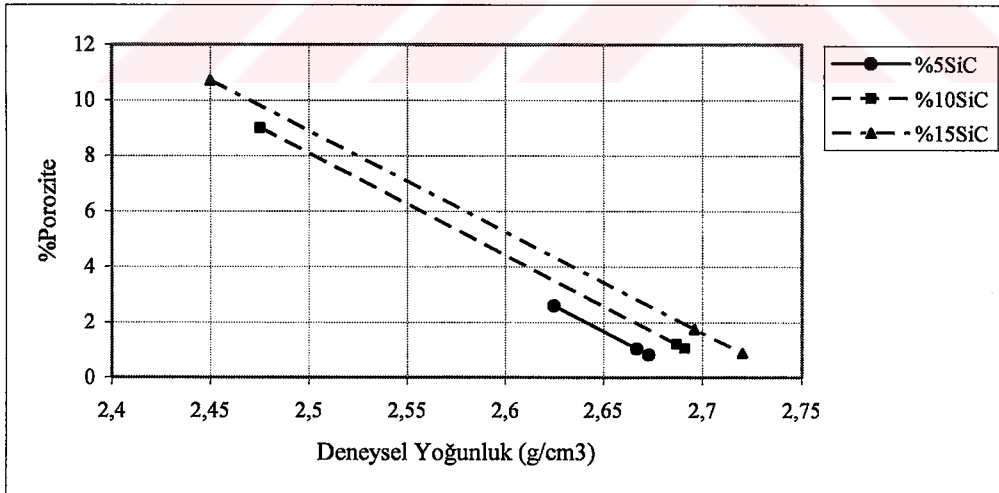
	Malzeme	Hacimsel SiC oranı (%)	Deneysel yoğunluk (g/cm ³)	Porozite (%)
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2	0	2,652	0,67
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	4,80	2,673	0,82
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	9,74	2,691	1,07
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	14,58	2,720	0,88
Gravite Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	4,80	2,625	2,6
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	9,74	2,475	9,01
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	14,58	2,450	10,71
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	4,80	2,667	1,04
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	9,74	2,687	1,21
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	14,58	2,696	1,75
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2	0	2,645	0,94
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	4,80	2,672	0,85
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	9,74	2,687	1,21
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	14,58	2,723	0,77
Gravite Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	4,80	2,625	2,6
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	9,74	2,480	8,82
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	14,58	2,450	10,71
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	4,80	2,670	0,93
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	9,74	2,692	1,03
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	14,58	2,696	1,75

Kompozit malzemelerin deneysel yoğunluklarının, ağırlıkça SiC oranı ile değişimleri Şekil 7.33'te görülmektedir. Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde, SiC oranının artışıyla boşluk oluşumu artmış ve deneysel yoğunluklar düşmüştür. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen ve ekstrüzyon ile şekillendirilen kompozit malzemelerin yoğunluklarının, SiC oranının artışıyla arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.33 Kompozit malzemelerin deneysel yoğunluk değerleri

Kompozit malzemelerin yoğunluklarının porozite yüzdesi ile değişimleri Şekil 7.34'te görülmektedir. Grafik incelendiğinde, %5, %10, %15 SiC oranlarında, gravite döküm ve sıkıştırma döküm yöntemleriyle üretilen ve ekstrüzyon ile şekillendirilen üç farklı bileşimdeki kompozit malzemelerde; deneysel yoğunluk değerlerinin minimum olduğu koşullarda porozitenin maksimum olduğu, deneysel yoğunluğun maksimum olduğu durumda ise porozitenin minimum olduğu görülmektedir.

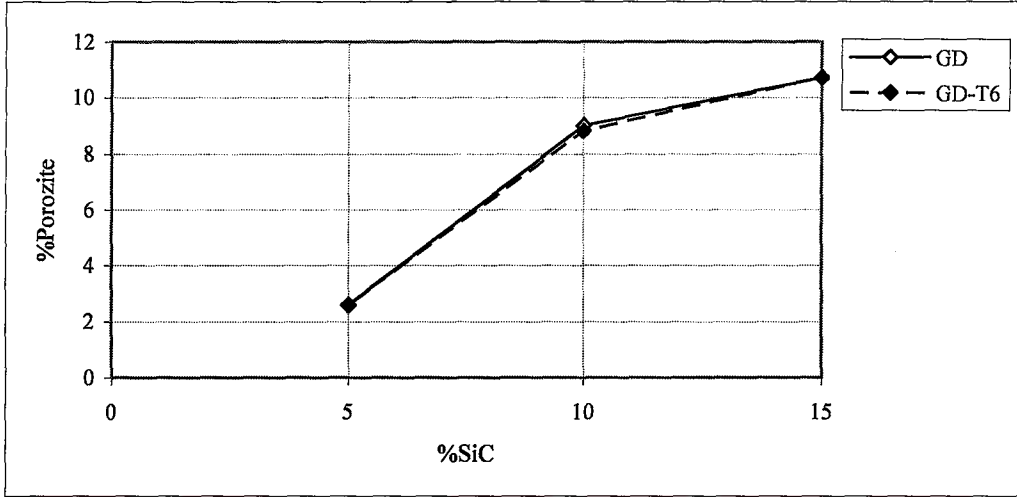


Şekil 7.34 %Porozite değerlerinin deneysel yoğunluk değerleri ile değişimi

Kompozit malzemelerde SiC oranının artması ile %porozite değerlerindeki değişimler Şekil 7.35, 7.36 ve 7.37'de görülmektedir.

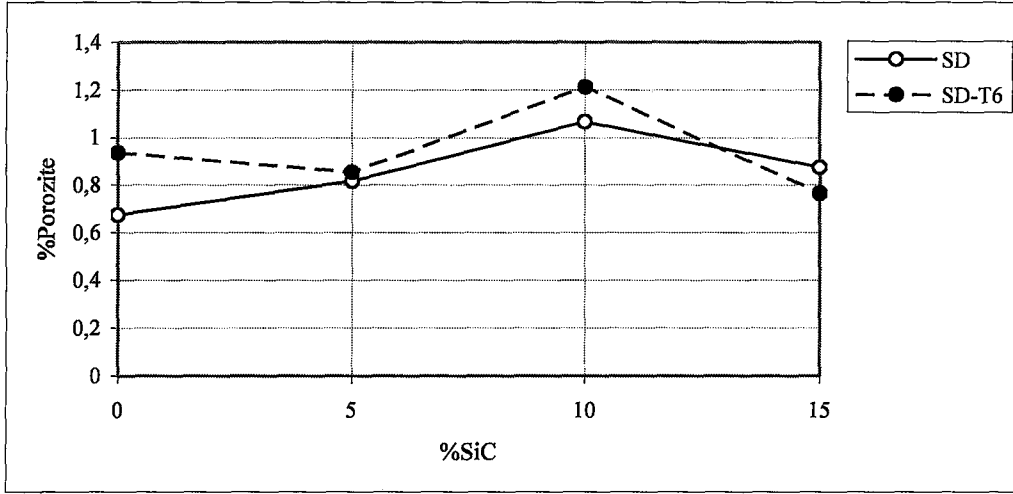
Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde, matriks malzemesi ile takviye

malzemesi arayüzeyindeki bağın zayıf olması nedeniyle porozite yüzdeleri çok yüksek çıkmıştır. Porozite yüzdeleri, SiC oranının artışıyla artmış; en yüksek porozite yüzdesi, %15 SiC içeren numunede 10,71 olarak tespit edilmiştir. Uygulanan T6 ısıt işlemleri porozite miktarlarında önemli değişimlere sebep olmamıştır (Şekil 7.35).



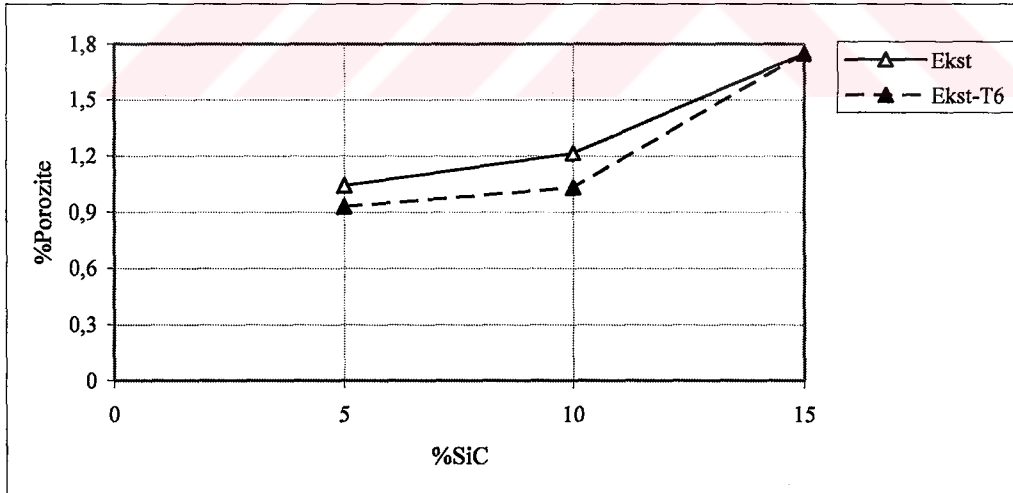
Şekil 7.35 Isıl işlemsiz ve T6 ısıt işlemleri uygulanan gravite döküm numunelerinde %porozite değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde katılma esnasında uygulanan yüksek basıncın etkisiyle, matriks ile takviye arayüzeyinde boşluk oluşumu azalmakta, bu nedenle porozite yüzdeleri, gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelere oranla düşmektedir (Lee vd., 1996). Yaptığımız çalışmada bu düşüş; %5, %10 ve %15 SiC içeren kompozit malzemelerde sırasıyla, %69, %88 ve %92 olmuştur. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks malzemesinde porozite yüzdesi 0,67 iken, %5 SiC içeren kompozit malzemede %21'lik bir artışla 0,82'ye, %10 SiC içeren kompozit malzemede ise yaklaşık %58'lik bir artışla 1,07'ye yükselmiştir. Dolayısıyla, SiC oranının artmasıyla, literatürdeki incelenen çalışmalarda olduğu gibi, porozite yüzdeleri artmıştır. Bunun nedeni, mikroyapıda homojen olarak dağılım göstermeyen SiC partiküllerinin biraraya toplanmasıyla aralarında boşlukların oluşmasıdır. Uygulanan T6 ısıt işlemleri ile %15 SiC içeren kompozit malzemede porozite değeri %13 düşerken, diğerlerinde artmıştır. Bu artış matriks malzemesinde yaklaşık %39 olmuştur (Şekil 7.36).



Şekil 7.36 Isıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde %porozite değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelerde porozite yüzdesi, sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelere oranla artmıştır. Yine ekstrüzyonda da SiC oranının artmasıyla, porozite yüzdeleri artmıştır. SiC oranı %5'ten %15'e artarken, yapıdaki porozite yüzdesinin 1,04'den %65'lik bir artışla 1,75'e çıktığı saptanmıştır (Şekil 7.37). T6 ısıl işlemi uygulanması ile porozite yüzdesinde önemli bir değişim olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 7.37 Isıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde %porozite değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Bindumadhavan vd.'nin (2001a), ergiyik karıştırma tekniğiyle ürettikleri %15 SiC takviyeli A356 Al alaşımı matriksli kompozit malzemede yaptıkları porozite ölçümleri sonucunda, hacimsel SiC oranının artışıyla porozite yüzdesinin yükseldiğini tespit etmişlerdir. Üretim

esnasında biraz daha uzun zaman karıştırma işlemi yapılan daha yüksek hacimsel SiC oranına sahip kompozit malzemelerde bunun sebebi, ergiyik metal karışımına giren hava baloncukları miktarının fazla olmasıdır. Kompozit malzemeye katılan SiC ile kompozit malzemedeki porozite miktarı arasında, pozitif bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Bu ilişkinin ikinci dereceden denklemi,

$$P = 2,19 + 0,36S - 0,006S^2 \quad (7.1)$$

olarak çıkmaktadır. Burada, P dökümdeki porozite yüzdesi, S ise hacimsel %SiC oranıdır. Bu denklem, elde edilen verilerle 0,9998'lik bir bağıntı katsayısıyla uygunluk sağlamaktadır.

7.4 Ultrasonik Ses Hızı Ölçümü Yardımıyla Belirlenen Elastiklik Modülü

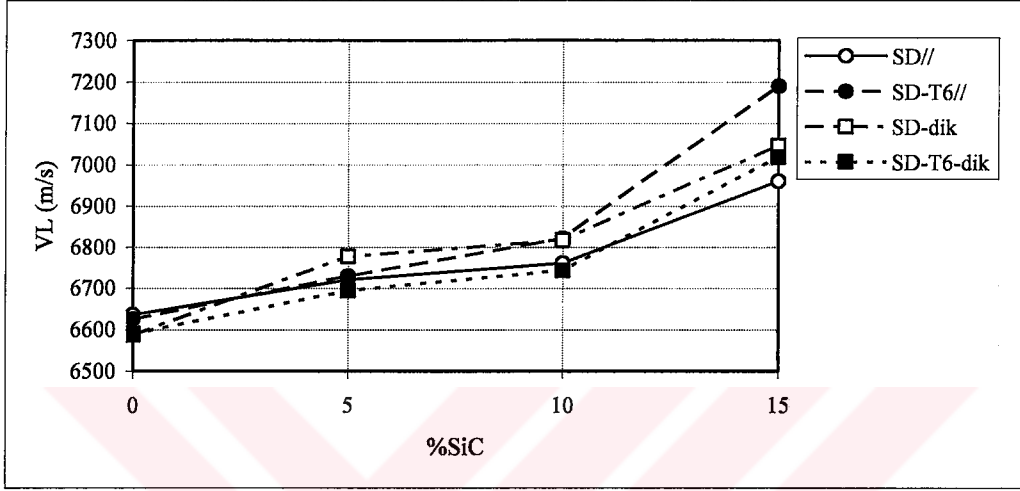
Ultrasonik ses hızı ölçümü ile belirlenen elastiklik modülleri Çizelge 7.4'te verilmiştir. Paralel yön, sıkıştırma döküm bloklarının ve ekstrüzyon çubuklarının enine kesitinden alınan numunelerdeki ölçümleri, dik yön ise boyuna kesitteki ölçümleri belirtmektedir.

Çizelge 7.4 Ultrasonik yöntemle ölçülen ses hızları ve elastiklik modülleri

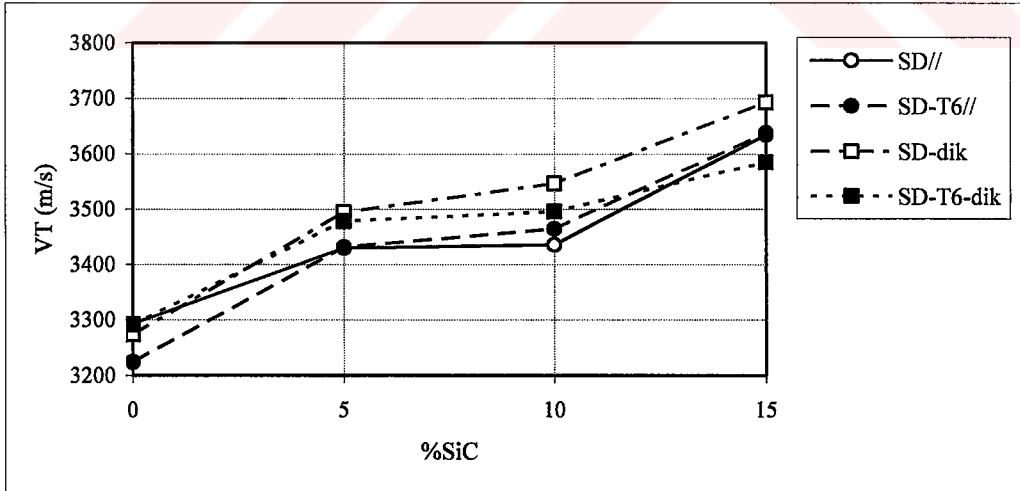
	Malzeme	Ağırlıkça SiC oranı (%)	Paralel yönde V_L (m/s)	Dik yönde V_L (m/s)	Paralel yönde V_T (m/s)	Dik yönde V_T (m/s)	Poisson oranı (μ)	E (GPa)
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2	0	6636	6588	3293	3274	0,16	66,54
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	6721	6778	3429	3494	0,18	75,49
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	6762	6817	3435	3546	0,18	77,24
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	6960	7046	3635	3693	0,19	86,96
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	6696	6605	3462	3354	0,18	73,03
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	6759	6931	3571	3620	0,19	82,79
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	6899	7010	3547	3513	0,18	78,69
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2	0	6626	6591	3224	3292	0,17	65,31
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	6730	6695	3431	3478	0,18	75,37
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	6822	6744	3464	3495	0,18	76,53
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	7190	7018	3638	3585	0,18	83,24
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	6687	6696	3327	3353	0,17	69,07
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	6827	6879	3608	3625	0,19	83,99
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	6945	6828	3525	3520	0,18	78,63

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen bloklardan alınan numuneler üzerindeki boyuna ve enine ultrasonik ses hızı ölçümleri sonucunda, artan SiC partikül oranı ile ses hızlarının arttığı

tespit edilmiştir. Uygulanan T6 ısıt işlemleri, eksene paralel olarak yapılan boyuna dalga ölçümünde matriks malzemesinde ses hızının düşmesine, kompozit malzemede ise yükselmesine sebep olmuştur. Eksene dik yapılan boyuna ses hızı ölçümlerinde ise T6 ısıt işleminin, matriks malzemesinde ses hızının yükselmesine, kompozit malzemede ise düşmesine sebep olduğu belirlenmiştir. Bu numunelerde yapılan enine ses hızı ölçümlerinde de benzer değerler elde edilmiştir (Şekil 7.38 ve 7.39).



Şekil 7.38 Isıl işlemsiz ve T6 ısıt işlemleri uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen boyuna ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

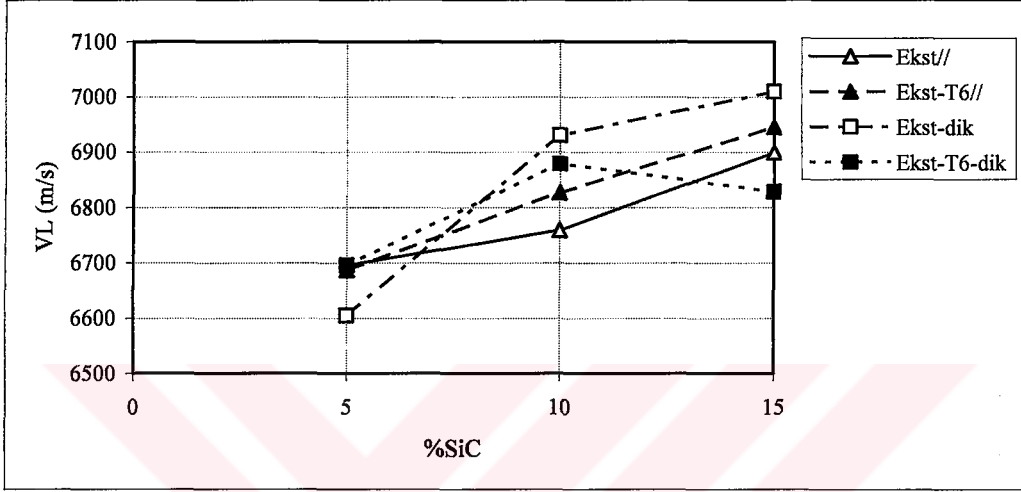


Şekil 7.39 Isıl işlemsiz ve T6 ısıt işlemleri uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen enine ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

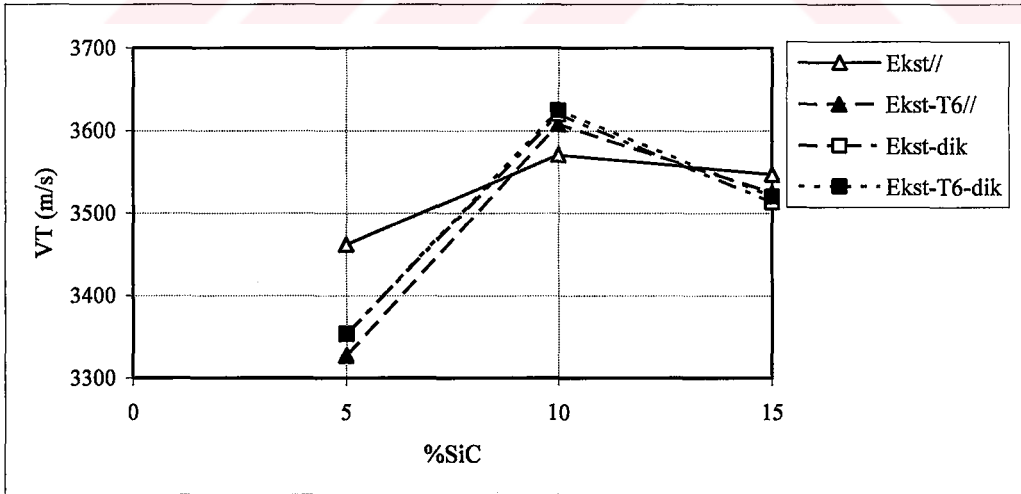
Şekil 7.38 ve 7.39'da SD//; sıkıştırma döküm numunelerde blok eksenine paralel yönü, SD-T6//; ısıt işlemlili sıkıştırma döküm numunelerde eksene paralel yönü, SD-dik ve SD-T6-dik

ise; eksene dik yöndeki ölçümleri ifade etmektedir.

Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen çubuklardan alınan numuneler üzerinde yapılan ses hızı ölçümlerinde ise, %5 ve %10 SiC içeren numunelerde SiC oranının artışıyla yine ses hızlarının arttığı saptanmıştır. %15 SiC partikül içeren numunelerde ise, özellikle enine dalga ölçümlerinde, %10 SiC içeren numunelerle karşılaştırıldığında ses hızında düşme olduğu görülmüştür (Şekil 7.40 ve 7.41).



Şekil 7.40 Isıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen boyuna ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

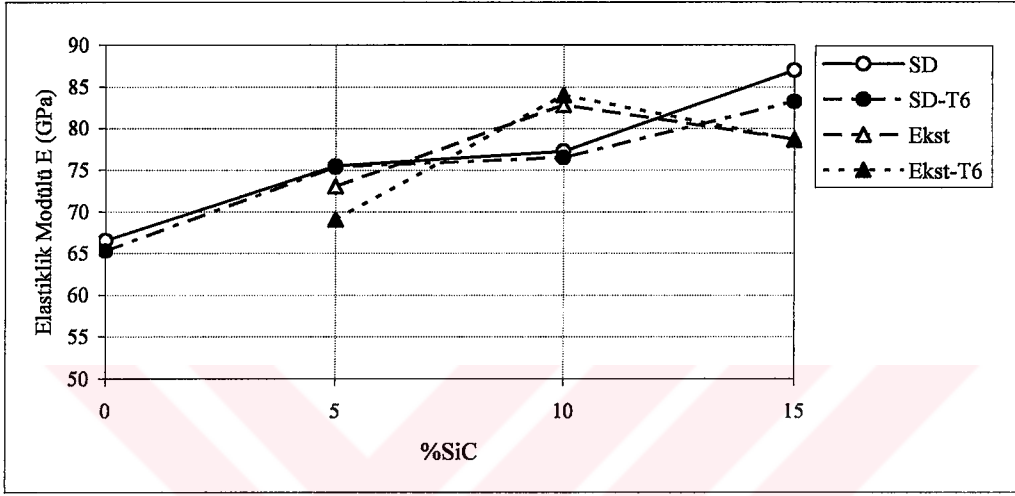


Şekil 7.41 Isıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde eksene paralel ve dik olarak ölçülen enine ses hızı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Şekil 7.40 ve 7.41'de Ekst//; ekstrüzyon numunelerinde çubuk eksenine paralel yönü, Ekst-

T6//; ısıtıl işlemli ekstrüzyon numunelerinde eksene paralel yönü, Ekst-dik ve Ekst-T6-dik ise; eksene dik yöndeki ölçümleri ifade etmektedir.

Ultrasonik ölçümlerden elde edilen ses hızı değerleri ile (6.6) denklemi yardımıyla Poisson oranları hesaplanmıştır. Bu değerler ve malzeme yoğunlukları (6.7) ve (6.8) denklemlerinde yerlerine konarak elastiklik modülleri belirlenmiştir. Hesaplanan elastiklik modüllerinin ağırlıkça %SiC oranı ile değişimi Şekil 7.42'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7.42 Elastiklik modülünün ağırlıkça %SiC ile değişimi

Attia'nın (1993) ve Jung vd.'nin (1997) yaptığı çalışmalarda bulduğu sonuçlarda olduğu gibi, bizim çalışmamızda elde edilen sonuçlara da bakıldığında, sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde SiC oranının artışıyla, yoğunluğun artması nedeniyle elastiklik modülünün arttığı görülmüştür. Lee vd. (1996), sıkıştırma döküm yöntemiyle ürettiği, 9-10 μm boyutunda, hacimce %15 SiC partikül takviyeli A356 Al alaşımı matrisli kompozit malzemenin elastiklik modülünü 90 GPa olarak belirlemiştir. Çalışmamızda kullandığımız AlSi7Mg2 matris alaşımının elastiklik modülü 66,54 GPa iken, %5, %10 ve %15 SiC içeren kompozit malzemeyle sırasıyla, 75,49 GPa, 77,24 GPa ve 86,96 GPa olarak hesaplanmıştır. Buna göre, %15 SiC içeren kompozit malzemenin elastiklik modülü, matris alaşımına oranla %31 artmıştır. Uygulanan T6 ısıtıl işlemi sonucunda elastiklik modüllerinde çok küçük oranlarda düşmeler olmuştur. Bu düşüş en fazla, %15 SiC içeren kompozit malzemeyle yaklaşık %4 olarak gerçekleşmiştir.

Ekstrüzyonla şekillendirilen numunelerde ise, SiC partikülleri ekstrüzyon doğrultusu boyunca yönlendiğinden, %5 SiC içeren numunenin elastiklik modülü 73,03 iken, %10 SiC içeren

kompozit malzemede %13'lük bir artışla 82,79 GPa değerine yükselmiştir. SiC oranı %15'e çıktığında ise elastiklik modülü düşmüş ve 78,69 GPa olmuştur. T6 ısıt işleme, %5 ve %15 SiC oranlarında elastiklik modülünü düşürmüş, %10 SiC oranında arttırmıştır.

7.5 Mekanik Özellikler

Kompozit malzemelerin mekanik dayanımları; çekme dayanımı, %uzama, çentik darbe dayanımı ve sertlikleri açısından değerlendirilmiştir.

7.5.1 Çekme Dayanımı Özellikleri

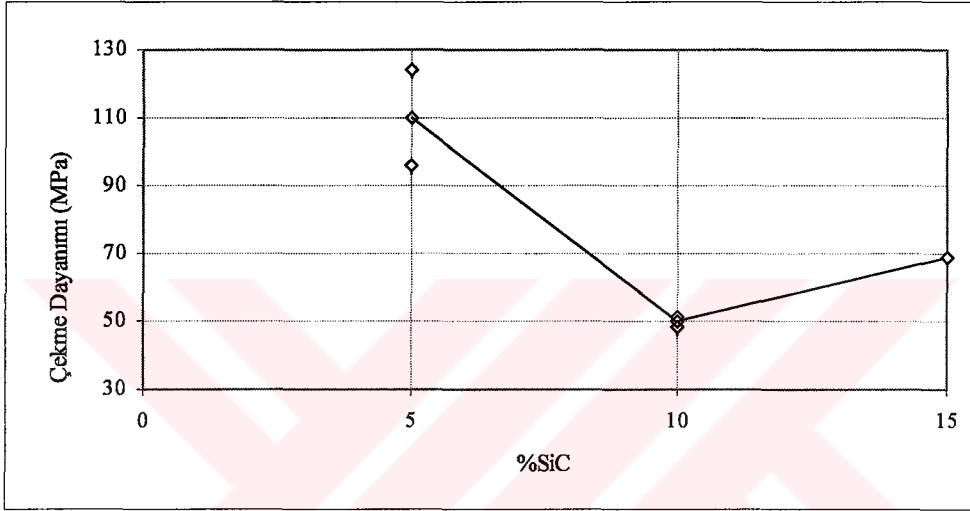
AlSi7Mg2 alaşımına ve deneylerde kullanılan tüm kompozit malzemelere ait çekme dayanımı değerleri ve %uzama değerleri Çizelge 7.5'te verilmiştir. SiC partikül oranına, üretim yöntemine, ekstrüzyon işlemine ve T6 ısıt işlemine bağlı olarak, kompozit malzemelerin çekme dayanımları farklılıklar göstermiştir.

Çizelge 7.5 Kompozit malzemelerin çekme dayanımı ve %uzama değerleri

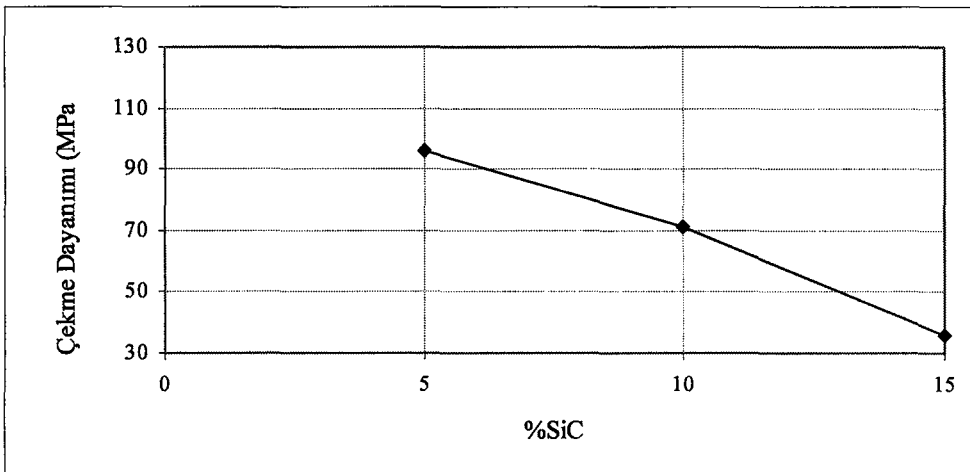
	Malzeme	Ağırlıkça SiC oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2	0	199	2,7
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	152	1,6
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	167	1,9
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	156	1,5
Gravite Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	110	1,8
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	50	1,7
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	69	2,2
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	166	9,6
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	175	7,9
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	164	5,3
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2	0	192	2,2
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	181	1,4
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	196	1,4
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	189	1,0
Gravite Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	96	1,7
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	71	0,7
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	36	0,4
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş+T6 Isıl İşlemi	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	188	2,6
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	204	5,1
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	204	6,0

Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin çekme dayanımları porozite

miktarının fazla olması nedeniyle düşük çıkmıştır. %5 SiC içeren kompozit malzemenin çekme dayanımı 110 MPa iken, SiC oranı %10'a çıktığında %55'lik düşüşle 50 MPa olmuştur. %15 SiC oranında ise çekme dayanımı 69 MPa'ya yükselmiştir. %10 SiC içeren kompozit malzemede çekme dayanımının düşük çıkmasının nedeninin, numunelerin çıkarıldığı bölgedeki yüksek porozite miktarı olduğu düşünülmektedir (Şekil 7.43). Uygulanan T6 ısıt işlemleri ile %10 SiC içeren kompozit malzemenin çekme dayanımında %42 oranında artış, diğerlerinde ise düşüş meydana gelmiştir. En düşük çekme dayanımı ise, %15 SiC içeren kompozit malzemede 36 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 7.44).



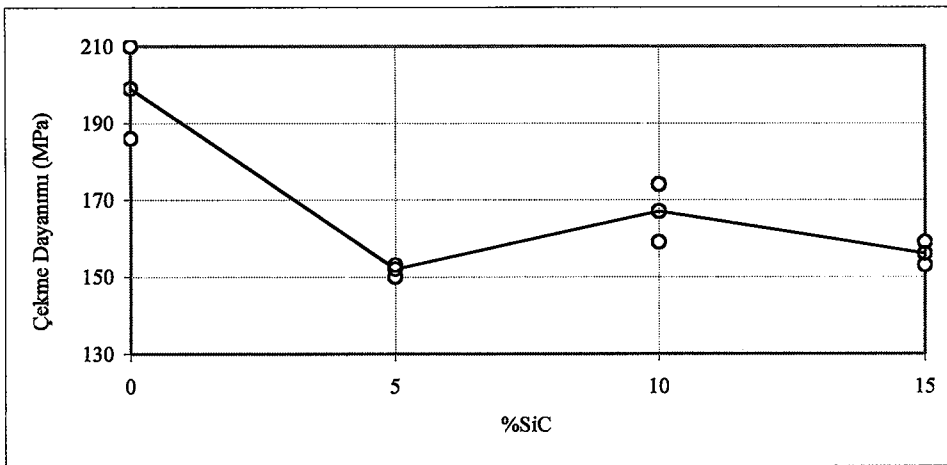
Şekil 7.43 Gravite döküm numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi



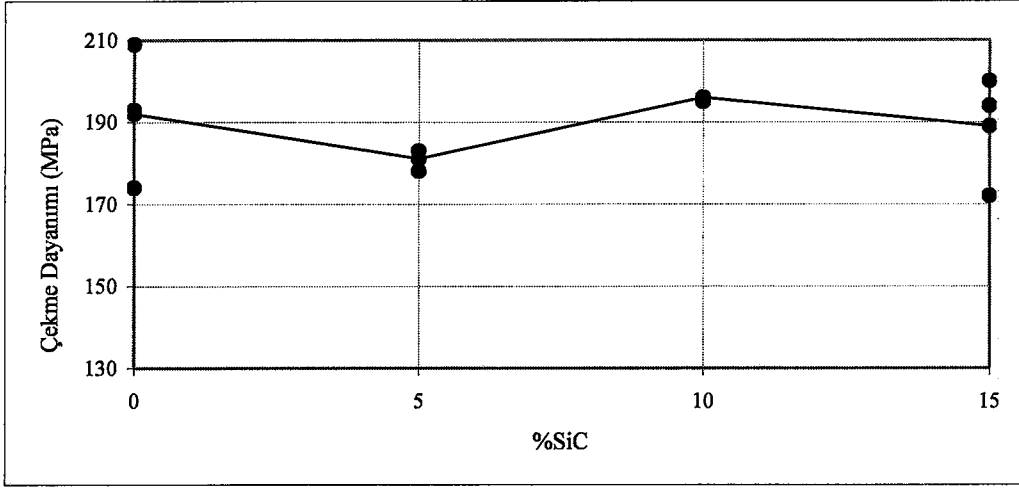
Şekil 7.44 T6 ısıt işlemleri uygulanan gravite döküm numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen tüm kompozit malzemelerin çekme dayanımları Şekil 7.45'te görüldüğü gibi, aynı yöntemle üretilen matriks alaşımına göre düşme eğilimindedir. Bunun nedeni, toplanmalar, porozite ve büzülmeler şeklindeki içyapı hatalarıdır (Seo ve Kang, 1999). Matriks alaşımının çekme dayanımı 199 MPa iken, örneğin ağırlıkça %5 SiC partikül içeren kompozit malzemenin çekme dayanımı, matriks alaşımının çekme dayanımından %24 oranında daha düşük çıkmış ve 152 MPa olarak ölçülmüştür. Bu düşüş, %10 SiC içeren kompozit malzemede %16, %15 SiC içeren kompozit malzemede ise %22 oranında olmuştur. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kendi aralarındaki karşılaştırmasında ise, SiC oranının çekme dayanımını düşük oranlarda değiştirdiği belirlenmiştir. SiC oranı %5'ten %10'a çıktığında çekme dayanımının arttığı, %15'e yükseldiğinde tekrar düştüğü görülmüştür. Bu düşüş, sıkıştırma döküm yönteminde uygulanan basınç nedeniyle, yüksek SiC oranında partikül kırılmalarının meydana gelmesi nedeniyle. Sıkıştırma döküm ile üretilen kompozit malzemelerde en yüksek çekme dayanımı, %10 SiC içeren kompozit malzemede 167 MPa olarak ölçülmüştür.

Sıkıştırma döküm numunelerine T6 ısıt işlemleri uygulanmasıyla, matriks malzemesinin çekme dayanımında %4 oranında düşüş olmasına rağmen, kompozit malzemelerin çekme dayanımlarında artış görülmüştür (Şekil 7.46). Bunun nedeni, ısıt işlem sonucunda, intermetalik bileşiklerin küresel hale gelmesidir. Bu durum Duralcan şirketinin SiC partikül takviyeli Al alaşımı matriksli kompozit malzeme üzerinde yaptığı çekme deneyinde de ortaya çıkmıştır (Kaczmar vd., 2000). Çalışmamızda en büyük çekme dayanımı artışı, %15 SiC içeren kompozit malzemede %21 ile gerçekleşmiştir. T6 ısıt işlemi sonucunda maksimum çekme dayanımı değeri, %10 SiC içeren kompozit malzemede 196 MPa olarak belirlenmiştir.

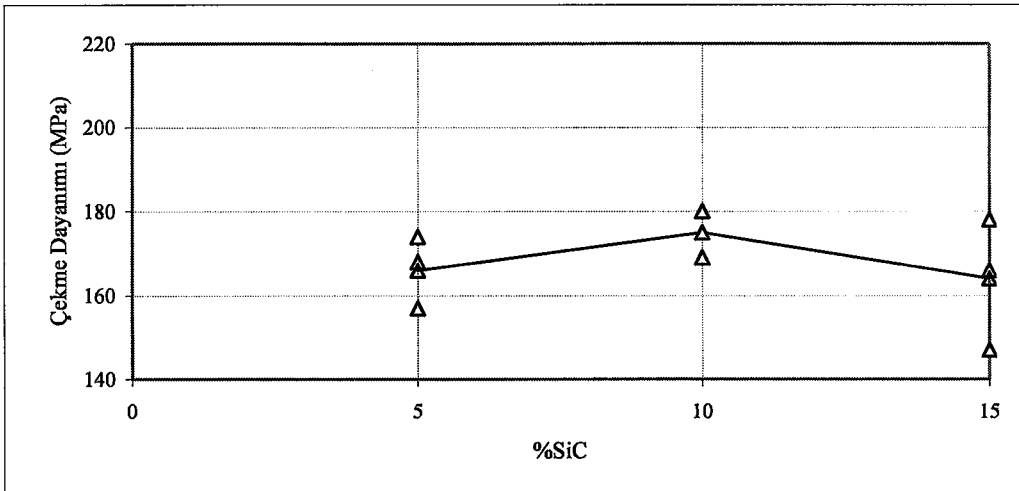


Şekil 7.45 Sıkıştırma döküm numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi



Şekil 7.46 T6 ısıtılması uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

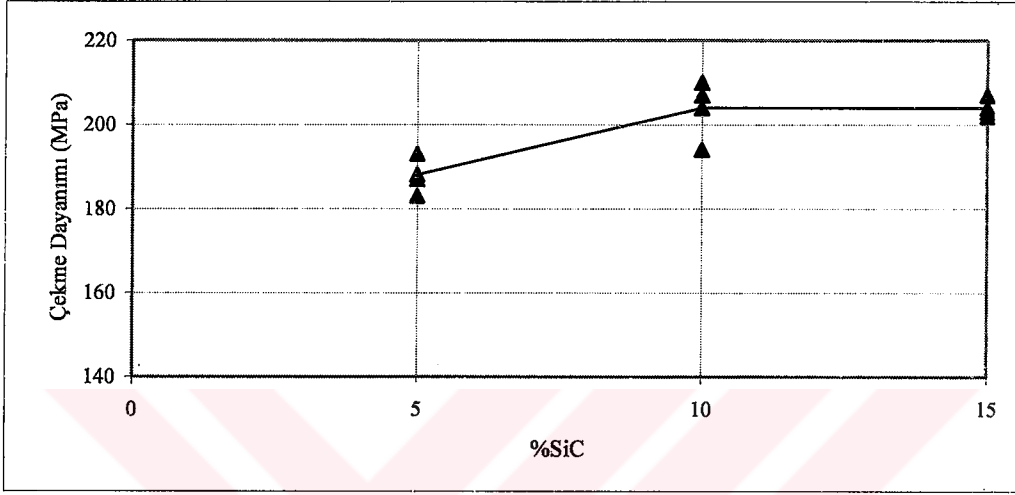
Kompozit malzemelere sıkıştırma döküm sonrası sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanması ile ekstrüzyon yönüne paralel partikül yönelmesi nedeniyle, çekme dayanımları artmıştır. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında, %5, %10 ve %15 SiC içeren kompozit malzemeler için bu artış sırasıyla, %9, %5 ve %5 oranında gerçekleşmiştir. Ekstrüzyon numunelerinde de maksimum çekme dayanımı, %10 SiC içeren kompozit malzemedeki 175 MPa olarak ölçülmüştür. %15 SiC içeren kompozit malzeme, partikül kılınmaları nedeniyle, en düşük çekme dayanımı değerini vermiştir (Şekil 7.47).



Şekil 7.47 Ekstrüzyon numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

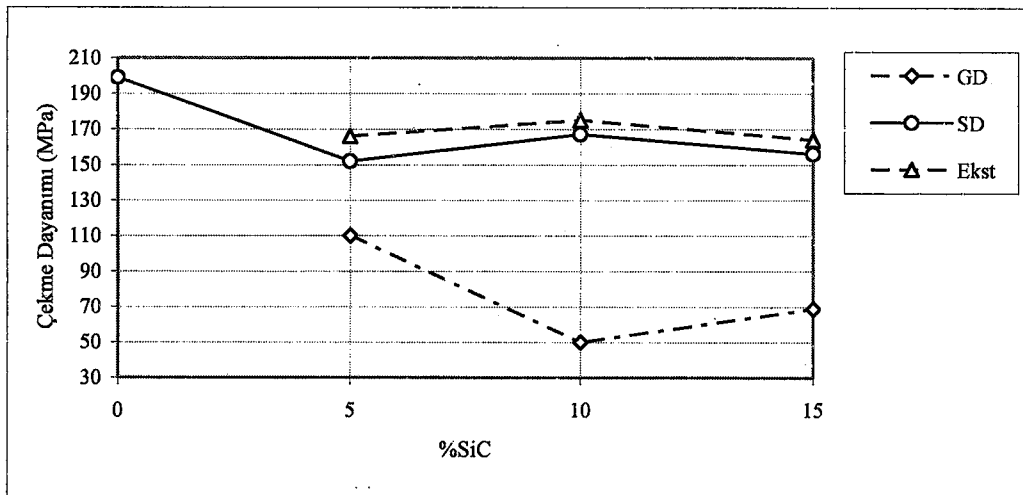
Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelerden alınan numunelere T6 ısıtılması

işlemi uygulanması ile yapıdaki intermetalik bileşiklerin küresel hale gelmesi nedeniyle, çekme dayanımlarında artış meydana gelmiştir. Bu artış, %5 SiC içeren kompozit malzemede %13 oranında, %10 SiC içeren kompozit malzemede %17 oranında ve %15 SiC içeren kompozit malzemede ise %24 oranında olmuştur. %10 ve %15 SiC oranlarındaki kompozit malzemelerin çekme dayanımları eşit çıkmış ve 204 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer, tüm kompozit malzemeler içerisinde maksimum değer olarak tespit edilmiştir (Şekil 7.48).

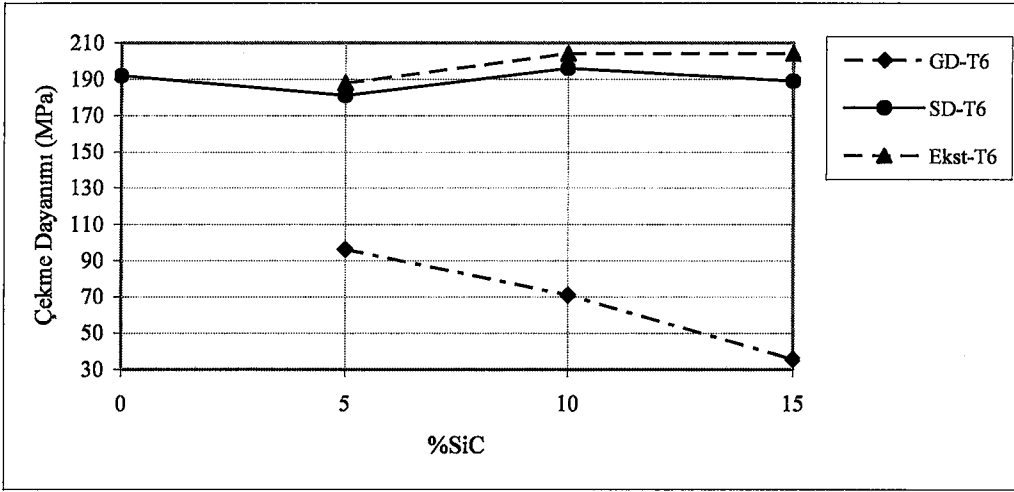


Şekil 7.48 T6 ısıt işlemleri uygulanan ekstrüzyon numunelerinde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Şekil 7.49 ve Şekil 7.50’de, tüm kompozit malzemeler için ölçülen çekme dayanımları, SiC oranına bağlı olarak grafikler halinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7.49 Isıl işlemsiz numunelerde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimlerinin karşılaştırılması

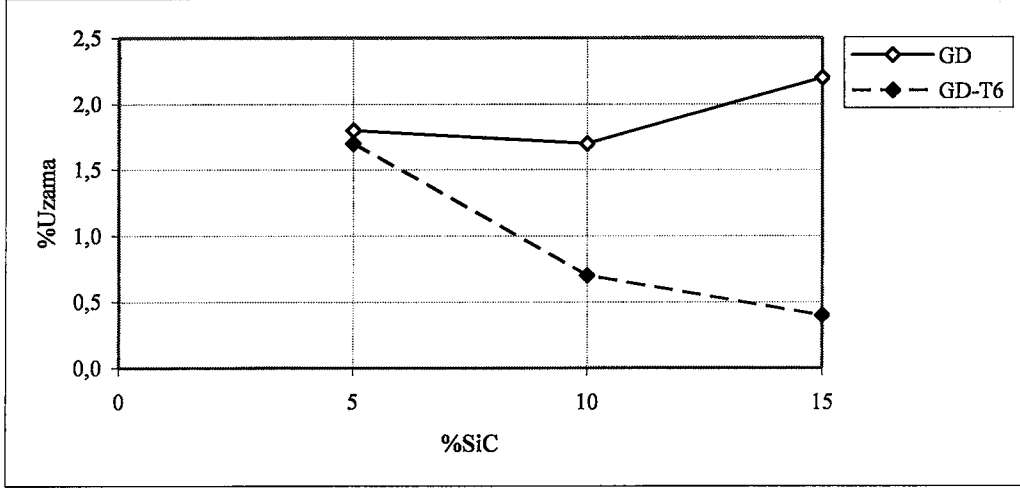


Şekil 7.50 T6 ısıt işlemleri uygulanan numunelerde çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimlerinin karşılaştırılması

7.5.2 %Uzama Özellikleri

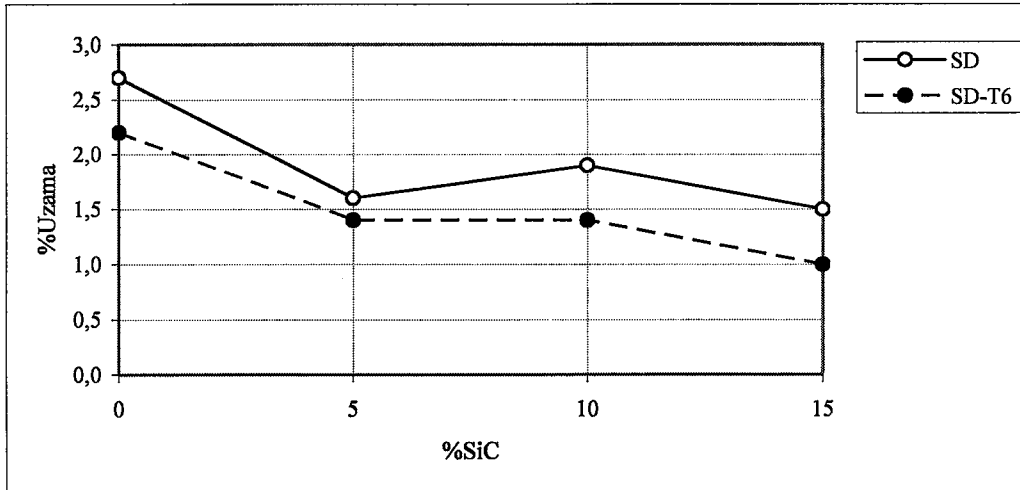
Çekme deneyi sonunda kompozit malzemelerin %uzama miktarları hesaplanmış ve Şekil 7.51, 7.52 ve 7.53'teki grafikler elde edilmiştir.

Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin uzama yüzdelerinin SiC oranı ile değişimleri Şekil 7.51'de görülmektedir. SiC oranının artması ile %uzama miktarları düşmektedir. Buna göre, %5 SiC içeren kompozit malzemede %uzama değeri 1,8 iken, SiC oranının %10'a çıkmasıyla 1,7'ye düşmüştür. %15 SiC içeren numunede ise bu değer yine yükselme eğilimi göstermiş ve 2,2 olmuştur. Uygulanan T6 ısıt işlemleri ile uzama yüzdelerinde, ısıt işlemsiz numunelere oranla düşme olduğu tespit edilmiştir. T6 ısıt işlemleri numunelerde SiC oranının artmasıyla, uzama miktarları düşmüştür. %5 SiC içeren numunenin %uzaması 1,7 iken, %10 SiC içeren kompozit malzemede bu değer yaklaşık %59'luk bir düşüşle 0,7'ye, %15 SiC içeren kompozit malzemede ise yaklaşık %76'luk bir düşüşle 0,4'e inmiştir.



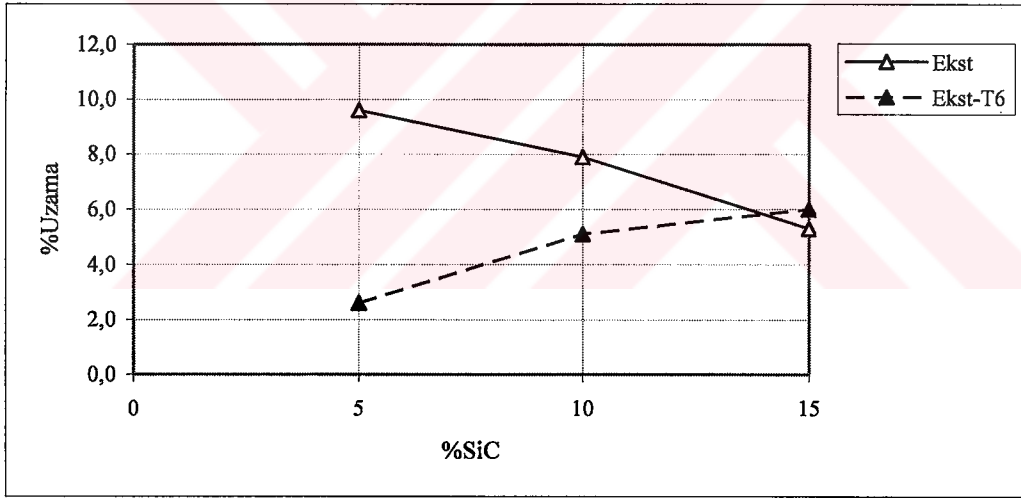
Şekil 7.51 Isıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemi uygulanan gravite döküm numunelerinde %uzama miktarlarının ağırlıkça %SiC ile değişimi

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks malzemesinin uzama yüzdesi 2,7 olarak hesaplanmıştır. SiC ilavesi ile %uzama değeri düşmüş, fakat artan SiC oranı ile artmıştır. %5 SiC katılarak üretilen kompozit malzemede bu değer, yaklaşık %40'lık bir düşüş göstermiş ve 1,6 olmuştur. SiC oranının %10'a çıkmasıyla %uzama değeri 1,9'a yükselmiş, %15 SiC'de ise, partikül kırılmaları nedeniyle tekrar düşerek 1,5 olmuştur. Uygulanan T6 ısıl işlemi, %uzama değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Matriks malzemesinde bu düşüş, %19 oranında olmuş ve %uzama değeri 2,2 olarak hesaplanmıştır. %5 ve %10 SiC içeren kompozit malzemelerde %uzama değeri eşit çıkmış ve 1,4 olmuştur. %15 SiC içeren kompozit malzemede bu değer yaklaşık %28'lik bir düşüşle 1,0 olarak tespit edilmiştir (Şekil 7.52).



Şekil 7.52 Isıl işlemsiz ve T6 ısıl işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde %uzama miktarlarının ağırlıkça %SiC ile değişimi

Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelere bakıldığında, partikül yönlenmesi ve ekstrüzyon öncesi uygulanan tavlama işlemi nedeniyle, %uzama değerlerinde, gravite döküm ve sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelere oranla oldukça yüksek değerler elde edilmiştir. Örneğin %5 SiC içeren sıkıştırma döküm kompozit malzemenin %uzama değeri, ekstrüzyon işlemi uygulanmasıyla %500'lük bir artışla 9,6'ya çıkmıştır. Ekstrüzyon numunelerinde SiC oranının artışıyla ise, %uzama değerlerinde düşmeler görülmüştür. %10 ve %15 SiC içeren numunelerin %5 SiC içeren numuneye oranla gösterdiği düşüş sırasıyla, %18 ve %45 olmuştur. T6 ısıt işlemi uygulanmasıyla, %5 ve %10 SiC için, ısıt işlemsiz numunelere oranla, %uzama değerlerinde düşüşler, %15 SiC oranı için ise artış tespit edilmiştir. T6 ısıt işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinin kendi aralarında yapılan karşılaştırmasında ise, SiC oranının artması %uzama değerlerini arttırmıştır. %5 SiC içeren numunede %uzama değeri 2,6 iken, %10 ve %15 SiC içeren numunelerde bu değer sırasıyla, 5,1 ve 6,0 olarak belirlenmiştir (Şekil 7.53).



Şekil 7.53 Isıl işlemsiz ve T6 ısıt işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde %uzama miktarlarının ağırlıkça %SiC ile değişimi

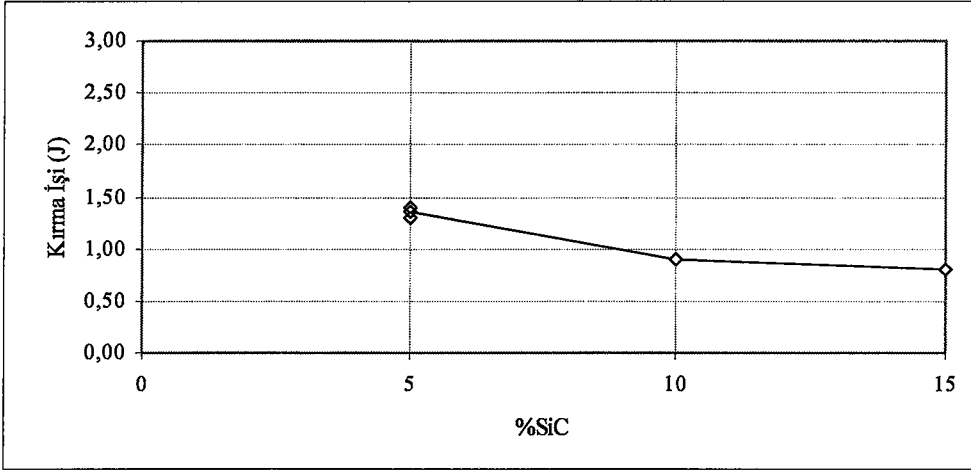
7.5.3 Çentik Darbe Dayanımı Özellikleri

Çentik darbe deneyi ile belirlenen kırma işi ve hesaplanan tokluk değerleri Çizelge 7.6'da verilmiştir.

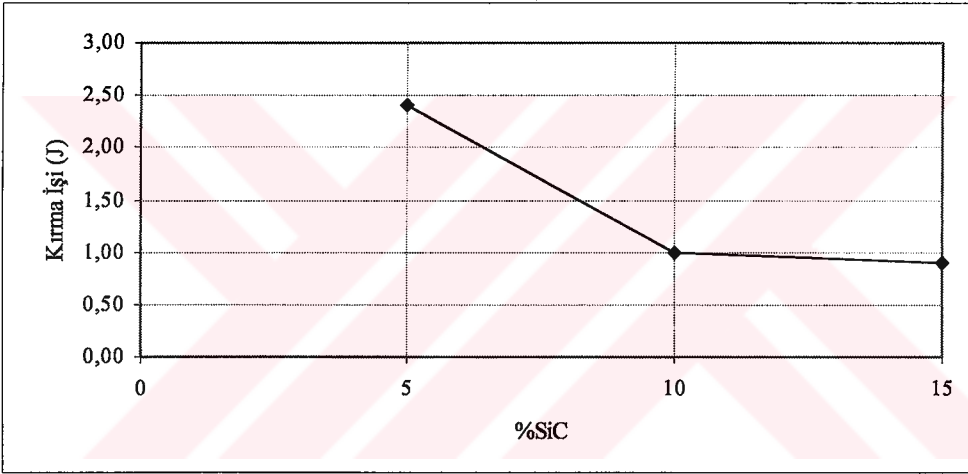
Çizelge 7.6 Kompozit malzemelerin darbe dayanım ve tokluk değerleri

	Malzeme	Ağırlıkça SiC oranı (%)	Kırma İşi (J)	Tokluk (kgf _m /cm ²)
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2	0	1,40	0,18
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	1,50	0,18
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	1,30	0,16
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	1,30	0,16
Gravite Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	1,35	0,16
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	0,90	0,11
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	0,80	0,10
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	6,70	0,79
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	4,65	0,56
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	6,15	0,75
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2	0	3,00	0,37
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	2,20	0,27
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	2,20	0,27
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	2,00	0,24
Gravite Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	2,40	0,29
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	1,00	0,12
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	0,90	0,11
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	6,10	0,73
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	7,25	0,87
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	7,25	0,88

Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde, porozite miktarının fazla olması sebebiyle, kırma işi değerleri düşük çıkmıştır. Artan SiC oranı ile darbe dayanımı düşmüştür. Tüm kompozit malzemeler içerisinde en düşük kırma işi, 0,80 J ile %15 SiC içeren gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemede ölçülmüştür (Şekil 7.54). T6 ısıl işlemi sonucunda, kırma işi, dolayısıyla tokluk değerlerinde, ısıl işlemsiz numunelere oranla artış olmuştur. Bu artış, %5 SiC içeren kompozit malzemede yaklaşık %78 oranında gerçekleşmiştir (Şekil 7.55).

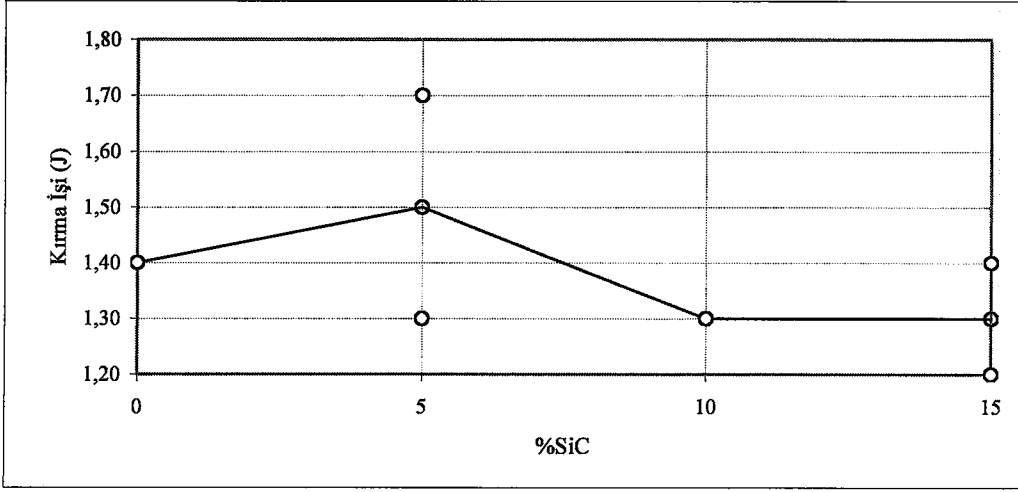


Şekil 7.54 Gravite döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

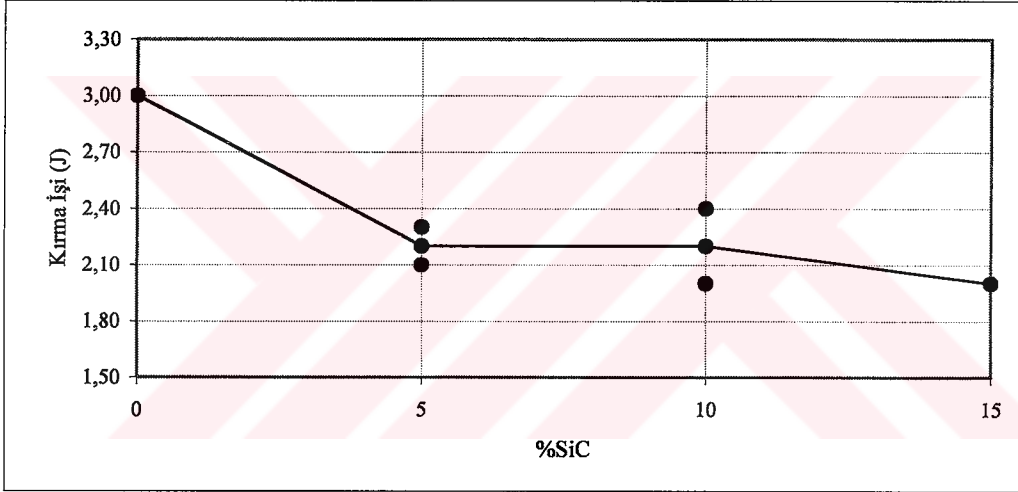


Şekil 7.55 T6 ısıtılmış gravite döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks alaşımının kırma işi değeri 1,40 J olarak ölçülmüştür. %5 SiC ile takviye edilmesiyle elde edilen kompozit malzemenin kırma işi ise 1,50 J olmuş ve böylece darbe dayanımında yaklaşık %7'lik bir artış sağlanmıştır. Ancak SiC oranının artmasıyla porozite miktarı arttığından, darbe dayanım değeri tekrar düşüş göstermiş; %10 ve %15 SiC içeren kompozit malzemelerde kırma işi 1,30 J değeriyle birbirine eşit çıkmıştır (Şekil 7.56). Bu numunelere T6 ısıtılmasıyla, matriks alaşımının kırma işi değeri yaklaşık %114'lük bir artışla 3,00 J'ye ulaşmıştır. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin ısıtılması sonucunda intermetalik bileşiklerin küresel hale gelmesi nedeniyle, kırma işi değerleri artmıştır. SiC oranının artışı ile kırma işi değerleri düşme eğilimi göstermiştir (Şekil 7.57).

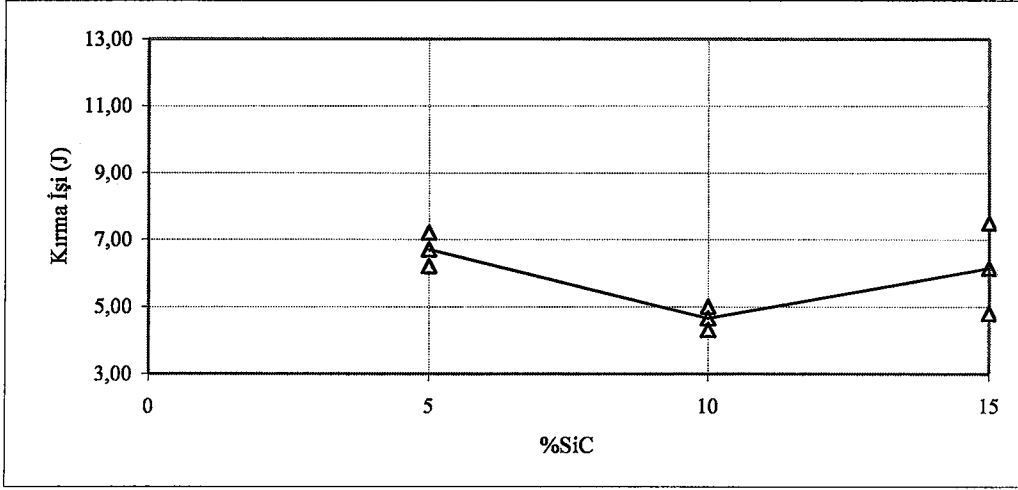


Şekil 7.56 Sıkıştırma döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

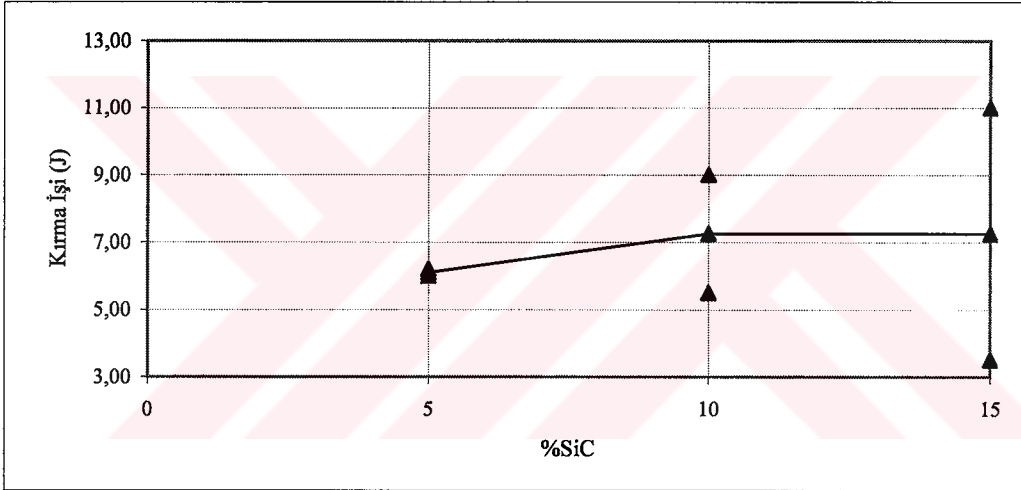


Şekil 7.57 T6 ısıtma işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelerde ise homojen partikül dağılımı ve yeniden billurlaşmış tane yapısı sayesinde, en yüksek darbe dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. %5 SiC içeren kompozit malzemede kırma işi değeri 6,70 J olarak ölçülmüş, SiC oranı %10'a çıktığında ise bu değer 4,65 J'ye düşmüştür. %15 SiC içeren kompozit malzemede kırma işi değeri tekrar yükselmiş ve 6,15 J olmuştur (Şekil 7.58). T6 ısıtma işlemi uygulanmasıyla, %5 SiC içeren kompozit malzemenin kırma işi yaklaşık %9'luk bir düşüşle 6,10 J olmuş, %10 ve %15 SiC içeren kompozit malzemelerin darbe dayanımları ise yükselmiştir. Kırma işi değeri her iki kompozit malzemede de 7,25 J olarak ölçülmüştür. Bu değer tüm kompozit malzemeler içerisindeki en yüksek değer olmuştur (Şekil 7.59).

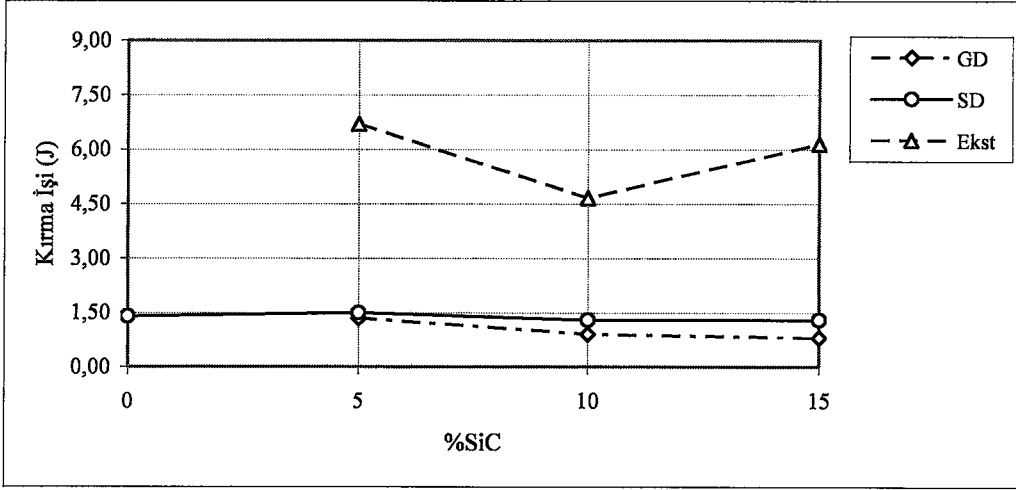


Şekil 7.58 Ekstrüzyon numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

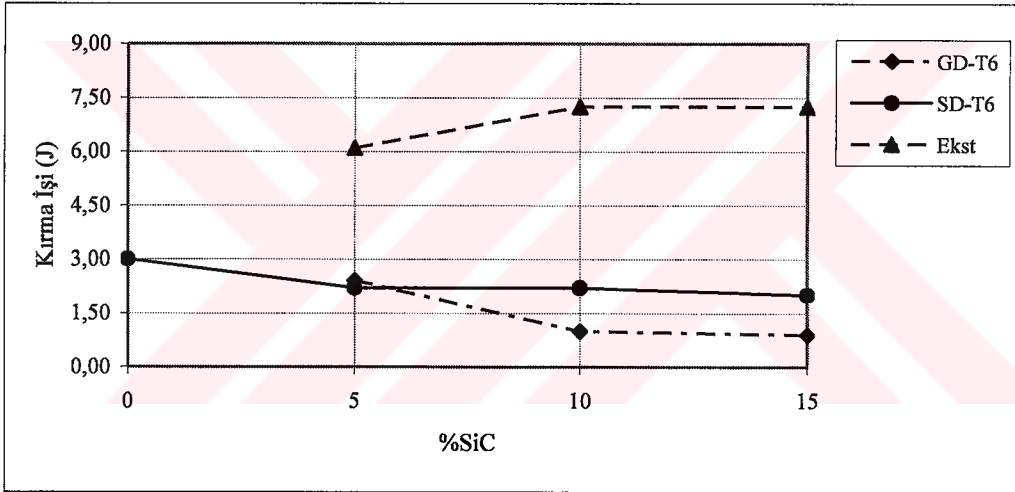


Şekil 7.59 T6 ısıtıl işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Tüm kompozit malzemeler için ölçülen kırma işi değerleri, ağırlıkça %SiC oranına bağlı olarak Şekil 7.60 ve Şekil 7.61’de, grafikler halinde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7.60 Isıl işlemsiz numunelerde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması



Şekil 7.61 T6 ısıl işlemi uygulanan numunelerde kırma işinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması

7.5.4 Sertlik Değerleri

Kompozit malzemelerin sertlik ölçümleri sonucunda Brinell sertlik cinsinden değerleri Çizelge 7.7’de verilmiştir.

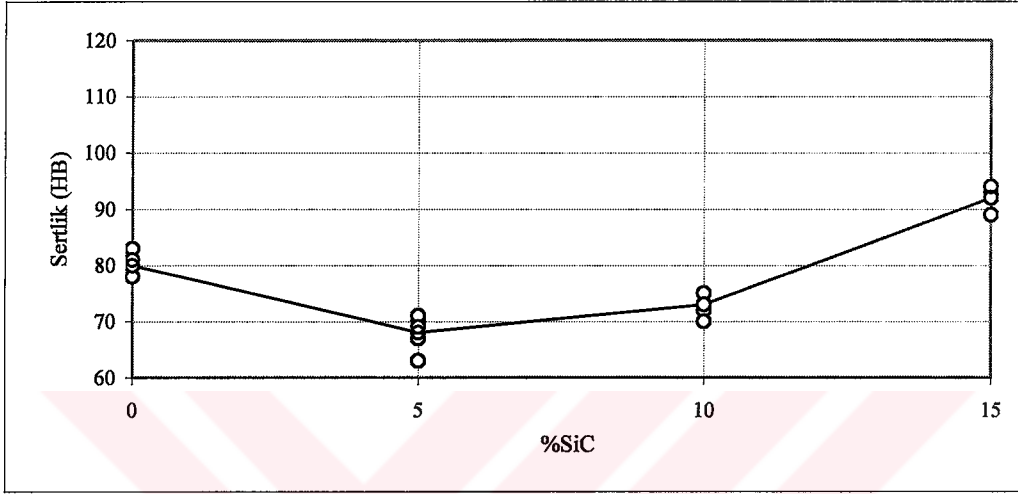
Gravite döküm numuneleri üzerinde yapılan sertlik ölçümleri sonucunda, artan SiC oranına bağlı olarak, sertlik değerlerinde düşme olduğu görülmüştür. %5 SiC içeren numunenin sertliği 71 HB iken, %10 SiC içeren numunede bu değer %15 oranında düşerek 60 HB olmuştur. %15 SiC içeren numunede ise %23’lük bir düşüşle 55 HB olarak ölçülmüştür (Şekil 7.62). Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelere uygulanan T6 ısıl işlemi

sonucunda bulunan sertlik ölçüm değerleri, ısıtma işlemi görmemiş numunelere oranla, sırasıyla %5 SiC içeren kompozit malzemede yaklaşık %18, %10 SiC içeren kompozit malzemede %2 artış gösterirken, %15 SiC içeren kompozit malzemede ise yaklaşık %2 oranında düşmüştür (Şekil 7.63).

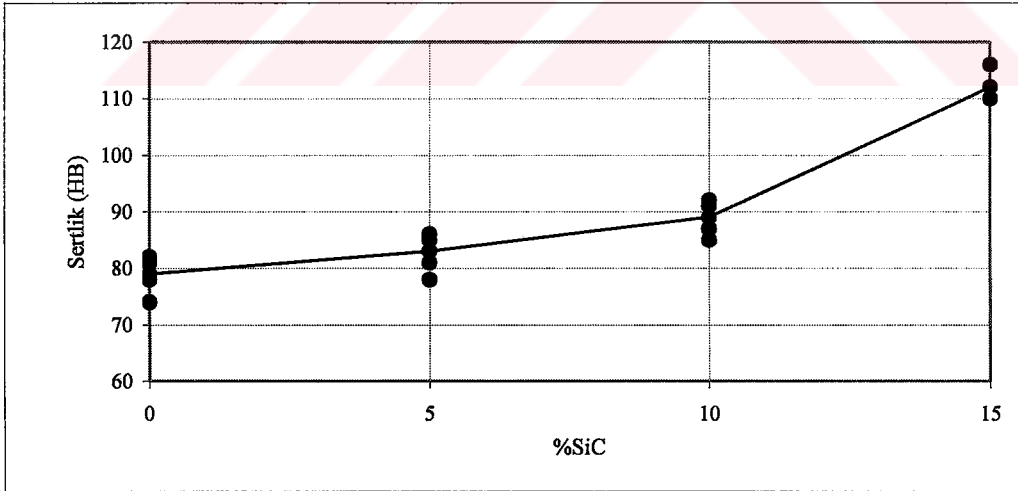
Çizelge 7.7 Kompozit malzemelerin sertlik değerleri

	Malzeme	Ağırlıkça SiC oranı (%)	Sertlik (HB)
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2	0	80
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	68
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	73
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	92
Gravite Dökümle Üretilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	71
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	60
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	55
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	53
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	65
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	56
Sıkıştırma Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2	0	79
	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	83
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	89
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	112
Gravite Dökümle Üretilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	84
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	61
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	54
Ekstrüzyonla Şekillendirilmiş+T6 Isıl İşlemi Uygulanmış	AlSi7Mg2/%5SiC _p	5	86
	AlSi7Mg2/%10SiC _p	10	97
	AlSi7Mg2/%15SiC _p	15	103

intermetalik bileşiklerin küresel hale gelmesiyle, artma olduğu görülmüştür. T6 ısıtıl işlemi uygulanan numuneler kendi aralarında kıyaslandığında ise, SiC oranının artmasıyla, sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Bu artış %15 SiC içeren kompozit malzeme için, matriks alaşımına oranla, yaklaşık %42 olmuş ve 112 HB'ye ulaşmıştır. Bu sertlik değeri, çalışmamızda kullanılan tüm kompozit malzemeler içerisindeki en yüksek değer olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 7.65).



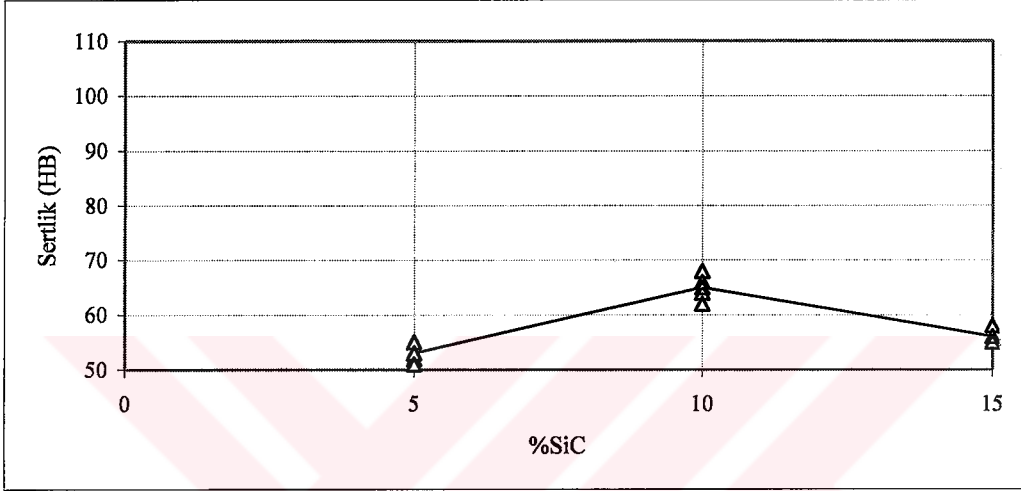
Şekil 7.64 Sıkıştırma döküm numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi



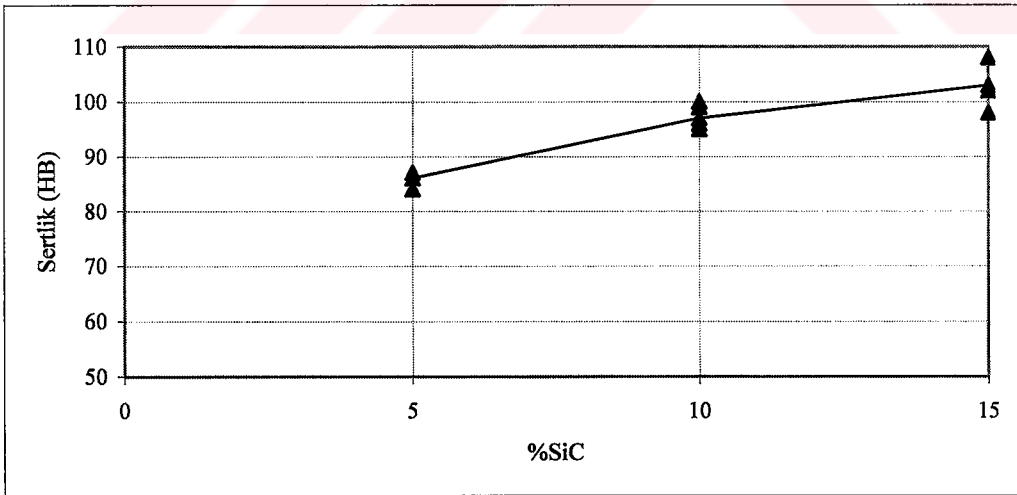
Şekil 7.65 T6 ısıtıl işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Ekstrüzyonla şekillendirilmiş numunelerin sertlik değerlerine bakıldığında, sıkıştırma döküme oranla düşmeler olduğu görülmüştür. %5, %10 ve %15 SiC içeren kompozit malzemelerde bu düşüşler sırasıyla, %22, %11 ve %39 oranlarında gerçekleşmiştir. Ekstrüzyon numuneleri

kendi aralarında kıyaslandığında ise, %5 SiC'den %10 SiC'ye geçildiğinde 53 HB olan sertlik değeri 65 HB'ye çıkmış ve yaklaşık %23'lük bir artış gözlenmiştir. Ancak %15 SiC'li numunenin sertliğinde, tekrar düşme olmuş ve 56 HB olarak tespit edilmiştir (Şekil 7.66). T6 ısıt işleminde ise sertlik değerleri oldukça yükselmiş ve artan SiC oranı ile artış göstermiştir. %5 SiC'li numunenin sertliği, ısıt işleminde %62 kadar artarak 86 HB olmuştur. Bu artışın, %10 SiC içeren kompozit malzemede %49, %15 SiC içeren kompozit malzemede ise yaklaşık %84 olduğu saptanmıştır (Şekil 7.67).

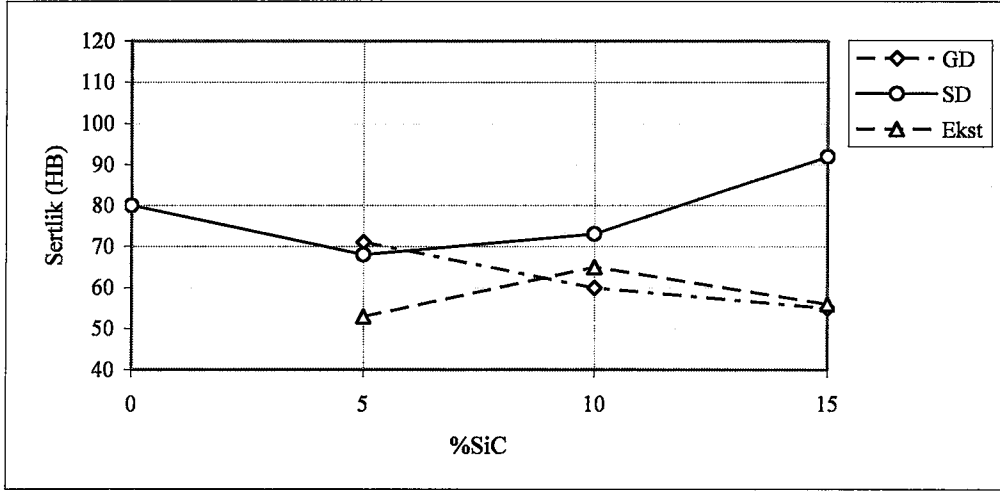


Şekil 7.66 Ekstrüzyon numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

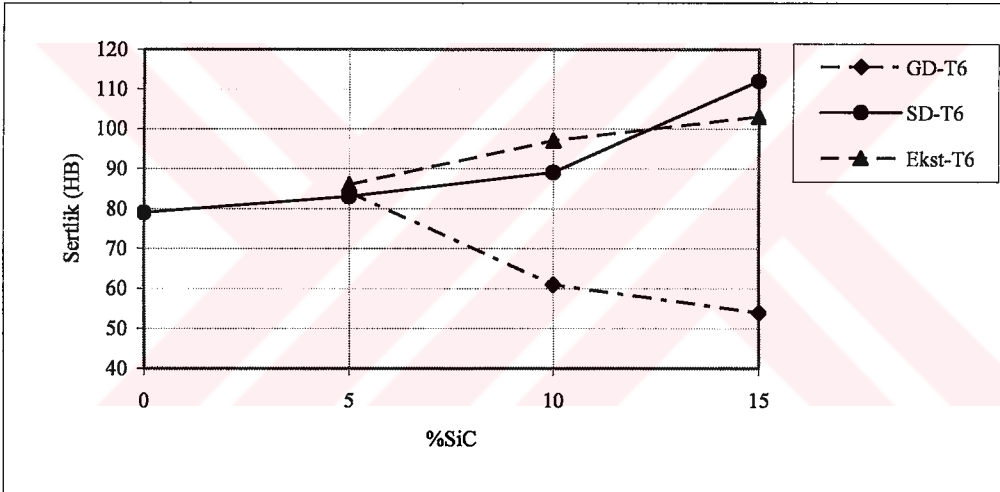


Şekil 7.67 T6 ısıt işleminde uygulanan ekstrüzyon numunelerinde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişimi

Şekil 7.68 ve 7.69'da tüm numunelerin sertliklerinin karşılaştırıldığı grafikler görülmektedir.



Şekil 7.68 Isıl işlemsiz numunelerde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması



Şekil 7.69 T6 ısıt işlemleri uygulanan numunelerde sertlik değerlerinin ağırlıkça %SiC ile değişiminin karşılaştırılması

8. SONUÇLAR

Sürekli gelişmekte olan teknoloji, beraberinde malzeme biliminde de gelişmelere neden olmaktadır. Bunun sonucunda, geleneksel malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi yanısıra, yeni malzemeler ortaya çıkmaktadır. Günümüzde kompozit malzemeler, geleneksel mühendislik malzemelerin yerini almaktadır. Bu malzemelerin üretiminin ve üretim sonrası yapılan şekillendirme işlemlerinin geliştirilmesi, teknolojik uygulamalara cevap verebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, özellikle sıkıştırma döküm yöntemi uygulandığında, kompozit malzemelerin içyapılarında iyileşmeler sağlandığı, sıcak ekstrüzyonla şekillendirme ile de daha homojen bir yapının ve daha iyi mekanik özelliklerin elde edildiği gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, ağırlıkça farklı oranlarda SiC partikül takviyeli AlSi7Mg2 matriks alaşımlı kompozit malzemeler gravite döküm ve sıkıştırma döküm yöntemleri ile üretilmiştir. Sıkıştırma dökümle üretilen blokların bir kısmı, 23: 1 ekstrüzyon oranında ve 450°C’de sıcak ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilmişlerdir. Blokların ve ekstrüzyon çubuklarının bir kısmı T6 ısıtılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Farklı oranlarda SiC partikül takviyesinin, kompozit malzemelerin mikroyapılarında ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, literatürdeki sonuçlarla uyumlu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1) Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde soğuma hızının yavaş olması nedeniyle, katılaşma sırasında SiC partikülleri, en son soğuyan ötektik bölgelere itilmiştir. Partiküllerin toplanmasına neden olan bu durum, matriks içerisinde homojen olmayan dağılım ortaya çıkarmıştır. Özellikle partiküllerin toplandığı kısımlarda, takviye ile matriks arasındaki boşluk oluşumu da artmıştır. %5 SiC içeren kompozit malzemede porozite yüzdesi 2,6 iken, %15 SiC içeren kompozit malzemede ise 10,71’e yükselmiştir.
- 2) Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin mikroyapılarına bakıldığında, matriks alaşımında Mg_2Si bileşiklerinin bölgesel olarak toplandığı görülmüştür. Sıkıştırma döküm yönteminde uygulanan basıncın, boşlukların azalmasında çok etkili olduğu saptanmıştır. Böylece porozitenin az olması, çekme dayanımı ve sertliğin yükselmesini sağlamıştır. SiC oranının artması, komşu tane sayılarının da artmasına neden olmuş ve sıkıştırma dökümde uygulanan basınç nedeniyle, yüksek SiC oranlarında partiküllerin çatlamasına, hatta bazı bölgelerde parçalanmasına yol açmıştır.
- 3) Sıcak ekstrüzyon işlemi uygulanması ile tane yapısı yeniden billurlaşarak eş eksenli hale

gelmiş, kompozit malzemede partikül dağılımı daha homojen bir hal almıştır. Ayrıca SiC taneler ekstrüzyon doğrultusu boyunca yönlenmiştir. Ancak, şekillendirme işleminde basınç uygulanması ile partikül kırılmaları oluşmuştur. %15 SiC içeren kompozit malzemede daha yoğun olarak ortaya çıkan partikül kırılmaları nedeniyle, çekme dayanımı ve sertlik değerleri düşmüştür. Ayrıca ekstrüzyon işlemi, mikroyapıda bantlaşma etkisi göstermiştir.

4) Boyuna ve enine ultrasonik ses hızı ölçümleri sonucunda, artan SiC partikül oranı ile ses hızlarının arttığı belirlenmiştir.

5) Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde SiC oranının artışıyla, yoğunluk değerleri arttığından, elastiklik modülü artmıştır. %15 SiC ilave edilerek sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemenin elastiklik modülü, matriks alaşımına oranla %31 artış göstermiştir. Ekstrüzyonla şekillendirilen numunelerde ise, %5 SiC içeren numunenin elastiklik modülü 73,03 GPa iken, %10 SiC içeren kompozit malzemede %13'lük bir artışla 82,79 GPa değerine yükselmiştir. SiC oranı %15'e çıktığında ise elastiklik modülü tekrar düşmüş ve 78,69 GPa olmuştur. T6 ısıtma işlemi sonucunda elastiklik modüllerinde çok düşük oranlarda düşmeler olmuştur.

6) Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin çekme dayanımları, SiC oranının artmasıyla düşmüştür. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen tüm kompozit malzemelerin çekme dayanımları, içyapı hataları nedeniyle, aynı yöntemle üretilen matriks alaşımına göre düşme eğilimindedir. SiC oranının artması çekme dayanımı değerlerinde düşük oranlarda değişmelere sebep olmuştur. Sıkıştırma döküm numunelerine T6 ısıtma işlemi uygulanmasıyla, matriks malzemesinin çekme dayanımında %4 oranında düşüş olmasına rağmen, kompozit malzemelerin çekme dayanımları artmıştır. Ekstrüzyon işlemi sonucunda, partikül yönlenmeleri nedeniyle, çekme dayanımları artmıştır. Ekstrüzyon numunelerinde maksimum çekme dayanımı, %10 SiC içeren kompozit malzemede 175 MPa olarak ölçülmüştür. T6 ısıtma işlemi uygulanmasıyla, çekme dayanımları artmıştır. %10 ve %15 oranlarında SiC içeren kompozit malzemelerde 204 MPa değerine ulaşılmıştır.

7) Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde SiC oranının artmasıyla, %uzama değeri düşmüştür. Uygulanan T6 ısıtma işlemi ile uzama miktarlarında düşmeler görülmüştür. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks malzemesinin uzama yüzdesi SiC ilavesiyle, fakat artan SiC oranı ile yükselmiştir. T6 ısıtma işlemi uygulanması, %uzama değerlerinde düşüşe neden olmuştur. Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelerde partikül yönlenmesi ve ekstrüzyon işlemi öncesi tavlama yapılması nedeniyle,

oldukça yüksek %uzama değerleri elde edilmiştir. %5 SiC içeren sıkıştırma döküm kompozit malzemenin %uzama değeri, ekstrüzyon işlemi uygulanmasıyla %500'lük bir artışla 9,6'ya çıkmıştır. Ekstrüzyon numunelerinde SiC oranının artışıyla ise, %uzama değerlerinde düşmeler görülmüştür. T6 ısıtıl işlemi uygulanmasıyla, %5 ve %10 SiC için, ısıtıl işlemsiz numunelere oranla, %uzama değerlerinde düşüşler, %15 SiC oranı için ise artış tespit edilmiştir. T6 ısıtıl işlemi uygulanan ekstrüzyon numunelerinin kendi aralarında yapılan karşılaştırmasında ise, SiC oranının artması %uzama değerlerini arttırmıştır.

8) Gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerde, porozite miktarının fazla olması sebebiyle, darbe dayanımları düşük çıkmıştır. Tüm kompozit malzemeler içerisinde en düşük kırma işi, %15 SiC içeren gravite döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemede 0,80 J olarak ölçülmüştür. T6 ısıtıl işlemi sonucunda, darbe dayanımı değerlerinde, ısıtıl işlemsiz numunelere oranla artış olmuştur. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks alaşımının kırma işi değeri 1,40 J olarak ölçülmüştür. %5 SiC ile takviye edilmesiyle elde edilen kompozit malzemenin kırma işi ise %7'lik bir artışla, 1,50 J olmuştur. Ancak SiC oranının artmasıyla darbe dayanım değeri tekrar düşmüştür. T6 ısıtıl işlemi uygulanmasıyla, matriks alaşımının kırma işi değeri yaklaşık %114'lük bir artışla 3,00 J'ye ulaşmıştır. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen kompozit malzemelerin kırma işi değerleri de ısıtıl işlemle artmıştır. Ekstrüzyon işlemi ile şekillendirilen kompozit malzemelerde ise homojen partikül dağılımı ve yeniden billurlaşmış tane yapısı sayesinde, en yüksek darbe dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. T6 ısıtıl işlemi uygulanmasıyla, %10 ve %15 SiC içeren kompozit malzemelerin darbe dayanımları yükselmiş ve kırma işi 7,25 J olarak ölçülmüştür.

9) Gravite döküm numunelerinde, artan SiC oranı ile sertlik değerleri düşmüştür. T6 ısıtıl işlemi sonucunda sertlik değerlerinde düşük oranlarda değişimler gözlenmiştir. Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen matriks alaşımının sertliği 80 HB olarak bulunmuştur. SiC ilave edilerek üretilen kompozit malzemelerin sertlik değerleri düşmüştür. Kompozit malzemedeki SiC oranının artmasıyla sertlik değerleri yükselme eğilimi göstermiştir. T6 ısıtıl işlemi uygulanan sıkıştırma döküm numunelerinin sertlik değerleri artmıştır. Ekstrüzyonla şekillendirilmiş numunelerde sertlik değerleri sıkıştırma döküme oranla düşmüştür. Ekstrüzyon numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında ise, %5 SiC'den %10 SiC'ye geçildiğinde 53 HB olan sertlik değeri 65 HB'ye çıkmış ve yaklaşık %23'lük bir artış gözlenmiştir. Ancak %15 SiC'li numunenin sertliği tekrar düşmüş ve 56 HB olmuştur. T6 ısıtıl işlemi sonucunda ise sertlik değerleri oldukça yükselmiş ve artan SiC oranı ile artış göstermiştir.

AlSi7Mg2 matriks ve ağırlıkça farklı oranlarda SiC ilavesiyle üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin, literatürde çalışılan Al alaşımı matriksli kompozit malzeme özellikleriyle benzerlikler gösterdiği belirlenmiştir. Matriks malzemesinin katılma aralığının farklı olmasının kompozit malzemenin özelliklerini belirgin olarak etkilemediği, buna karşılık SiC partikül oranının içyapının homojenliğini ve poroziteyi etkilediği, üretim yönteminin de porozite ve buna bağlı olarak mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

- Akyüz, S.S. ve Gümrükçüoğlu, M., (1999), “Tahribatsız Muayene Yöntemleriyle Süreksizliklerin Tespiti ve Değerlendirilmesi”, *Mühendis ve Makina*, 40, 476: 39-49.
- Aran, A., (1997), “Metal Matriksli Kompozit Malzemeler Alanında Yeni Gelişmeler”, *MAMKON’97, İTÜ Makine Fakültesi 1.Makine Mühendisliği Kongresi, İstanbul*, 368-372.
- Attia, A.N., (1993), “Static ve Dymanic Properties of Al-Si Alloys/SiC Particulate Composites”, *Key Engineering Materials*, 79-80: 327-338.
- Bindumadhavan, P.N., Chia, T.K., Chandrasekaran, M., Wah, H.K., Lam, L.N. ve Prabhakar, O., (2001a), “Effect of Particle-Porosity Clusters on Tribological Behavior of Cast Aluminum Alloy A356-SiC_p Metal Matrix Composites”, *Materials Science and Engineering*, A315: 217-226.
- Bindumadhavan, P.N., Wah, H.K. ve Prabhakar, O., (2001b), “Dual Particle Size (DPS) Composites: Effect on Wear and Mechanical Properties of Particulate Metal Matrix Composites”, *Wear*, 248: 112-120.
- Borrego, A., Fernandez, R., Cristina, M.del C., Ibanez, J. ve Doncel G.G., (2002), “Influence of Extrusion Temperature on the Microstructure and the Texture of 6061Al-15 vol.% SiC_w PM Composites”, *Composite Science and Technology*, 62: 731-742.
- Buarzaiga, M.M. ve Thorpe, S.J., (1994), “Corrosion Behavior of As-Cast, Silicon Carbide Particulate-Aluminum Alloy Metal-Matrix Composites”, *Corrosion*, 50, 3: 176-185.
- Chawla, K.K., (1998), *Composite Materials–Science and Engineering*, Second Edition, Springer-Verlag New York Inc., USA.
- Cöcen, Ü., (1997), “Süreksiz Katkılı Metal Matrisli Kompozitler Bölüm 2: Süneklik”, *Metalurji*, 21, 109: 46-53.
- Crouch, I.G., (1987), “Aluminium Squeeze Casting Technology-a European Researches Viewpoint”, *Australian Conference on Materials for Industrial Development*, Christchurch, New Zealand, 24-26.
- Demirkesen, E., (1991), *Kompozit Malzemeler*, İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Yayın No:3/1991, İstanbul.
- Eliasson, J. ve Sandström, R., (1995), “Applications of Aluminium Matrix Composites”, *Key Engineering Materials*, 104-107: 3-36.
- Ersoy, H.Y., (2001), *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayınları, 66, İstanbul.
- Erturan, H., Savaş, M.A. ve Altıntaş, S., (2000), “Döküm Kalitesinin Sıkıştırma Döküm Yöntemi ile Yükseltilmesi”, *Mühendis ve Makina*, 41, 486: 43-46.
- Fang, C.-K., Fang, R.L., Weng, W.P. ve Chuang, T.H., (1999), “Applicability of Ultrasonic Testing for the Determination of Volume Fraction of Particulates in Alumina-Reinforced Aluminum Matrix Composites”, *Materials Characterization*, 43: 217-226.
- Foltz, J.V. ve Blackmon, C.M., (1998), “Metal Matrix Composites”, *Advanced Materials & Processes*, Metals Park, 154(6): 19-23.
- Ghomashchi, M.R. ve Vikhrov, A., (2000), “Squeeze Casting: an Overview”, *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 1-9.

Gül, F., (1999), "Döküm Yoluyla Alüminyum Temelli Parçacık Takviyeli Kompozit Geliştirme", Doktora Tezi, MÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (Tez Danışmanı: Prof.Dr.Mehmet Koz).

Gür, C.H. ve Ogel, B., (2001), "Non-destructive Microstructural Characterization of Aluminium Matrix Composites by Ultrasonic Techniques", *Materials Characterization*, 47: 227-233.

Gür, C.H., (2001), "Investigation of SiC_p Reinforced Aluminium Matrix Composites by Shear and Longitudinal Ultrasonic Waves", *INSIGHT, British Journal of NDT*, 43, 11: 748-750.

Hanada, K., Murakoshi, Y., Negishi, H. ve Sano, T., (1997), "Microstructures and Mechanical Properties of Al-Li/SiC_p Composite Produced Extrusion Processing", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 405-410.

Hashim, J., Looney, L. ve Hashmi, M.S.J., (2002), "Particle Distribution in Cast Metal Matrix Composites-Part I", *Journal of Materials Processing Technology*, 123: 251-257.

<http://www.amc-mmc.co.uk>.

<http://www.cmt.ltd.com/mmc.htm>.

Huda, D., El Baradie M.A. ve Hashmi, M.S.J., (1993), "Metal Matrix Composites: Materials Aspects, Part II", *Journal of Materials Processing Technology*, 37: 529-541.

Huda, M.D., Hashmi, M.S.J. ve El-Baradie, M.A., (1995), "MMCs: Materials, Manufacturing and Mechanical Properties", *Key Engineering Materials*, 104-107: 37-64.

Jung, H.K., Cheong, Y.M., Ryu, H.J. ve Hong, S.H., (1999), "Analysis of Anisotropy in Elastic Constants of SiC_p/2124 Al Metal Matrix Composites", *Scripta Materialia*, 41, 12: 1261-1267.

Kaczmar, J.W., Pietrzak, K. ve Wlosinski, W., (2000), "The Production and Application of Metal Matrix Composite Materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 106: 58-67.

Kalkanlı, A. ve Sarioğlu, F., (1995), "Microstructural Assessment of Al-SiC_p Composite Produced by Squeeze Casting", *Tr.J.of Medical Sciences Supplement, TÜBİTAK*, 168.

Kang, C.G., Kim, N.H. ve Kim, B.M., (2000), "The Effect of Die Shape the Hot Extrudability and Mechanical Properties of 6061 Al/Al₂O₃ Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 100: 53-62.

Kennedy, A.R. ve Wyatt, S.M., (2000), "The Effect of Processing on the Mechanical Properties and Interfacial Strength of Aluminium/TiC MMCs", *Composites Science and Technology*, 60: 307-314.

Kervorkijan, M.V., (1998), "MMCs for Automotive Applications", *American Ceramic Society Bulletin*, Columbus, 77(12): 53-61.

Kwok, J.K.M. ve Lim, S.C., (1999), "High-Speed Tribological Properties of Some Al/SiC_p Composites: I. Frictional and Wear-Rate Characteristics", *Composite Science and Technology*, 59: 55-63.

Kwon, S.J. ve Goo, B.C., (2000), "A Study on the Friction and Wear Characteristics of Brake Pads for Al MMC Brake Disc", *Key Engineering Materials*, 183-187: 1225-1230.

Lee, S., Kwon, D. ve Suh, D., (1996), "Microstructure and Fracture of SiC-Particulate-

Reinforced Cast 356 Aluminum Alloy Composites”, Metallurgical and Materials Transactions A, 27A: 3893-3901.

Libin, Z. ve Jintao, H., (1998), Metal Matrix Composites in China, Journal of Materials Processing Technology, 75: 1-5.

Midling, O.T. ve Grong, O., (1995), “Processing and Properties of Particle Reinforced Al-SiC MMCs”, Key Engineering Materials, 104-107: 329-354.

Morelli, E.C., Chawla, N. ve Schaller, R., (2001), “Thermo-Mechanical Characterization of 2080 Al/SiC_p Composites by Mechanical Spectroscopy Technique”, Journal of Materials Science Letters, 20: 163-165).

Mortensen, A., (2001), “Metal Matrix Composites in Industry: an Overview”, BRRT-CT98-5061.

Nguyen, T.G., Suery, M. ve Favier, D., (1994), “Influence of SiC Particle Volume Fraction on the Compressive Behaviour of Partially remelted Al-Si-Based Composites”, Materials Science and Engineering, A183: 157-167.

Noguchi, M. ve Takahashi, K., (1997), “Status and Prospects for Metal Matrix Composites in Japan”, Key Engineering Materials, 127-131: 153-164.

Özben, T., (2001), “Sıkıştırma Döküm Yöntemiyle Üretilen Seramik Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, (Tez Danışmanı: Prof.Dr.Ayşegül AKDOĞAN).

Pai, B.C., Pillai, S.G.K., Pillai, R.M. ve Satyanarayana, K.G., (1990), “Microstructural Evaluation of Cast Aluminium Alloy Matrix Composites”, Solidification of Metal Matrix Composites, Edited by Pradeep Rohatgi, The Minerals, Metals & Materials Society, USA.

Park, C.-S., Kim, M.-H. ve Lawley, A., (1999), “Microstructure and Wear Response of Spray Cast Al-Si/SiC_p Composites”, The International Journal of Powder Metallurgy, 35, 1: 41,50.

Rawal, S., (2001), “Metal-Matrix Composites for Space Applications”, JOM, 53(4):14-17.

Schwartz, M., (1992), Composite Materials Handbook, Second Edition, McGraw-Hill Inc., New York.

Seo, Y.H. ve Kang, C.G., (1999), “ Effect of Hot Extrusion Through a Curved Die on the Mechanical Properties of SiC_p/Al Composites Fabricated by Melt-Stirring”, Composites Science and Technology, 59: 643-654.

Spigarelli, S., Cerri, E., Cavaliere, P. ve Evangelista, E., (2002), “An Analysis of Hot Formability of the 6061+20% Al₂O₃ Composite by means of Different Stability Criteria”, Materials Science and Engineering, A327: 144-154.

Sternowsky, S.B., O'Donnel, G. ve Looney, L., (1997), “Effect of Particle Size on the Mechanical Properties of SiC Particulate Reinforced Aluminium Alloy AA6061”, Key Engineering Materials, 127-131: 455-462.

Subramanian, K.N., Bieler, T.R. ve Lucas, J.P., (1995), “Mechanical Shaping of Metal Matrix Composites”, Key Engineering Materials, 104-107: 175-214.

Sui, X., Luo, C., Luo, Z. ve Quyang, L., (1997), “The Fabrication and Properties of Particle Reinforced Cast Metal Matrix Composites”, Journal of Materials Processing Technology, 63:

426-431.

Şahin, Y., (2000), Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.

Şahin, Y., (2003), “Wear Behaviour of Aluminium Alloy and its Composites Reinforced by SiC Particles Using Statistical Analysis”, Materials and Design, 24: 95-103.

Taha, M.A., (2001), “Practicalization of Cast Metal Matrix Composites (MMCCs)”, Materials and Design, 22: 431-441.

Tjong, S.C., Wu, S.Q. ve Liao, H.C., (1997), “Wear Behaviour of an Al-12%Si Alloy Reinforced with a Low Volume Fraction of SiC Particles”, Composite Science and Technology, 57: 1551-1558.

Tokaji, K., Shiota, H. ve Kobayashi, K., (1999), “Effect of Particle Size on Fatigue Behaviour in SiC Particulate-Reinforced Aluminium Alloy Composites”, Fatigue Fracture Engineering Materials Structures, 22: 281-288.

Wojciechowski, S., (2000), “New Trends in the Development of Mechanical Engineering Materials”, Journal of Materials Processing Technology, 106: 230-235.

Yılmaz, M., (1997), “Production and Mechanical Behavior of Particulate Reinforced Auminum Matrix Composites”, PhD Thesis, Boğaziçi University, (Thesis Supervisor: Prof.Dr.Sabri ALTINTAŞ).

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	12.09.1967	
Doğum yeri	Erzurum	
Lise	1981-1985	İstanbul Pendik Lisesi
Lisans	1987-1991	Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak. Makina Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1991-1994	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı
Doktora	1994-2004	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1993-Devam ediyor YTÜ Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği
Bölümü, Araştırma Görevlisi