

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AlMg₃ / SiC_p KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ ve
MEKANİK ÖZELLİKLERDEKİ DEĞİŞİMLERİN
İNCELENMESİ**

Makina Yük. Müh. Nilhan ÜRKMEZ

**F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

154376

Tez Savunma Tarihi : 06 Ekim 2004

Tez Danışmanı : Prof. M. Emin YURCİ (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN (YTÜ)

: Prof. Dr. Niyazi ERUSLU (İTÜ)

: Prof. Dr. Ahmet ARAN (İTÜ)

: Prof. Dr. Sabri ALTINTAŞ (BÜ)

İSTANBUL, 2004

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AlMg₃ / SiC_p KOMPOZİTLERİNİN ÜRETİMİ ve
MEKANİK ÖZELLİKLERDEKİ DEĞİŞİMLERİN
İNCELENMESİ**

Makina Yük. Müh. Nilhan ÜRKMEZ

**F.B.E Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmal Usulleri Doktora Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 06 Ekim 2004

Tez Danışmanı

Jüri Üyeleri

: Prof. M. Emin YURCİ (YTÜ)

: Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN (YTÜ)

: Prof. Dr. Niyazi ERUSLU (İTÜ)

: Prof. Dr. Ahmet ARAN (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.....	xiii
ABSTRACT.....	1
1. GİRİŞ.....	2
2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	6
2.1 Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması	7
2.2 Matris Malzemeleri.....	9
2.3 Takviye Malzemeleri	14
2.4 Metal Matrisli Kompozitlerde Arayüzeyler	16
2.5 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	20
2.5.1 Katı Faz Üretim Yöntemleri	21
2.5.1.1 Toz Metalurjisi	21
2.5.1.2 Difüzyon Bağı Oluşturma Tekniği	24
2.5.2 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri	25
2.5.2.1 Sıvı Metal Emdirme Tekniği	26
2.5.2.2 Sıkıştırma Döküm Tekniği	27
2.5.2.3 Sıvı Metal Karıştırma Teknikleri.....	28
2.5.3 Diğer Üretim Yöntemleri.....	29
2.5.3.1 Rheocasting ve Compocasting Döküm Tekniği	29
2.5.3.2 Vidalı Ekstrüzyon	30
2.5.3.3 Plazma Püskürtme Tekniği	30
2.5.3.4 In-Situ Tekniği.....	31
2.5.3.5 XD Tekniği	31
2.5.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Deformasyon İşlemleri.....	32
2.5.5 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Mukavemet Mekanizmaları	34
2.5.6 Kompozit Malzemelerde Plastik Deformasyon Davranışı	36
2.6 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemelerde Mikro Mekanik Modeller	36
2.6.1 Efektif Modüllerin Hesaplanması.....	37
2.6.1.1 Hashin-Strikman Sınırları.....	37
2.6.1.2 Birim Hücre Modelleri	38
2.6.1.3 Ortalama Alan Metotları.....	39
2.6.1.4 Tsai-Halpin Eşitlikleri	44

3.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	45
3.1	Kompozit Malzeme Üretimi.....	45
3.1.1	Malzeme Seçimi	45
3.1.2	Deney Düzenegi	49
3.1.2.1	Ergitme ve Karıştırma Ünitesi.....	49
3.1.2.2	Döküm Kalıpları	52
3.1.3	Sıvı Karıştırma Yöntemi ile Denemeler	53
3.1.4	Kompozit Döküm Yönteminin Modifiye Edilmesi	55
3.2	Üretilen Kompozit Malzemelerin Haddelenmesi	59
3.3	Karakterizasyon	60
3.3.1	Hacımsal Takviye Oranlarının Tespit Edilmesi	60
3.3.2	Özgül Ağırlıkların Tespit Edilmesi	60
3.3.3	Sertlik Ölçümleri	62
3.3.4	Çekme Deneyleri	63
3.3.5	Mikroyapı İnceleme.....	66
4.	DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	67
4.1	Proses Değişkenlerinin Belirlenmesi.....	67
4.2	Modifiye Edilmiş Kompozit Döküm Yöntemi.....	69
4.3	Kimyasal Bileşimin İncelenmesi	73
4.4	Özgül ağırlıkların Tespit Edilmesi ve Porozitenin Belirlenmesi.....	75
4.5	Haddeleme	77
4.6	Sertlik Ölçümleri	79
4.7	Çekme Deneyleri Sonuçları.....	82
4.8	Mikroyapı İncelemeleri	90
4.8.1	Tarama Elektron Mikroskobu ve EDS Analiz Sonuçları	96
5.	SONUÇLAR.....	99
6.	KAYNAKLAR.....	102
7.	ÖZGEÇMİŞ	106

SİMGE LİSTESİ

E_p	Takviye Fazın Elastiklik Modülü
E_m	Metal Fazın Elastiklik Modülü
E_k	MMK Malzemenin Elastiklik Modülü
G_p	Takviye Fazın Kayma Modülü
G_m	Metal Fazın Kayma Modülü,
K_p	Takviye Fazın Bulk Modülü,
K_m	Metal Fazın Bulk Modülü,
K_k	MMK Malzemenin Bulk Modülü
V_p	Takviye Fazın Hacım Oranı
ν_p	Takviye Fazın Poisson Oranı
ρ_p	Takviye Fazın Özgöl Ağırlığı (g/cm^3)
ρ_m	Metal Fazın Özgöl Ağırlığı (g/cm^3)
ν_m	Metal Fazın Poisson Oranı

KISALTMA LİSTESİ

MMK	Metal matrisli kompozit malzemeler
AMK	Alüminyum matrisli kompozit malzemeler
BHM	Birim Hücre Modelleri
HS	Hashin- Strikman sınırları
NADIBO	North American Defense Industrial Base Organization
MT	Mori-Tanaka metodu



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Metal matrisli kompozitlerin şematik olarak tanımlanması	7
Şekil 2.2 MMK’larda matris malzemelerinin sınıflandırılması	8
Şekil 2.3 Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye örnekleri (a)Sürekli elyaf takviye, (b) Parçacık takviye, (c) Whisker takviye, (d) Süreksiz elyaf takviye	9
Şekil 2.4 Islatma açısı	18
Şekil 2.5 Toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretim şeması.....	23
Şekil 2.6 Difüzyon bağlama yöntemi ile MMK üretim şeması.....	25
Şekil 2. 7 Mori-Tanaka metodunun geçerli olduğu kompozit mikro yapısı.....	41
Şekil 2. 8 Self-consistent metodunun geçerli olduğu kompozit mikro yapısı	42
Şekil 3.1 Kompozit malzeme hazırlama düzeneği şematik resmi	49
Şekil 3.2 Kompozit malzeme üretiminde kullanılan ergitme fırını	49
Şekil 3.3 Sıvı metal karıştırma işlemlerinde kullanılan seramik karıştırıcılar	50
Şekil 3.4 Yarı katı karıştırma işlemlerinde kullanılan grafit karıştırıcılar.....	51
Şekil 3.5 Çelik çubuklardan hazırlanan karıştırıcı kesitlerinden örnekler	51
Şekil 3.6 Döküm numuneleri elde edilirken kullanılan döküm kalıpları	52
Şekil 3.7 Modifiye edilmiş kompozit döküm yönteminin şematik gösterimi	55
Şekil 3.8 Alüminyum magnezyum alaşım diyagramı ve seçilen çalışma bölgesi.....	56
Şekil 3.9 Matris malzemesi olarak kullanılan AA5754 alaşımı	57
Şekil 3.10 Yarı-katı karıştırma yöntemi uygulaması sırasında karışımın görüntüsü	57
Şekil 3.11 Değişik hacimsal takviye oranlarında üretilen kompozit malzemeler	58
Şekil 3.12 Kompozit numunelerin haddelenmesi.....	59
Şekil 3.13 Yapısında döküm hatası bulunan numuneler	61
Şekil 3.14 Hazırlanan kompozit numuneler üzerinde sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktalar.	62
Şekil 3.15 Standard çekme numuneleri	63
Şekil 3.16 Çekme numunelerinin hazırlanış safhalarından alınmış görüntüler.....	64
Şekil 4. 1 Farklı iki kompozit döküm yöntemi için (a) SiC hacim oranı (b) ortalama SiC boyutu (c) kalıp sıcaklıklarının poroziteye etkisi	70
Şekil 4. 2 Farklı iki kompozit döküm yöntemi için (a) SiC hacim oranı (b) ortalama SiC boyutu (c) kalıp sıcaklıkları ile parçacık dağılım faktörünün değişimi.....	70
Şekil 4.3 Farklı oranlarda takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntüleri	72
Şekil 4. 4 (a) Basınç ve ısıl işlemin çekme dayanımına etkisi (b) 370 °C kalıp sıcaklığı ve 820 °C döküm sıcaklığında basınçsız ve basınç altında soğuma eğrisi.....	73
Şekil 4.5 Takviye oranları, teorik özgül ağırlık ve ölçülen özgül ağırlıklar.....	76

Şekil 4.6 Deneysel sonuçlar ile bazı mikro mekanik modellerin karşılaştırılması.....	77
Şekil 4.7 % 35 ezme uygulanmış %5 takviyeli kompozit numune	78
Şekil 4.8 Değişik ezme oranlarında haddelenmiş (a) % 5, (b) % 10, (c) % 15, (d) % 20 hacımsal takviyeli kompozit numuneler.....	78
Şekil 4.9 Tek yönlü %5 - % 20 haddelenmiş kompozit numuneler	79
Şekil 4.10 Matris malzemesinin sertlik değerlerinin takviye oranları ile değişimi	79
Şekil 4.11 Takviyesiz ve % 20 SiC takviyeli kompozit malzemenin yüzey sertlik değerlerinin ezme oranları ile değişimi.	80
Şekil 4.12 %20 ezme uygulanmış kompozit malzemelerin haddeleme yüzeylerine dik kesit boyunca sertlik değerlerinin değişimi(a) Takviyesiz (b) %5 (c) %10 (d) %15 (e) %20.....	81
Şekil 4.13 Farklı takviye ve ezme oranlarında kompozit malzemelerin çekme dayanımları...	82
Şekil 4.14 Çekme dayanımlarının takviye oranları ile değişimi (a) %0 Ezme (b) %5 Ezme (c) %10 Ezme (d) %15 Ezme (e) %20 Ezme	83
Şekil 4.15 Kompozit malzemelere % 20 ezme uygulanması sonucu çekme dayanımlarında meydana gelen değişimler	84
Şekil 4.16 Farklı takviye oranlarında üretilmiş kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının ezme oranları ile değişimi (a) Takviyesiz (b) %5 Takviye (c) %10 Takviye (d) %15 Takviye (e) % 20 Takviye	85
Şekil 4.17 Takviyesiz ve %20 takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının ezme oranları ile değişimi	86
Şekil 4.18 (a) AA5754 matris alaşımının akma gerilmesinin takviye ve ezme oranları ile değişimi (b) AA5754 / %15 SiC kompozitin akma gerilmesinin ezme oranları ile değişimi	87
Şekil 4.19 Takviye oranları ile kopma uzaması değerlerinin değişimi	88
Şekil 4.20 Takviye oranları ile elastiklik modülünün değişimi.....	89
Şekil 4.21 Deneysel elastiklik modülleri ile bazı mikro mekanik modellerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	89
Şekil 4.22 AA5754 / %20SiCp kompozit malzemesinin %20 ezme uygulanmış (a) ve ezme uygulanmamış (b) mikroyapılarının SEM fotoğrafları.....	90
Şekil 4.23 AA5754/ %15 SiC kompozit malzemesinin %20 ezme uygulanmış (a) ve ezme uygulanmamış (b) mikroyapıları	91
Şekil 4.24 AA5754/ %10 SiCp kompozit malzemesinin %20 ezme uygulanmış (a) ve ezme uygulanmamış (b) mikroyapıları	92

Şekil 4.25 Ezme uygulanmamış AA5754 / %5 SiCp malzemesinin SEM görüntüsü.....	93
Şekil 4.26 Matris malzemesi AA5754 alaşımının döküm sonrası SEM görüntüsü	93
Şekil 4.27 Ezme uygulanmamış AA5754 / %15 SiC kompozitinin SEM görüntüsü	94
Şekil 4.28 AA5754 / %35 SiC malzemenin mikroyapısı (a) x100 (b) x1000.....	94
Şekil 4.29 AA5754 / %35 SiC malzemenin SEM görüntüleri (a) x1500 (b) x5000	95
Şekil 4.30 AA5754/ %35 SiCp malzemesinin SEM görüntüleri.	95
Şekil 4.31 %15 takviyeli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları.....	96
Şekil 4.32 %20 takviyeli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları.....	97
Şekil 4.33 %35 takviyeli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları.....	98



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 AMK potansiyel ve mevcut uygulamaları	4
Çizelge 2.1 Matris/takviye kombinasyonları.....	10
Çizelge 2.2 Biçimlenebilir ve dökme alüminyum alaşımlarının gösterilişleri.	12
Çizelge 2.3 Temper kodları ve açıklamaları.....	14
Çizelge 2.4 Farklı matris ve takviye sistemlerinde oluşan arayüzey reaksiyonları.....	18
Çizelge 3.1 AA5754'ün fiziksel özellikleri.....	45
Çizelge 3.2 Kompozit üretiminde kullanılan matris malzemesinin kimyasal bileşimi	45
Çizelge 3.3 Kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan seramik parçacıkların karakteristik özellikleri.	46
Çizelge 3. 4 Kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan SiC'nin kimyasal bileşimi.	46
Çizelge 3 .5 Takviye cinsi ve tane iriliği belirleme denemeleri	47
Çizelge 3.6 Tane çapı dağılımı.	48
Çizelge 3.7 Karışım sağlama denemeleri (a).....	53
Çizelge 3.8 Karışım sağlama denemeleri (b)	54
Çizelge 3.9 Numunelerin gruplandırılması	65
Çizelge 4.1 %5 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları	73
Çizelge 4.2 %10 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları	74
Çizelge 4.3 %15 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları	74
Çizelge 4.4 %20 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları	74
Çizelge 4.5 %35 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları	74
Çizelge 4.6 (a) Yoğunluk değerlerinin takviye oranlarına göre değişimi	75
Çizelge 4.6(b) Teorik ve ölçülen özgül ağırlıkları ile porozite oranları.....	75
Çizelge 4.7 Değişik takviye oranlarına sahip numunelere uygulanan ezme oranları.....	77
Çizelge 4.8 Kompozit malzemelerin yüzey sertliklerinde meydana gelen artışlar.	80
Çizelge 4.9 Matris malzemesinin döküldüğü haldeki çekme dayanımları.....	84
Çizelge 4.10 Hadde ürünü matris malzemelerinin çekme dayanımları.....	84
Çizelge 4.11 Matris malzemesinin döküldüğü haldeki akma gerilmesi değerleri.....	87
Çizelge 4.12 Hadde ürünü matris malzemelerinin akma gerilmesi değerleri	87
Çizelge 4.13 Üretilen kompozit malzemelerinin % kopma uzaması değerleri	88

ÖNSÖZ

Malzeme bilimindeki yenilikler, teknolojik alanlarda çalışan tasarımcılar için daima anahtar rol oynamıştır. Yeni bir malzemenin üretilmesi ya da var olan malzemelerin daha üstün özellikler taşıyacak şekilde geliştirilmesinden sonra, bu malzemeye bağlı olarak bütün teknolojik alanlarda hızlı gelişmeler yaşanmıştır.

1970’li yıllarda, savunma ve uzay sanayileri tarafından üzerinde yoğun bir şekilde çalışılmaya başlanan metal matrisli kompozit malzemeler (MMK), son on yıldır otomotiv ve elektronik dahil olmak üzere pek çok endüstri alanında kullanılmaktadır. Klasik yapısal malzemeler içinde bir araya getirilemeyecek birden fazla özelliğe aynı anda ulaşılabilmesi ve uygun malzeme kombinasyonlarının seçimi ile malzeme özelliklerinin isteğe bağlı olarak geliştirilebilmesi, kompozit malzemelerin mühendislik uygulamalarında önem kazanmasının başlıca sebepleridir. MMK’larda matris ve takviye çeşitlerinin çokluğu, çok geniş bir yelpazede malzeme kombinasyonu tasarlanmasına ve önceden belirlenen özelliklerin elde edilmesi için malzeme seçimine imkan vermektedir.

Çok farklı tür ve şekilde malzemelerle takviye edilerek üretilen MMK’lar arasında parçacık takviyeli MMK’ların, diğer takviye türlerine göre, özellikle yüksek sıcaklık dayanımı yönünden üstünlük sağlaması, aşınma dirençlerinin daha yüksek, maliyetlerinin daha düşük ve üretimlerinin daha kolay olması, bu malzemelerin kullanıcılar açısından daha cazip bir hale gelmesine sebep olmuştur. Parçacık takviyeli MMK’ların, toz metalürjisi veya döküm yöntemleri ile üretilmesinden sonra ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi ikincil şekil verme işlemlerine de oldukça yatkın oldukları görülmüş, özellikle alüminyum esaslı kompozitlere uygulanan ısıt işlemler ile geleneksel malzemelere göre çok daha yüksek sertlik, aşınma direnci, ısıt şoklara dayanım özelliklerine ulaşılmıştır. Son on yıldır bu malzemeler üzerinde sürdürülen çalışmaların bir sonucu olarak, dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi ikincil işlemlerin uygulanabilirlik kazanmasıyla, imalatla istenen yüksek ölçü tamlığına ulaşılabilir.

Malzeme araştırmacıları tarafından “The materials of the future and always will be” olarak tanımlanarak ileri kompozitler sınıfına dahil edilen MMK’lar, gelişen üretim yöntemlerinin de etkisi ile değişik uygulama alanlarında teknik ve ticari başarı kazanmaya devam etmektedirler.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince güven ve desteğini esirgemeyen, değerli önerileriyle beni yönlendiren hocam, tez danışmanım, Prof. Mehmet Emin Yurci'ye, çalışmalarımın başlangıcında kompozit malzemeler ile beni tanıştıran ve bu konuda çalışmam için beni yüreklendiren hocam, Prof. Dr. Ahmet Ulvi Avcı'ya, çalışmalarını örnek aldığım tavsiyeleri ile bana destek olan hocalarım, Prof. Dr. Ayşegül Akdoğan, Prof. Dr. Numan Durakbaşı, Prof. Dr. Erol Akata ve Prof. Dr. Niyazi Eruslu'ya, döküm kalıplarının imalini yaptırdığı Ermak Madeni Aksam San. ve TİC. A.Ş. imalat birimi personeline ve bu olanağı sağlayan Ertat Çokimre'ye, Assan Alüminyum A.Ş. laboratuvar olanaklarını kullanmamızı sağlayan Güngör Yıldızbayrak ve diğer AR-GE personeline, teknik desteğini esirgemeyen Murat Dündar'a, tez çalışmalarımın en kritik aşaması olan deney numunelerinin hazırlanmasında teknik destek sağlayarak değerli zaman ve bilgilerini benimle paylaşan Ortadoğu Rulman Sanayi A.Ş. Fabrika Müdürü Dr. Feridun Özhan'a ve teknik personeline, ergitme ve karıştırma ünitelerinin tasarımı ve imalini beraberce gerçekleştirdiğimiz E.M.Y. Makine Bölümü Öğretim Görevlisi Cevat Altıntaş'a, malzeme üretimi aşamasında tecrübi bilgilerinden yararlandığım Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Eğitimi Anabilim Dalı Öğretim Görevlisi Ferhat Gül'e, numunelerden radyografik görüntü alınması konusunda teknik destek sağlayan arkadaşım Tıbbi Radyofizik Uzmanı Şule Parlar'a, fikirleriyle bana destek veren değerli arkadaşım, Trakya Üniversitesi Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Doğan Eryener'e, tez çalışmamın her aşamasında benimle birlikte çalışan, sonuçların alınması için her türlü gayret ve desteğini esirgemeyen mesai arkadaşım Trakya Üniversitesi Öğretim Elemanı Arş. Gör. Vedat Taşkın'a, sabır ve destekleri ile bana güç veren aileme, özellikle de deneysel çalışmamın deneme dökümleri yapılırken benimle birlikte çalışan babam, Cengiz Ürkmez'e ve çalışmalarım süresince beni daima motive eden, güç aldığım sevgili oğlum Sermetcan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Uzay, havacılık, otomotiv ve savunma sanayiinde, hafif, aşınma direnci ve özgül dayanımı yüksek makina parçaları ve yapı bileşenlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fiziksel özellikleri önceden belirlenip mümkün olduğunca az bitirme işlemleri uygulanarak kolay ve ekonomik olarak üretilmesi amaçlanan bu tür mühendislik uygulamalarında, metal matrisli kompozit malzemelerin giderek artan oranlarda kullanıldığı görülmektedir. Alışılmış şekil verme yöntemleri ile sınırlı olarak şekillendirilebilen bu malzemelere üretim aşamasında kazandırılan özelliklerin, şekillendirme işlemleri sırasında korunabilmesi için süreksiz faz takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler üzerine çalışmalar yapılmakta, sözü edilen sorunun çözümü için parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler potansiyel olarak görülmektedir.

Dolayısı ile bu çalışma nispeten ucuz ve kolay bir yöntem kullanarak parçacık takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretmek ve değişik ezme oranlarında soğuk haddelenmenin bu malzemelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine etkilerini incelemek amacı ile yapılmıştır. İki aşamada gerçekleştirilen çalışmanın ilk aşamasında, seçilen alüminyum alaşımı farklı oranlarda silisyum karbür ile takviye edilmiş ve basınç altında katılaştırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Döküm yöntemleri ile kompozit malzeme üretiminde, takviye fazının matris malzemesi tarafından yeterince ısıtılabilmesi, takviye edilmiş malzemenin homojen olarak karıştırılamaması ve takviyenin malzeme dışına itilmesi gibi karıştırma problemlerini en aza indirmek amacı ile kompozit döküm yöntemi üzerinde yenilikler yapılmıştır. Böylece yüksek oranlarda takviye edilen kompozit malzemelerin homojen olarak karıştırılması mümkün olmuş ve karışımın sağlanabileceği en uygun sıcaklık aralığı belirlenmiştir. Karıştırma işlemleri sırasında karşılaşılan sorunlar, farklı sıcaklık aralıkları için özel olarak tasarlanan karıştırıcılar vasıtası ile çözümlenmiştir. Ayrıca, bu işlemler mümkün olduğu kadar düşük sıcaklıklarda yapılarak istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının oluşumu en aza indirgenmeye çalışılmıştır. İkinci aşamada ise, değişik oranlarda silisyum karbür içeren kompozit malzemeler farklı ezme oranlarında soğuk haddelenmiştir. Elde edilen kompozit malzemelerin mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

Sonuç olarak, modifiye edilmiş yarı katı karıştırma tekniğinin takviye malzemesinin matris alaşımı tarafından ısıtılabilirliğini iyileştirdiği, karıştırma esnasında takviyenin malzeme dışına itilmesi ve topaklanma problemlerini önlediği, homojen dağılımın sağlanabildiği görülmüştür. Yarı-katı karıştırma arkasından uygulanan sıkıştırma döküm yöntemi ile diğer döküm yöntemlerine nazaran daha az poroziteli yapı elde edilmiştir. Malzemeye uygulanan haddeleme işlemleri ve takviye oranlarındaki artışın malzemenin soğuk biçimlendirilme kabiliyetini etkilediği ve şekil değiştirme oranını azalttığı ancak, çekme dayanımı, akma gerilmesi, elastiklik modülü ve sertlik değerlerinde artış meydana getirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Metal matrisli kompozit malzeme, haddeleme, alüminyum, SiC, sıkıştırma döküm, yarı katı karıştırma

ABSTRACT

In space, aviation, automotive and defence industries, light machinery parts and structure components with high erosion resistance and specific strength are demanded. In such engineering applications that are easy, economic and intended to be produced within the minimum completing processes for predetermined physical properties, metal matrix composites are being used at an increasing rate. In the forming operation, retaining the qualities obtained in the manufacturing process is still among the major problems for the manufacturers and producers to overcome. The use of discontinuous reinforced aluminum composites are accepted as a potential solution to the aforementioned problem.

The intention of this study is to manufacture particle reinforced aluminum matrix composite materials and investigate the effects of varied volume fractions of SiC and cold rolling on the mechanical and microstructural properties of these materials. This study was carried out at two steps. At the first one, particle reinforced aluminum matrix composites were manufactured by modified compocasting and squeeze casting methods at variable reinforced volume fraction. The second step composite materials were cold rolled at varying reductions. In order to reduce such problems of stirring which were caused by poor wettability of reinforced phases by matrix materials in casting operation at the composite material manufacturing, non-homogeneous stirring of the reinforced matrix material homogeneously and undesired rejection of the reinforcement; melt stirring and semi-solid stirring processes were modified and by reinforcing composite materials at high volume fractions homogeneous stirring of the material was maintained. The problems encountered during the stirring process were solved by the use of stirrers designed specifically for variable temperature ranges. Furthermore, the processes are carried out at the lowest temperature possible in order to minimize undesired interface reactions. At the proceeding step, variably reinforced composite materials were cold rolled at varying reductions. Microstructural and mechanical properties of the obtained composite materials were determined.

Consequently, the use of modified technique improved the wettability of SiC, prevented rejection of the reinforcement in the stirring process and the clusters problems and maintained homogeneity. By employing the squeeze casting method after semi-solid stirring, a relatively low level of porosity was obtained in comparison to other casting methods. The rolling process and the increase in reinforced volume fraction affected the cold formability of the composite materials and decreased elongation, however the estimated increase in tensile strength, yield stress, elasticity modulus and hardness was observed.

Keywords: Metal matrix composites, rolling, aluminum, SiC, squeeze casting, semi solid stirring

1. GİRİŞ

Doğada mevcut olan kompozit yapının, insanlığın ilk varoluşundan beri keşfedilip taklit edilmeye başlanması, insan yapısı kompozitlerin, insanlığın hizmetine sunulmasının başlangıcı olmuştur. Farklı malzemelerin istenen özelliklerini tek bir malzemedeki birleştirmeyi başaran insanoğlu, bu malzemeleri kendi hayatını kolaylaştırmak, korumak, çeşitli alanlarda üstünlük sağlamak ve fiziki engelleri aşabilmek amacıyla kullanmaya ve geliştirmeye başlamıştır.

Hayvansal lifler, ağaç lifleri, ipek ve yapıştırıcılardan oluşan bir malzeme sistemini 13. yüzyılda Moğollar ok ve yay yapımında kullanmışlar, eski İsrail halkı, çamur ve saman karışımından briketler yapmışlardır. Mısırlılar ilk zamanlarda ağaç talaşı ve reçineler kullanarak takviyeli malzemeler üretmişler, ortaçağ da ise kılıçlar ve zırhlar bu günün tabakalı kompozit yapıları gibi üretilmişlerdir.

Tabakalı ve sandviç yapılı kompozitler ilk olarak 1940 yılında radar güdümlü “The Mosquito” uçağının iç bölmelerinde kullanılmıştır. Cam elyaf takviyeli polyester kompozitler ise 2. Dünya Savaşı sırasında savaş uçaklarında kullanılmaya başlanmış, yapıyı hafifletmesi için kapı, kaplama vb. gibi elemanlarda ve dayanım kazandırılması gerekli olan her kısımda kullanılmıştır. Cam elyaf takviyeli kompozitler Polaris denizaltısının roketlerinin kaplamalarında kullanıldıktan sonra uzay sanayiinde de kabul görmüştür.

1950’lerde, cam elyaf üretim teknolojileri geliştirilmiş ve yüksek performanslı cam elyaflar üretilmiştir. 1950’lerin sonunda, araştırmacılar daha yüksek dayanımlı elyaflar üretebilmek amacıyla hafif metallere odaklanmış ve boron elyafların üretimi bu çabaların ilk sonuçları olmuştur. Bu gelişmeyi karbon elyaf, berilyumoksit elyaf, ve grafit elyafların üretimi takip etmiştir. Elde edilen elyaf ve filamentlerin etrafının matris görevi gören alüminyum gibi metallerle sarılmasıyla Metal Matrisli Kompozitler kullanılmaya başlanmıştır (Nadibo, 1993).

MMK’larda matris, özel seçilmiş bir metal veya metal alaşımıdır ve ısı işlem uygulamaları ile matris malzemesinde isteğe bağlı yapısal dönüşümler sağlanabilir. Uygulanabilir termomekanik işlem çeşitliliği ve seçilebilir uygun alaşım kompozisyonlarının çokluğu nedeniyle, metalik malzemeler çok geniş bir oranda kontrol edilebilen özellikler sergiler. MMK’lar çoğu kez kendisini oluşturan matris fazından çok daha düşük süneklik ve tokluk değerlerine sahiptirler ancak, süneklik ve tokluk değerleri seramik malzeme ve seramik matrisli kompozit malzemelere nazaran çok daha yüksektir. Genellikle alışılmış metallerden

daha hafif olan MMK'ların başlıca avantajları, önceden belirlenebilir fiziksel özellikleri ve geliştirilmiş mekanik özellikleridir. Göreceli olarak daha yüksek ergime sıcaklığına sahip olan takviye malzemeleri ile güçlendirildiklerinden, diğer kompozit malzemelere göre, yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri performans artışı, daha yüksek korozyon dirençleri, kimyasal ve fiziksel kararlılıkları, ısı ve elektrik iletkenliği gibi önemli fonksiyonel özellikleri, MMK'ların oldukça önemli avantajlarıdır. Ayrıca, MMK'lar döküm yolu ile elde edilebilmekte, biçimlendirilebilmekte, işlenebilmekte ve kaynak edilebilmektedirler. Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan malzeme problemleri göz önüne alındığında, çözüm bulunması ve/veya geliştirilmesi istenen malzeme özellikleri ile araştırmacıların MMK geliştirme amaçlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Dayanım, rijitlik ve boyutsal stabiliteyi arttırmak
- Tokluğu arttırmak (Çentik Darbe Dayanımı)
- Isıl çarpılma sıcaklığını arttırmak
- Mekanik sönümleme özelliğini arttırmak
- Sıvı ve gaz geçirgenliğini azaltmak
- Elektriksel özellikleri geliştirmek
- Maliyeti düşürmek
- Su absorpsiyonunu azaltmak
- Termal genleşmeleri azaltmak
- Kimyasal aşınma ve korozyona direnci arttırmak
- Ağırlığı azaltmak
- Korozi ortamda yüksek sıcaklıkta dayanım özelliklerini korumak
- Malzemelerin yeniden üretilebilirliğini arttırmak ve çevrenin olumsuz etkilerini azaltmak
- Dizayn esnekliği sağlayabilmek.

Metal matrisli kompozit malzemeler yapısal uygulamalarda kullanılmaları için iyi bir potansiyele sahiptirler. Ancak monolitik metal ve alaşımları ile karşılaştırıldıklarında, mukavemet ve elastiklik modülü değerlerindeki artışın yüksek maliyetten daha öncelikli hale geldiği uygulamalar dışındaki kullanımları sınırlıdır.

Alüminyum matrisli kompozit malzemelerin (AMK) potansiyel ve mevcut uygulamaları Çizelge 1.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 AMK potansiyel ve mevcut uygulamaları (NADIBO, 1993)

POTANSİYEL VE MEVCUT UYGULAMALAR	SAĞLANAN FAYDA	Ağırlık Azaltılması	Aşınma Direncinin Artması	Rijitlik	Isıl İletkenliğin Önceden Belirlenebilmesi	Yüksek Sıcaklıklarda Performans Artışı	Önceden Belirlenebilir CTE	Korozyon Direnci	Radyasyona Karşı Direnç	Yüksek Dayanım
Uçakların Dış Yüzey Kaplamaları		•				•				•
Taşıyıcı Elemanlar		•	•					•		•
Bisiklet Gövdeleri		•		•						•
Deniz Araçlarının Direkleri		•		•						•
Fren Rotorları		•	•							
Elektronik Ambalaj		•			•	•	•		•	
Elektronik Devre Taşıyıcıları		•			•	•	•			
Motor Silindir Gömlekleri		•	•							
Birleştirme Elemanları, Cıvatalar, Somunlar		•						•		•
Yer Araçları		•								•
İniş Takımları Destekleyicileri		•		•						•
Tıbbi İmplantlar		•						•		•
Optik Kılavuz Sistemleri		•		•	•		•			
Pistonlar		•	•							
Uydu Anten Direkleri		•		•						
Deniz Araçları		•		•				•		
Uzay Yapıları		•		•	•				•	
Transmisyon Parçaları		•	•					•		
Nükleer Santral Boru Donanımları		•						•	•	
Türbin Motor Parçaları		•	•			•				•
Sonsuz Vida Dişlileri		•	•							•

Parçacık takviyeli alüminyum alaşımları MMK sınıfının en çok araştırılan ve geliştirilen grubudur. Bu tür kompozitlere sürekli faz takviyeli kompozitlerden farklı olarak, metallere uygulanan deformasyon işlemlerinin çoğu adapte edilebilmektedir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde parçanın son boyutlarına çok yakın veya tam istenen boyutlarda şekillendirecek üretim yöntemleri seçilmesi zorunlu iken, süreksiz faz takviyeli kompozit malzemelere ekstrüzyon, haddeleme, dövme ve hatta süper plastik şekillendirme ile üretim sonrası farklı biçimlendirme işlemleri uygulanabilmektedir.

Bu çalışmada, AA5754 alaşımını SiC ile takviye ederek kompozit malzeme üretmek, üretim parametrelerinin malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek

ve bu malzemeye haddeleme ile ezme uygulayarak takviye oranlarındaki artışın plastik şekil değiştirme derecesi ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Matris malzemesi olarak seçilen AA5754 alaşımı, özellikle otomotiv ve denizcilik uygulamalarında yüksek korozyon dayanımı, yüksek şekil verilebilirlik ve iyi kaynak edilebilme özelliklerinden dolayı kullanılan bir alüminyum alaşımıdır. Seçilen malzemelere yarı-katı karıştırma ve sıvı halde presleme yöntemlerinin birlikte uygulanmasıyla parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Değişik hacımsal takviye oranlarında elde edilen kompozit malzeme numunelerine soğuk haddeleme yolu ile ezme uygulanmış, değişik ezme oranlarının kompozit malzeme özellikleri üstündeki etkisi incelenmiştir.



2. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

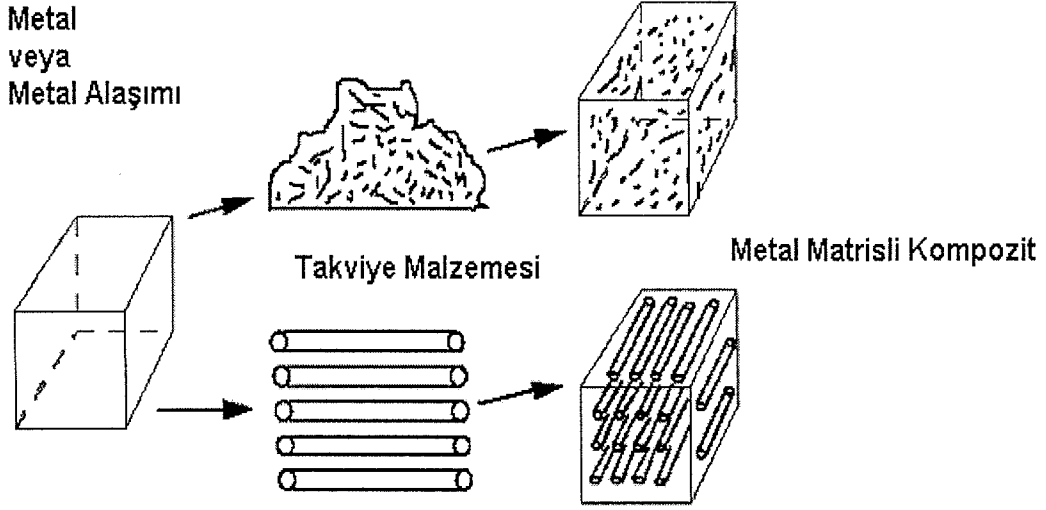
MMK'larda matris ve takviye çeşitlerinin çokluğu, çok geniş bir yelpazede malzeme kombinasyonu tasarlanmasına ve belirlenen özelliklerin eldesi için malzeme seçimine imkan verir. Örneğin, seramik elyafla takviye edilen alüminyumun dayanım ve rijitlik özellikleri, ağırlığını pek fazla değiştirmeden % 300 arttırılabilir, alüminyum metali 600° F sıcaklıkta dayanımının büyük bir kısmını kaybettiği halde, takviyeli alüminyum oda sıcaklığındaki dayanımının % 90'ını yüksek sıcaklıklarda korumaya devam etmektedir.

Başka bir örnek verilecek olursa, uçaklarda kullanılan elektronik cihazların ambalajları veya montaj edildiği parçaların, düşük termal genleşme katsayısına, düşük termal iletkenliğe ve düşük yoğunluğa aynı anda sahip olması istenmekte, fakat oldukça pahalı ve toksik özelliklere sahip olan berilyum haricinde hiçbir metal bu üç özelliği aynı anda sağlayamamaktadır, bu durumda, MMK'lar uygulanabilir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Oldukça yüksek modüllere sahip (ultra-high modulus graphite) grafit ile kombine edilerek üretilen alüminyum bu istenen üç özelliği aynı anda sağlayarak ihtiyaca cevap vermektedir. Düşük özgül ağırlıklı ve yüksek yapısal özellikler gösteren uygulamalara olan taleplerin artmasından dolayı MMK'lar arasında en dinamik gelişmeyi gösteren kompozit türü alüminyum matrisli kompozit malzemeler (AMK) olmuşlardır. AMK'larda saf alüminyum yada alüminyum alaşımları matris fazı olarak kullanılabilir. AlSi, AlSiMg, AlMn, AlFe, AlMnFe, AlNi ve AlZn en fazla kullanılan alüminyum alaşımlarıdır. Takviye fazı olarak da elyaf, parçacık vb. formlarda seramik malzemeler kullanılmaktadır. En çok kullanılan seramik takviye türleri Al_2O_3 , SiC, AlN ve B_4C dür. Ekolojik ve ekonomik gereksinimlerden dolayı düşük ağırlık istenen ve yüksek gerilmelere maruz konstrüksiyon ve parçalarda bu malzeme çiftleri çözüm olarak gösterilmektedir (Nadibo,1993). Alüminyum esaslı kompozit malzemelerin en önemli avantajları aşağıda verilmiştir.

- Düşük özgül ağırlık
- Döküm ve deformasyon işlemlerine uygunluk
- Nispeten düşük işlem maliyeti
- Yüksek korozyon direnci
- Nispeten kolay sağlanabilen ısı ve elektrik iletkenliği gibi fonksiyonel özellikler

2.1 Metal Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması

Şekil 2.1’ de genel tanımı gösterilen MMK'lar pek çok şekilde sınıflandırılabilmelerine rağmen genel olarak süreksiz takviyeli ve sürekli takviyeli olarak sınıflandırılırlar. (NADİBO, 1993)

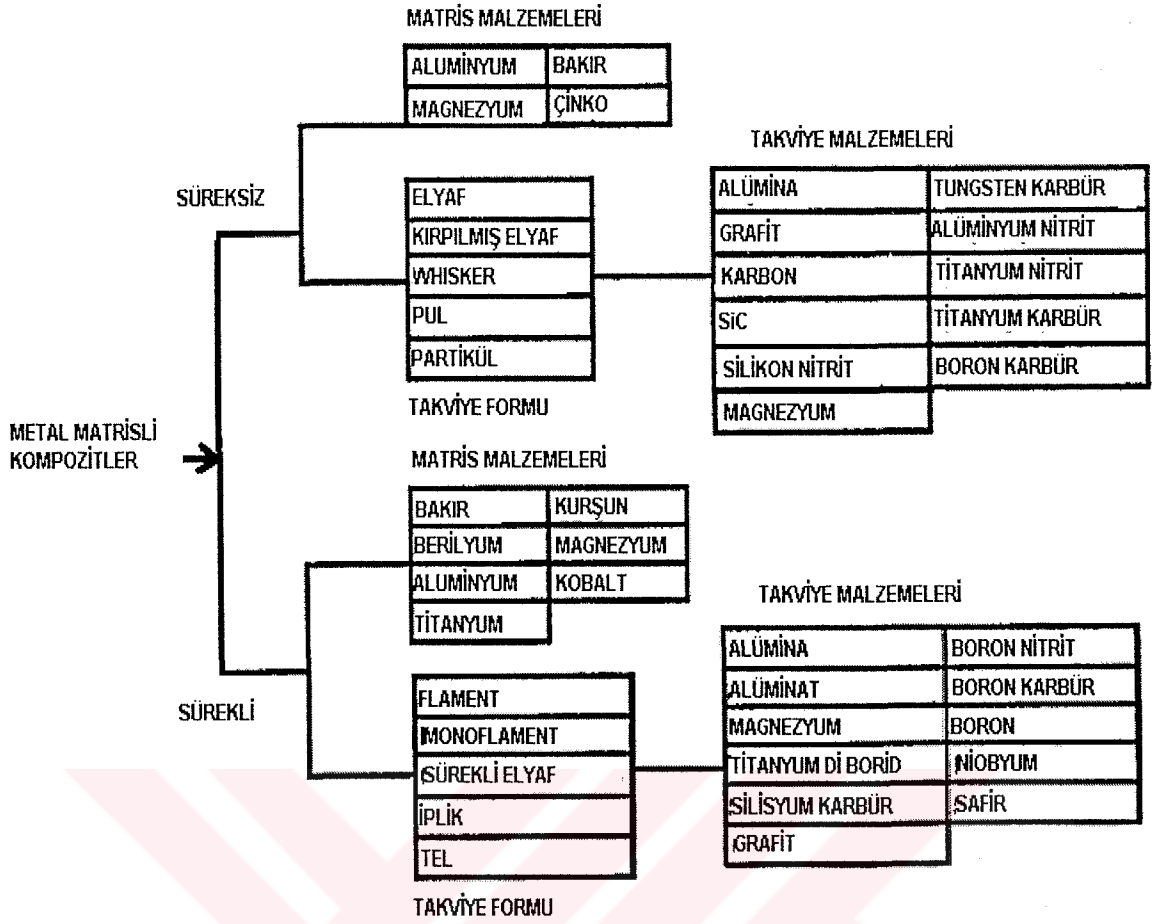


Şekil 2.1 Metal matrisli kompozitlerin şematik olarak tanımlanması (NADİBO, 1993)

Takviye boy/çap oranı esas alınarak yapılan sınıflandırmada büyük boy/çap oranına sahip olan takviyeler sürekli (uzun elyaflar, filamentler,vb.), küçük boy /çap oranına sahip takviyeler süreksiz (Kırpılmış elyaflar, parçacıklar, whiskerlar, vb.) olarak adlandırılır. Bu sınıflandırma detaylı olarak Şekil 2.2’de gösterilmiştir. (NADİBO, 1993)

Sürekli faz takviyeli MMK'ların özellikleri takviye olarak kullanılan elyafın yönüne ve dağılımına bağlı olmakta, dağılımın yönlendirilmesi ile isteğe bağlı malzeme üretimi mümkün olmaktadır (DOD, 1999).

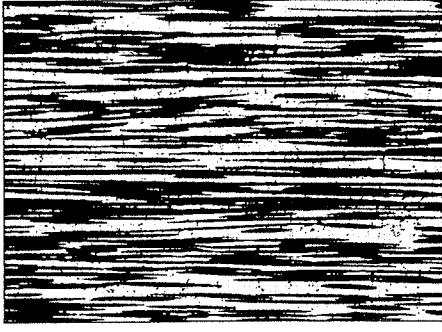
Sürekli faz takviyeli MMK'ların fiziksel ve mekanik özelliklerinin süreksiz takviyeli MMK'lara göre çok daha iyi olduğu bilinmektedir. Ancak, takviyenin tipi ve matris içindeki yüzdesi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerinden üretim maliyetine kadar, hemen hemen bütün özelliklerini oldukça büyük oranda değiştirmekte ve genelde özellik iyileştirilmesi ve maliyet artışı, boy/çap oranının artışıyla doğru orantılı olmaktadır. Şekil 2.3’te metal matrisli kompozit malzemelerde takviye çeşitlerinden örnekler gösterilmiştir.



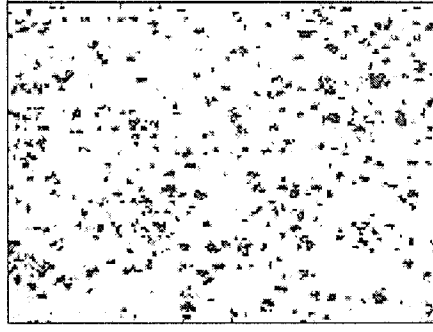
Şekil 2.2 MMK’larda matris malzemelerinin sınıflandırılması (NADİBO, 1993)

Süreksiz faz takviyeli MMK’lar için takviye malzemeleri rekabetçi maliyetlerle elde edilmekte ve metal işleme metotlarına benzer standartlar veya uygulanabilir standartlar bulunabilmektedir. Bu nedenlerle süreksiz faz takviyeli MMK’lar sürekli faz takviyeli MMK’lara oranla daha fazla tercih edilmektedirler.

Süreksiz faz takviyeli MMK’larda takviye malzemeleri matris içinde genellikle homojen olarak dağılmakta, üretim uygulamalarında ekstrem yükleme veya termal şartlar gerektirmemekte, takviyesiz metallerle karşılaştırıldığında dayanım ve rijitlik özelliklerinin önemli ölçüde arttığı ve izotropik özellikler sergilemekte olduğu görülmektedir. Özellikle parçacık takviyeli MMK’lar, whisker takviyeli veya uzun elyaf takviyeli MMK’lardan nispeten daha düşük dayanım özellikleri sağlamasına rağmen, monolitik malzemelere göre daha iyi ve geliştirilebilir özellikler sergilemesi ve daha düşük maliyetlerle kolay üretilebilir olması nedeniyle tercih edilmektedirler. (Rawal, 2001)



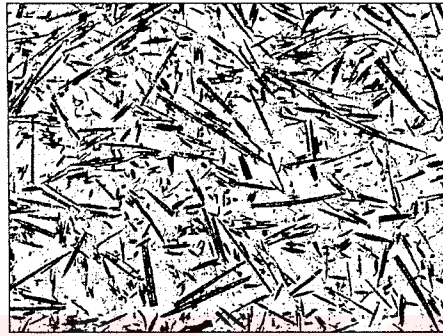
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.3 Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye örnekleri (a) Sürekli elyaf takviye, (b) Parçacık takviye, (c) Whisker takviye, (d) Süreksiz elyaf takviye (Nicoara, 1999)

2.2 Matris Malzemeleri

Matris metali, birleştirici özellikte olup, takviyeyi bir arada tutmak ve takviye edilmek suretiyle ulaşılan iyileştirilmiş özellikleri, belirtilmiş bir yönde veya üniform olarak dağıtma görevi görmektedir. Kompozit malzeme üretimi için matris malzemesi seçilirken, öncelikle takviyenin sürekli veya süreksiz olma durumu göz önünde bulundurulmaktadır. Sürekli takviye kullanılan uygulamalarda yükün büyük bir kısmının matris tarafından takviyeye transferi söz konusu olduğundan, sürekli takviyenin dayanımı, üretilecek olan kompozit malzemenin dayanımında belirleyici rol oynamaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan elyaflar genellikle yüksek dayanım ve yüksek elastiklik modülüne sahip, fakat oldukça gevreklerdir. Bu sebeple kullanılan matris malzemesi elyafları bir arada tutarak kuvvetleri elyafa iletme görevi yaparken aynı zamanda elyafı çevresel etkilerden, darbelerden korumalı ve çatlakları durdurmalıdır. Bu durumda matris malzemesi seçiminde, matris malzemesinin mukavemetinden çok, tokluk ve süneklik özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır. Süreksiz takviyeli kompozit malzemelerde ise, matris malzemesinin

dayanımı, kompozit malzemenin dayanımını belirlemekte olduğundan, gerekli olan kompozit dayanımını sağlamak için matris malzemesinin dayanım değerleri göz önünde bulundurularak seçim yapılmaktadır. Matris malzemesi seçimi yapılırken, kompozit performansının düşmesine neden olan, takviye/matris ara yüzey reaksiyonları da göz önünde bulundurulmaktadır. MMK uygulamalarında pek çok farklı metal ve metal alaşımları matris malzemesi olarak kullanılmaktadır (Çizelge 2.1). Kullanılan matris malzemesinin ergime sıcaklıklarına göre de sınıflandırılabilen MMK'lar, yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık kompozitleri olarak sınıflandırılabilirler. Mo, Nb ve W matris alaşımları refrakter olarak adlandırılmakta ve yüksek sıcaklıklara dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilmekte, Fe, Ni ve Cu gibi metaller, daha kolay ergidiklerinden nispeten daha düşük sıcaklık gerektiren uygulamalarda, Al ve Mg alaşımları ise düşük sıcaklık kompozitlerinde tercih edilmektedirler.

Çizelge 2.1 Matris/takviye kombinasyonları (NADİBO,1993)

MATRİS	TAKVİYE MALZEMESİ														
	Alümina	Alümina/Silika	Boron	Grafit	Molibden	Niobyum	SiC	Si3C4	Çelik	Titanyum	TiB2	TiC	Tungsten	Yttrium	Zr
Alüminyum	•	•	•	•			•	•				•		•	•
Berilidler		•				•	•	•		•	•	•		•	•
Bakır				•			•				•		•		
Demir									•						
Demir Alüminat						•	•			•	•			•	•
Kurşun	•									•					
Magnezyum	•			•				•							
Nikel Alüminat		•				•	•	•		•	•	•		•	•
Süper Alaşımlar					•	•			•				•		
Titanyum				•			•			•	•	•			
Titanyum Alüminatlar		•				•	•	•		•	•	•		•	•

Alüminyum alaşımlarının büyük bir çoğunluğu MMK üretiminde kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının özgül ağırlıkları saf alüminyuma oldukça yakındır. Özgül dayanım değerleri açısından diğer metallere oranla çok daha iyi durumda olan Alüminyum ve alaşımları, iyi biçimlendirilebilme özelliğinin yanında, yüksek korozyon dayanımına, elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir.

Saf alüminyumun özgül ağırlığı yaklaşık 0.1 lb/in^3 (2698 kg/m^3), ergime sıcaklığı 1220°F (660°C) dir. Saf alüminyumun çekme dayanımı çok yüksek olmamasına rağmen, ısıtılma işlemi, soğuk deformasyon veya alaşımlandırma ile mukavemet değerlerinde oldukça fazla artış sağlanabilmektedir. Buna ilaveten, talaşlı işlenebilme ve haddelenebilme, alüminyumun en önemli özelliklerindendir.

Yüksek saflıktaki alüminyumun düşük akıcılığı, katılaşma ve katılaşmadan hemen sonra çatlamaya neden olan sıcak yırtılma eğilimi nedeniyle, bu malzemedan döküm yolu ile sağlam parça elde etmek oldukça güçtür. Bu nedenlerle alüminyum farklı amaçlarla değişik elementlerle alaşımlandırılmaktadır.

Alaşımlandırma işlemi, alüminyumun yüksek uzama kabiliyeti ve korozyona dayanım özelliklerini değiştirmeden, düşük olan akma sınırını yükseltmek amacı ile yapılmaktadır. Mukavemet özelliği kazandıran elementler; Mg, Si, Mn, Cu, ve Zn dir. Kübik yüzey merkezli alüminyum kristal kafesi bu elementlerden çok küçük oranlarda bünyesine alarak, karışık kristali oluşturur. Yabancı atomlar kristal kafes içersinde kaymaya karşı direnci arttırarak malzemenin akma mukavemetini yükseltirler. Bu elementlerin oranlarının daha yüksek olması durumunda alüminyum atomlarından ve alaşım elementlerinden çözünmeyen kısımlardan sert, gevrek metaller arası bileşikler oluşur. Bu oluşum alaşımın mukavemetini daha da yükselterek deformasyon kabiliyetini düşürür.

Alüminyum birçok element ile alaşımlanabilmekte ancak bu elementlerden sadece Cu, Zn, Mg ve Si yüksek çözünürlüğe sahip olup çökelme sertleşmesinde önemli rol oynamaktadır. Çözünürlüğü %1' den düşük olan ancak toparlanma ve yeniden kristalleşmeyi kontrol ederek tane yapısında önemli iyileşme sağlayan Fe, Zr, Mn ve Cr gibi geçiş elementleri intermetalik bileşik oluşturmak amacı ile kullanılmaktadır. (Beljajev, 1974), (Webster, 1980)

Alüminyum alaşımları sıvı halde hidrojen absorpsiyonuna çok duyarlı olup, katı halde çözünürlüğü çok düşüktür. Hidrojen, alüminyumda sıvı halde hissedilir şekilde çözünen tek gazdır. Sıcaklık yükseldikçe hidrojenin çözünürlüğü üssel olarak artmaktadır. Ergitme işlemleri sırasında alüminyumun gaz almasını en aza indirmek için ergitme sırasında aşırı

ısıtmadan kaçınılması gerekmektedir.

Değişik alüminyum alaşımları gaz alma yönünden farklı duyarlılıklar göstermekte ve önlem alınmaz ise gaz porozitesine neden olmaktadır. Alüminyum alaşımlarında alaşım elementi olarak kullanılan Si ve Cu elementlerinin miktarlarının artışı ile hidrojen çözünürlüğü azalmakta, Mg ile hidrojen çözünürlüğü artmaktadır (Khorasani, 1995). Hidrojenin çözünürlüğü katılaşma sıcaklığında hızla düşmekte, katılaşma sırasında sıvıdan ayrılmakta ve poroziteye neden olmaktadır (Shivkumar,1991).

Alüminyum alaşımları genelde biçimlenebilir ve döküm alüminyum alaşımları olarak sınıflandırılmaktadırlar. “Biçimlenebilir” terimi, alüminyum alaşımının haddelenmiş sac, plaka veya folyo, değişik şekillerde ekstrüzyon ürünü, tüpler, dövülmüş tel yada çubuk halinde, mekanik işlemden geçmiş yarı mamüller olarak piyasadan temin edilebilirliğini ifade etmektedir. Biçimlenebilir alüminyum alaşımı kompozisyonlarından bir çoğu toz yada yeniden ergitmeye müsait külçeler halinde piyasadan temin edilebileceği için toz metalurjisi yada döküm yöntemleri kullanılarak parçacık takviyeli kompozit üretimine uygundur. Biçimlenebilir ve döküm alüminyum alaşımları, ısıl işlem uygulanabilir ve uygulanamaz olarak da sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 Biçimlenebilir ve dökme alüminyum alaşımlarının gösterilişleri.

ALAŞIMLARIN GÖSTERİLİŞLERİ		
BIÇIMLENEBİLİR	DÖKÜM	İÇERDİĞİ ALAŞIM ELEMENTLERİ
1XXX ^(*)	1XX ^(*)	----
2XXX ^(**)	2XX ^(**)	Cu
3XXX ^(*)	-----	Mn
	3XX ^(****)	Si+Mg; Si+Cu; Si+Mg+Cu
4XXX ^(***)	4XX ^(*)	Si
5XXX ^(*)	5XX ^(*)	Mg
6XXX ^(**)	-----	Mg+Si
7XXX ^(**)	7XX ^(**)	Zn
8XXX ^(**)	-----	Diğer
	8XX ^(**)	Sn

(*) Yaşlandırma serleştirmesi uygulanamaz

(**)Yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.

(***) Magnezyum varsa yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.

(****) Bazılarına yaşlandırma serleştirmesi uygulanabilir.

Biçimlenebilir ve ısıl işlem uygulanabilir alaşımların iç yapı ve mukavemetleri, alaşım elementlerinin tür ve yapı bileşenlerine bağlıdır. Sıcaklığın artması ile birlikte alaşım

elementlerinin katı çözünürlükleri arttığı zaman bu malzemeye ısıtma işlemi uygulanarak, mukavemet artımı sağlanabilmektedir.

Bıçımlenebilir alüminyum alaşımlarından 2XXX, 6XXX, 7XXX ve alaşım elementi olarak ağırlıklı olarak lityum içeren 8XXX serisi genellikle ısıtma işlemi ile mekanik özellikleri iyileştirilebilir alaşımlardır.

Isıtma işlemi uygulanamayan alüminyum alaşımlarında, ısıtma işlemi yolu ile fark edilecek oranda bir mukavemet artışı sağlanamaz. Bu malzemelerde dayanım artışı, içerisinde bulunan alaşım elementleri ve malzemeye uygulanan pekleştirme işlemleri ile sağlanabilmektedir. Bıçımlenebilir alüminyum alaşımlarından 1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serileri ısıtma işlemi ile mukavemet artışı sağlanamayan alaşım gruplarıdır.

Al-Si alaşımları (3XX ve 4XX serileri) döküm alüminyum alaşımları arasında çok iyi akıcılık özelliğine sahip olması nedeniyle en çok rağbet gören alaşımlardır. Silisyumun ana alaşım elementi olarak bulunduğu alüminyum alaşımları, yüksek akıcılık, döküm sırasında düşük çekme, iyi korozyon direnci, kaynak edilebilirlik ve düşük ısıtma genleşme katsayısı gibi önemli avantajlara sahiptir. Bu alaşımlar ince kesitli ve kompleks şekilli parçaların döküm yolu ile elde edilmesi için oldukça uygundur. Akıcılık, MMK malzemelerin döküm yöntemleri ile üretiminde, matris kompozisyonlarının seçiminde oldukça önemli bir etkidir.

Al-Mg alaşımları iyi korozyon direncine sahiptir. Ancak söz konusu bu alaşımlar gerilmeli korozyona ve doğal yaşlanma sertleşmesine duyarlıdır. Sıvı halde magnezyum oksidasyona eğilimli olup döküm esnasında özel koruma işlemleri gerektirir. Al-Si alaşımlarına göre Al-Mg alaşımlarının döküm özellikleri daha az uygundur.

Afset ve arkadaşları (2001), AA5754 ve AA3005 alaşımlarının korozyon dayanımlarını incelemişler ve AA5754 alaşımının daha az sayıda ve düşük oranlarda alaşım elementi içerdiğinden dolayı ve Mg elementinin etkisi ile daha yüksek korozyon direncine sahip olduğunu ve ısıtma işlemi uygulayarak bu özelliğinin daha da arttırılabileceğini belirtmişlerdir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanabilen ısıtma işlemleri 1948 yılında Amerikan Alüminyum Birliği tarafından standartlaştırılmış olup, temper gösterimi alaşım gösterimini takiben bir tire işareti ile ayrılarak gösterilmektedir. Standart temper gösterim sistemi temperleri temsil eden bir harften oluşmaktadır. Yumuşatma tavlama ve üretilmiş haldeki temper durumu hariç diğerleri bir veya daha fazla rakam ilave edilerek özellikleri daha detaylı belirlenmektedir. Bu temper gösterimleri aşağıda detaylı olarak tanımlanmıştır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3 Temper kodları ve açıklamaları

F	Üretildiği şekilde
O	Yumuşak tavllanmış
H	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş
H1	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş
H2	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve kısmi tavllanmış
H3	Soğuk biçimlendirme ile sertleştirilmiş ve stabilize olmuş
T1	Yüksek sıcaklıkta deformasyon işleminden sonra tabii yaşlandırılmış
T2	Yalnız döküm ürünleri için tavllanmış
T3	Katı çözelti ısıtılmasından sonra soğuk biçimlendirilmiş
T4	Katı çözelti ısıtılmasından sonra doğal yaşlandırılmış
T5	Tabii yaşlandırılmış
T6	Katı çözelti ısıtılmasından sonra doğal yaşlandırılmış
T10	Yüksek sıcaklıkta deformasyon işleminden sonra soğutulmuş, soğuk biçimlendirilmiş suni yaşlandırılmış

Alüminyumun diğer potansiyel metal matris malzemelerine göre ergime sıcaklığının nispeten düşük olması bu malzemenin toz metalurjisi ve döküm yöntemleri kullanılarak MMK üretiminde kullanılmasını kolaylaştırmaktadır.

2.3 Takviye Malzemeleri

Takviye malzemesi olarak, değişik kimyasal kompozisyonlarda ve yapıda, seramikten grafit veya karbondan metale, pek çok malzeme çeşidi kullanılmaktadır. Takviye malzemeleri, L/D (çap /boy) oranı yaklaşık 1 olan parçacıklar, yaklaşık 50 olan kırılmış elyaf veya whiskerler ve 100 den büyük olan sürekli elyaflar olarak başlıca üç gruba ayrılmaktadır. Sürekli elyaflar takviye yönündeki dayanımı arttırmakta, takviyeye dik yönde ise daha düşük dayanım değerleri elde edilmektedir. Süreksiz takviyeli elyaflarla üretilmiş MMK'lar ise daha izotropik davranış göstermektedirler. Yapısal MMK'larda takviyenin rolü, tipine bağlı olmakta, parçacık veya whisker'larla güçlendirilmiş kompozitlerde matris malzemesi yük taşıyıcı bileşen olmaktadır. Takviye olarak seçilen malzemeler iyi özelliklerinin yanında olumsuz özellikleri de olan malzemelerdir. Sahip oldukları yüksek dayanım ve elastiklik modüllerine karşın, oldukça kırılgan bir yapıya sahip olan seramikler örnek olarak verilebilir. MMK'larda matris malzemesi bu gibi olumsuz özellikleri azaltarak seçilen malzeme kombinasyonundan optimum özelliklerin elde edilmesini sağlar.

MMK üretiminde matris malzemesi ile uyum sağlayacak takviye seçilmekte ve takviye geometrisine göre de üretim metodu belirlenmektedir. Takviye seçimi yapılırken üretilcek malzemenin yapısal uygulamalarda kullanılması durumunda, yüksek modül, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa sahip takviye malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır. Takviye şekli ise, malzemeye uygulanacak ikincil işlemlerde önem kazanmakta, sünekliği azaltacak keskin köşelere sahip geometrik şekillerdeki takviyelerden kaçınılmaktadır. Üretim metodu seçilirken, eğer toz metalurjisi ile üretim yapılacaksa uniform takviye dağılımı için takviye ile metal tozlarının tane iriliği oranının optimum değerinde olmasına dikkat edilmektedir. Sıvı metal işlemlerinde ise takviyenin matris malzemesi ile bağ oluşturacak ancak, aşırı reaksiyon oluşturmayacak yapıya sahip olması gerekmektedir. Literatürde karışım kolaylığı açısından iri parçacıklar önerilirken, yer çekimi etkisi ile çökelmenin engellenmesi için ince parçacıkların kullanılması gerektiği belirtilmektedir.

Hashim vd.(2002), Metal matrisli kompozit malzemelerde parçacık dağılımını inceledikleri çalışmada 10 µm boyutundan daha küçük parçacıkların ergimiş metal içinde daima asılı kaldığı ve yer çekimi etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu, hatta 10- 100µm arasındaki parçacık boyutu içinde bunun geçerli olduğunu ancak, 100 -1000 µm aralığındaki parçacık boyutu için yüksek hızlardaki karıştırma işlemlerinde parçacıkların sıvı içerisinde asılı kaldığını, fakat düşük hızlardaki karıştırma işlemlerinde parçacıkların yerçekimi etkisi ile dibeye çöküp biriktiğini belirtmişlerdir. Bu durumda karıştırma hızının kritik bir değeri ile parçacık büyüklüğü ile arasında bir ilişki kurmuşlardır.

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin diğer takviye şekillerine göre en önemli avantajları ;

- Üretimin hacmi büyüdükçe maliyet önemli olduğundan, sürekli veya kırılmış elyafa göre daha ucuz maliyetlerle elde edilebilirler
- Döküm ve toz metalurjisi gibi üretim teknikleri ve bunu takiben haddeme, dövme ve ekstrüzyon gibi ikincil işlemler uygulanabilir
- Takviye edilmemiş metalden daha yüksek kullanım sıcaklığına sahiptirler
- Daha yüksek mukavemet ve modül
- Artan ısı kararlılık
- Elyaf takviyeli kompozitlere göre daha izotropik özellikler

2.4 Metal Matrisli Kompozitlerde Arayüzeyler

Arayüzey, iki faz arasında sınır teşkil eden bir veya daha fazla malzeme parametresinde süreksizliklerin meydana geldiği iki boyutlu bölgeler olarak tanımlanabilir. Önemli süreksizlikler arasında elastik modül, kimyasal aktivite potansiyeli ve ısı genleşme katsayısı gibi parametreler sayılabilir. Kimyasal potansiyeldeki süreksizlik, bir inter difüzyon bölgesi veya bileşik oluşumuna yol açan kimyasal etkileşime neden olmaktadır. Isıl genleşme katsayısındaki süreksizlik ise değişik sıcaklıklarda iki veya üç eksenli gerilme alanları oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerde ara yüzeyin kapladığı alan takviye boyutun küçülmesi ve takviye hacim oranlarını artışı ile birlikte artmakta olduğundan ve genelde matris ve takviye termodinamik olarak dengede olmayan bir sistem oluşturmaktadırlar. Kompozit malzemelerde arayüzeyler, MMK üretim amaçlarının gerçekleşmesinde rol oynayan ve istenen termal, elektriki ve mekanik özelliklerin malzemeye kazandırılması için anlaşılması ve kontrol edilmesi gereken bölgelerdir. (Vaucher, S., Beffort, O.,2000).

Bu kontrolü sağlayabilmek için ise seçilen kompozit sisteminde mümkün olan bağ tipi veya bağ tiplerinden hangilerinin gerçekleştiğini anlamak gereklidir. Ara yüzeyde oluşabilecek bağ tipleri genel olarak iki gruba ayrılabilir:

- a) Mekanik bağ
- b) Kimyasal bağ

İki yüzey arasında mekanik kilitlenme ile oluşan mekanik bağın, kompozit malzeme özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği belirtilmektedir. Bu tür bağlanma, kimyasal veya fiziksel yöntemlerle takviye yüzeyinde işlem yaparak yüzeyin pürüzlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Takviye yüzeyinde matris fazının çekirdeklenmesi, takviyenin matris ile çevrelenip sarılmasına sebebiyet verir. Bu tür bağlanmada basma yükleri altında iyi sonuçlar alınırken, diğer yükleme durumlarında mekanik bağın yanında kimyasal bağın da oluşması kompozit malzemenin dayanım özelliklerini arttırdığı, mekanik bağın kontrollü kimyasal reaksiyonlarla oluşan bağlarla desteklenmesi durumunda çok daha iyi özelliklerin ortaya çıktığı belirtilmiştir(Vaucher, S., Beffort, O.,2000). Mekanik bağlanma, takviye- matris arayüzeyinde kimyasal etkileşiminin olmadığı veya kontrol edilemediği malzemelerde tercih edilmektedir.

Metal matrisli kompozit sistemleri çoğu zaman termodinamik olarak dengesiz sistemlerdir. Takviye-matris arayüzeyi boyunca kimyasal potansiyel gradienti bulunmaktadır. Belirli

sıcaklık ve sürede, belirli kinetik şartlarda farklı fazların ara yüzeylerinde difüzyon ve/veya kimyasal reaksiyon meydana gelmektedir. Reaksiyon bağı olarak adlandırılan bu tür reaksiyonlar ile meydana gelmiş ara yüzey oluşumları, genellikle kompoziti oluşturan fazlardan farklı özelliklere sahiptirler. Ara yüzeyde güçlü bir bağın oluşumu için istenen ara yüzey reaksiyonları kontrollü olarak gerçekleşmeli, istenenden daha fazla reaksiyon ürünü ara yüzeyin kabalaşmasına ve dolayısı ile de kompozit malzemenin istenen özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olabilmektedir. (Metcalf, 1974). Seramik-metal arayüzey reaksiyonları genellikle yüksek sıcaklıklarda oluşurlar. Difüzyon veya kimyasal reaksiyon kinetiği yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleşmektedir. Ara yüzey reaksiyonlarının kontrol edilebilmesi ve istenen özelliklerin sağlanabilmesi için reaksiyon kinetiği ve termodinamiğinin bilinmesi gerekmektedir.

Vaucher, S. ve Befford, O. Al_2O_3 , C, B_4C ve SiC sürekli elyaflar, kısa elyaflar ve parçacık takviyeler kullanarak farklı matris malzemeleri ile oluşturulan kompozit malzemelerde arayüzey reaksiyonlarını incelemişler, oluşan ve muhtemel reaksiyonları Çizelge 2.4’de özetlemişlerdir.

Bu çalışmaya göre, metal matrisli kompozitlerde aşırı reaksiyonlardan kaçınmak için katılma süresi oldukça kısa olmalıdır. Soğuma işlemleri süresince matris ve takviye malzemeleri arasındaki ısı kapasite ve ısı iletkenlik farklılıkları sıcaklık dağılımı gradientinin sınırlandırılmasına sebep olmaktadır. Al/SiC kompozitlerinde 600 °C ın altında Al/SiC arayüzeyi iyi kimyasal kararlılığa sahip iken 660°C’ın üzerindeki sıcaklıklarda reaktif davranış göstermektedir.

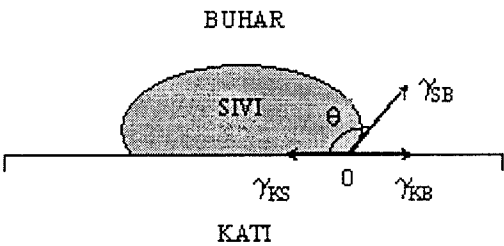
Matris malzemesinde Si miktarının artırılması veya SiC tozlarına uygulanan oksitlendirme işlemi ile de Al_4C_3 oluşumu engellenmekte ve oluşan arayüzey bağı güçlenmektedir. Matrisin takviyeyi ıslattığı ve ergittiği, ancak bunlarla bileşik oluşturmadığı oksit dışı takviye malzemeleri ile meydana gelen çözünme ve ıslatma bağı, atomik boyutta elektron etkileşimlerini kapsayan atomlar arası çekim kuvvetlerinin söz konusu olduğu bir bağ çeşididir.

Ancak, bu bağ çeşidi eleman atomlarının birbirlerine birkaç atom çapı mesafesinde yaklaşması durumunda gerçekleşebilmektedir.

Çizelge 2.4 Farklı matris ve takviye sistemlerinde oluşan arayüzey reaksiyonları (Vaucher, S ve Befford, O.)

			Al	Mg + Al	Mg	Cu	Ti
C			$4Al + 3C \rightarrow Al_4C_3$	$2Al + Mg + 2C \rightarrow Al_2MgC_2$ (<2% Al) $4Al + 3C \rightarrow Al_4C_3$ (>2% Al)	Reaksiyon yok	Reaksiyon yok	$Ti + C \rightarrow TiC$
Si			AlSi Alaşım	$Si + 2Mg \rightarrow Mg_2Si$	$Si + 2Mg \rightarrow Mg_2Si$	—	—
	B ₄ C		$6B_4C + 27Al \rightarrow 6Al_3BC + 9AlB_2$ Muhtemel reaksiyonlar AlB ₁₀ , Al ₃ B ₄ C ₂ , AlB ₂ C ₄	$6B_4C + 27Al \rightarrow 6Al_3BC + 9AlB_2$ Muhtemel reaksiyonlar AlB ₁₀ , Al ₃ B ₄ C ₂ , AlB ₂ C ₄	—	—	—
	SiC		$4Al + 3SiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$	$4Al + 3SiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Si$	—	Reaksiyon yok	$SiC + Ti \rightarrow TiC + Si$
	TiC		$4Al + 3TiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Ti$ $13Al + 3TiC \rightarrow Al_4C_3 + 3Al_3Ti$	—	—	—	—
		Al ₂ O ₃	Reaksiyon yok	$3Mg + 4Al_2O_3 \rightarrow 3MgAl_2O_4 + 2Al$ $3Mg + Al_2O_3 \rightarrow 3MgO + 2Al$	$3Mg + 4Al_2O_3 \rightarrow 3MgAl_2O_4 + 2Al$	—	—
		SiO ₂	Reaksiyon yok	$Mg + 2SiO_2 + 2Al \rightarrow MgAl_2O_4 + 2Si$ $2MgAl_2O_4 + 3Si \rightarrow 2MgO + 3SiO_2 + 4Al$	$2Mg + SiO_2 \rightarrow 2MgO + 2Si$	—	—

Islatılabilirlik, bir sıvının katı bir yüzey üzerinde yayılabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Şekil 2.4’te gösterildiği gibi ıslatılabilirlik, sıvı damlanın katı yüzey ile yaptığı θ temas açısı ile ifade edilebilir.



Şekil 2.4 Islatma açısı

Denge durumunda kontak açısı Young-Dupre denklemi olarak bilinen aşağıdaki ifade ile belirlenebilir,

γ_{KB} : katı–buhar ara yüzeyindeki serbest enerji

γ_{KS} : katı –sıvı ara yüzeyindeki serbest enerji

γ_{SB} : sıvı –buhar ara yüzeyindeki serbest enerji olmak üzere,

$$\gamma_{KB} = \gamma_{KS} + \gamma_{SB} \cos \theta \quad (2.1)$$

Her serbest enerji, birim alan başına düşen enerji veya yüzey gerilimi olarak tanımlanabilir. Bir sıvı tanesi katı bir yüzey ile temas ettiğinde, sistemin serbest enerjisinin düşmesi ile sıvı katı üzerine yayılmaya başlar ayrıca sıvı ve katı yüzeyler arasında

$$W_a = \gamma_{SB} + \gamma_{KB} - \gamma_{KS} \quad (2.2)$$

şeklinde tanımlanan adhezyon kuvvetleri oluşur. (2.1) ve (2.2) denklemleri yardımıyla

$$W_a = \gamma_{SB} (1 + \cos \theta) \quad (2.3)$$

elde edilir. Böylelikle katı ve sıvı arasındaki adhezyon bağ kuvveti, temas açısı ve sıvının yüzey gerilimi ile açıklanabilir.

$\theta = 0$, ıslatılabilirlik özelliği mükemmel

$\theta = 180$, ıslatılabilirlik özelliği yok

$0 < \theta < 180$, kısmi ıslatılabilirlik

θ temas açısının küçük olması ıslatılabilirlik özelliğinin iyi olduğu anlamına gelmektedir. Alüminyum çok yüksek oranda oksijen alma özelliğine sahip bir metal olduğundan dolayı, (dört saatte 400 °C’de 50 nm. kalınlığında bir oksit tabakası oluşabilir) özellikle, takviye malzemesinin eriyik halindeki matris içine üstten ilave edilmesi yönteminde, yüzeyde oluşan oksit tabakası, takviye malzemesine karşı direnç oluşturmaktadır. Sıvı metalin takviye malzemesini ıslatma kabiliyetini arttırmak amacıyla bir çok yöntem kullanılmaktadır. Matris alaşımına değişik alaşım elementlerinin ilave edilmesi, seramik takviye malzemesinin kaplanması, seramik takviye malzemesine ısıtma işlem uygulanması, mekanik kuvvet uygulayarak ıslatılabilirliğin artırılması en çok kullanılan yöntemlerdir.

Sıvı metalürjisi tekniği ile kompozit malzeme üretiminde, magnezyum, kalsiyum titanyum, veya zirkonyum gibi değişik alaşım elementlerinin ilave edilmesi ile ergiyiğin yüzey gerilimini ve katı-sıvı ara yüzey serbest enerjisini azaltarak ıslatılabilirlik özelliği artırılabilir ve matris ile takviye arasında çok iyi bir bağ oluşturulabilir. Magnezyum, özellikle

alüminyum bazlı metaller için, seryum, lantanyum, zirkonyum, titanyum, bizmut, kurşun, çinko ve bakır ilaveleri ile yapılan denemelerde ısıtılabilme özelliğini en fazla arttıran ilave malzemesi olmuştur. Bunun en büyük nedeni magnezyum'un yüzey gerilimi değerinin (0.599 Nm^{-1}) alüminyum'un yüzey gerilimi değerine (0.760 Nm^{-1}) oranla düşük bir değere sahip olmasıdır. $720 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de %3 magnezyum ilave edilmesi ergiğin yüzey gerilimini 0.760 Nm^{-1} değerinden 0.620 Nm^{-1} değerine indirmektedir (Hashim vd., 2001).

Islatma kabiliyetini arttıran yöntemlerden biri de, takviyeye ısı işlem uygulanmasıdır. Uygulanan ısı işlem ile takviye işlemi öncesinde parçacık yüzeyinde absorbe edilmiş gazların ergiğin içine karışması engellenir ayrıca taneler üzerinde oksit tabakası oluşturularak takviye ile matris malzemesi arasında ıslatmanın iyileştirilebileceği temiz bir yüzey elde edilebilir. Bu yüzey ergiyik halindeki metalin takviye ile daha iyi bir şekilde temasına izin verir, yüzeyleri temizlemek için ultrasonik teknikler, değişik dağlama veya uygun bir fırın atmosferi içinde ısıtma gibi yöntemler kullanılabilir. Ancak her tür takviye malzemesine ısı işlem uygulanamaz, örneğin grafit parçacıklara ısı işlem uygulayarak ıslanma kabiliyetleri arttırılamaz.

Genellikle metal olmayan taneciklerin sıvı metal ile ısıtılabilmesi çok zordur. Bu yüzden taneciklerin bir metal ile kaplanması yöntemi ısıtılabilme özelliğinin arttırılması için kullanılan yöntemlerden biridir. Takviye malzemesinin üzerine değişik yöntemlerle kaplama yapılabilir. CVD (Chemical Vapour Deposition), PVD (Plazma Vapour Deposition), Elektro kaplama, sementasyon, plazma spray ve sol-jel işlemleri bu yöntemlerden en bilinenleridir. Nikel ve bakır pek çok alaşım tarafından çok iyi ısıtılmaktadır bu sebeple genellikle kaplama malzemesi olarak kullanılır. Gümüş ve krom kaplamanın kullanıldığı da görülmektedir. Alüminyum bazlı kompozitlerde özellikle nikel kaplama tercih edilmektedir. Mekanik kuvvet uygulayarak karıştırma ile ısıtılabilirliğin arttırılması da mümkün olup daha çok yarı katı haldeki karışımlar için önerilmektedir. (Hashim vd., 2001)

Sıvı faz üretim teknikleri kolay ve hızlı olmalarından dolayı metal matrisli kompozitlerin üretiminde sıkça kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan sıvı halde üretim metotları; ergimiş metal emdirme, basınçlı döküm, sıvı metal karıştırma, plazma püskürtme vb. dir. Bu tekniklerden bazıları aşağıda açıklanmaktadır.

2.5 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

MMK üretim yöntemlerinin seçiminde, üretilecek mamül veya yarı mamülün önceden

belirlenen mekanik ve fiziksel özellikleri göz önünde bulundurulmaktadır. MMK üretiminde alışlagelmiş üretim yöntemlerinin uygulanmasında karşılaşılan zorluklar, bu yöntemlerin ya modifiye edilmesini ya da üretilecek kompozit malzeme türü için yeni üretim metotlarının geliştirilmesini gerektirmiştir. MMK üretiminde yöntem seçimi yapılırken istenen mekanik ve fiziksel özellikler belirlenmekte ve öncelikle aşağıda verilen parametreler dikkate alınarak yöntem tayin edilmektedir (Kaczmar vd., 2000).

- Çalışma sıcaklığı aralıkları (yüksek sıcaklıklar, düşük sıcaklıklar)
- Takviye malzemesi formu (sürekli form, süreksiz form)
- Matris malzemesi ile takviye malzemesinin uyumu
- Malzemelerinin ek işlem gereksinimi (Takviye ön işlemleri, alaşımlandırma, vb.)
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında oluşabilecek reaksiyonlar
- Elde edilecek üründen istenen boyut tamlığı
- Maliyet

Ayrıca, takviye dayanımının korunması, oluşabilecek takviye hasarının en aza indirgenmesi, takviye ve matris ara yüzey bağının tam olarak sağlanması ve takviyenin matris içindeki dağılımının homojen olması da üretim yönteminin seçiminde belirleyici rol oynamaktadır.

Katı faz üretim yöntemleri uzun zaman aldığından, sıvı faz üretim yöntemleri genellikle daha çok tercih edilen yöntemlerdir. Farklı üretim yöntemleri için değişik formlarda matris malzemesi kullanılmaktadır. Toz metalurjisi ve toz dövme yöntemlerinde, matris malzemesi toz halinde; sıvı metal emdirme, sıkıştırma döküm, compocasting, basınçlı döküm, plazma sprey, spray dolgu, yerçekimi ile döküm ve hassas döküm uygulamalarında matris malzemesi sıvı halde; elektro-forming, buhar fazında çökeltme yöntemlerinde moleküler formda ve haddeleme, ekstrüzyon, difüzyon bağlama yöntemlerinde ise folyo halinde kullanılmaktadır. Sözü edilen yöntemler arasında en düşük maliyetlerle en iyi mekanik dayanım sonuçlarını veren ve endüstriyel uygulaması olan yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

2.5.1 Katı Faz Üretim Yöntemleri

2.5.1.1 Toz Metalurjisi

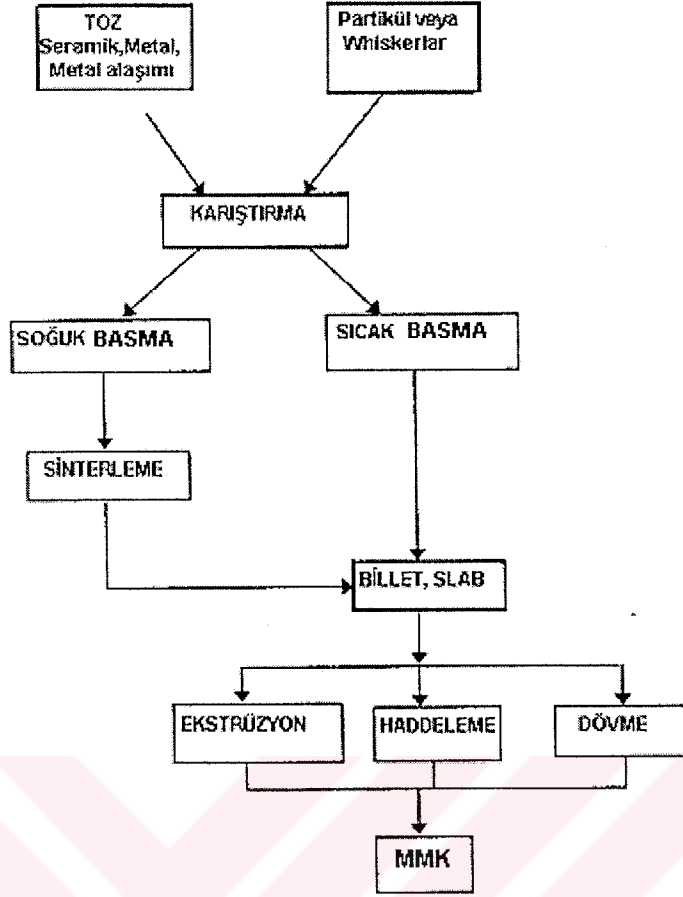
Toz metalurjisi tekniği kompozit malzeme üretiminde özellikle süreksiz takviye malzemeleri

ile üretilen seramik matrisli yada metal matrisli kompozitlerin üretiminde en fazla kullanılan yöntemdir. Şekil 2.5'te üretim şeması görülen bu yöntemde, takviye malzemesi (parçacık veya whisker) ile matris malzemesi toz halinde istenilen oranlarda bir araya getirilmekte ve özel karıştırma yöntemleri ile malzemeler homojen olarak karıştırılmaktadır. Karışım sağlandıktan sonra istenen şekildeki kalıbın içine konulup soğuk basma işlemi ile bir ön şekillendirme sağlanmaktadır. Daha sonra takviye ile matris tozlarının daha kolay birleşmesini sağlamak amacı ile malzemelerin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklığa kadar ısıtılarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Sinterleme ile teorik yoğunluğun %85-95'ine ulaşılabilmekte ve istenen özelliklere ulaşmak amacı ile daha sonra meydana gelen ürüne ikincil operasyonlar uygulanabilmektedir (Torralba vd., 2003). Toz metalurjisi yönteminde bakır, nikel, alüminyum, kobalt, titanyum ve molibden alaşımları matris olarak, SiC, grafit, Ni, Ti, ve Mo takviye elementi olarak kullanılmaktadır.

Bu yöntemin bazı avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Ergitme esaslı üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında işlem daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir.
- Ergitme yöntemleri ile kompozit hazırlamanın mümkün olmadığı malzeme kombinasyonlarında toz metalurjisi yöntemi başarılı olmaktadır. Örneğin SiC whisker'ların sıvı titanyum alaşımlarının içinde oldukça fazla çözünmesi sebebiyle ergitme yöntemleri ile mümkün olmayan kompozit üretimi toz metalurjisi yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.
- SiC whisker'lar toz haldeki alüminyum alaşımları ile sıvı haldeki alüminyum alaşımlarına nazaran daha iyi uyum sağlamaktadırlar.
- Toz metalurjisi yöntemi ile parçacık veya whisker takviyeli kompozit malzeme döküm yöntemlerine nazaran daha kolay üretilmektedir.
- Sıvı karıştırma ve spray yöntemleri ile sınırlı olan hacımsal takviye oranı (%15-20), toz metalurjisi yöntemi ile %55 değerlerine çıkabilmektedir.



Şekil 2.5 Toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretim şeması (Clyne,1996)

Toz metalürjisi yöntemi alternatif yöntemlerle kıyaslandığında daha güvenilir olduğundan oldukça rağbet edilen bir yöntemdir. Ancak olumsuz yönleri de vardır. Takviye ve metal tozlarının basma işlemi öncesi homojen olarak karıştırılması gerektiğinden karıştırma aşaması pahalı, yüksek derecede reaktif tozların işlemlerini kapsadığından, potansiyel tehlike oluşturan ve fazla zaman isteyen bir işlemdir. Kullanılan tozların yüksek saflıkta ve son derece temiz olması gerekmekte, aksi takdirde ürün içerisinde oluşacak inklüzyonlar ve istenmeyen oluşumlar kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı gibi değerleri olumsuz etkilemektedir. Bu konuda yapılan bazı çalışmalar ve sonuçları aşağıda örneklenmiştir.

Ataş ve Gür (2000) SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeyi toz metalürjisi tekniğini ultrasonik yöntem ile destekleyerek yaptıkları çalışmada, 25, 100, 180 μm boyutlarındaki Al tozları ve 10, 40 μm boyutlarında SiC tozlarını kullanarak %0, 5, 10, 20 gibi farklı hacimsel takviye oranlarında malzeme hazırlamışlardır. Ses hız ve frekansının malzeme özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, sabit toz büyüklüklerinde, ses hızının artışı ile birim hacimdeki SiC oranının ve dolayısı ile özgül ağırlığın arttığı, sabit

kompozisyonlarda, ses frekansının azalması ile özgül ağırlıkta artış olduğu ve ultrasonik titreşimin SiC tozlarının yapı içerisinde homojen olarak dağılımına yardım ettiği ve gözenekliliği azalttığını belirtilmiştir.

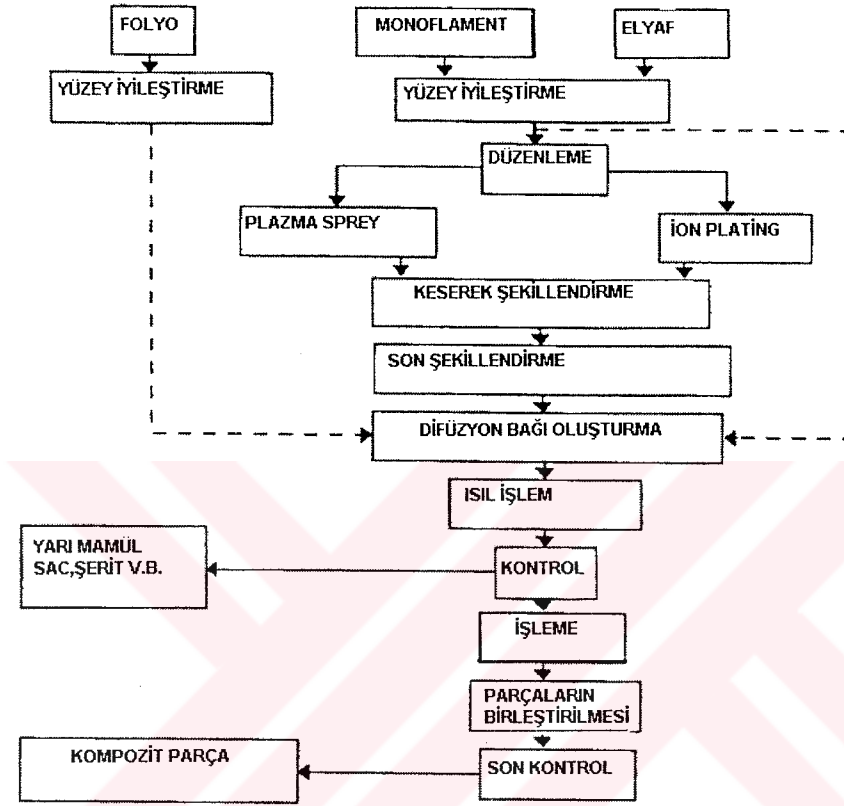
Zulfia vd. (1999) %15 hacımsal oranda SiC ile takviye ettikleri A357 alaşımına kademeli olarak sıcak izostatik presleme (HIP) uygulamışlar ve uygulanan yöntemin kompozit malzemenin mikro yapısına ve akma dayanıma etkilerini incelemişler. 565°C/103MPa/2h ve takiben 535°C/103MPa/2h şartlarında uyguladıkları işlem sonucunda malzemenin ilk elde edildiği şartlara nazaran %10 ila 30 arasında akma dayanımı artışı olduğu ve mikro yapıda işlem öncesi gözlenen porozite miktarında önemli ölçüde azalma olduğunu belirtmişlerdir.

William ve Harrigan (1998), tarafından parçacık takviyeli alüminyum alaşımlı kompozit malzemelerin daha ekonomik yollarla üretilmesi amacıyla denenen ve Boralyn kompoziti adı verilen yöntemi içeren çalışmada, Al alaşımı ve toz halindeki B₄C karıştırılarak soğuk izostatik presleme uygulamış daha sonra vakum altında sıcak basma işlemi ve vakum sinterleme yöntemi uygulayarak elde ettikleri kütükleri ekstrüzyon işleminden geçirmişlerdir. Boralyn kompozitlerin, mekanik özellikler bakımından vakum altında sıcak basma işlemi ile üretilen kompozit malzemelerle benzer özellikler taşıdığı, ancak sözü edilen yöntemin daha az prosesten geçtiği için daha ekonomik olduğunu belirtmişlerdir.

2.5.1.2 Difüzyon Bağı Oluşturma Tekniği

Difüzyon bağı oluşturma işlemi, katı halde kompozit malzeme üretim tekniklerinden en pratik olanlarından birisidir. İşlem akış şeması Şekil 2.6'da verilen bu yöntemde, matris malzemesi metal folyo veya levha şeklinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, elyaflar metal folyolar üzerine istenilen açıda ve miktarda yerleştirilebilmekte ve bu işlemler tamamlandıktan sonra ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklık altında basılarak veya haddelenerek matris ile elyaflar arasında bir bağ oluşturulmak suretiyle kompozit malzeme üretilmektedir. Üretilen kompozit malzemenin dayanımı difüzyon bağına bağlıdır. Bu işlemde difüzyon bağı oluşumu için matris malzemesi ve elyafların yüzeylerinin çok temiz ve oksitsiz olması gerektiğinden kimyasal olarak temizleme işlemleri yapılmaktadır. Takviye ile matris malzemesi arasında difüzyon bağı oluşturabilmek için elyafların yüzeyinde plazma püskürtme yöntemi ve iyon kaplama ile koruyucu bir tabaka da oluşturulmaktadır. Difüzyon bağı oluşturma işleminde sıvı halde üretim tekniğinde karşılaşılan problemlerden birisi olan elyafların bozulma veya ayrışmasına pek rastlanmamaktadır. Bunun sebebi, sıvı halde üretim tekniğine göre daha düşük sıcaklıklarda işlemlerin gerçekleşmesidir. Vakum altında yapılan haddelenerek

difüzyon bağı oluşturma işlemi, gaz altında veya atmosfer basıncında yapılan işlemlerden daha verimli ve başarılıdır. Ancak yöntem oldukça pahalı bir yöntem olup, sınırlı malzeme formu ve çeşidi ile gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 2.6 Difüzyon bağlama yöntemi ile MMK üretim şeması(Clyne,1996)

2.5.2 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

Kompozit malzeme üretim işlemlerinin matris malzemesi sıvı halde iken yapıldığı bu tür üretim yöntemlerinde, özellikle de alüminyum alaşımlarının seramik malzemeler ile takviye edildiği uygulamalarda, katı seramik fazı ile sıvı alüminyum fazının iyi bir bağ oluşturmaları sıvı fazın katı fazı ıslatabilme kabiliyetine bağlıdır. Matris ve takviye arasında kuvvetli ara yüzey bağı, kuvvetlerin matris malzemesinden takviye malzemesine iyi bir şekilde aktarılmasını ve dolayısıyla malzemenin elastiklik modülünün ve mukavemetin artmasını sağlar.

2.5.2.1 Sıvı Metal Emdirme Tekniği

Metal matrisli kompozitlerin üretim metotları arasında yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu işlemde esas prensip, bir kap veya tüp içerisine yerleştirilmiş elyaflar arasına sıvı halindeki metal matrisin emdirilmesidir. İlk işlem olarak istenilen profilde ön şekillendirme yapılmakta, elyafların yönlendirilmesi ve hacımsal oranı bu aşamada ayarlanmaktadır. Ön şekiller kalıba bir bağlayıcı ile tutturulduktan sonra kalıp içerisine ergimiş metal emdirilmekte ve katılaşmaya bırakılmaktadır. Ergimiş metalin emdirilmesi elyaf hacım oranının yüksek olduğu durumlarda biraz daha zordur. Elyaflar arası mesafenin az olduğu bu gibi durumlarda ergimiş metal ya basınç altında veya vakumla emdirilmektedir. Böylece matrisin elyafların arasına girmesiyle açığa çıkacak atıl gazlar da yapı içerisinde sıkışıp kalmayıp dışarı atılmaktadır.

Ergimiş metal emdirilmesi işlemi, atmosfer basıncında, yüksek basınç altında, koruyucu gaz atmosferi altında yada vakum şartlarında yapılabilir. İşlemlerin vakum altında yapılması elyafların yüzey aktivitesini arttırdığından dolayı ergimiş metalin ıslatma kabiliyeti artmakta ve kompozitin kalitesini olumlu yönde arttırmaktadır. Uygulamada karşılaşılan bazı problemler bu yönetime sınırlamalar getirmektedir. Sıvı halde üretim yöntemlerinde karşılaşılan başlıca problemlerden biri de matrisin ergime sıcaklığı ile elyafların ergime sıcaklıklarının birbirine yakın olduğu durumlarda, elyaf yüzey aktivitesinde meydana gelen azalma nedeniyle, ergimiş metalin elyafları iyi bir şekilde ıslatamaması ve elyaf ile matris arasında istenilen güçlü bağın oluşturulamamasıdır. Bu problemi ortadan kaldırmanın tek yolu da elyafların başka bir malzeme ile kaplanmasıdır. Al_2O_3 whisker takviyeli Al, B/Mg ve C/Mg bu teknikle üretilmektedir.

Long vd. (1998) takviye olarak elyaf preform kullanarak sıkıştırma döküm yönteminde infiltrasyon hızının malzeme dayanımı üzerine etkilerini inceledikleri çalışmada, T4 ve T6 ısıtım işlem şartlarında, değişik infiltrasyon hızları uygulayarak elde ettikleri kompozit malzemeye çekme deneyi yapmışlardır. İnfiltrasyon hızının malzemenin çekme dayanımı üzerine etkilerini ve işlem sırasında malzeme içerisinde hapis olan hava kabarcıklarının malzeme dayanımı üzerine etkilerini incelemişler ve sonuç olarak sıkıştırma hızı 1.5 tan 10 mm/sn ye çıktığında çekme dayanımının 378 MPa'dan 436 MPa'a çıktığı, gerinim miktarının da %1.2 den %2' ye çıktığı ve işlem sırasında yapı içersine hapis olan havanın, takviye ile matris arasındaki ara yüzey bağını olumsuz etkileyerek malzemenin dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir.

Long vd., (1999), basınçlı infiltrasyon yöntemini kullanarak yüksek takviye oranlarında (%45-80) SiCp/ AlCu4MgAg kompozit malzemesini üreterek, parçacık çapı ve şeklinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini inceledikleri çalışmada, sözü edilen yöntemle yapılan üretim sonucu malzeme mikro yapısında dikkate alınacak boyutta segregasyonlar ve ara yüzey reaksiyonlarının meydana gelmediğini, daha ince parçacık takviyeli kompozitlerin daha iyi mekanik performans sergilediğini belirtmişlerdir.

2.5.2.2 Sıkıştırma Döküm Tekniği

Grafit, silisyum karbür, alümina ve paslanmaz çelik elyaf gibi takviye malzemeleri ergimiş metal tarafından yeterince ısıtıl原因amamaktadır. Bu sebeple sıvı metal emdirme yöntemlerinin kullanılmadığı bu tür takviye türlerinde sıkıştırma döküm tekniği kullanılmaktadır. Sıkıştırma döküm yönteminde bir metal kalıp içersine yerleştirilmiş bulunan preform veya takviye malzemesi üzerine basınç uygulanarak sıvı metal basılmakta ve sıvı metal takviye ile birlikte yüksek basınç altında hızla katılaştırılmaktadır.

Basınç altında katılaştırma ile takviye malzemesi ile matris metali arasındaki ara yüzey bağ mukavemetinin oldukça olumlu yönde etkilenmektedir. Sıkıştırma döküm yöntemi ile geleneksel döküm yöntemlerine nazaran daha yüksek basınca gereksinim duyulmaktadır. Takviye malzemesi ile matris arasındaki sürtünme kuvvetlerini ve kapiler etkileri yenmek için 50-150 MPa basınç uygulanmakta ve katılama süresince etkiyen basınç sayesinde daha ince taneli, porozitesiz ve boyut tamlığı sağlanmış ürünler elde edilmektedir. Yüksek basınç uygulaması nedeniyle parça boyutunun sınırlandırılması ve takviye malzemesinin hasara uğraması bu yöntemin başlıca problemleridir., Al_2O_3/Al , C/Mg , SiC_w/Al ve Si_3N_{4w}/Al kompozitleri bu yöntemle başarılı bir şekilde üretilmektedir.

Lim ve Clegg, (1997) hassas döküm ve sıkıştırma infiltrasyon döküm proseslerini birleştirerek kompozit malzeme üretiminde birleşik döküm yöntemi denedikleri çalışmada, döküm öncesinde, preform, seramik kabuk ve kalıp ön sıcaklıklarının döküm kalitesine etkilerini araştırmışlar ve preform sıcaklığı arttıkça çekme dayanımının arttığı, kabuk sıcaklığı arttıkça çekme dayanımının azaldığı ve kalıp sıcaklığının da yaklaşık 300 °C'den sonra çekme dayanımını düşürücü etki yaptığını, birleşik döküm yönteminde elde edilen kompozit malzeme çekme dayanımı sonuçlarının, hassas döküme göre daha yüksek ancak sıkıştırma infiltrasyon yöntemine göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

Long vd., (1999) SiC parçacıklarını ön şekil verme işleminden geçirerek elde edilen bir

preform ile AlCu4MgAg alaşımını kullanarak, sıkıştırma döküm, basınçlı infiltrasyon gibi değişik yöntemlerle yüksek oranlarda (%45-80) takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretilen kompozit malzemenin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesinde, elastiklik modülü, sertlik, yorulma dayanımı ve aşınma dirençlerinde monolitik matris alaşımına nazaran artış, kırılma tokluğu ve süneklikte önemli derecede azalma olduğunu belirtmişlerdir.

2.5.2.3 Sıvı Metal Karıştırma Teknikleri

Bu yöntemde ön ısıtma yapılmış veya ön işlemlerden geçerek hazırlanmış takviye malzemeleri sürekli karıştırılan ergimiş metal içersine değişik yöntemlerle katılmakta ve daha sonra döküm işlemi yapılmaktadır. Takviye malzemesini sıvı metal içine karıştırmak için geliştirilen yöntemlerden bazıları aşağıdaki gibidir.

- Bir enjeksiyon tabancası kullanarak inert gaz desteği ile takviyenin ergimiş metal içersine enjeksiyonu
- Ergimiş metal kalıba dökülürken takviye ilavesi
- Mekanik bir karıştırıcı ile ergimiş metal içersinde vorteks oluşturma ve takviyenin vorteks içine verilerek karışımın sağlanması
- Sıvı metal içersine küçük briketler halindeki takviye matris karışımlarının ilavesi
- Takviye malzemesinin folyolara paketlenerek ergimiş metale alttan veya üstten ilavesi
- Karşılıklı hareket eden çubuklar kullanılarak parçacıkların sıvı metal içine atılması
- Merkezkaç etki ile ince parçaların sıvı metal içersine dağıtılması
- Ultrasonik etki ile sıvı titreştirilirken takviyenin ilavesi
- Çok yüksek vakum altında uzun süre de sıfır yerçekimi etkisi ile karışım sağlanması

Karıştırma işleminin atmosfere açık olarak yapılması ergimiş metalin atmosferden gaz alması problemini oluşturduğundan dolayı işlemin koruyucu gaz veya vakum altında yapılması önerilmektedir. Yöntem kolay ve ucuz bir yöntem olmasına rağmen literatürde, çökeltme, topaklanma, segregasyon oluşumu, istenmeyen ara yüzey reaksiyonlarının oluşumu, takviye malzemesinin karıştırma esnasında hasar görmesi gibi sorunların oluştuğu da belirtilmektedir (Ejiofor, 1997).

Pai vd., (1993) sıvı metal karıştırma yönteminin diğer yöntemlere göre nispeten basit, ucuz ve hemen hemen tüm döküm yöntemlerine adapte edilebilir olduğunu ifade etmişler ve yaptıkları çalışmada, üç farklı takviye malzemesi (kırpılmış karbon elyaf, grafit parçacıklar, SiC parçacıkları) ve beş farklı Al alaşımı matris malzemesi kullanarak (LM6, LM25, 6061, HMS2112 ve 7075), farklı döküm yöntemleriyle denemeler yapmışlar ve döküm yönteminin seçiminde takviye boyutunun ve tipinin belirleyici olduğu, kritik parçacık çapının 20 µm ve daha küçük çaplar olduğu, takviye malzemesinin sıvı alüminyum üzerinde oluşan geçirimsiz alümina tabakasını ve yüzey gerilimini aşarak ergimiş metal içine topaklanmadan karışmasını sağlamak için yeteri kadar güçte ve iyi tasarlanmış karıştırıcılar gerektiği, vorteks oluşumunun karışımı sağladığı fakat ortamdan oldukça fazla gaz emilmesine neden olduğu için bu tür karıştırma yöntemlerinde azot ve argon gazı koruması altında yapılması, yüzey gerilimini azaltmak ve takviyenin daha iyi karışımını sağlamak için, Mg, Ca, Nb, Ti, Pb gibi elementlerin alaşıma katılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Benzer bir çalışmada, Samuel ve Samuel, (1995) matris olarak Al-Si-Mg alaşımı, takviye olarak da SiC ve Al₂O₃ kullanmışlar ve ergimiş metal sıcaklığının, ortamdaki hidrojen seviyesinin ve karıştırma prosedürünün dengeli seçimi ile sırası ile istenmeyen kimyasal reaksiyonların, gaz porozitesinin ve inklüzyon ve oksit kirliliklerinin önlenmesinde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir.

Gui vd., (2000) SiC takviyeli Al-Si matrisli kompozit malzemeleri döküm yolu ile üretmeyi kapsayan çalışmalarında, sıvı karıştırma prosesini takiben yarı-katı karıştırma prosesi uygulanmış, nispeten düşük devirli karıştırma sonucu SiC parçacıklarının matris malzemesi tarafından tam olarak ıslatılabildiği, karıştırma işleminin düşük sıcaklıklarda yapılması ile Al-SiC ara yüzeyinde istenmeyen Al₄C₃ oluşumunun minimize edildiğini ve %15 ve %20 hacımsal takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının takviye edilmemiş matris malzemesine göre sırası ile %15 ile %26, akma dayanımının %40 ile %54, E- modülünün %40 ile %30 oranında arttığını belirtmişlerdir.

2.5.3 Diğer Üretim Yöntemleri

2.5.3.1 Rheocasting ve Compocasting Döküm Tekniği

Rheocasting ve Compocasting olarak bilinen döküm yöntemleri süreksiz faz takviyeli metal matrisli kompozitler için uygulanan yöntemlerin en ekonomik olanlarıdır (Bader, 2002). Matris malzemesi, karıştırma üniteli bir ergitme fırınının içine yerleştirilip ergime sıcaklığının

40-50 °C üzerinde ısıtılmakta, karıştırma işlemi ile sıcaklık homojenize edilmekte ve sıvı metal sıcaklığı kontrollü olarak düşürülmektedir. Alaşım %40-50 katı hale geldiğinde matris malzemesinin içine takviye malzemesi eklenmeye başlamaktadır. Takviyenin ilavesi esnasında sıcaklık yükseltilmeye başlamakta ve takviyenin tamamı iyi şekilde ısıtılınca kadar sıcaklık artırılarak karıştırma işlemi devam etmektedir. Nispeten düşük vizkoziteye sahip karışım doğrudan basit kütük şeklinde dökülebilir, bu durumda yöntem “Rheocasting” adını almakta eğer karışım sıvı sıcaklığı üzerinde karıştırılarak döküm gerçekleştirilirse “Compocasting” adı verilmektedir.

Cöcen ve Önel (1996) compocasting yöntemini kullanarak elde ettikleri SiC takviyeli Al-Si alaşımı matrisli kompozit malzeme üretiminde karıştırma süresi ve artan takviye oranının malzemenin mikro yapısı üzerine etkilerini araştırmış, artan takviye oranının ve uzun karıştırma sürelerinin poroziteyi artırıcı yönde etki yaptığı sonucuna varmışlardır.

2.5.3.2 Vidalı Ekstrüzyon

Polimer ürünlerin işlemleri için geliştirilen ve kullanılan vidalı ekstrüzyon yöntemi Dow laboratuvarları tarafından Mg alaşımı esaslı kompozit malzeme üretimi için kullanılmıştır. Bu yöntemde matris malzemesini oluşturacak olan Mg küçük parçacıklar halinde takviye tozları ile birlikte bir haznenin içine doldurulur. Haznenin ağzı, hazırlanan karışımın, vidalı ekstrüzyon sisteminin içerisine kolayca doldurulabilmesi için uygun bir geometride yapılmıştır. Bu hazneden beraberce ilerleyen matris ve takviye malzemesi aynı anda hem ısıtılıp hem de karıştırılmaktadır. İlerleme esnasında matris malzemesi ergime sıcaklığı civarına geldiğinde yarı katı yarı sıvı haldeki karışım sistemin sonundaki kalıp içine beslenir. Bu yöntemle sürekli formda kompozit malzeme üretimi yapılabilmektedir.

2.5.3.3 Plazma Püskürtme Tekniği

Özellikle parçacık takviyeli MMK malzemelerin üretiminde kabul görmüş bir yöntemdir. Plazma püskürtme, atomize edilmiş ergimiş metal parçacıklarının takviye elemanları üzerine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir. Püskürtülen ergiyik metal parçacıkları, takviye elemanlarına yapışmakta ve hızla katılaşmaya başlamaktadır. Bu tip üretim yöntemi alüminyum gibi ergime sıcaklığı nispeten düşük olan metallerde uygulanır. Bu üretim metoduyla matris malzemesi takviye elmanı üzerine istenilen kalınlığı verecek şekilde püskürtülerek kompleks şekilli parçalar üretilebilir. Bunlara ilaveten, bu yöntem takviyeler arası mesafenin kontrolü ve takviyelerin daha rahat yönlendirilebilmesi gibi avantajlara

sahiptir.

Üretim esnasında ergimiş metal zerrecikleri takviye elemanına temas eder etmez katılaştığından sıvı halde üretim tekniğinin dezavantajlarından olan takviye-matris arasında oluşan ara reaksiyon problemleri en aza indirgenir. Bu nedenle plazma püskürtme yöntemi ara reaksiyon oluşma ihtimalinin yüksek olduğu durumlarda tercih sebebidir. Bu yöntemle en çok alüminyum-bor kompozitleri üretilmektedir. Bunun yanında alüminyum-SiC parçacık takviyeli kompozitlerde üretilmektedir.

Koruyucu gaz jeti ile birlikte atomize edilen ergimiş veya toz halindeki matris malzemesine yine toz haldeki takviye malzemesinin katılıp beraberce bir katman üzerine püskürtülmesi yöntemi “Osprey yöntemi” olarak adlandırılmıştır. Katman kalınlığı ve işlem süresi kontrol edilebilen bu spray yöntemi düşük porozite değerleri göstermekte ve özellikle SiC parçacık takviyeli hafif metal uygulamalarında kullanılmaktadır.

2.5.3.4 In-Situ Tekniği

Bir ötektiğin yönlenmiş olarak katılaştırılması ile iki fazlı bir yapı ortaya çıkmaktadır. Fazlardan biri matris diğeri ise matris içine dağıtılmış lamel, plaka veya elyaf şeklinde fazdır. Bu yöntemle elde edilen MMK'lara ilgi oldukça fazladır. Uygulamaların çoğu alüminyum, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar kullanılarak yapılmaktadır.

2.5.3.5 XD Tekniği

Martin Marietta tarafından geliştirilen yöntem, takviye fazın sıvı metal içerisinde bir bileşik ilavesi ile oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile sıvı metal fazı içerisinde pek çok seramik bileşik oluşturulabilmektedir.

Parçacıklar sıvı metalin içinde oluşturulduğundan tek kristalli ve oksitlenmemiş ara yüzeylere sahiptir. Oluşan parçacık boyutlarının proses parametrelerinin etkisiyle 0,2 – 10 μm arasında değişmektedir.

2.5.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Deformasyon İşlemleri

Süreksiz takviyeli kompozit malzemelerin en önemli avantajlarından biri, takviyesiz alaşımlara uygulanması gerekli ve faydalı bazı basit üretim tekniklerinin ve ikincil üretim işlemlerinin bu malzemelere uygulanabilir olmasıdır. Bununla birlikte, bu malzemelerin takviyeli olması nedeniyle sözü edilen yöntem ve işlemlerde uygulama itibarıyla değişiklikler yapmak zorunlu olmaktadır. Metal matrisli kompozitler, ileri kompozit uygulamaları arasında önemli bir sınıfı oluşturmaktadırlar. Parçacık takviyeli alüminyum alaşımları ise MMK sınıfının en çok araştırılan ve geliştirilen grubudur. Bu tür kompozitlere sürekli faz takviyeli kompozitlerden farklı olarak, metallere uygulanan deformasyon işlemlerinin çoğu adapte edilebilmektedir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde parçanın son boyutlarına çok yakın veya tam istenen boyutlarda şekillendirecek üretim yöntemleri seçilmesi zorunlu iken, süreksiz faz takviyeli kompozit malzemeler ekstrüzyon, haddeleme, dövme ve hatta süper plastik şekillendirme ile üretim sonrası farklı biçimlendirme işlemlerine tabii tutulabilmektedirler. Parçacık takviye ve matris bileşenlerinin farklı kompozisyonları için deformasyon karakteristikleri birbirini tutmadığı için, optimum işlem parametrelerinin her seferinde yeniden belirlenmesi gerekmektedir. (Bhat, 1995)

Cheng ve Morris (2002), Al-Mg alaşımlarının, bazı durumlarda plastik deformasyon işlemlerinin zorlaştığını özellikle sıcak bantlardan ilk elde edilmiş haline uygulanan soğuk haddeleme işlemlerinden sonra, malzemenin biçimlenebilme kabiliyetinin azaldığını ifade etmişler ve yüksek sıcaklıklarda (480°C civarı) yapılacak ısı işlemleriyle bu özelliğinin artırılabilceğini belirtmişlerdir. Ayrıca Al-Mg alaşımlarının sertliklerinin de biçimlenebilme özelliği ile yakından ilişkili olduğu 75 HV'den daha az sertlik değeri olan alaşımların derin çekme ile şekillendirilebileceğini belirtmişlerdir.

Dodd ve Petitcorps, (1997) çökeltme sertleşmesi uygulanabilen iki farklı matris malzemesi (Al-2124, A356) ve iki ayrı üretim yöntemi (sıvı metal karıştırma, toz metalurjisi) kullanarak kompozit malzeme üretmişler. Toz metalurjisi kullanılan işlemde, yaklaşık 3-13 µm ortalama tane çapında SiC parçacıklarını ve Al-2124 alaşımını, sıvı metal karıştırma yöntemi kullanılan işlemde ise yaklaşık 16 µm ortalama tane çapında SiC parçacıkları ile A356 Al alaşımını matris malzemesi olarak kullanmışlardır. Elde ettikleri kompozit malzemelere farklı ısı işlemleri uygulayarak, ısı işleminin çekme ve basma gerilme-gerinim eğrileri üzerine etkisini inceledikleri çalışmada, sadece çekme testi eğrisinin malzemenin plastik biçimlendirilebilme kabiliyetinin belirlenmesinde yeterli olmadığını, kompozit malzemeler için soğuk biçimlendirilebilme kabiliyetini etkileyen ve belirleyen pek çok faktör olduğunu, basma testi

sonuçlarının bu özellik için daha belirleyici sonuçlar verdiğini, soğuk biçimlendirmenin sıcak biçimlendirme yöntemlerine göre pek çok yönden avantajlı olduğu sonuçlarına varmışlardır.

MMK'ların ikincil işlemlerinden ekstrüzyon yöntemi, toz metalurjisi tekniği ile üretilmiş MMK'larda oldukça sık olarak kullanılan bir yöntem olup, hem ileri, hem de geri ekstrüzyon, sıcak ve soğuk olarak uygulanabilmektedir. Takviye olarak elyafların kullanıldığı uygulamalarda elyaflar ekstrüzyon ekseninde yönlenmekte, malzeme içindeki gözeneklilik azalmakta ve buna karşın elyaflarda hasar meydana gelme riski fazla olmaktadır. Haddelenme ve dövme gibi uygulamalarda ise bilhassa düşük sıcaklıklarda parçacık veya elyaflarda parçalanma, mikroskobik çatlamlar meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında ise sıcak yırtılma en büyük sorun olmaktadır. Sıcak izostatik presleme uygulamalarında ise bu tür olumsuz etkiler düşük seramik takviye içeren MMK üretiminde en az seviyeye inmektedir. Ancak, yüksek takviye oranlarında, parçanın yüzeyden uzak bölgelerinde işlem esnasında takviyece yoğun bölgeler arasında kalmış olan kalıntı ve porozite oranları bu yöntemle de azaltılamamaktadır (Clyne, 2001).

MMK'lar toz metalürjisi, sıvı metal karıştırma ve sıcak ekstrüzyon yöntemleri uygulanarak genellikle çeşitli çaplarda silindirik çubuklar halinde üretilmektedirler. İlk ürün olarak bu şekilde piyasada bulunabilen MMK'lar daha sonra malzeme özelliklerine göre uyarlanmış ikincil üretim işlemleri uygulanarak bitmiş parça haline getirilebilmektedir. Parçacık takviyeli alüminyum kompozitlerine ekstrüzyon yolu ile ikincil şekil verme işlemlerinde ekstrüzyon hızının kontrol altında tutulması, işlem sırasında monolitik malzemelerde rastlanmayan yada az rastlanan hasar türlerinin engellenmesi açısından önemli olmaktadır. Ayrıca, bu malzemelerin ekstrüzyon işlemleri sırasında, takviyesiz alaşımların ekstrüzyon işlemlerinde gerçekleşenden çok daha fazla miktarda kalıp aşınması meydana gelmektedir. Seramik parçacıkların doğası gereği sahip oldukları aşındırma özelliği, MMK malzemelerin üretimi için hazırlanan ekstrüzyon kalıplarının çok daha sert malzemelerden yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Parçacık takviyeli alüminyum kompozitlerin dövme işlemleri ile şekillendirme uygulamaları da mevcuttur. Bu konuda çok sayıda çalışma olup, özellikle şahmerdan ile dövme sonucunda yüksek şekil verme hızlarında iyi sonuçlar alındığı belirtilmektedir. İlk üretimleri kütük halinde gerçekleştirilen parçacık takviyeli alüminyum kompozitlerin haddelenme yolu ile şerit, sac ve plaka haline getirilmesi çalışmaları devam etmekte ve başarılı sonuçlar alınmaktadır.

Prangnell vd., (1996) SiC takviyeli kompozit malzemelerde plastik akışı inceledikleri çalışmada, plastik akışın genelde parçacık toplanmalarının olduğu bölgelerde engellendiği, yüksek hidrostatik basınç altındaki deformasyonlarda dahi bu bölgelerde plastik akışın devam etmediği, yüksek oranda hasar ve boşluk oluşumunun meydana geldiği ve özellikle basma yüklerinde bu durumun daha fazla gözlemlendiğini, aynı miktarda uygulanan çekme yüklerinde parçacık hasarı ve boşluk oluşumunun önemsiz miktarlarda oluştuğunu belirtmişlerdir.

Kang vd. , (2000) compocasting tekniği ile süreksiz elyaf takviyeli %15 SiC/AA6061 kompozit malzemesini ürettikten sonra iki farklı kalıp geometrisi kullanarak sıcak ekstrüzyon uygulamışlar. Farklı kalıp geometrisinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini araştırdıkları çalışmanın sonucunda, ekstrüzyon oranı arttıkça takviye dağılımının homojenleştiği fakat takviyede meydana gelen hasar oranının yükseldiği, gerinim miktarı hariç bütün mekanik özelliklerin matris malzemesine oranla yükseldiğini, ekstrüzyon işlemi uygulanmış MMK malzemede sabit gerinim hızı geçerli olan kalıp ile elde edilen numunelerde çekme dayanımı ve sertlik değerlerinin daha fazla arttığını ancak kritik ekstrüzyon oranı sınırı altında bulguların geçerli olduğunu belirtmişlerdir.

Bolt vd., (2001) alüminyum sac ürünlerinin sıcak derin çekmedeki plastik biçimlendirilebilir kabiliyetini inceledikleri çalışmada, üç farklı alüminyum alaşımından sac ürünler kullanarak (1050, 5754 ve 6061) yüksek kalıp sıcaklıklarında bu malzemeleri derin çekme testine tabii tutmuşlar ve 175°C sıcaklıkta %25, 250°C sıcaklıkta %65 daha fazla deformasyon elde ettiklerini bildirmişlerdir.

2.5.5 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerde Mukavemet Mekanizmaları

Kompozit malzemelerin mukavemetlerinin artışı üzerine çok sayıda mekanizma ileri sürülmüştür. Mantıksal olarak bu mekanizmaların çoğunda dislokasyon oluşumunun mukavemeti arttırdığı görüşü hakimdir. Ancak sürekli fiberlerle takviye edilmiş kompozitlerde mukavemet artışında dislokasyon oluşumunun çok önemli olmadığı belirtilmektedir. Bunun anlamı, fiberler ve matris arasındaki ısı genleşme katsayısı arasındaki farktan dolayı dislokasyon meydana gelmiyor demek değildir. Sürekli fiberlerle takviye edilen kompozitlerde dislokasyon oluşumunun mukavemet artışında birinci derecede etkin olmadığı, mukavemetin matrisin gerilmeleri fiberlere transfer etmesi ile yükseldiği ifade edilmektedir. Ancak süreksiz olarak takviye edilen MMK'ler göz önüne alındığında, dislokasyon

yoğunluğunda meydana gelen artışın son derece önemli olduğu vurgulanmaktadır. Tekstür ve kalıntı gerilmelerin kompozit malzeme mukavemetini arttırmasının yanında, takviye malzemelerinin matris alaşımının tane boyutunu, takviyesiz alaşıma göre birkaç kat düşürerek malzemenin mukavemetini arttırdığı belirtilmektedir.

MMK malzemelerde potansiyel mukavemet artış mekanizmaları aşağıda özetlenmektedir;

- Klasik kompozit mukavemet artışı (yük transferi)
- Dispersiyonla mukavemet artışı
- Kalıntı elastik gerilmeler
- Tekstür farklılıkları
- Isıl genleşme katsayıları arasındaki farkın bir sonucu olarak artan dislokasyon yoğunluğu
- Yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşumunun sonucu olarak küçük alt tane boyutu

Dispersiyonla mukavetlendirilmiş kompozit malzemelerde yüksek ısı kararlılığına sahip mikrondan daha küçük çökeltiler veya parçacıkların metalik matris içinde homojen dağılmasıyla elde edilir. Kullanılan parçacıkların çapı 0.01 ile 0.1 μm , uzunluğu 50-200 μm arasında ve hacim oranı %1-15 arasında değişir. Bu küçük parçacıklar metal malzemede dislokasyon hareketini engellediği için dayanımı arttırır. Bu tür malzemeler izotropik özellik gösterirler. Çökelme sertleşmesi uygulanmış alüminyum alaşımı bu tür malzemelere örnek olarak gösterilebilir. Parçacıkların geometrisi, boyutları ve yapı içindeki dağılımlarının homojenliği kompozit malzemenin mukavemetini etkileyen en önemli faktörlerdir. Parçacıkların boyutu arttıkça kompozit malzemenin mukavemeti düşer. Parçacık boyutu parçacıkların arasındaki mesafeyi belirlediğinden aynı hacim oranında küçük çapa sahip parçacıklar dislokasyon hareketini daha etkili bir şekilde kontrol edeceğinden kompozit malzemenin mukavemeti artar. Bu tür kompozit malzemeler, toz metalürji tekniğiyle sinterlenmiş alüminyum tozlarının dağıtılması (disperse edilmesi) ile, iç oksitleme yoluyla, çökelme metodu ile matris metalin toz üzerine çöktülmesiyle veya tozları ergimiş matris metaline ilave edilerek karıştırılması ile üretilmektedir.

Kompozit malzemelerde mukavemet artışı üzerine dislokasyonların etkisi bir çok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Dislokasyonların, uyumsuz parçacıklar ve sünek matris ara yüzeylerinde meydana geldiği gerçeği 1950'li yıllarda Hedges ve Mitchell ve 1960'lı yılların

sonunda Ashby ve Johnson tarafından da incelenmiştir. Kompozit malzeme sistemlerinde dislokasyon yoğunluklarının artması birinci derecede ısı genleşme katsayıları arasındaki farklılığa bağlanmıştır. MMK malzemelerde matris ve takviye malzemesinin ısı genleşme katsayılarının 10:1 gibi yüksek oranlarda olabilmesi, dislokasyon yoğunluk artışının en etken sebebi olarak kaydedilmiştir. Isıl genleşme katsayısının yanında Taya ve Mori'ye göre kompozit malzemelere uygulanan plastik deformasyon neticesinde takviye malzemeleri dislokasyonların ilerlemelerini engelleyerek dislokasyon yoğunluğunun artmasına yol açmaktadırlar.

2.5.6 Kompozit Malzemelerde Plastik Deformasyon Davranışı

Gerilme-gerinim eğrisi üzerindeki plastik alandaki malzeme davranışı, elastik alandaki davranış gibi Hook kanunu gibi basit ifadelerle açıklanamamaktadır ve plastik deformasyonun matematiksel modellenmesi oldukça güç olmaktadır (Estrin vd., 1999). Elastik davranış gerilme ve gerinimin sınırları ile kesin olarak belirlenebilirken, plastik davranışta malzemenin akış hareketinin dikkate alınması gerekmekte ve deformasyonun her aşamasında gerilme gerinim dengesi yeniden yazılmak durumundadır. Pekleşme ve Bauschinger etkilerini plastisite teorileri ile ifade etmek oldukça güç olmaktadır (Zong ve Yu, 2000; Davis, 1996). Plastisite teorilerinin geliştirilmesinde karşılaşılan güçlükler göz önüne alındığında, çok fazlı malzemeler için bu tür çalışmaların yapılmasının güçlüğü de ortaya çıkmaktadır. İki fazlı malzemelerde gerilme ve gerinimin homojen olarak dağılmaması, hesaplamalarda bu büyüklüklerin dikkate alınmasını zorlaştırmaktadır. Bu tür sorunların çözümü için literatürde, düzgün dağılmadığı bilinen gerilme-gerinim değerleri yerine, onların ortalama değerlerini ele alan yaklaşımlar yapılmaya çalışılmaktadır. Özellikle çift fazlı sünek yapılarda bu tür yaklaşımların uygulanması da oldukça güç olmaktadır. Fazların akma dayanımlarının oranlarına, sert fazın hacim oranlarına ve şekline bağlı olan ortalama gerinim değerleri için genellikle ampirik eşitlikler önerilmiştir. Bu eşitlikler yardımıyla fazların ortalama gerinimleri belirlendikten sonra, kompozit malzemenin gerilme gerinim davranışının hesaplanabileceği bağıntılar verilmektedir. Kompozit malzemelerin deformasyon davranışlarının incelenmesinde sonlu elemanlar yöntemlerinin uygulanması daha yaklaşık sonuçların elde edilmesini sağlamıştır (Leggoe vd., 1998).

2.6 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemelerde Mikro Mekanik Modeller

Mikro mekanik analiz, kompozit malzemeleri oluşturan bileşenlerin bilinen özelliklerini ve bu

bileşenlerin birbirleri ile etkileşim özelliklerini kullanarak malzemenin tamamının davranışı hakkında fikir edinmemize yardımcı olur. Ayrıca mikro mekanik yaklaşımlar yardımıyla homojen olmayan bir kompozit malzeme yapısı, anizotropik özellikleri belirlenebilen homojen bir yapı şeklinde modellenebilir. Takviyelerin geometrik olarak süreksiz olduğu iki fazlı yapılarda geometrik etkileşim oldukça karışıktır. Ancak iki fazlı malzemelerde hacim oranı da göz önünde bulundurularak malzemeye uygulanan yükün rijit faz tarafından taşındığı, şekil değişiminin ise daha yumuşak olan ikinci faz tarafından karşılandığı varsayılmaktadır. Bu tür malzemelerin gerilme gerinim davranışını parametrelere bağlı olarak ifade etmek oldukça zordur. Bunun başlıca sebebi gerilme ve gerinim değerlerinin fazlar arasında sabit dağılmamasıdır, sabit gerilme veya sabit gerinim kabulü ile yapılan “Karışımlar Kuralı” gibi yaklaşımlar bu sebeple yetersiz kalmaktadırlar.

Sürekli ve basit geometrilili iki fazlı yapılarda efektif modüllerin tespiti oldukça kolay olduğu halde, takviyelerin karmaşık şekle sahip ve süreksiz olduğu, düzensiz dağıldığı durumlarda, geometrik parametrelerin hesaplara katılması oldukça zor olmaktadır. Literatürde bu tür takviye içeren malzemelerin elastiklik modüllerinin daha yaklaşık sonuçlar verecek şekilde hesaplanması için bir çok çalışma bulunmaktadır.

2.6.1 Efektif Modüllerin Hesaplanması

MMK malzeme göz önüne alındığında genellikle takviye malzemesi olarak kullanılan seramik parçacıkların boyutları, şekilleri ve yapıdaki dağılımları hakkında çok hassas bir bilgiye sahip olunmadığından çeşitli mikro mekanik modeller geliştirilmiştir. Bu modeller elastik matris yapısını kuvvetlendirmek amacıyla, küresel takviye bileşenlerinin yapıda tesadüfi bir dağılım gösterdiği metal matrisli kompozit malzemelerin davranışlarının analizi için gerekli olan etkili elastiklik modülünün tahmininde kullanılmaktadır. Hashin-Strikman, Voigt modeli, Reuss modeli, Hills modeli, self-consistent modeli ve Mori Tanaka bu modellerin en önemlileridir (Aboudi, 1991; Gasik, 1998).

2.6.1.1 Hashin-Strikman Sınırları

Hashin ve Strikman 1962 yılında random ve izotropik heterojen malzemelerin elastik sabitlerinin alt ve üst sınırlarını, yapıyı oluşturan fazların hacim oranlarını ve her bir fazın ayrı ayrı fiziksel ve mekanik özelliklerini hesaba katarak ifade etmişlerdir. Bir izotropi hipotezi ile birleştirilmiş varyasyonel prensipleri temel alarak, her bir fazın ortalama gerinimlerinin hesaplanmasında Eshelby'nin inklüzyon problemlerini çözdüğü yöntemle aynı

yolu izlemişlerdir. Matrisin takviyeden daha yumuşak olduğu durumlarda alt sınırlar, matrisin takviyeden daha sert olduğu durumlarda üst sınırlar geçerli olmaktadır. Elastik sabitlerin HS yöntemi ile alt ve üst sınırlarının belirlenmesi izotropik yapıdaki fazlar için oldukça kolay ve genel olarak geçerlidir. HS sınırları özellikle faz içersinde random izotropik olarak dağılmış küresel parçacık ile %20'ye kadar hacımsal takviyeli kompozit malzemelerin elastik sabitlerinin alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde oldukça isabetli sonuçlar vermektedir. Parçacıklar arası etkileşimler, büyük hacımsal takviye oranlarındaki kompozitler için ihmal edilmektedir.

Fazların yapı içersinde anizotropik dağıldığı ve izotropik elastik özellikler sergilemeyen fazlar için de bu sınırların geçerli olduğu alanlar genişletilebilmiştir. Willis, HS sınırlarını ve Self-consistent modelini anizotropik kompozitlerin genel özelliklerini belirlemek için kullanmıştır. Castenada ve Suqed malzemenin lineer olmayan elastisite, viskoplastisite ve plastisite özelliklerini incelemek amacı ile HS sınırlarını kullanarak yaklaşımlar yapmışlardır. HS sınırlarının orijinal çözümleri her ne kadar inklüzyon tipi kompozitler için yapılmış olsa da bir çok araştırmacı tarafından genişletilerek değişik takviye tipleri için de kullanılmaktadır. Mori ve Tanaka'nın geliştirdikleri bir model ile HS'nin alt elastik sınırı ile bulunan sonuçların tam olarak aynısını bulmuşlardır. Ancak MT modelinin kapsamı genişletildiğinde HS sınırları ile farklılık göstermektedir, bunun sebebi ise MT modelinde parçacıklar arası etkileşimlerin de her durumda hesaba katılması olmaktadır.

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin deneysel yöntemlerle elde edilen elastik sabitleri, eğer yapıda porozite yoksa genellikle HS sınırlarının arasında kalmaktadır.

HS sınırları kullanılarak, parçacık takviyeli kompozit malzemelerin elastik özellikleri hakkında hızlı bir şekilde fikir sahibi olunabilir, örneğin incelenecek malzemenin elastik sabitleri HS alt sınırının altında bir değerde ise mikro yapı hataları içerdiği söylenebilir. Eğer HS sınırlarının üst sınırının üzerinde bir değerde ise, yapının parçacık takviye yerine lifli bir yapı özelliği sergilediği düşünülebilir. Sonuç olarak HS sınırları, elasto-plastik davranışın modellenmesinde temel kabul edilmektedir.

2.6.1.2 Birim Hücre Modelleri

Periyodik mikro alan modelleri olarak da bilinen birim hücre modellerinde, takviyenin matris içersinde düzenli olarak dağıldığı farz edilmektedir. Kompozit malzeme üç boyutlu uzay da periyodik birim hücreler ile temsil edilmektedir. Pek çok araştırmacı tarafından geliştirilmekte

olan birim hücre modelleri, takviyenin matris içersinde değişik yükleme şartları altındaki davranışının incelenmesinde, problemi tek bir hücreye indirgeyerek yaklaşım yapılabilmesine olanak verir, ancak BHM'ler, sınır değer problemlerinin çözümünde kullanılan; sonlu fark algoritmaları, sınır eleman metodu, hızlı Fourier transformasyonları ve sonlu elemanlar metodu gibi yöntemlerle çözüm yapan nümerik tekniklerden oldukça farklıdır.

BHM'ler sürekli faz takviyeli kompozitler için iki boyutlu uygulamalarda uygun olmakla birlikte, kısa elyaf takviyeli kompozitlerin elastik özelliklerinin analizinde üç boyutlu hücrelerdeki takviyenin simetrik olmayışı ve paralelliğin sağlanamaması nedeniyle kompleks hale gelen problemin BHM yaklaşımı ile çözümü oldukça zor olmaktadır.

Kusursuz düzenlenmiş elyaflar için en basit BHM modeli Cox tarafından ileri sürülmüş olan shear-lag modelidir. Bu modelde, matris ile takviye ara yüzeyindeki kayma gerilmeleri aracılığı ile gerilme aktarımından yola çıkılarak yapılan yaklaşım takviye boy/en oranı küçük olan takviye türü için doğru sonuçlar vermemektedir. Bu model üzerinde daha sonraları çalışan Clyne teoriyi daha küçük boy/en oranları için kullanılabilecek şekilde geliştirmiştir. Matrisin oluşan yükü elyaflara kayma gerilmeleri vasıtasıyla aktardığı varsayılan bu teorinin, kompozit malzemenin elastiklik modülünün, eksenel yönde analitik çözümü için oldukça geçerli olduğu belirtilmektedir. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin elastik özellikleri basit kübik, yüzey merkezli kübik, hacim merkezli kübik birim hücreler içersinde yerleştirilmiş silindirik, küresel vb. üç boyutlu takviyelerin simetrilerinin yardımı ile saptanmaya çalışılmaktadır. Düzenli olarak dizilmiş kısa elyaf takviyeli ve sürekli elyaf takviyeli kompozit malzemeler için, sonlu elemanlar yöntemi ile birleştirilmiş BHM'leri oldukça hassas olarak malzemelerin elastik özelliklerini belirlemektedir.

2.6.1.3 Ortalama Alan Metotları

Kompozit yapı içersinde gerilme ve gerinim mikro alanların tanımlanması ile elastik sabitlerin belirlenmesi temeline dayanan bu modelin ilk uygulamaları Voight ve Reuss tarafından yapılmıştır. Kabul edilen sınır şartları altında fazların ortalama gerilme ve gerinim alanlarını malzemenin efektif gerilme ve gerinimi ile ilişkilendirmişlerdir. Konsantrasyon tensörleri olarak adlandırılan bu fonksiyonlar, takviyenin malzeme içindeki hacımsal dağılımı ve oranına, takviyenin sürekli yada süreksiz oluşuna ve takviye şekline bağlı olmaktadır. Bu yöntemi kullanarak, faz dağılımı ve faz geometrisinden bağımsız, sadece fazların elastik sabitlerine ve hacim oranlarına bağlı olarak kompozit malzemenin elastik sabitlerini aşağıdaki gibi basit eşitliklerle ifade etmişlerdir.(2.6 - 2.13)

$$E_k = (1 - V_p)E_m + V_pE_p \quad (2.6)$$

$$G_k = (1 - V_p)G_m + V_pG_p \quad (2.7)$$

$$v_k = (1 - V_p)v_m + V_pv_p \quad (2.8)$$

$$\rho_k = (1 - V_p)\rho_m + V_p\rho_p \quad (2.9)$$

$$E_k = \frac{1}{\frac{1 - V_p}{E_m} + \frac{V_p}{E_p}} \quad (2.10)$$

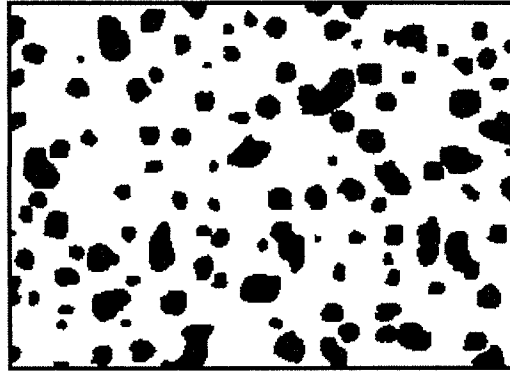
$$G_k = \frac{1}{\frac{1 - V_p}{G_m} + \frac{V_p}{G_p}} \quad (2.11)$$

$$v_k = \frac{1}{\frac{1 - V_p}{v_m} + \frac{V_p}{v_p}} \quad (2.12)$$

$$\rho_k = \frac{1}{\frac{1 - V_p}{\rho_m} + \frac{V_p}{\rho_p}} \quad (2.13)$$

Eshelby 1957 yılında, sonsuz matris içersine gömülmüş elipsoidal inklüzyonlar içeren malzemeye ait konsantrasyon tensörlerini hesaplamak için yeni bir yöntem geliştirmiştir (equivalent inclusion method). Bu yöntemle ikinci faz olan inklüzyonların içinde ve dışındaki gerilme alanları formüle edilmiştir ve takviyelerin birbirleri ile etkileşimleri göz önüne alınmadığından ancak düşük takviye oranlı kompozit malzemelerin elastik sabitleri hesaplanmaktadır. Eshelby modeli birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir, bunların arasından en popüler olanı özellikle parçacık takviyeli kompozit malzemelerin elastik sabitlerini takviyeler arasındaki etkileşimi de dikkate alacak şekilde inceleyen Mori–Tanaka metodu’dur. Etkili elastiklik modülünün hesaplanmasında takviye (seramik) bileşenine ait hacim oranı dağılımından yararlanan, çoğunlukla sürekli matris malzemesinin içinde süreksiz takviye malzemesinin olduğu yapılar için bu model kullanılmaktadır (Şekil 2. 7). Bu teoride;

elastik küresel takviye parçacıkların elastik matris malzemesi içinde izotropik olarak dağıldığı kabul edilmektedir.



Şekil 2. 7 Mori-Tanaka metodunun geçerli olduğu kompozit mikro yapısı (Aboudi, 1991)

Mori Tanaka Modelinde, etkili modüllerin tespitinde kullanılan eşitlikler aşağıdaki gibidir(2.14- 2.21).

$$V_p + V_m = 1 \quad (2.14)$$

$$\nu_k = (\nu_p - \nu_m) \cdot V_p + \nu_m \quad (2.15)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (2.16)$$

$$G_p = \frac{E_p}{2(1 + \nu_p)} \quad (2.17)$$

$$K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (2.18)$$

$$K_p = \frac{E_p}{3(1 - 2\nu_p)} \quad (2.19)$$

$$f_m = \frac{G_m(9K_m + 8G_m)}{6(K_m + 2G_m)} \quad (2.20)$$

$$\frac{G - G_m}{G_p - G_m} = \frac{V_p}{1 + (1 - V_p) \frac{G_p - G_m}{G_m + f_m}} \quad (2.21)$$

İzotropik matris malzemesinin içinde izotropik takviye parçacıkların dağıldığı kompozit malzemenin etkili Bulk modülü de aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır(2.22) (Reiter vd., 1997; Vel ve Batra, 2002a, 2002b).

$$\frac{K_k - K_m}{K_p - K_m} = \frac{V_p}{1 + (1 - V_p) \frac{G_p - G_m}{K_m + \frac{4}{3}G_m}} \quad (2.22)$$

Bir başka yaklaşım ise self-consistent metodudur ve temelinde Kröner tarafından kristal plastisitesini açıklayan öneriler vardır.



Şekil 2. 8 Self-consistent metodunun geçerli olduğu kompozit mikro yapısı (Aboudi, 1991)

Self-consistent metodunda sürekli faz içinde gömülü olan ikinci fazların biçimleri dikkate alınmış, ancak sürekli faz içindeki dağılımlarını dikkate alınmamıştır (Şekil 2. 8). Bu metod aşağıdaki eşitlikleri önermektedir(2.23 -2.24)

$$\frac{V_m K_m}{K_m + \frac{4}{3}G} + \frac{V_p K_p}{K_p + \frac{4}{3}G} + 5 \left(\frac{V_m G_p}{G - G_p} + \frac{V_p G_m}{G - G_m} \right) + 2 = 0 \quad (2.23)$$

$$K_k = \frac{1}{\frac{V_m}{K_m + \frac{4}{3}G} + \frac{V_p}{K_p + \frac{4}{3}G}} - \frac{4}{3}G \quad (2.24)$$

Son zamanlardaki çalışmalarda ise Cristensen ve Lo self consistent metodunun geliştirilmiş bir genel versiyonunu hem kabuk şeklindeki bir matris hem de sürekli bir matris içinde gömülü kompozitler için genelleştirerek, sürekli elyaf takviyeli ve parçacık takviyeli kompozit malzemeler için elastik sabitleri belirlemişlerdir. Hashin ve Shtrikman doğrusal elastisite teorisindeki varyasyonel prensiplerden hareketle, malzemede depolanan enerjinin minimize edilmesi ile hacımsal elastiklik modülü ve kayma modülü için alt ve üst sınırları hesaplamaya yarayan aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir(2.25- 2.29):

$$K_L = \left(K_m + \frac{V_p}{1/(K_p - K_m) + 3V_m/(3K_m + 4G_m)} \right) \quad (2.25)$$

$$K_U = \left(K_p + \frac{V_m}{1/(K_m - K_p) + 3V_p/(3K_p + 4G_p)} \right) \quad (2.26)$$

$$G_L = \left(G_m + \frac{V_p}{1/(G_p - G_m) + 6(K_m + 2G_m)V_m/5(3K_m + 4G_m)G_m} \right) \quad (2.27)$$

$$G_U = \left(G_p + \frac{V_p}{1/(G_m - G_p) + 6(K_p + 2G_p)V_p/5(3K_p + 4G_p)G_p} \right) \quad (2.28)$$

elastiklik modülünün hesaplanmasında ise,

$$E = \frac{9KG}{(3K + G)} \quad (2.29)$$

eşitliği kullanılmaktadır. Yukarıdaki formüllerde K Bulk Modülü, G kayma modülünü, m ve p alt indisleri sırasıyla matris, parçacık, V hacim oranını, L ve U alt indisleri ise sırasıyla alt ve üst sınırları ifade etmektedir. Willis bu sınırları kompozit malzemeler için elipsoidal simetriyi de açıklayacak şekilde geliştirmiştir.

2.6.1.4 Tsai-Halpin Eşitlikleri

Bu modelde elastik sabitlerin incelenebilmesi için kompozit yapı içerisindeki takviye ve matris fazın etrafında oluşan gerilme ve gerinim alanları hakkında bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bu problemin birinci mertebeden çözümü, klasik eş gerinim ve eş gerilme yaklaşımları ile yapılmaktadır. Malzemenin elastik sabitleri, takviye fazının hacim oranı ve fazların elastik sabitleri ile belirlenmekte, takviye şekli ve dağılımı dikkate alınmamaktadır.

Tsai-Halpin tarafından yönlendirilmiş süreksiz lifler içeren kompozit malzemelerin elyaf yönündeki elastiklik modülünü hesaplayan eşitlikler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} E_L &= E_m (1 + c_L n V_f) / (1 - n V_f) \\ c_L &= 2s + 40 V_f^{10} \\ n &= (E_f / E_m - 1) / (E_f / E_m + c_L) \end{aligned} \quad (2.30)$$

E_L elyaf yönündeki elastiklik modülü, f ve m alt indisleri sırası ile elyaf ve matrisi, s boy/en oranını, C_L ve n ise sabit katsayıları göstermektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, matris malzemesi değişik oranlarda SiC parçacıkları ile takviye edilerek alüminyum matrisli kompozit malzemeler üretilmiş, ikinci aşamada, üretilen kompozit malzemeler farklı ezme oranlarında soğuk olarak haddelenmiş ve son aşamada üretim parametreleri ve ezme işlemlerinin malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.1 Kompozit Malzeme Üretimi

3.1.1 Malzeme Seçimi

AA5754 alüminyum alaşımı ısıtılma işlemle sertleştirilebilme özelliği olmayan, dayanımı yüksek yeni bir alaşım olup, özellikle deniz suyuna karşı mükemmel korozyon dayanımı, çok iyi kaynak edilebilirliği ve iyi şekil verilebilme özelliği olan bir alaşımdır. (Spencer vd. 2002). Bu sebeple AA5754 alaşımı matris malzemesi olarak seçilmiştir. AA5754 alaşımının fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’ de, kimyasal bileşimi Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 AA5754’ün fiziksel özellikleri (TALAT, 2000)

AA5754’ün Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık	2,66	g/cm ³
Elastiklik Modülü	68-72	GPa
Kayma Modülü	27	GPa
Ergime Aralığı	600-620	°C
Özgül ısı (273-373°K)	0,97	
Lineer Genleşme katsayısı (293-373°K)	24x10-6	/°K
Termal iletkenlik (373-673°K)	147-168	W/m°K
Direnç (293 °K)	0,049x10-6	Ωm

Çizelge 3.2 Kompozit üretiminde kullanılan matris malzemesinin kimyasal bileşimi

Mg	Si	Fe	Mn	Diğer (Toplam)
2,6 -3,2	0,40	0,40	0,5	0,15

Kompozit malzeme üretimi için en uygun takviye çeşidi ve boyutunun belirlenmesi için bir seri karıştırma denemesi yapılmıştır. Piyasadan 300, 500,1000 ve 1200 Mesh boyutlarında Green SiC, Black SiC, NK(Normal Korund), EKR (Asil Korund), EKW (Beyaz Asil Korund)

ticari adları ile bilinen SiC ve Al₂O₃ çeşitleri ile denemeler yapılmıştır (Çizelge 3. 5).

Çizelge 3.3 Kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan seramik parçacıkların karakteristik özellikleri.

Parçacık cinsi	Boyut (µm)	Özgül ağırlık (gr/ cm ³)	Çekme dayanımı (GPa)	E- Modülü (GPa)
Grafit	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 -1 80	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

Çizelge 3. 4 Kompozit üretiminde takviye malzemesi olarak kullanılan SiC'nin kimyasal bileşimi.

Ürünler	Tane İriliği	% SiC	% Serbest C	% Si	% SO ₂	% Fe ₂ O ₃
GW Micro	F240 - F800	99,5	0,10	0,10	0,10	0,05
	F1000 – F1200	99,0	0,25	0,25	0,20	0,05
BW Micro	F240 - F800	99,2	0,15	0,15	0,25	0,05
	F1000 – F1200	98,0	0,25	0,20	0,40	0,1

Çizelge 3 .5 Takviye cinsi ve tane iriliği belirleme denemeleri

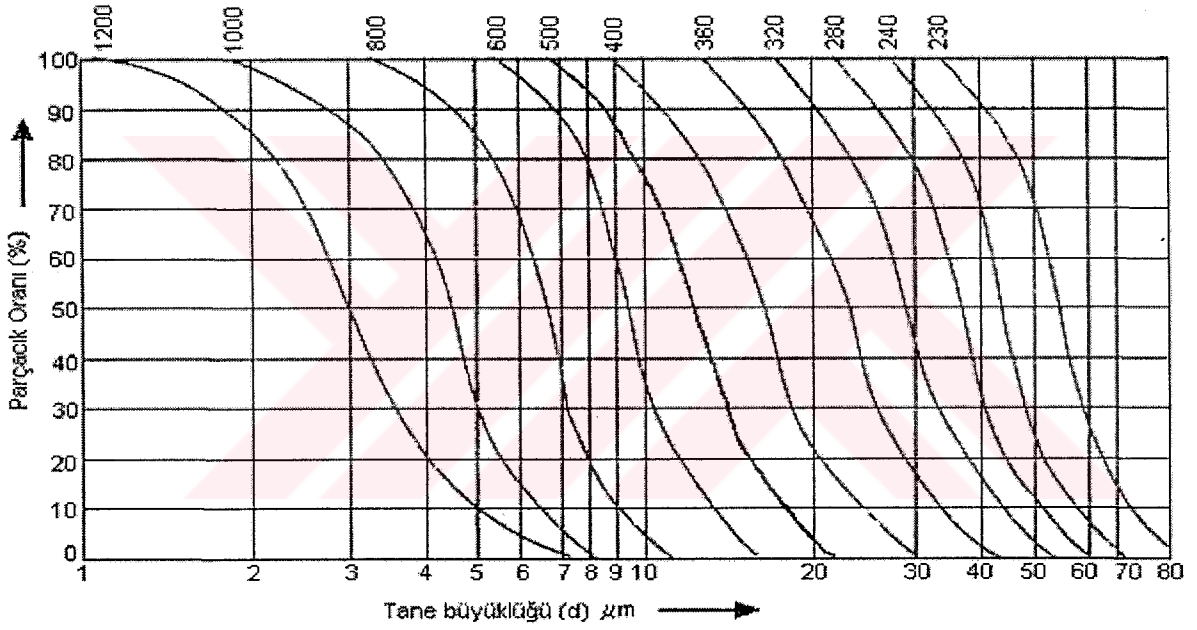
Takviye Çeşidi	Takviye Boyutu (Mesh)	İlave edilen takviye (~hacımca %)	Karışan takviye (~hacımca %)
SiC (Green)	300	10	10
SiC (Green)	500	10	10
SiC (Green)	1000	10	3-4
SiC (Green)	1200	10	3 4
SiC (Black)	300	10	7 -8
SiC (Black)	500	10	7-8
SiC (Black)	1000	10	3-4
SiC (Black)	1200	10	3-4
Al ₂ O ₃ (NK)	300	10	9-10
Al ₂ O ₃ (NK)	500	10	9-10
Al ₂ O ₃ (NK)	1000	10	3- 4
Al ₂ O ₃ (NK)	1200	10	3-4
Al ₂ O ₃ (EKR)	300	10	7-8
Al ₂ O ₃ (EKR)	500	10	7-8
Al ₂ O ₃ (EKR)	1000	10	4-5
Al ₂ O ₃ (EKR)	1200	10	4-5
Al ₂ O ₃ (EK W)	300	10	9-10
Al ₂ O ₃ (EK W)	500	10	9-10
Al ₂ O ₃ (EK W)	1000	10	5-6
Al ₂ O ₃ (EK W)	1200	10	5-6

Matris alaşımının takviye edilmesi için ORKLA firması tarafından üretilen, kimyasal bileşimi Çizelge 3.3’ te, karakteristik özellikleri ise Çizelge 3.4’te verilen ortalama 12 mikron (500 Mesh) tane iriliğine sahip Green SiC tozları (GW Micro) kullanılmıştır. (Şekil 3.1).

Ucuz ve kolay temin edilebilirliğinin yanında, yüksek dayanıma da sahip olan bu malzeme lepleme, parlatma işlemleri ile, teknik seramiklerde, yarı iletken teknolojisinde ve fotovoltaik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan tozların FEPA 45-GB-1986 R1993, ISO 9286 standardına uygun olarak yapılan kimyasal analizi, satın alınan firmadan temin edilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan tozların tane çapı dağılımı firma tarafından Coulter Multisizer III cihazı ile FEPA 42-GB- 1986 R1993 standardına uygun olarak yapılmış ve Çizelge 3.6’ te verilmiştir.

Çizelge 3.6 Tane çapı dağılımı.

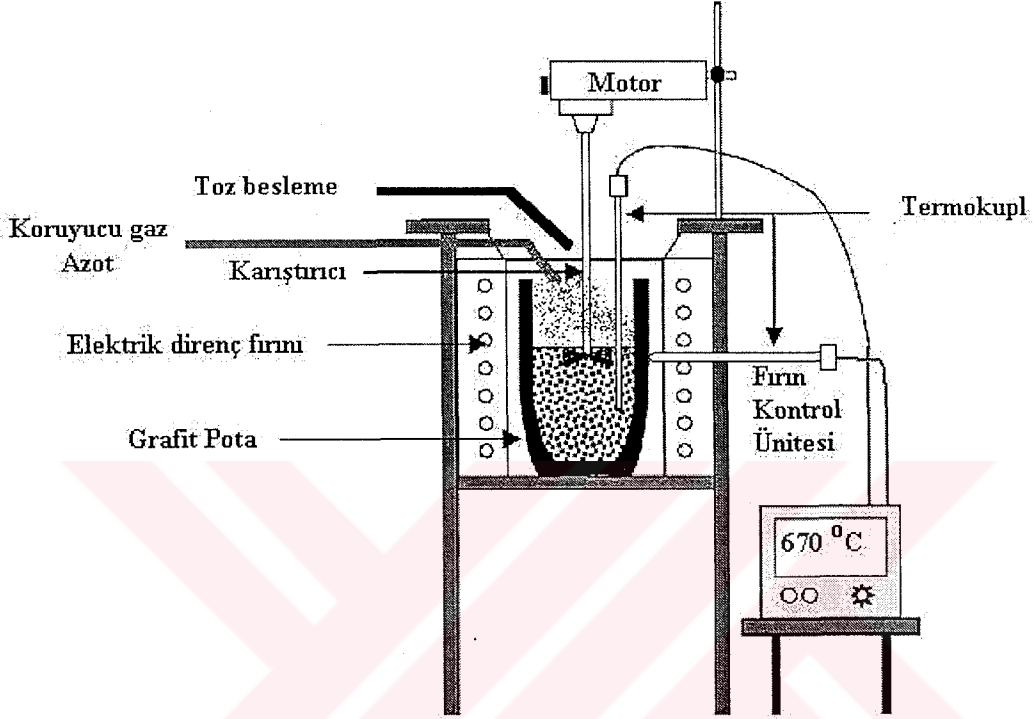
Gridler	Malzemenin %90'ının geçtiği elek açıklığı $d_{0,1}$ min (μm)	Malzemenin %50'sinin ortalama tane boyutu $d_{0,5}$ (μm)	Malzemenin %10'unun geçtiği elek açıklığı $d_{0,9}$ max. (μm)
F 280	59	$36,5 \pm 1,5$	22
F 320	49	$29,2 \pm 1,5$	16,5
F 360	40	$22,8 \pm 1,5$	12
F 400	32	$17,3 \pm 1,0$	8
F 500	25	$12,8 \pm 1,0$	5
F 600	19	$9,3 \pm 1,0$	3
F 800	14	$6,5 \pm 1,0$	2



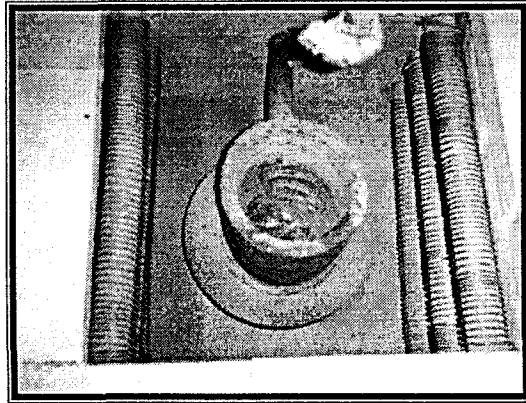
3.1.2 Deney Düzeneği

3.1.2.1 Ergitme ve Karıştırma Ünitesi

Döküm yöntemiyle kompozit malzeme üretiminin gerçekleştirilmesi için karşılaşılan üretim problemleri de göz önüne alınarak, bir ergitme ünitesi imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.1 Kompozit malzeme hazırlama düzeneği şematik resmi



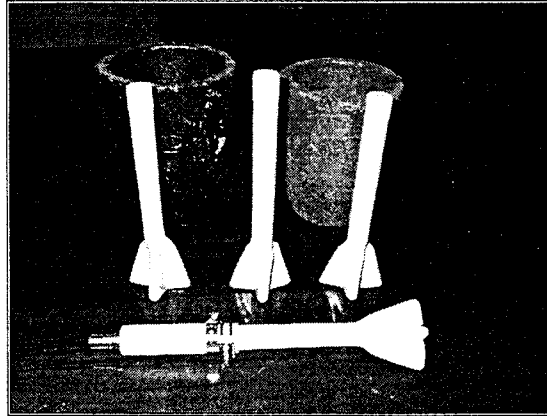
Şekil 3.2 Kompozit malzeme üretiminde kullanılan ergitme fırını

Bu çalışmada kullanılan kompozit malzeme hazırlama ünitesi bir fırın, karıştırma araçları, pota, azot tüpü ve kontrol sistemlerinden oluşmaktadır. Ergitme işlemleri için imal edilen fırında, fırın atmosferinin daha kolay kontrolünü sağlamak amacı ile mümkün olan en küçük iç hacim ölçüleri seçilmiştir (300x300x400 mm). Refrakter tuğla ve refrakter harç ile hazırlanan fırın iç cidarının dışı 40mm Ytong malzemesi ile çevrildikten sonra seramik battaniye ile kaplanmıştır. İmal edilen ergitme ünitesinde aşağıdaki özellikler sağlanmıştır.

- Sıcaklık kontrolü
- Ergitme hızı kontrolü
- Azot gazı koruyucu atmosferi
- Ergiyik gözetleme ve karıştırma penceresi
- Karıştırma hızı kontrolü
- 1200°C Maksimum sıcaklık
- 2 KW Güç

Fırın içerisindeki ergitme işlemi için, fırın sıcaklığının ve ergimiş metalin ergime sıcaklığının kontrolü termostat ve iki adet termoeleman (K-Tip) yardımıyla sağlanmıştır. Termoelemanlardan bir tanesi pota dışına temas ettirilmiş bir tanesi ise pota içindeki sıvı metal içine daldırılarak sıcaklık kontrolü sağlanmıştır.

Kompozit malzeme üretimi sırasında farklı sıcaklık aralıklarında ve hızlarda karıştırma işlemleri uygulandığından dolayı her aşamaya uygun malzeme ve profilde karıştırıcılar kullanılmıştır.



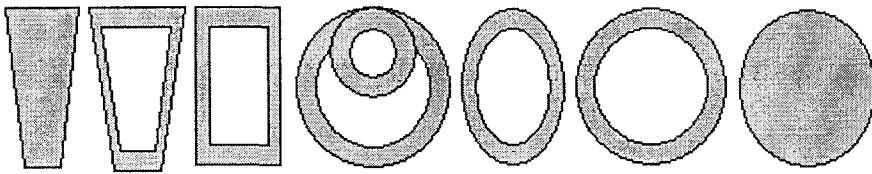
Şekil 3.3 Sıvı metal karıştırma işlemlerinde kullanılan seramik karıştırıcılar

Kompozit malzeme üretimi sırasında karıştırma işlemleri yarı katı karıştırma ve sıvı metal karıştırma işlemlerinin ard arda uygulanması ile gerçekleştirilmiş olup, yüksek sıcaklıklarda ve değişken devirlerde yapılan karıştırma işlemlerinde seramik ve grafit malzemedan (Şekil 3.3) uygun profillerde hazırlanan karıştırıcı uçlar kullanılmıştır. Yarı katı karıştırma ile yapılan kompozit malzeme hazırlama işlemlerinde ise karıştırma işlemi üç aşamalı olarak tasarlanmış ve her bir aşama için farklı karıştırıcı uçlar kullanılmıştır.



Şekil 3.4 Yarı katı karıştırma işlemlerinde kullanılan grafit karıştırıcılar

Yarı-katı sıcaklık aralığında yapılan ilk karıştırma aşaması için paslanmaz çelik çubuklardan, matris malzemesinin ergime sıcaklığının 20-30°C yukarısında planlanan ikinci karıştırma aşaması için grafit malzemedan ve üçüncü yüksek devirli karıştırma aşaması için ise yine grafit malzemedan, özel karıştırıcı uç profilleri tasarlanarak değişik ölçülerde imal edilmiştir (Şekil 3.5). Karıştırma işlemlerinde, ergitme ünitesi üzerine monte edilebilen, değişken devirli bir karıştırıcı kullanılmıştır.

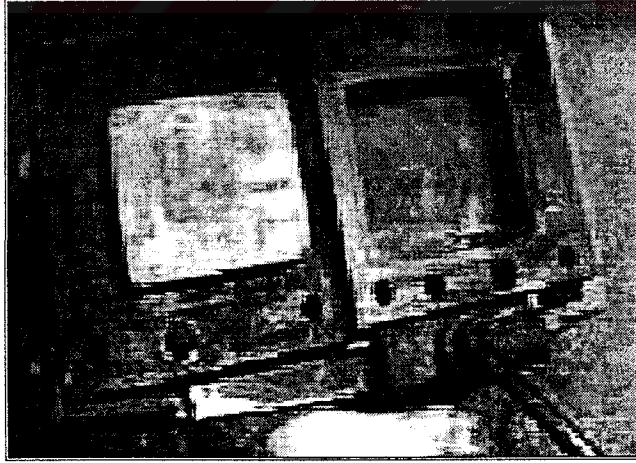


Şekil 3.5 Çelik çubuklardan hazırlanan karıştırıcı kesitlerinden örnekler

Karıştırma işleminde kullanılan özel profilli grafit uçlar, hem aşınmalarının önlenmesi hem de ergimiş metal içine istenmeyen elementlerin karışmasını engellemek amacı ile çelik mil üzerine geçirilen grafit kılıf ile birlikte kolloidal silika ve SiC tozları karıştırılarak elde edilen bir karışım ile kaplanmışlardır.

3.1.2.2 Döküm Kalıpları

MMK üretimi için karıştırma işlemlerinden sonra sıvı haldeki kompozit malzeme kalıp içersinde yüksek basınç altında sıkıştırılarak katılaştırılacağından, uygun kalıp malzemesi seçilmiş ve malzeme üretimi sonrası soğuk haddeleme işlemleri de göz önüne alınarak boyutlandırma yapılmıştır. Alt ve üst kalıp olarak iki parça halinde tasarlanan döküm kalıpları, uygun kalıp çeliği seçiminden sonra, talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak imal edilmiştir. Şekil 3.6 Ergimiş metalin kalıba dökümü esnasında katılaşmayı kontrol altında tutabilmek için uygun ölçülerde kalıp ısıtıcıları imal edilmiştir.



Şekil 3.6 Döküm numuneleri elde edilirken kullanılan döküm kalıpları

3.1.3 Sıvı Karıştırma Yöntemi ile Denemeler

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin döküm yöntemi ile üretiminde, malzemenin kalitesini ve istenen şartların sağlanmasını etkileyen çok sayıda parametre vardır. Karıştırma aşamasında, atmosfer şartları, takviye malzemesinin tane büyüklüğü, takviyenin ön işlemi, ilave hızı, ilave şekli ve sıcaklığı, karıştırma hızı, karıştırma süresi, karıştırıcı uç malzemesi ve profili, döküm aşamasında ise, karışımın döküm sıcaklığı, kalıp sıcaklıkları, döküm süresi ve katılma şartları, belirlenmesi ve kontrol edilmesi gereken değişkenlerdir.

Çizelge 3.7 Karışım sağlama denemeleri (a)

Takviyenin ilave edilme şekli	İlave hızı (gr/dak.)	Karıştırma Hızı (dev/dak)	Ortam
A	1	250	Atmosfere açık
A	1	500	Atmosfere açık
A	1	750	Atmosfere açık
A	1	1000	Atmosfere açık
A	1	250	Gaz koruyuculu
A	1	500	Gaz koruyuculu
A	1	750	Gaz koruyuculu
A	1	1000	Gaz koruyuculu
B	-	250	Atmosfere açık
B	-	500	Atmosfere açık
B	-	750	Atmosfere açık
B	-	1000	Atmosfere açık
B	-	250	Gaz koruyuculu
B	-	500	Gaz koruyuculu
B	-	750	Gaz koruyuculu
B	-	1000	Gaz koruyuculu
B-C	-	500	Gaz koruyuculu
B-C	-	750	Gaz koruyuculu
A-C	-	500	Gaz koruyuculu
A-C	-	750	Gaz koruyuculu

A: Pota üzerinden ilave B: Pota altından ilave C: Alüminyum folyo ile paketlenmiş

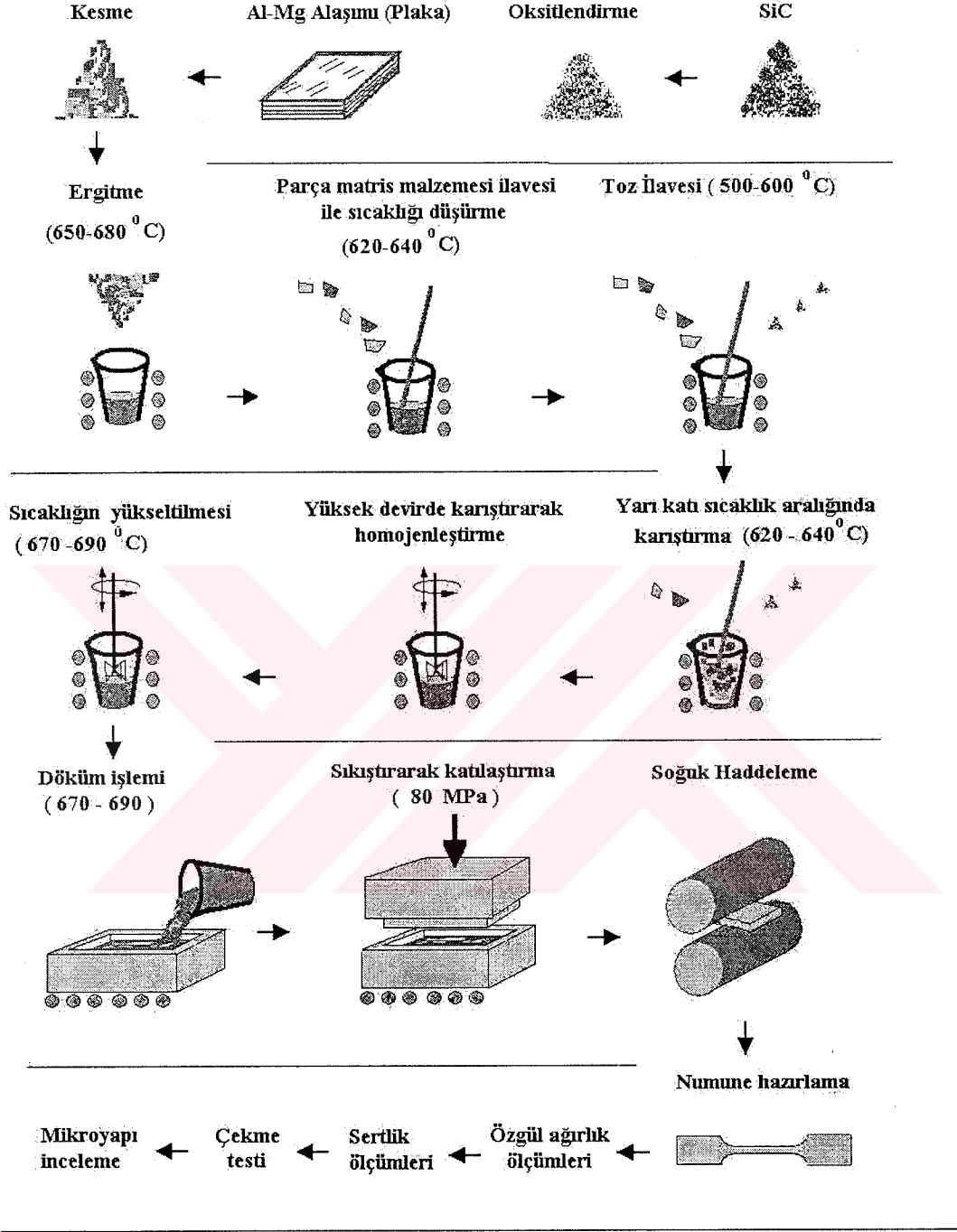
Çizelge 3.8 Karışım sağlama denemeleri (b)

Matris	Takviye işlemi	Takviye ilave sıcaklığı (°C)	Karıştırma süresi (dak)
A	-	Oda sıcaklığı	5
A	-	200	10
A	-	300	15
A	D	Oda sıcaklığı	5
A	D	200	10
A	D	300	15
A	D	500	15
A	D	800	15
A	D	1000	15
B	D	Oda sıcaklığı	5
B	D	500	10
B	D	1000	15
C	D	Oda sıcaklığı	5
C	D	500	10
C	D	1000	15
C	D	Oda sıcaklığı	5
C	D	500	10
C	D	1000	15

A: 5754 B: AA5754 + %0,5 Mg C: AA5754 + %1 Mg
D: 1100 °C de 5 saat oksitlendirme

Kompozit malzemelerde istenen takviye oranlarının ve istenen iç yapı ve dayanım özelliklerinin sağlanabilmesi için Çizelge 3.7 (a) ve (b)'de gösterilen denemeler yapılmıştır. Atmosfere açık ve koruyucu gaz altında yapılan denemelerde her iki koşul altında karışımın sağlanmasında etkili olan parametrelerden karıştırıcı devir sayıları 200- 1000 devir/dak aralığında denenmiştir. Ön işlem görmüş ve görmemiş takviye malzemesi oda sıcaklığında ve fırın içersinde 200- 1000°C arasındaki farklı sıcaklıklarda ısıtılarak, takviye ilave hızları, takviye ilave şekilleri ve karıştırma süreleri değiştirilerek parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi için en uygun şartlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca olumlu etkileri olduğu bilinen Mg farklı miktarlarda ilave edilerek karışımın sağlanması üzerindeki etkileri incelenmiştir.

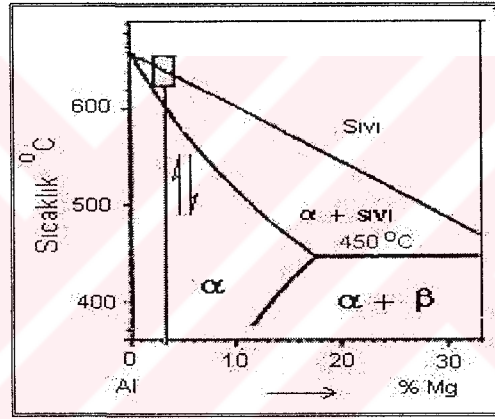
3.1.4 Kompozit Döküm Yönteminin Modifiye Edilmesi



Şekil 3.7 Modifiye edilmiş kompozit döküm yönteminin şematik gösterimi

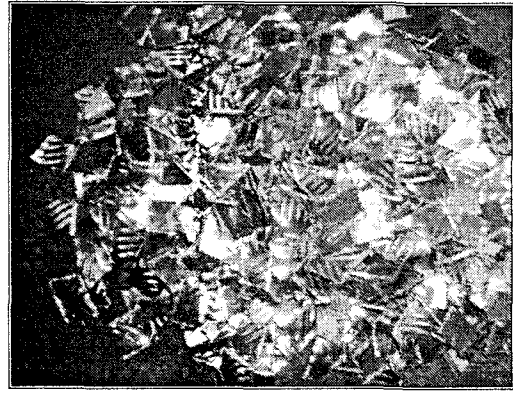
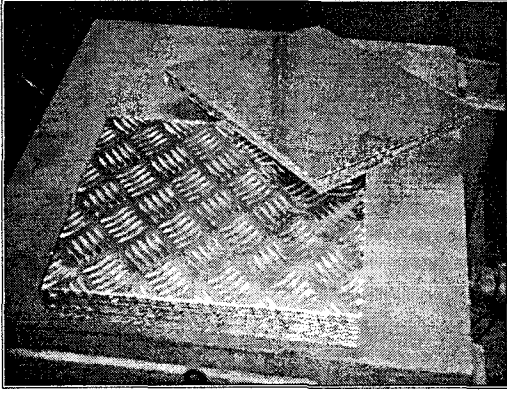
Al/SiC kompozitlerin sıvı karıştırma yöntemleri ile üretilmesinde, takviye malzemesinin ergiyik dışına itilmesi, potanın dibinde veya pota üzerinde toplanması, topak oluşumu, takviyenin matris malzemesi tarafından ısıtıl原因amaması ve homojen karışım sağlanamaması gibi problemlerle karşılaşmaktadır. Ayrıca, karışımın yüksek sıcaklıklara çıkarılarak (700 °C ve üstü) uzun süre karıştırılması, matris ile takviye malzemesi arasında istenmeyen ara yüzey reaksiyonları meydana getirmekte ve bunun sonucunda üretilen kompozit malzemenin dayanımı düşmektedir (Shi, 2001). Sıvı karıştırma yöntemi uygulanarak yapılan çalışmada da aynı sorunlarla karşılaşmış, karıştırma ve döküm yönteminde değişiklikler yapılarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.7’de şematik olarak ifade edilen çalışmada, parçacık takviyeli kompozit malzeme üretmek için kompozit döküm yönteminde yenilikler yapılmıştır. Çalışma bölgesi ve izlenen yol şekil 3.8’de gösterilen yöntemde aşağıdaki işlem basamakları izlenmiştir.



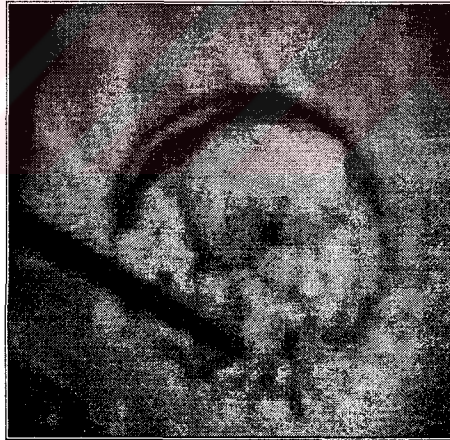
Şekil 3.8 Alüminyum magnezyum alaşım diyagramı ve seçilen çalışma bölgesi

- 1) Takviye malzemesi olarak seçilen ortalama 12 µm boyutunda SiC parçacıkları hacimsel karışım oranı belirlendikten sonra ısıtım fırınına alınarak 1100 °C sıcaklıkta 5 saat oksitlendirilmiştir.
- 2) Matris malzemesi olarak seçilen AA5754 alaşımı, haddelenmiş plakalar halinde temin edilmiş ve kompozit malzeme üretimi için küçük parçalara bölünerek hazırlanmıştır. Ergitme fırınının sıcaklığı 750 – 800 °C ‘a çıkarılarak bu aralıkta sabit tutulmaya çalışılmıştır. Azot gazı tesisatı gazın ergimiş metal üzerine sıcak olarak verilmesini sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 3.9 Matris malzemesi olarak kullanılan AA5754 alaşımı

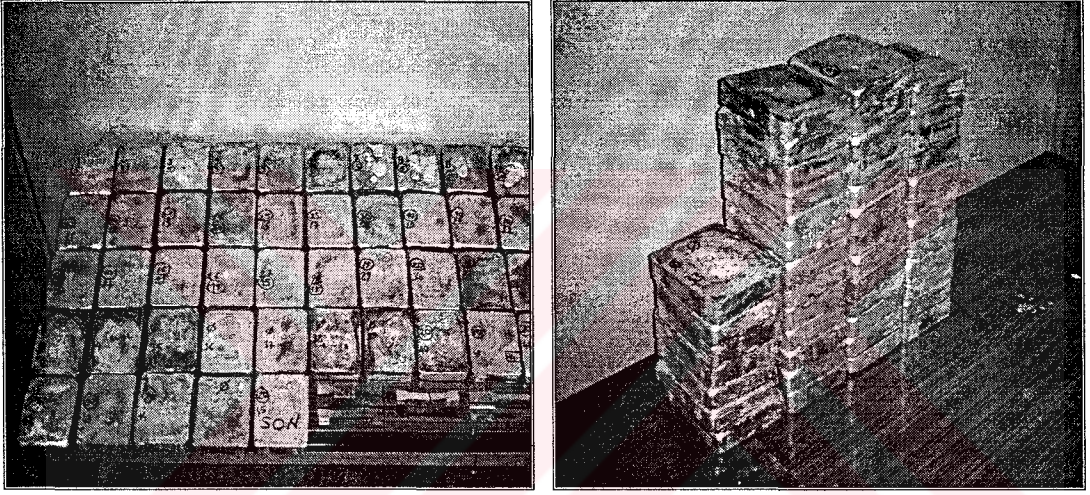
- 3) Ergitme ve karıştırma işlemlerinin yapıldığı potanın içine matris malzemesi konulduktan sonra, yarı-katı sıcaklık aralığına ısıtılmış ve bu sıcaklıkta içine 5 gr/dak hızla önceden 500–600°C'a ısıtılmış takviye malzemesi yarı katı haldeki matris malzemesinin içine katılmaya başlanmıştır. Değişik karıştırıcı uçlar kullanılarak malzeme içine katılan bütün takviye malzemesi bitene kadar karışım aynı sıcaklıkta tutulmuştur (Şekil 3.10). Karışımın aynı sıcaklık aralığında tutulması belirli hızda matris malzemesi ilavesi ile mümkün olmuştur.



Şekil 3.10 Yarı-katı karıştırma yöntemi uygulaması sırasında karışımın görüntüsü

- 4) Matris malzemesi yarı katı sıcaklıkta iken farklı uç profillerine sahip karıştırıcılar ile düşük hızlı karıştırma ve yoğurma işlemi ile, takviyenin matris malzemesi içine karışması sağlanmıştır. Sıvı karıştırma yöntemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen karıştırma işlemleri aşamasında takviye malzemesinin katılabileceği en uygun sıcaklık aralığı belirlenmiştir.

- 5) Takviye matris ilavesi işlemlerinin bitmesi ile birlikte hızla sıcaklığı yükselen karışıma kısa süreli, yüksek devirli karıştırma işlemi ile homojenleştirme yapılmış, karıştırma ve homojenleştirme işlemlerinden sonra döküm sıcaklığı olarak akıcılığın sağlandığı en düşük sıcaklık aralığı seçilerek karışım ergitme ünitesinden çıkarılarak önceden ısıtılmış (500-550 °C) çelik kalıba boşaltılmıştır.
- 6) Üzerine üst kalıp kapanıp pres tablasının altına sürüldükten birkaç saniye içinde sıkıştırma işlemi başlatılmış, 10 sn süre ile 80 MPa sıkıştırma basıncı uygulandıktan sonra kalıp dışarıya alınarak kompozit malzemenin kalıp içinde bir süre soğuması beklenmiş ve daha sonra kalıptan çıkarılarak ortam sıcaklığında soğutulmuştur. Bu şekilde 110x140x25mm boyutlarında prizmatik metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Değişik hacımsal takviye oranlarında üretilen kompozit malzemeler

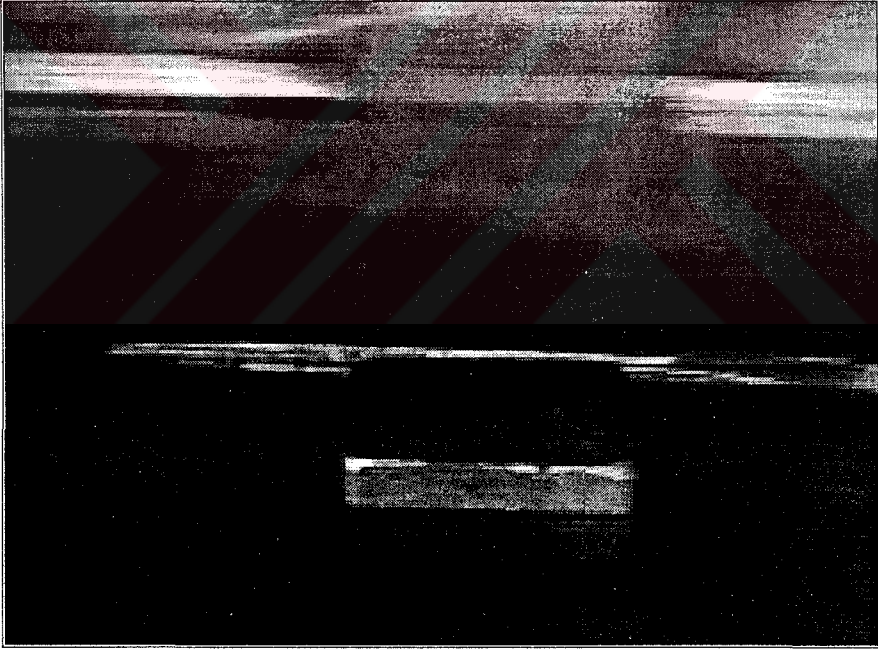
Aynı yöntem uygulanarak AA5754 alaşımının içine % 5, 10,15, 20, 25, 30 ve 35 hacımsal oranlarda SiC takviye malzemesi katılarak parçacık takviyeli kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir.

Her bir takviye oranı için 8 adet numune dökümü yapılmış, elde edilen kompozit malzemelerin özelliklerinin, matris alaşımının özellikleri ile kıyaslanabilmesi için takviyesiz matris alaşımı da aynı üretim şartlarında üretilerek kontrol numuneleri hazırlanmıştır.

3.2 Üretilen Kompozit Malzemelerin Haddelenmesi

Takviye oranlarının ve değişik ezme oranlarının plastik şekil değiştirme derecesi ve MMK'ların mekanik özellikleri üstündeki etkilerini incelemek amacı ile 110x140x25 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler haddelenmiştir. Haddeleme öncesi numuneler bir seri zımparalama ve yüzey parlatma işlemlerinden geçirilmiştir. Haddeleme işlemleri öncesinde numunelere hiçbir ısıtma işlemi ya da iyileştirme uygulanmamıştır.

Soğuk haddeleme işleminden önce numuneler hacımsal takviye oranlarına göre gruplandırılmış ve her gruptan birer numune seçilmiştir. Dijital mikrometre ile numunelerin başlangıç boyutları, en az 6 ayrı bölgesinden kalınlık, genişlik ve boy ölçümleri yapılarak belirlenmiştir. Numunelerin ilk boyutları belirlendikten sonra, her numunenin maksimum ezme oranları tespit edilmiştir. (Şekil 3.12). Haddeleme işlemleri sırasında her bir pasoda malzemeye % 1- 1.5 ezme uygulanmıştır.



Şekil 3.12 Kompozit numunelerin haddelenmesi

3.3 Karakterizasyon

Döküm işlemleri sonucunda referans numuneleri hariç 7 ayrı hacımsal takviye oranında kompozit malzeme üretilmiş, ezme işlemleri sonrasında da her bir hacımsal takviye oranındaki kompozit malzemeye 5 farklı oranda ezme işlemi uygulanarak 35 adet farklı özellikte numune elde edilmiştir. Elde edilen malzeme türlerini birbirleri ile kıyaslayabilmek için aynı oranda ezme uygulanan numuneler ayrılarak 25 farklı özellikteki numunenin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Birbirleri ile mukayese edilecek olan numune gruplarına aynı ezme oranlarının uygulanması gerektiğinden, sadece %20 hacımsal takviye oranı ve %20'lik ezme oranına kadar olan numuneler değerlendirmeye alınmıştır.

3.3.1 Hacımsal Takviye Oranlarının Tespit Edilmesi

Kompozit malzemelerdeki takviye miktarlarının istenen hacımsal oranlarda gerçekleşip gerçekleşmediğinin tespiti için öncelikle tartım işlemleri yapılmıştır. Döküm öncesinde hacımsal olarak yüzdeleri belirlenerek tartılıp hazırlanan matris ve takviye malzemesi ağırlık toplamının döküm sonrası elde edilen kompozit malzemenin ağırlığı ile karşılaştırılması yapılmış ve istenen hacımsal takviye oranının sağlandığı görülmüştür. İkinci olarak çözündürme metodu kullanılmış her hacımsal takviye oranından birer tane numune seçilerek, numunelerin alt ve üst bölgeleri beşer bölgeye ayrılmış ve her bölgeden 10 gr. talaş halinde numune alınmıştır. Alınan bu numuneler ayrı ayrı kaplara alınarak 1:1' lik HCL asit çözeltisi içerisinde 24 saat tutulmak suretiyle alüminyum matrisin çözünmesi sağlanmış, daha sonra süzme, yıkama, kurutma ve tartım işlemi yapılarak hacımsal takviye oranları tespit edilmiştir.

Döküm işlemleri sonucunda üretilen kompozit malzemenin kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla beş farklı hacımsal takviye oranında malzeme çeşidinden numunelerin spektrometre analizleri yaptırılmıştır.

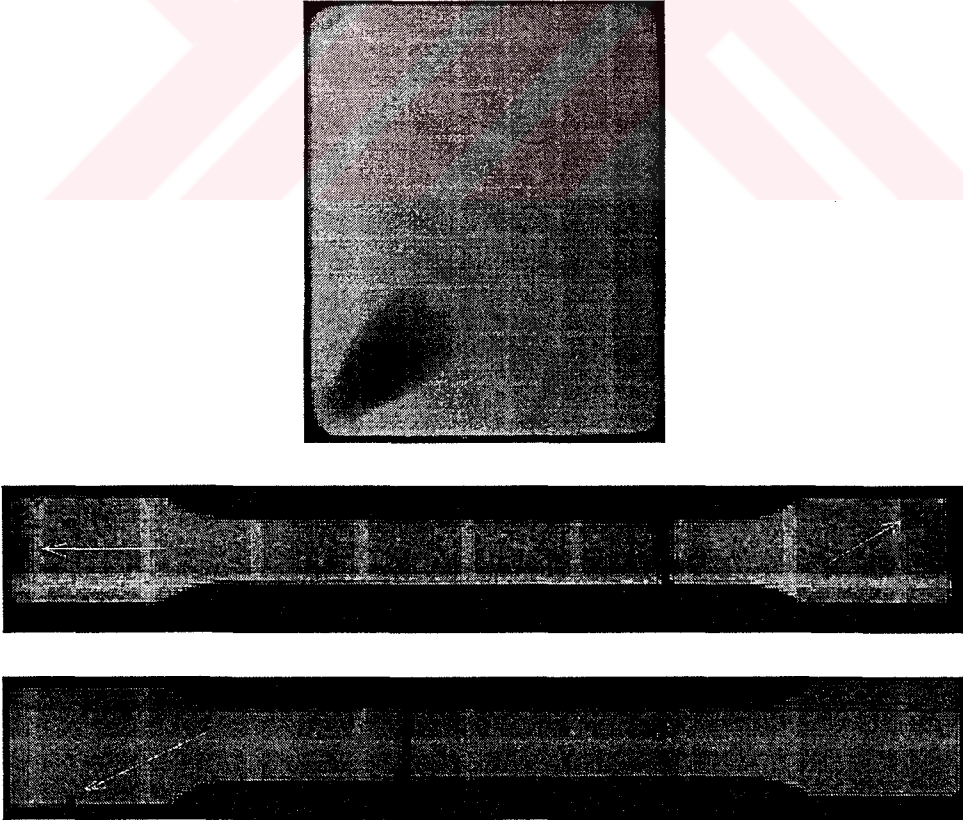
3.3.2 Özgül Ağırlıkların Tespit Edilmesi

Kompozit malzeme numunelerinin deneysel olarak özgül ağırlık ölçümleri, Arşimed prensibine göre yapılmıştır. Her bir numune türünden 6x3x15mm ölçülerinde 3'er adet numune hazırlanmıştır. Numunelerin yüzeyleri sırası ile 280, 400, 600, 800 ve 1200'lük su zımparaları ile zımparalandıktan sonra 1/1000 gr hassasiyetli tartı kullanılarak, havada ve saf su içerisindeki ağırlıkları tespit edilmiştir.

Hacım hesaplaması için, numunelerin havadaki ağırlıklarından, sudaki ağırlıkları çıkarılarak

hacımları bulunduktan sonra özgül ağırlıkları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kompozit malzemelerle aynı şartlarda üretilen takviyesiz AA5754 alaşımının da deneysel özgül ağırlık ölçümü yine Arşimed prensibine göre yapılmıştır. Matris malzemesi AA5754 alaşımının gerçek yoğunluğu ile Arşimet prensibine göre deneysel olarak tespit edilen yoğunluğu kıyaslanarak, malzeme içerisinde oluşan porozite miktarı tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde kompozit malzemelerde de matris içerisine ağırlıkça farklı oranlarda ilave edilen SiC parçacık miktarına göre teorik özgül ağırlıkları tespit edilerek, deneysel özgül ağırlıkları arasındaki fark bulunmuş ve numuneler içerisindeki porozite oranlarının tespiti yapılmıştır.

Ayrıca, parçacık takviyeli kompozit malzeme numunelerinin üretimi tamamlandıktan sonra, çekme numuneleri hazırlama safhasına geçmeden önce, yapıda oluşabilecek makro ölçekteki porozite ve boşluk oluşumlarını tespit etmek amacıyla x-ışınları ile yapıdan görüntü alabilen Varian 2100 C/D Lineer Akselaratör cihazı kullanılmıştır. 6 MV foton enerjisinde, 100 MU/dak doz hızı ile ışınlama altında alınan dijital görüntülerle iç yapısında makro ölçekte hata bulunan numuneler tespit edilmiştir (Şekil 3.13). Görüntü üzerinde x4 büyütme yapılabilmekte ve 0,25mm mesafe ölçülebilmektedir. 0,25 mm'den daha büyük boşluklar içeren numuneler ayrılarak haddelme işlemi uygulanmamıştır.

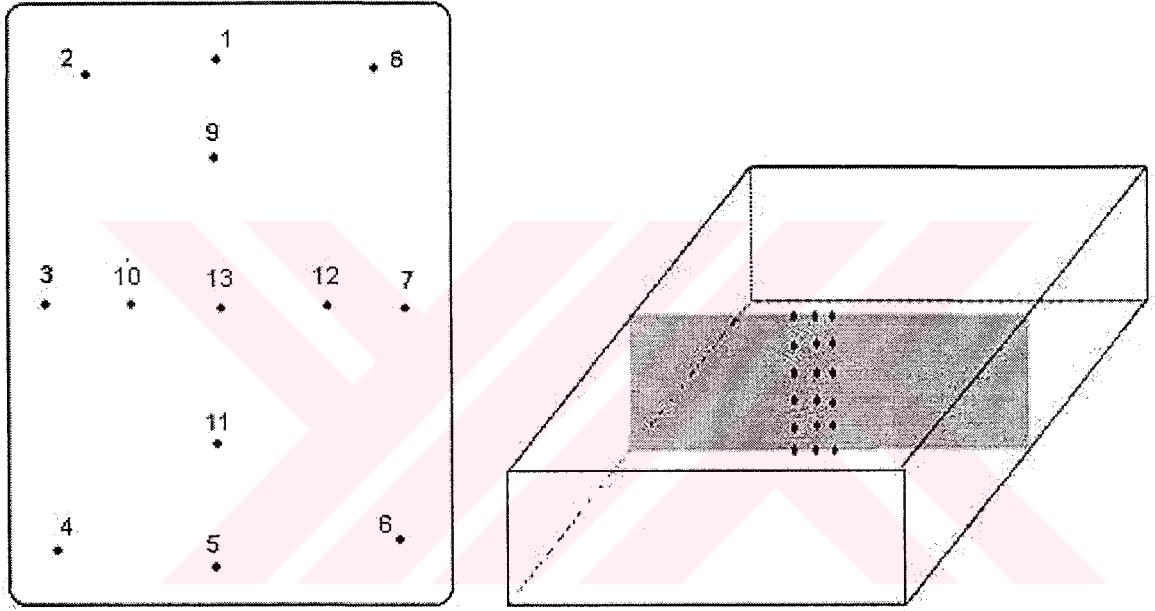


Şekil 3.13 Yapısında döküm hatası bulunan numuneler

3.3.3 Sertlik Ölçümleri

Takviye oranlarının arttırılması ve ezme işlemleri sonucu kompozit malzemelerde meydana gelen sertlik değişimlerini tespit etmek amacıyla Brinell ve Rockwell-B yöntemleri ile sertlik ölçümleri yapılmıştır.

Brinell sertlik deneyinde farklı oranlarda ezme uygulanan kompozit numunelerin sertlik değerleri 62.5 kg yük altında 2.5 mm çaplı bilya kullanarak ölçülmüştür. Numunelerin her iki yüzeyinden 13 farklı noktadan ölçüm alınmış, ortalamaları o malzemeye ait sertlik değeri olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.14).

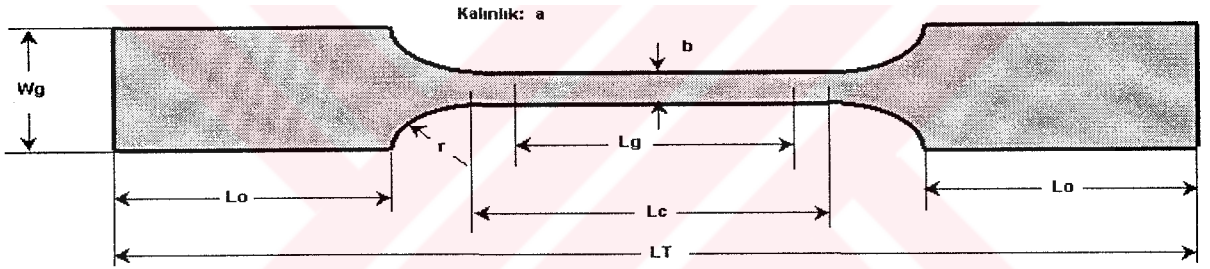


Şekil 3.14 Hazırlanan kompozit numuneler üzerinde sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktalar

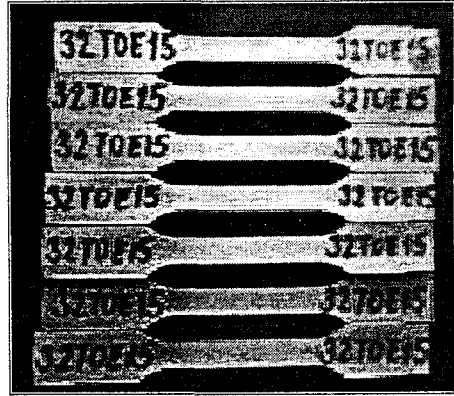
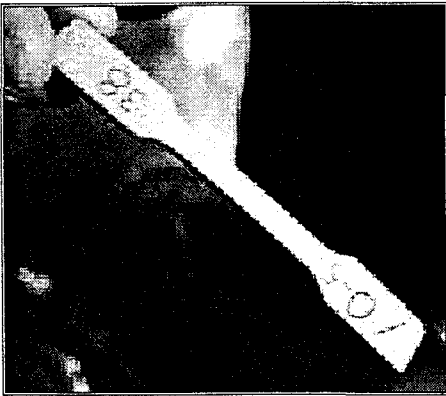
Haddeleyerek ezme işlemlerinde, yüzey sertlikleri ile iç bölgelerdeki oluşabilecek sertlik farklılıklarını tespit etmek amacı ile her bir numune orta kısmından kesilerek aynı yük ve bilya çapı ile Brinell sertlik ölçümü yapılmıştır. Rockwell B Sertlik ölçümünde ise 1/16" bilya kullanılarak 100 kg yük altında ölçümler tekrarlanmıştır.

3.3.4 Çekme Deneyleri

Çekme deneylerinde kullanılacak çekme numunelerinin hazırlanmasında, metal matrisli kompozitler için hazırlanmakta olan bir standart çalışması kullanılmıştır. ISO (International Organization for Standardization) ve VAMAS (The Versailles Project on Advanced Materials and Standards) tarafından, EN-10002-PT1 (tensile tests for metals) ve EN-2002-1-PT1 (aerospace materials) gibi mevcut olan metal standartlarını da baz alarak hazırlanan metal matrisli kompozit malzemelerin test metotlarını inceleme ve geliştirme projesi *ISO/TTA-2* kapsamında yayınlanan ve süreksiz takviyeli metal matrisli kompozitlerin test standardizasyon çalışmalarını içeren “*Tensile Test for Discontinuously Reinforced Metal Matris Composites at Ambient Temperatures*” adlı yayında önerilen numune hazırlama, çekme testi teknik şartlarına uyarak her malzeme grubu için 8 Adet dikdörtgen kesitli çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme numune hazırlanmasında kullanılan ölçüler Şekil 3.14’de gösterilmiştir.

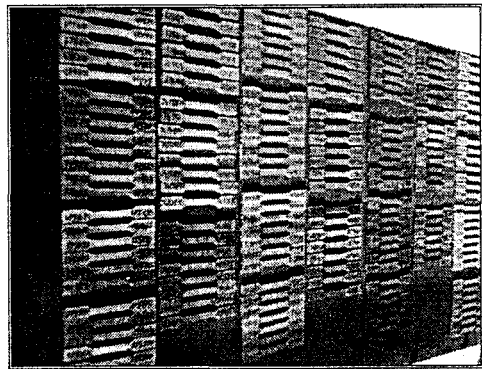
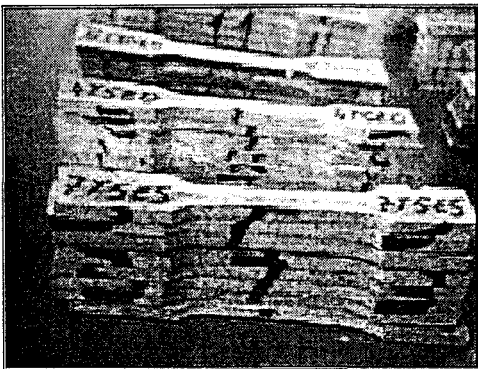
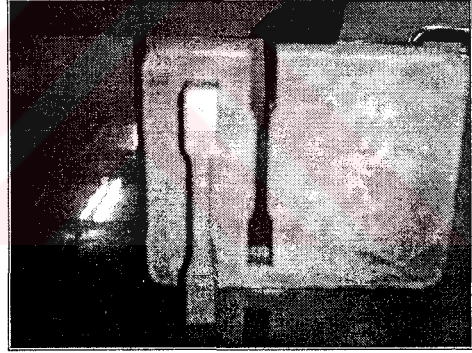


Tip	Lt	r	Wg	Lg	Lc	Lo	b	a
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
T1	100	12	12	25	36	25	6	3
T2	200	24	24	50	72	50	12	6



Şekil 3.15 Standard çekme numuneleri

Döküm işlemleri sonucunda elde edilen prizmatik plakalar, uygulanan haddeleme işlemlerinin malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisinin incelenmesi amacı ile öncelikle çekme testine tabii tutulmuştur. Çekme deneylerinde kullanılacak numuneler için uygun standartlar seçilerek ölçüler belirlenmiş ve EDM (Electro Discharge Machining) yöntemi kullanılarak çekme testi numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Çekme numunelerinin hazırlanış safhalarından alınmış görüntüler

EDM ile kesme işlemi dielektrik sıvı içerisinde 5mm/dak hızla gerçekleştirilmiş, kesme işlemleri sırasında malzeme içinde bulunan takviye sebebiyle sık sık tel kopması problemi ile karşılaşılmasına rağmen 25 adet plakadan çekme numuneleri kesilerek çıkarılmıştır. Bu numuneler, zımparalama işlemine sokularak çekme testinin sonuçlarını etkileyebilecek iz ve çapaklar temizlenmiştir. Çekme testi öncesi bütün numuneler markalanarak hepsinin gerekli ölçüleri alınmıştır. Çekme deneyleri sırasında, numuneler aşağıdaki Çizelge 3.9’da gösterildiği şekilde gruplara ayrılmıştır.

Çizelge 3.9 Numunelerin gruplandırılması

Deney no	Grup no	Numune grup adı	Hacımsal takviye oranı %	Ezme oranı %	Çekilen numune adedi
1	1	T0E0	0	0	5
2	1	T0E5	0	5	5
3	1	T0E10	0	10	5
4	1	T0E15	0	15	5
5	1	T0E20	0	20	5
6	2	T5E0	5	0	5
7	2	T5E5	5	5	5
8	2	T5E10	5	10	5
9	2	T5E15	5	15	5
10	2	T5E20	5	20	5
11	3	T10E0	10	0	5
12	3	T10E5	10	5	5
13	3	T10E10	10	10	5
14	3	T10E15	10	15	5
15	3	T10E20	10	20	5
16	4	T15E0	15	0	6
17	4	T15E5	15	5	6
18	4	T15E10	15	10	6
19	4	T15E15	15	15	6
20	4	T15E20	15	20	6
21	5	T20E0	20	0	8
22	5	T20E5	20	5	8
23	5	T20E10	20	10	8
24	5	T20E15	20	15	8
25	5	T20E20	20	20	8

Numuneler hacımsal takviye oranlarına göre 5 ayrı grup halinde hazırlanmıştır. Her grup 5 farklı ezme oranında haddelenmiş numunelerden oluşmaktadır.

Çekme testleri 50 kN yük kapasitesinde Zwick marka çekme makinası ile gerçekleştirilmiş olup, numuneler çekme deneyi makinesinin çeneleri arasına düzgün bir şekilde yerleştirilip sıkıştırıldıktan sonra 25mm ölçü boyuna ayarlanan ekstansiyometre kullanılarak numune eksenî yönünde 5mm/dak hızla kopana kadar çekilmiştir. Çekme deneyi esnasında çekme makinasına bağlı olan bilgisayar sisteminde kullanılan bir yazılım yardımı ile gerilme-kopma uzaması eğrileri çıkarılmış ve bu eğriler üzerinden malzemelere ait çekme dayanımı, akma dayanımı, kopma uzaması ve elastiklik modülü değerleri elde edilmiştir.

3.3.5 Mikroyapı İnceleme

Kompozit malzemelerde metalografik incelemeler için numune hazırlamak oldukça zor bir işlemdir. Yumuşak olan matris fazı ile beraber farklı sertlikteki takviyelerin birlikte parlatılma zorunluluğundan kaynaklanan bir güçlük söz konusudur. Takviye ile matris fazını aynı düzleme getirmek, takviye taneciklerini yerinden oynatmadan veya sökmeden bu işlemi gerçekleştirmek oldukça fazla tecrübe ve dikkat gerektirmektedir. Seçilen numuneler sırasıyla 280, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 ve 4000 Mesh SiC zımparasından geçirildikten sonra yine sırası ile uygun keçeler kullanılarak 6µm, 3µm, 1µm diamond paste ile parlatılmış, son olarak da koloidal silika ile parlatılarak mikroyapı incelemeleri için hazırlanmıştır.

Hazırlanan numunelerde homojen dağılım sağlanıp sağlanmadığı ve ezme işlemlerinin iç yapıda meydana getirdiği değişiklikler, porozite ve iç yapı kusurları oluşup oluşmadığı optik laboratuvar mikroskobu ve yarı kantitatif elementel analiz sistemine sahip, JOEL-FEG-SEM / INCA/ EDS tarama elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

4.1 Proses Değişkenlerinin Belirlenmesi

MMK malzemelerin sıvı metal karıştırma yöntemleri ile üretimi sırasında ergimiş metalin atmosferden gaz alma problemi, üretilecek olan malzemenin kalitesi açısından çok önemli olmaktadır. Alüminyum malzemenin ergime aşamasında hızlı yüzey oksidasyonu ile yüzeyde oksit filmi oluşmakta ve oluşan bu tabaka ergime boyunca metalin atmosferdeki gazlarla reaksiyona girmesini engellemektedir. Ergimiş metale takviye malzemesi ilave edilmesi sırasında, yüzeyde oluşan oksit filmini malzeme içine katmamak, oksit inklüzyonları oluşturmamak ve porozite oluşumuna engel olmak amacı ile vorteks oluşturulmamaya yada fazla çalkantılı bir karıştırma şekli seçilmemeye çalışılmıştır. MMK üretimi esnasında takviye ilavesi yüzeyden yapıldığı karıştırma biçimlerinde daha homojen bir karışımın sağlanabilmesi amacıyla vorteks oluşumundan faydalanılmış, Ancak, bu tür uygulamalarda ergitme ve karıştırma işlemlerinin koruyucu gaz altında yapılması gibi özel koruyucu önlemler alınmıştır.

Kompozit malzeme hazırlama işlemleri sırasında ergitme ve karıştırma prosesleri, açık atmosfer ve koruyucu azot gazı altında olmak üzere iki farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Koruyucu ortam sağlanmadığı takdirde karışım ortamdan oldukça fazla gaz almakta, matris ve takviye malzemeleri oksitlenerek karışım oluşturmak güçleşmekte, topaklanmalar oluşmakta ve istenen oranda takviye sağlanamamaktadır.

Çok küçük tane boyutuna sahip takviye malzemeleri ile yapılan denemelerde kurutma ve oksitlendirme işlemleri yapılmasına rağmen takviye malzemesinin topaklanması ve karışımın üzerinde toplanmasını engellemek oldukça güç olmaktadır, büyük boyutlu tanelere sahip takviye malzemesi ile karışımı sağlamak daha kolay olmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda tane boyutu büyüdükçe dayanım değerlerinin düştüğü, tane boyutu küçüldükçe dayanım değerlerinin arttığı ve malzemenin plastik şekil verme özelliklerinin iyileştiği belirtilmektedir (Seleznev vd., 1998).

Takviye malzemeleri sıvı matris malzemesi içine değişik yöntemlerle katılabilmektedir. Yapılan denemeler sonucunda da takviye malzemesinin uygun besleme hızı ile üstten ilave edilmesi ile karışım kontrolü daha iyi sağlanmışır. SiC parçacıklarının matris tarafından iyi ıslatılmasını sağlamak amacı ile mekanik karıştırıcılar kullanılmış ve karıştırıcı profili, karıştırma hızı ve süresi karıştırma sağlanmasında oldukça etkili olmuştur. Karıştırma işlemlerinde kullanılan çelik karıştırıcılar hızlı aşınma nedeniyle yüksek sıcaklıklarda ve uzun

sürekli karıştırma işlemlerinde kullanılmamıştır. Bu sebeplerle bu tür karıştırma şartlarında, grafit malzemeden yapılmış karıştırıcı uçların kolloidal silika ve SiC tozlarından hazırlanan bir karışım ile kaplanmıştır.

Karıştırıcının pota içindeki hareketi, homojen karışımın sağlanması açısından önemli olmaktadır. Takviye malzemesinin potanın dibinde ve üzerinde toplanmasını ve topak oluşumunu engellemek için kullanılan karıştırıcının pota içinde aşağı yukarı hareketi sağlanmalıdır. Ayrıca takviye malzemesi ilave edilirken çok yüksek devirlerde yapılan karıştırma işlemlerinde, ergimiş metal tarafından henüz ısıtılmamayan takviye malzemesi hızla dönen karıştırıcı ucun etkisi ile pota dışına savrulmaktadır. Bu sebeple, uygun karıştırıcı hızının seçilmesi gerekmektedir.

Takviye malzemesinin 1100 °C üzerinde 5 saat bekletilmesi ile, takviye malzemesinin matris malzemesi ile daha kolay karışması sağlanabilmektedir. Daha önce yapılan deneme dökümlerinde ısıtılma işlemi uygulanmayan takviye malzemesinin ergimiş metal içine karışmadığı ve ergiyeğin dışına itildiği görülmüştür. Aklaghi ve arkadaşları da yaptıkları benzer çalışmada ısıtılma işlemi yapılmayan parçacıklar ergiyeğin dışına itildiğini ve karışma sağlanamadığını belirtmişlerdir. Sıvı haldeki matris malzemesine %1 oranında Mg ilave edilerek yüzey geriliminin düşürülmesi ile matris içine karışan takviye miktarı artırılabilmiştir.

SiC takviyeli Al alaşımları ile yapılan bir çalışmada 5 µm SiC' ün 1100°C, 1200°C ve 1300°C sıcaklıkta 2-6 saat bekletilmesi ile takviye yüzeyinde SiO₂ oluşturulmuş, oksitlendirilmiş SiC ile Al-Mg alaşımı karıştırılarak oluşturulan kompozit karışım sıkıştırma döküm yöntemi ile katılaştırılarak arayüzey reaksiyonları incelenmiş, sonuç olarak sıvı karıştırma yöntemleri ile kompozit malzeme üretiminde ısıtılma sağlayabilmek için en az %1 Mg ilavesi gerektiği, değişik oranlarda Mg ilavesi ile MgO ve MgAl₂O₄ gibi reaksiyon ürünlerinin ve boyutlarının kontrol edilebileceği, oksitlendirme işleminin arayüzeyde istenmeyen Al₄C₃ oluşumunu önlemek amacı ile yapıldığını ve üretim sonrası yapılan incelemelerde Al₄C₃ oluşumuna rastlanmadığı belirtilmiştir (Shi, Z.vd., Vaucher, S.vd.).

Aklaghi ve arkadaşlarının(2004) A356 alaşımı ve SiC parçacıkları kullanarak yarıkatı karıştırma yöntemini kullandıkları bir çalışmada, ısıtılabilirliğini arttırmak amacı ile SiC parçacıklarını doğal olarak 1000°C de 120 dakika oksitlendirmişlerdir. Bu işlem ile parçacıkların matris içersine karışımının kolaylaştığı ve arayüzeyde istenmeyen reaksiyonların önlenildiği belirtilmiştir.

Takviyenin ergimiş metal içine katılmasından önce, yüksek sıcaklıklara (500 -750 °C) ısıtılması karışım sağlanmasını kolaylaştırmakta ve takviyenin ergimiş metalin içine daha kolay karışmasını sağlamaktadır.

Koruyucu gazın sisteme verilmiş hızı da oldukça önemli olup, gereğinden az olduğunda koruma sağlayamamakta, fazla olduğunda ise yeterince ısınmayıp, kompozit karışımın sıcaklık dengesini bozarak, karıştırma süresinin uzamasına ve/veya takviye malzemesinin topaklanmasına sebebiyet verebilmektedir.

Kullanılan pota malzemesi karıştırma işlemini oldukça fazla etkilemektedir. Çelik pota ile yapılan denemelerde, potanın sıcaklık değişimlerini karışıma hızla iletmesi nedeniyle ergiyik sıcaklığında ani değişimler olmakta, sıcaklığın yarı katı aralıkta muhafaza edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu durum takviyenin matris içinde dağılımını olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Bu nedenle yarı katı karıştırma işlemleri için grafit pota kullanılmıştır.

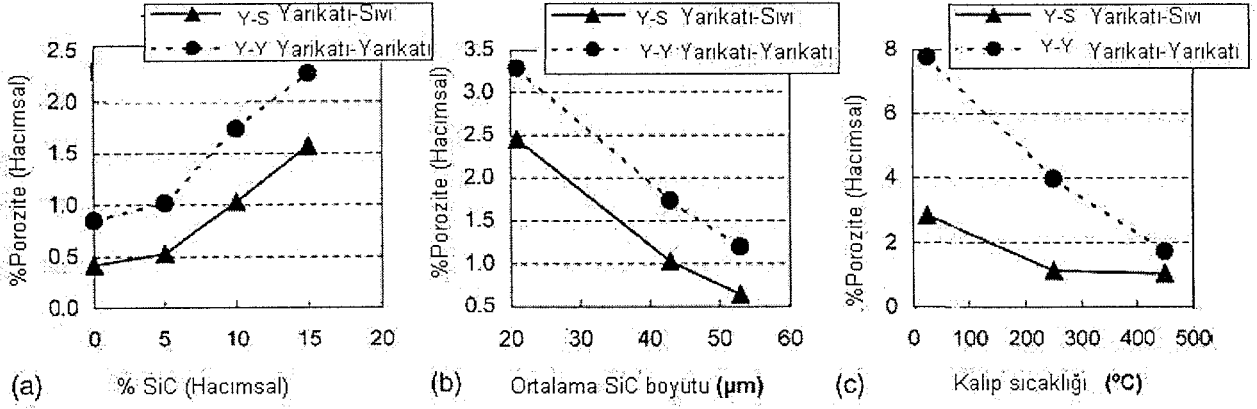
Bu çalışmada, sıkıştırma dökümün nihai malzeme üzerindeki etkilerinin görülmesi amacı ile iki farklı döküm yöntemi uygulanarak aradaki farklar incelenmiştir. Basınç altında katılaştırma işlemi uygulanmadan elde edilen kompozit numunelerde çok yüksek oranlarda porozite (%10-%15) saptanmış, ayrıca düşük hızlı katılaşma işlemi sonucu parça yüzeylerinde ve iç kısımlarında döküm kusurları ve sıcak yırtılma nedeniyle çatlamlar görülmüştür.

4.2 Modifiye Edilmiş Kompozit Döküm Yöntemi

Sıvı karıştırma ve sıvı halde (S-S) döküm yöntemleri parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerin üretimi için en ekonomik proses olmasına rağmen seramik parçacıkların ergimiş alaşım tarafından iyi ısıtılmaması, parçacıkların sıvı matris içine girişi ve üniform dağılımı zor olmaktadır. Ayrıca, iyi uygulanmayan ve yeterli önlem alınmamış döküm teknikleri, aşırı arayüzey reaksiyonu, porozite oluşumu ve homojen olmayan parçacık dağılımı gibi problemlere neden olmaktadır. Bu problemlere çözüm olarak çoğu zaman yarıkatı karıştırma proseslerini kapsayan kompozit döküm (compocasting) yöntemleri önerilmektedir (Aklaghi, F. vd.2004), (Hashim, J.2002).

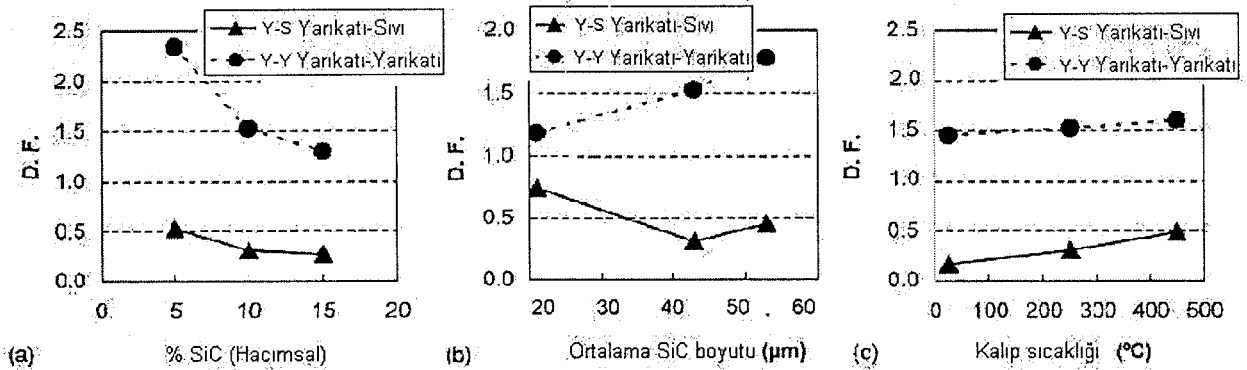
Aklaghi ve arkadaşları iki farklı kompozit döküm yöntemi uygulayarak değişik parametrelerin porozite oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada birinci yöntem olarak kompozit karışım yarıkatı karıştırma ile elde edilmiş ve yine yarı katı olarak dökülmüş (Y-Y), ikinci yöntem de ise, yarı katı karıştırma arkasından karışım ısıtılarak sıcaklığı yükseltilmiş (700°C) karıştırma işlemini takiben (800rpm) tamamen sıvı halde dökülmüştür (Y-S).

Sözü edilen yöntemlerde, takviye oranı artışının, ortalama parçacık boyutunun ve kalıp sıcaklığının porozite artışına etkisi aşağıdaki grafiklerle ifade edilmiştir (Şekil 4.1-4. 2).



Şekil 4. 1 Farklı iki kompozit döküm yöntemi için (a) SiC hacim oranı (b) ortalama SiC boyutu (c) kalıp sıcaklıklarının poroziteye etkisi (Aklaghi, F. vd.,2004)

Bu çalışmaya göre, yarıkatı karıştırma arkasından sıcaklığı yükseltilerek sıvı halde döküm yapılan numunelerdeki porozite yüzdeleri her zaman yarıkatı haldeki döküm işlemine nazaran daha düşük olmaktadır. Parçacıkların matris malzemesi içinde homojen olarak dağılımının bir dağılma faktörü ile belirtildiği çalışmada, takviye oranı ve tane boyutu arttıkça yarıkatı-sıvı döküm yönteminde daha üniform parçacık dağılımı sağlandığı, kalıp sıcaklığı artışının parçacık dağılımını olumlu etkilemesine rağmen düşük kalıp sıcaklıklarında yarıkatı-sıvı döküm yöntemi ile yarıkatı-yarıkatı döküm yöntemine nazaran daha iyi dağılım sağlandığı görülmektedir (Şekil 4. 3).



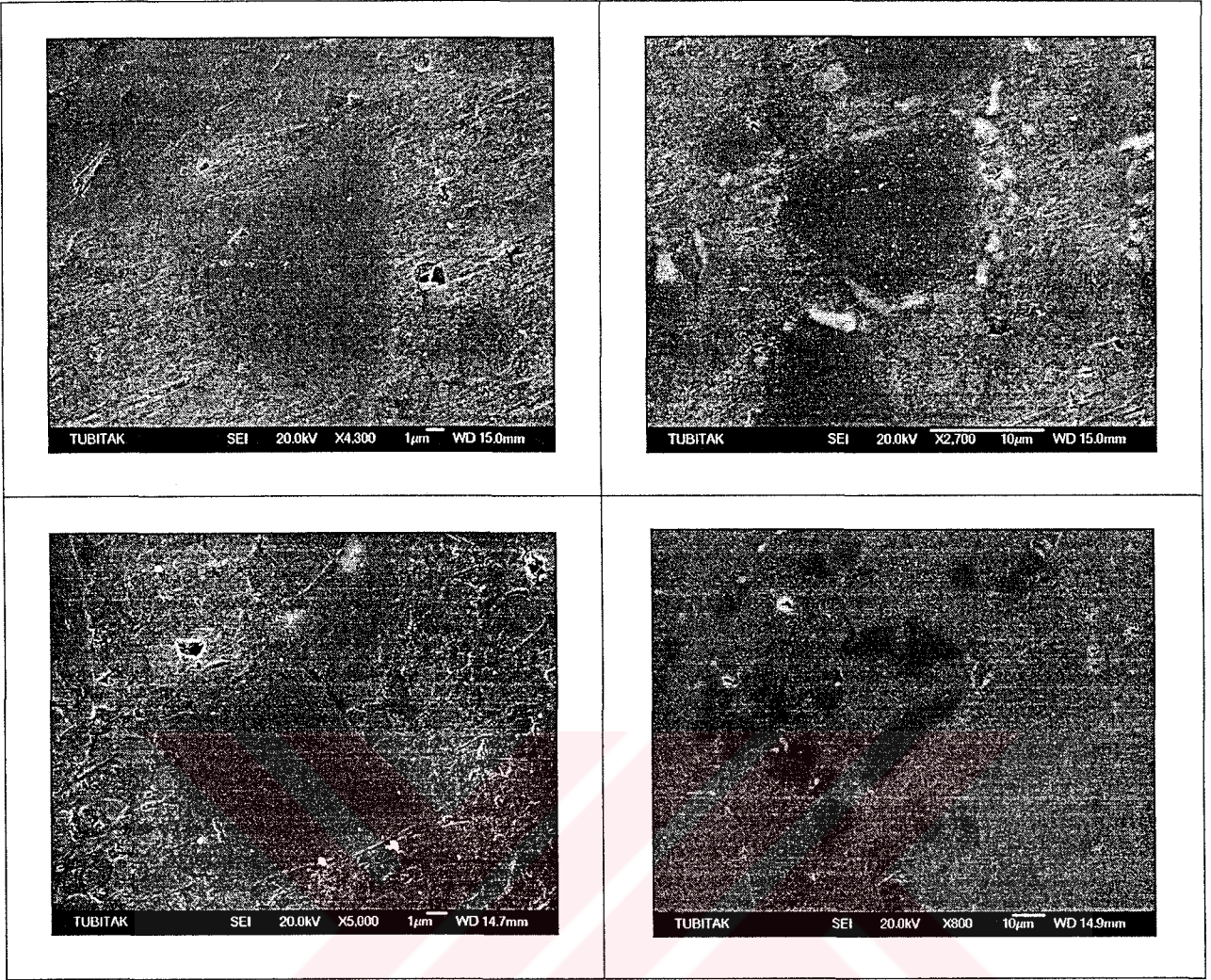
Şekil 4. 2 Farklı iki kompozit döküm yöntemi için (a) SiC hacim oranı (b) ortalama SiC boyutu (c) kalıp sıcaklıkları ile parçacık dağılım faktörünün değişimi (Aklaghi, F. vd.2004)

Yapılan çalışmada, literatürde önerilen yarıkatı karıştırma ve arkasından sıcaklığın yükseltilerek yüksek devirde karıştırma işlemi (Y-S) ile karışımın homojenleştirilmesi sağlanarak daha kısa sürede karışım sağlanmış, pota dibinde ve üzerinde takviye malzemesi toplanmadığı takviye malzemesinin topaklanmadığı ve parçacıkların homojen dağılımının sağlandığı görülmüştür. Sıvı metal karıştırma yöntemlerine göre matris malzemesi içine daha yüksek oranlarda takviye malzemesi katılabilmektedir. Uygulanan yöntemle hacimce %5'ten yüzde %35 oranına kadar SiC takviyeli kompozit malzemeler üretilmiştir. Ayrıca, kullanılan karıştırma yönteminde Mg ilavesine gerek kalmadan karışım sağlanabilmektedir.

Karışım sıcaklığı matris malzemesinin sürekli olarak ilavesi ile düşürüldüğünden takviye ilavesi süresince fırın sıcaklığı yüksek sıcaklıkta sabit kalmakta ve takviye ilave işlemi bittiğinde matris malzemesi ilave işlemi de bitmekte ve homojenleştirme işlemi ile birlikte karışım hızla döküm sıcaklığına yükselmektedir. Yöntemin diğer yöntemlere göre avantajları :

(i) Düşük sıcaklıklarda ve kısa süreli karıştırma işlemi nedeniyle diğer sıvı karıştırma yöntemlerine nazaran daha az enerji tüketimi;(ii) aşırı ısıtma olmaksızın düşük işlem sıcaklıkları ve alaşım tarafından takviye malzemesine kimyasal atakların azaltılması ile birlikte daha düşük ısı nedeniyle daha uzun kalıp ömrü; (iii)vizkoz yarıkatı malzemenin laminar akışı ; (iv)daha az katılaşma büzülmesi ;(v)sıcak yırtılmaya daha az eğilim;(vi)daha hızlı proses çevrimi;(vii)düşük sıcaklıklarda yapılan işlemler nedeniyle matris ve takviye malzemesi arasında daha az arayüzey reaksiyonu; (viii) kompozit malzemenin dayanımını düşüren reaksiyon ürünlerinin daha az oluşması;(ix)Karıştırma işlemlerinde kullanılan karıştırıcıların karışımla düşük sıcaklıkta ve daha kısa süre temasından dolayı aşınma ve karışım içine istenmeyen elementlerin karışmasının en az seviyeye indirgenmesi;(x)Karışımın ortamdan gaz alma oranının düşmesi ile ve daha az poroziteli iç yapı; (xi)dentritik olmayan eş eksenli tanelere sahip olarak elde edilen katı faz(Hashim, J.,2002), (Aklaghi, F.vd.,2004), (Cöcen, Ü.ve Önel, K.,1996), (Samuel, A.,vd., 1995), (Yılmaz, M. ve Altıntaş, S.1996).

Bütün bu avantajlara ek olarak bu çalışmada, karıştırma işlemini takiben karışımın sıcaklığının döküm sıcaklığına yükseltilmesi çok kısa sürede gerçekleştirildiği için takviye ile matris malzemesinin temas süresi, uygulanmakta olan yarı katı karıştırma yöntemlerine nazaran da daha kısa olmakta, farklı profillerde hazırlanan karıştırıcılarla uygulanan düşük hızlı karıştırma ve yoğurma işlemleri, takviye malzemesinin dibe çökmesini ve topaklanması engellenmektedir. Aynı zamanda, takviyenin daha homojen dağılımı ve matris tarafından daha iyi sarılması da sağlanmış olmaktadır (Şekil 4.3)

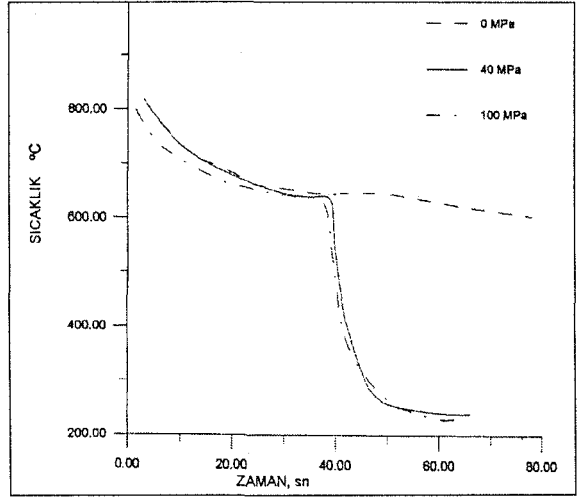
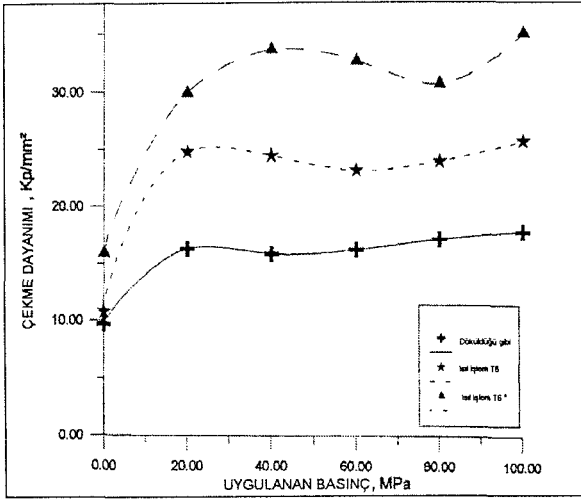


Şekil 4.3 Farklı oranlarda takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntüleri

Bir çok çalışmada, katılaşma süresini kısaltmak ve takviye ile matris malzemesinin sıvı halde temas süresini en aza indirmek ve dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda uzun süreli karıştırma ve döküm işlemlerinde takviye/matris arayüzeyinde oluşabilecek reaksiyonları en aza indirmek için sıkıştırma döküm yöntemi önerilmektedir.

80 MPa basınç altında katılaştırma işlemi uygulanarak elde edilen kompozit numuneler, oldukça kısa işlem süresinde katılaştırılmış (10 sn), ve düşük oranlarda poroziteye sahip kompozit numuneler üretilmiştir. Bu numunelerde döküm kusurları en aza indirgenmeye çalışılmıştır.

Skolianos ve arkadaşlarının sıkıştırma basıncının AA6061 alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmada, bu malzeme için bir soğuma eğrisi çıkarmışlar(Şekil 4. 4,a).



Şekil 4. 4 (a) Uygulanan basınç ve ısısl işlemin çekme dayanımına etkisi (b) 370 °C kalıp sıcaklığı ve 820 °C döküm sıcaklığında basınçsız ve basınç altında soğuma eğrisi (Skolianos,1997)

Basıncılı olarak ~9sn katılaşma zamanı tespit edilen numunelerde uygulanan basınca bağlı olarak porozite ve mikro boşlukların hacimsel oranlarının azaldığı, dentrit boylarının ve dentritler arası boşlukların alanlarında azalma olduğu, malzemenin çekme dayanımının arttığı belirtilmiş ve bütün numunelerde uzamanın max değerine ulaştığı basınç 60-80 MPa olarak belirlenmiştir(Şekil 4. 4, b).

4.3 Kimyasal Bileşimin İncelenmesi

Üretilen kompozit malzemenin kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla beş farklı hacimsel takviye oranında malzeme çeşidinden numunelerin spektrometre analizleri yaptırılmıştır ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1- 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.1 %5 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları

16-JAN-04 10:15:54 Sample: CEVHER DOKUM TOFAS NUM 2.NUMUNE										
Program: GLOBAL Task: GLOBAL										
Run	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	li	Cr	Ni	
Avg	4.65573	0.49946	0.02806	0.19414	2.92217	0.00821	0.01901	0.06822	0.00354	
Sd	0.67501	0.02605	0.00416	0.00107	0.01474	0.00241	0.00008	0.00080	0.00039	
Sd%	14.49844	5.21641	14.83569	0.55333	0.50441	29.31609	0.41078	1.17200	10.98479	
	Sb	P	AL%							
Avg	0.00153	0.00068	91.5052							
Sd	0.00111	0.00001	0.6993							
Sd%	72.88585	1.36156	0.7636							

Çizelge 4.2 %10 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları

14-04 10:24:04 Sample: CEVHER DOKUM TOFAS NUM 5.NUMUNE												
Program: GLOBAL Task: GLOBAL												
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	Na	
9.32574	0.34549	0.00202	0.00628	1.80506	0.00962	0.02841	0.00344	0.00520	0.0050	0.00434	0.00035	
P	AL%											
0.00048	88.4449											

Çizelge 4.3 %15 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları

16-JAN-04 10:26:46 Sample: CEVHER DOKUM TOFAS NUM 6.NUMUNE												
Program: GLOBAL Task: GLOBAL												
Run	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni	Pb	Sn	
Avg	12.22832	0.71975	0.00831	0.04920	1.68776	0.01681	0.02567	0.08390	0.04984	0.0065	0.00532	
Sd	0.39418	0.01701	0.00014	0.00094	0.15924	0.00300	0.00016	0.00241	0.00062	0.0006	0.00068	
Sd%	3.22350	2.36332	1.68472	1.91057	9.43499	17.84652	0.62330	2.87247	1.24398	9.2308	12.78195	
	Sb	P	AL%									
Avg	0.01306	0.00044	83.7934									
Sd	0.00174	0.00004	0.5433									
Sd%	13.32312	9.09091	0.6484									

Çizelge 4.4 %20 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları

Run	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni
Avg	17.18411	0.39198	0.00275	0.00742	1.55962	0.01441	0.03193	0.00581	0.00806
Sd	0.48571	0.00506	0.00015	0.00009	0.17845	0.00118	0.00123	0.00004	0.00017
Sd%	2.82651	1.29088	5.45455	1.21294	11.44189	8.18876	3.85218	0.68847	2.10918
	P	AL%							
Avg	0.00025	78.7581							
Sd	0.00001	0.2982							
Sd%	4.00000	0.3786							

Çizelge 4.5 %35 Takviyeli kompozit numunenin spektrometre analiz sonuçları

16-JAN-04 10:13:44 Sample: CEVHER DÖKÜM TOFAS NUM 1.NUMUNE									
Program: GLOBAL Task: GLOBAL									
Run	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Ni
Avg	30.14750	0.41076	0.01527	0.05894	1.86507	0.03843	0.04891	0.03112	0.01496
Sd	6.20635	0.04224	0.00498	0.00376	0.49346	0.00983	0.01849	0.00139	0.00202
Sd%	20.58662	10.28234	32.61025	6.37715	26.45825	25.57182	37.79337	4.46936	13.49719
	Cd	Sb	P	AL%					
Avg	0.00011	0.03120	0.00505	67.2782					
Sd	0.00001	0.00682	0.00577	5.6002					
Sd%	8.41416	21.86890	114.17955	8.3239					

Kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde, planlanan hacımsal takviye oranlarının, döküm işlemleri sonucunda sağlandığı görülmüştür.

4.4 Özgül ağırlıkların Tespit Edilmesi ve Porozitenin Belirlenmesi

Özgül ağırlık ve porozite ölçüm işlemi sonuçları Çizelge 4.6 (a)'da verilmiştir. Ayrıca numunelerin özgül ağırlıklarının ve porozite miktarlarının takviye oranı ile değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir.

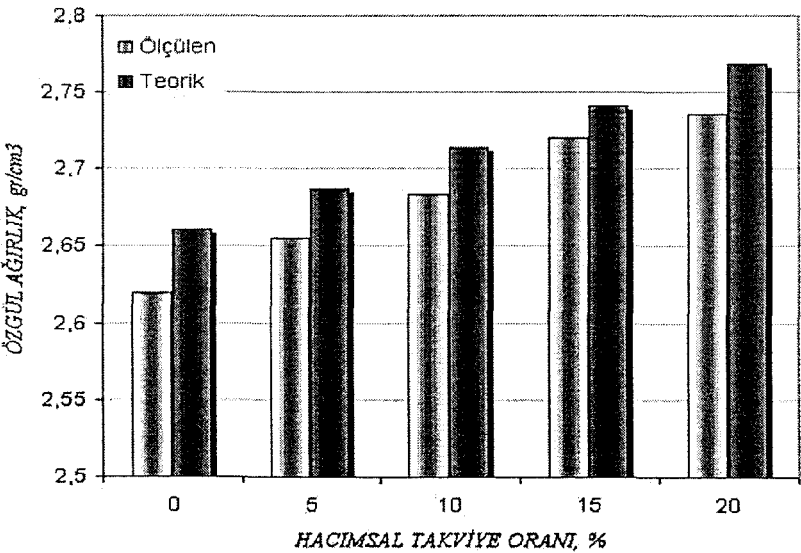
Çizelge 4.6 (a)Deney numunelerinin yoğunluk değerlerinin takviye oranlarına göre değişimi

Takviye oranı (%)	Yoğunluk (%)
0	98,5
5	98,8
10	98,9
15	99,3
20	98,8
25	96,6
30	94,4
35	95,5

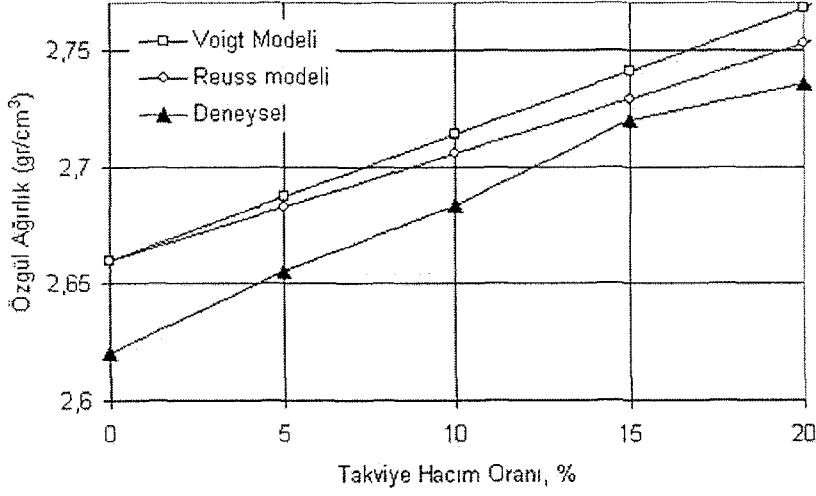
Çizelge 4.6(b) Deney numunelerinin teorik ve ölçülen özgül ağırlıkları ile porozite oranları

Malzeme	%SiC (Hacımca)	Teorik Özgül ağırlık (g/cm ³)	DeneySEL Özgül ağırlık (g/cm ³)	% Porozite
AA 5754	-	2,66	2,62	1,5
AA 5754 + % 5 SiC	5	2,69	2,65	1,2
AA 5754 + % 10 SiC	10	2,71	2,68	1,1
AA 5754 + % 15 SiC	15	2,74	2,72	0,8
AA 5754 + % 20 SiC	20	2,77	2,74	1,2
AA 5754 + % 25 SiC	25	2,79	2,70	3,4
AA 5754 + % 30 SiC	30	2,82	2,66	5,6
AA 5754 + % 35 SiC	35	2,85	2,72	4,5

Hacımsal takviye oranlarının artması ile birlikte kompozit malzemenin özgül ağırlığı artmıştır. DeneySEL ve teorik özgül ağırlık sonuçları karşılaştırıldığında, döküm sonrası uygulanan uygulanan basınçlı katılaştırma işleminin etkisi ile farklı takviye oranlarına sahip numunelerde % 20 takviyeli kompozit malzemeler dahil olmak üzere oldukça düşük (<2 %) porozite oranı sağlanmıştır(Şekil 4.5 – 4.6). %25 hacımsal takviye oranından sonra daha düşük takviye oranlarındaki kompozit malzemelere nazaran porozite oranlarında artış gözlenmiştir.



Şekil 4.5 Takviye oranlarının artışı ile özgül ağırlık değişimi



Şekil 4.6 Deneysel sonuçlar ile bazı mikro mekanik modellerin karşılaştırılması

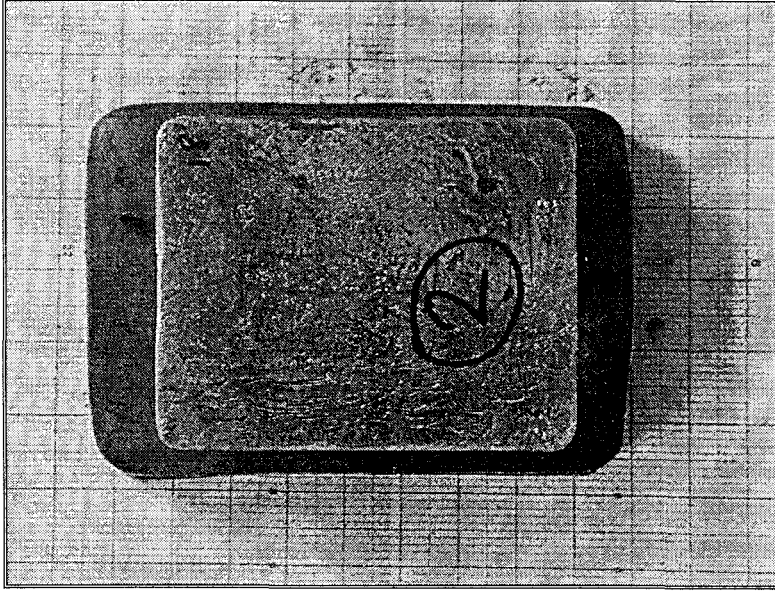
4.5 Haddeleme

Takviyesiz ve %5 takviyeli numuneye %35 oranında, %10, %15, %20, %25 ve %30 takviye oranına sahip olan numunelere sırası %25, %20, %20, %15 ve %10 oranında ezme uygulanmıştır. Haddeleme işlemleri sırasında her bir pasoda malzemeye % 1-1.5 ezme uygulanmıştır. Şekil 4.7’de matris malzemesi içindeki takviye oranı arttıkça kompozit numunelere uygulanabilen ezme miktarları azalmıştır. Ezme oranlarının arttırılmaya çalışılması ile malzemeler hasara uğramıştır.

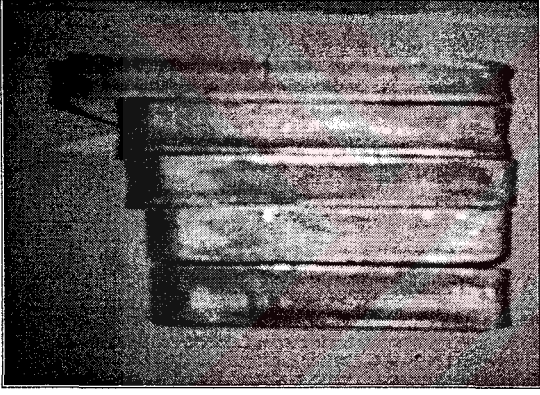
Çizelge 4.7 Değişik takviye oranlarına sahip numunelere uygulanan ezme oranları

	Ezme Oranları (%)							
Hacımsal Takviye	0	5	10	15	20	25	30	35
0	•	•	•	•	•	•	•	•
5	•	•	•	•	•	•	•	•
10	•	•	•	•	•	•	—	—
15	•	•	•	•	•	—	—	—
20	•	•	•	•	•	—	—	—
25	•	•	•	•	—	—	—	—
30	•	•	•	—	—	—	—	—

• Uygulanan ezme oranları



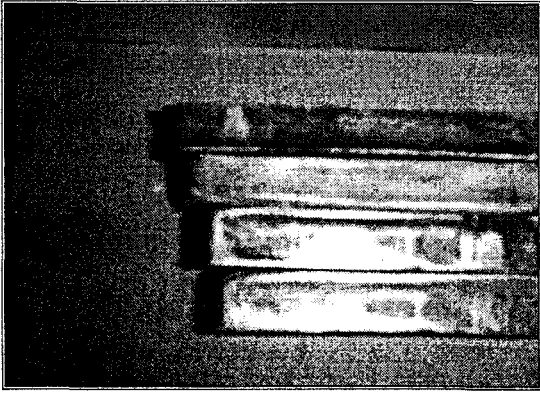
Şekil 4.7 % 35 ezme uygulanmış %5 takviyeli kompozit numune



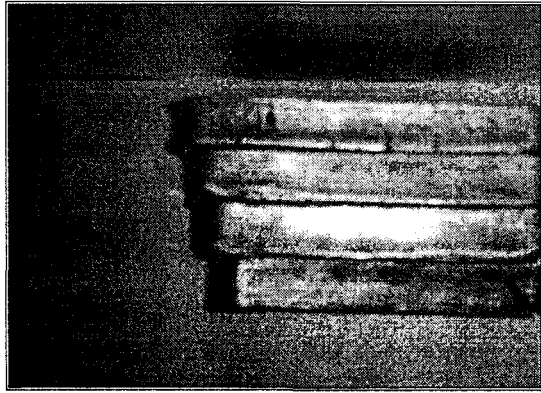
(a)



(b)



(c)



(d)

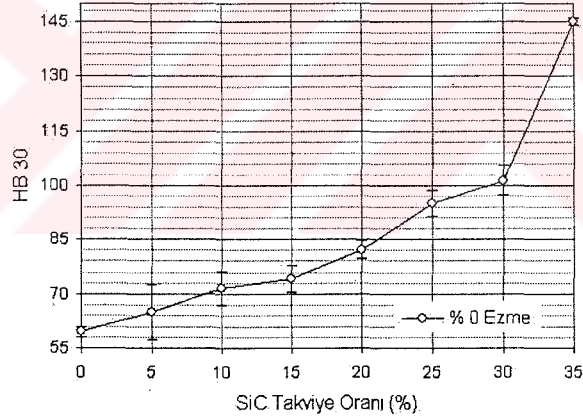
Şekil 4.8 Değişik ezme oranlarında haddelenmiş (a) % 5, (b) % 10, (c) % 15, (d) % 20 hacimsal takviyeli kompozit numuneler



Şekil 4.9 Tek yönlü %5 - % 20 haddelenmiş kompozit numuneler

4.6 Sertlik Ölçümleri

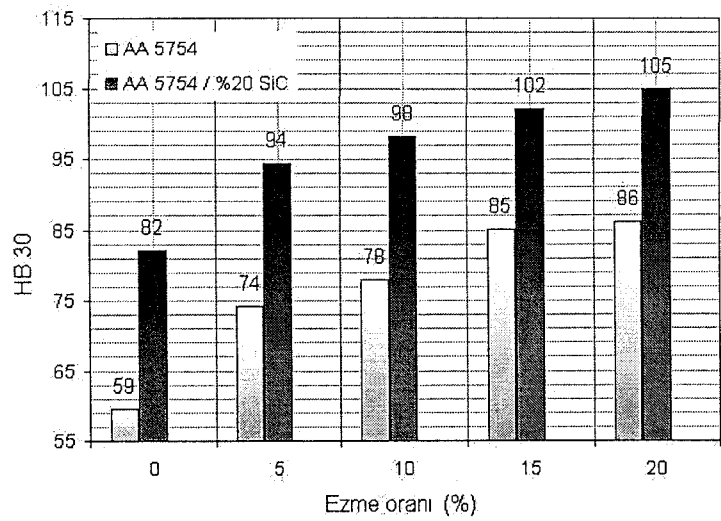
Hacımsal takviye oranlarının artımı ile birlikte kompozit malzemelerin sertliğinde artışlar meydana gelmiştir. Şekil 4.10’ da matris malzemesinin artan takviye oranı ile sertliğindeki artış verilmiştir. %20 oranında SiC takviyeli kompozit malzemenin takviyesiz matris alaşımına göre sertliğindeki artış %39, %35 oranında SiC takviyeli kompozit malzemenin takviyesiz matris alaşımına göre sertliğindeki artış %145 olmuştur.



Şekil 4.10 Matris malzemesinin sertlik değerlerinin takviye oranları ile değişimi

Şekil 4.11’ de Takviyesiz matris malzemesi ve % 20 oranında takviyeli kompozit malzemenin sertlik değerlerinin ezme oranları ile değişimi verilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere ezme uygulanması sonucu malzemelerin sertliklerinde artışlar meydana gelmiştir. Değişik oranlarda takviye edilerek üretilen kompozit malzemelere farklı oranlarda ezme işlemi uygulandıktan sonra elde edilen numunelerin yüzey sertlikleri ölçülmüş ve %20 oranında ezme uygulanmış AA5754 / %20 SiC kompozit malzemesinin sertlik değeri, ezme uygulanmamış AA5754 alaşımına göre %78 artış göstermiştir. Ancak, eşit oranda ezme

uygulanmış kompozit malzemelerin yüzey sertliklerindeki artış oranı içerdikleri takviye yüzdesine göre değişmiştir(Çizelge 4.8).



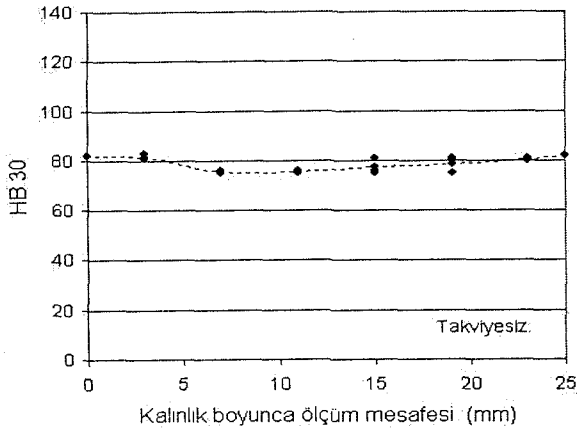
Şekil 4.11 Takviyesiz ve % 20 SiC takviyeli kompozit malzemenin yüzey sertlik değerlerinin ezme oranları ile değişimi.

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 ve Çizelge 4.8 ‘de verilen sertlik değerleri haddeleme yüzeylerinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen değerlerdir. Hadde yüzeyleri ile malzemelerin iç bölgelerinde oluşan sertlik değişimlerini belirleyebilmek amacı ile yapılan ölçümlerde, hadde yüzeyine dik olarak malzemenin kalınlığı boyunca sertlik değerlerinin değiştiği, hadde yüzeylerinin malzemenin iç bölgesine nazaran daha fazla sertleştiği görülmüştür(Şekil 4.12).

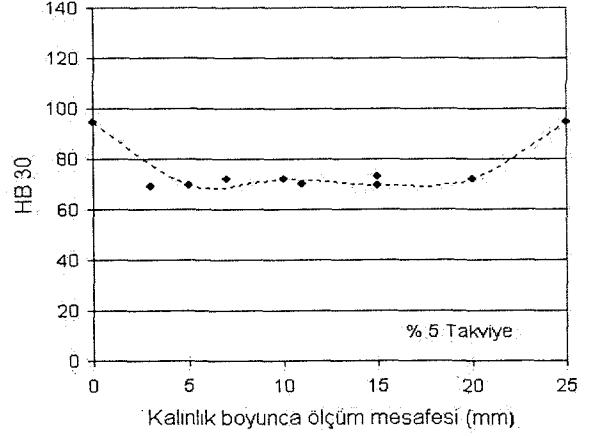
Çizelge 4.8 Kompozit malzemelerin yüzey sertliklerinde meydana gelen artışlar.

Malzeme Cinsi	Ezme Oranı (%)	Sertlik Artışı (%)
AA5754	20	46
AA5754 / %5 SiC	20	36
AA5754 / %10 SiC	20	27
AA5754 / %15 SiC	20	34
AA5754 / %20 SiC	20	28

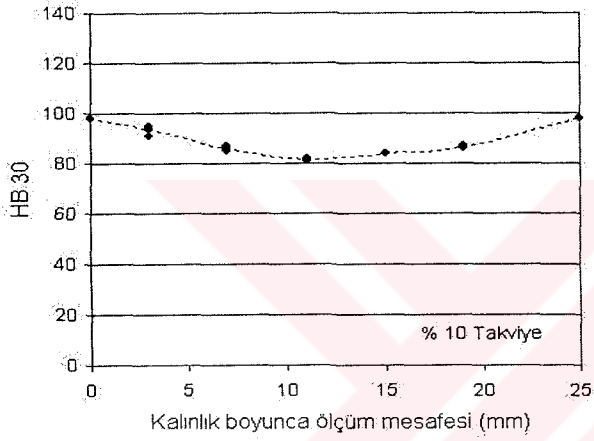
AA5754	Döküldüğü Halde(Rina Rules 2003)	Bu çalışmada döküldüğü halde
Sertlik, Brinell (HB)	55-75	59



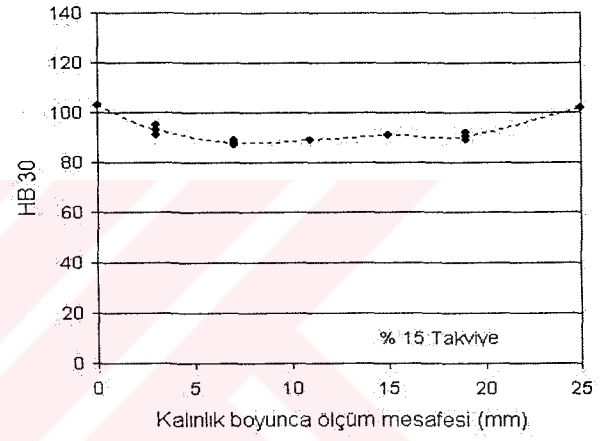
(a)



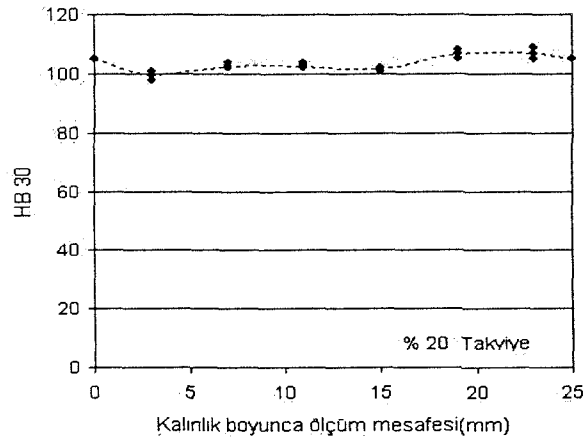
(b)



(c)



(d)

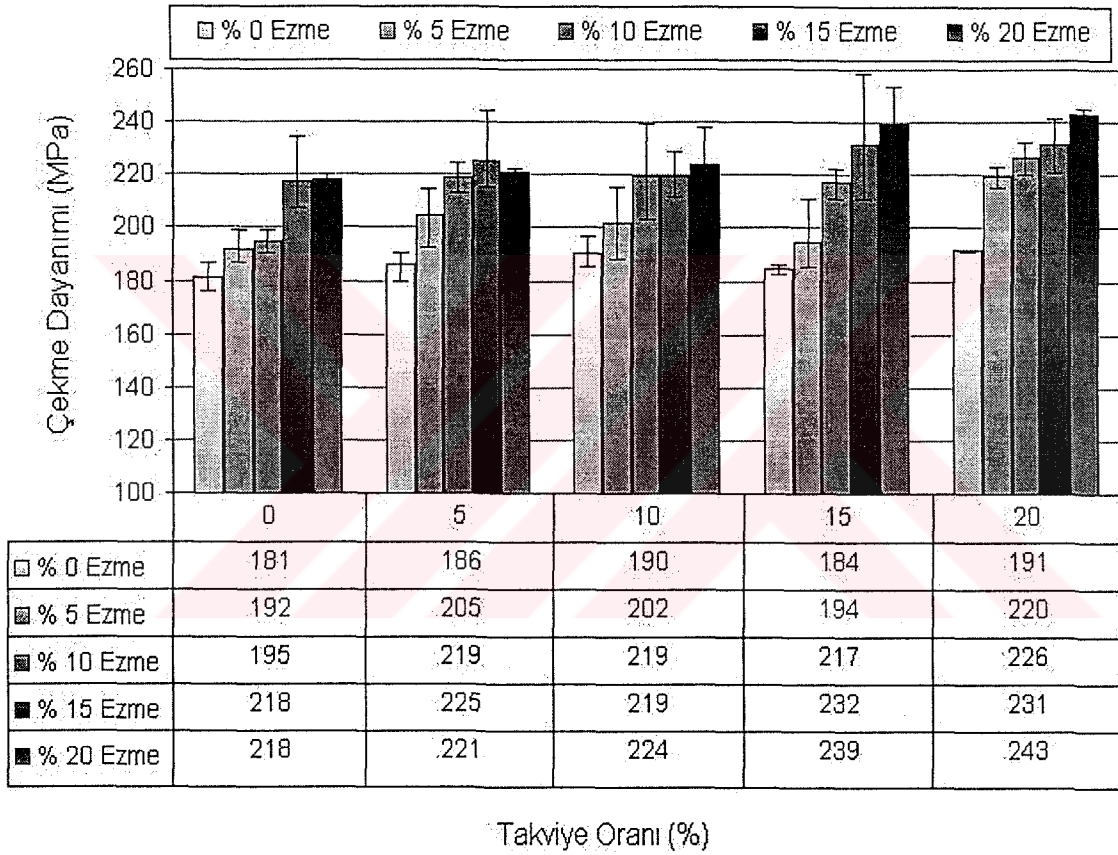


(e)

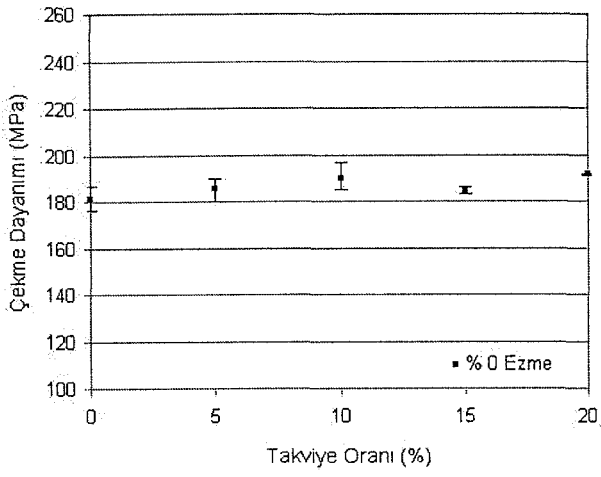
Şekil 4.12 %20 ezme uygulanmış kompozit malzemelerin haddelenme yüzeylerine dik kesit boyunca sertlik değerlerinin değişimi(a) Takviyesiz (b) %5 (c) %10 (d) %15 (e) %20

4.7 Çekme Deneyleri Sonuçları

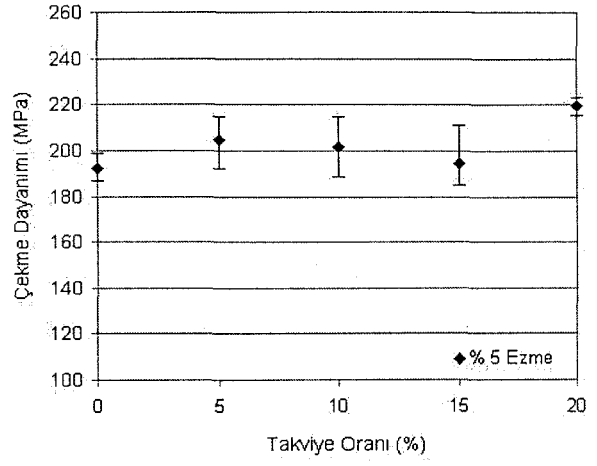
Yarı-katı karıştırma işleminden sonra, basınç altında hızlı katılaştırma sağlanarak elde edilen kompozit plakalara, haddelme ile farklı oranlarda ezme uygulanmıştır. Haddelenmiş plakalardan elde edilen çekme deneyi numuneleri ile sabit sıcaklık ve sabit deformasyon hızında çekme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda takviye ve ezme oranlarının artışı ile çekme dayanımı, akma gerilmesi, kopma uzaması ve elastiklik modülü değerlerinde meydana gelen değişimler aşağıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 4. 13 – 4.21).



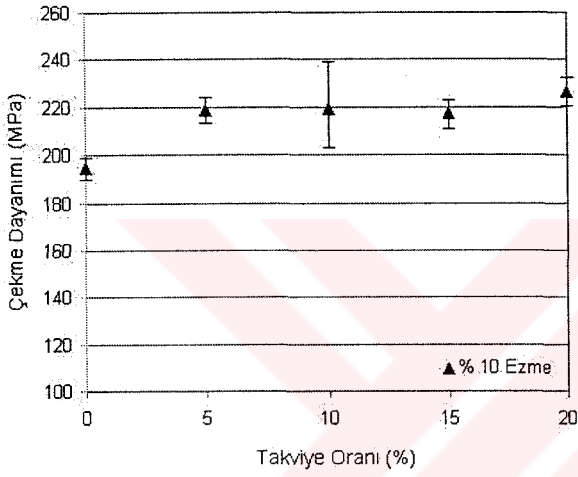
Şekil 4.13 Farklı takviye ve ezme oranlarında kompozit malzemelerin çekme dayanımları



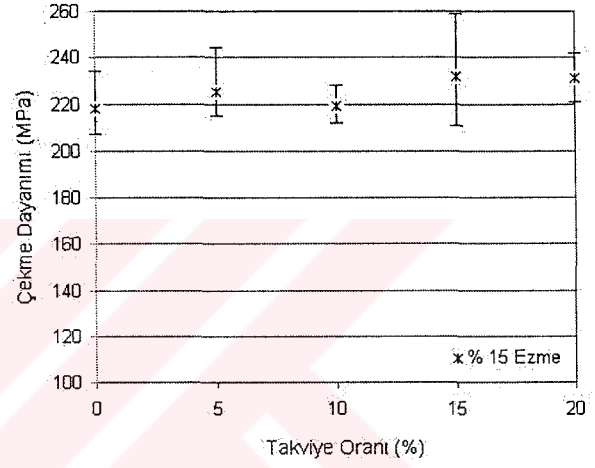
(a)



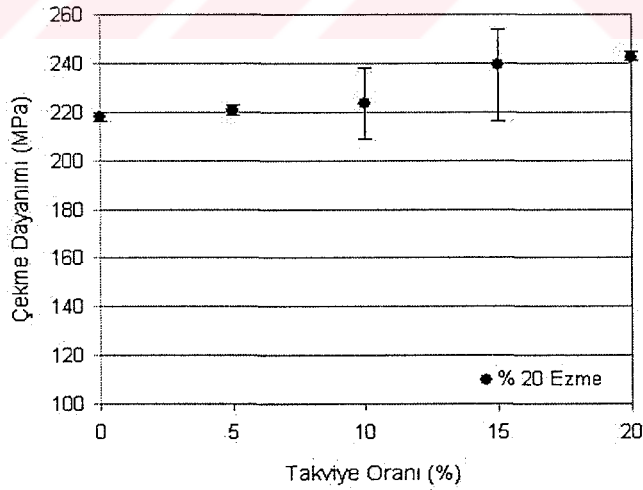
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.14 Çekme dayanımlarının takviye oranları ile değişimi (a) %0 Ezme (b) %5 Ezme (c) %10 Ezme (d) %15 Ezme (e) %20 Ezme

Çizelge 4.9 'da 5754 alaşımının döküldüğü halde çekme dayanımı değerleri görülmektedir.

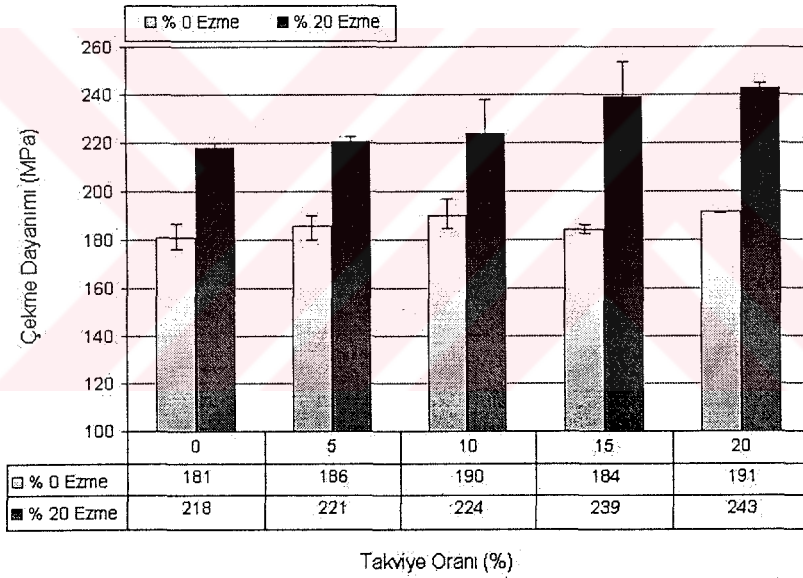
Bu değerler esas alındığında, sıkıştırma döküm uygulaması ile kontrol numunesi olarak üretilen matris malzemesinin çekme dayanımı değerinin arttığı görülmektedir. Çizelge 4.10'da 5754 alaşımının O/H111 temper şartlarındaki çekme dayanımı değerleri ile bu çalışmada %20 ezme uygulanması sonucu elde edilen çekme dayanımı değerleri karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 4.9 Matris malzemesinin döküldüğü haldeki çekme dayanımları

AA5754	Döküldüğü Halde(Rina Rules 2003)	Bu çalışmada döküldüğü halde
Çekme Dayanımı MPa	160- 170	181

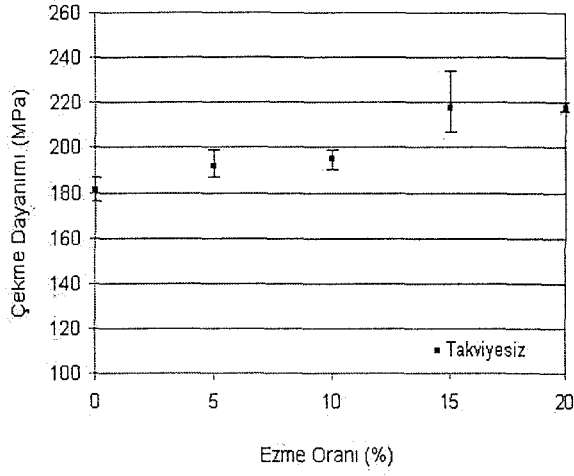
Çizelge 4.10 Hadde ürünü matris malzemelerinin çekme dayanımları

AA5754	O/H111 temper şartlarındaki (Rina Rules 2003)	Bu çalışmada %20 takviye ve %20 ezme uygulandığı halde
Çekme Dayanımı MPa	190- 240	243

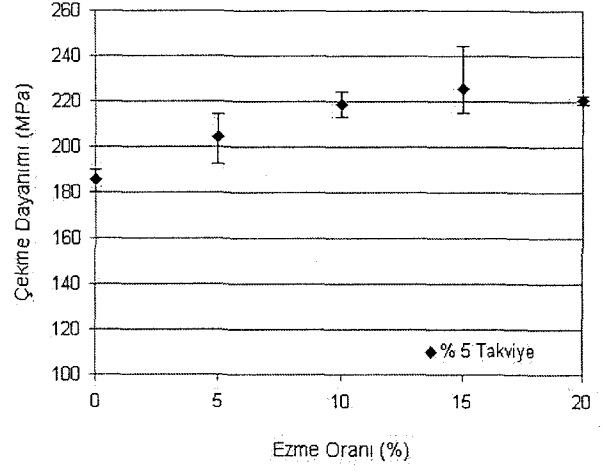


Malzeme Cinsi	Ezme Oranı (%)	Çekme Dayanımı Değişimi (%)
AA5754	20	20
AA5754 / %5 SiC	20	18
AA5754 / %10 SiC	20	18
AA5754 / %15 SiC	20	30
AA5754 / %20 SiC	20	27

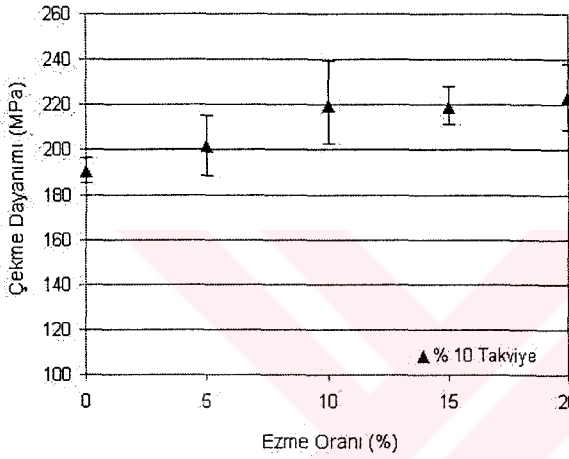
Şekil 4.15 Kompozit malzemelere % 20 ezme uygulanması sonucu çekme dayanımlarında meydana gelen değişimler



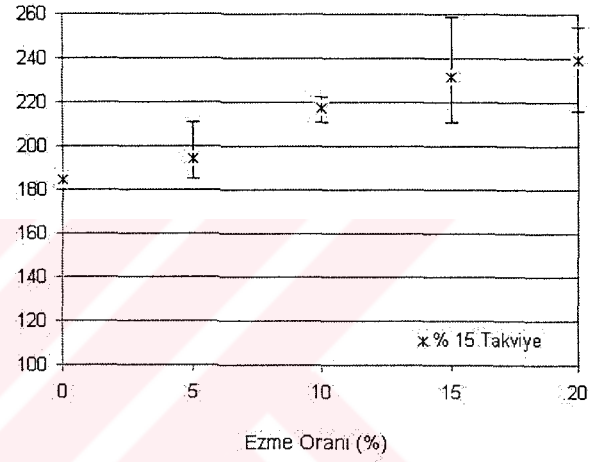
(a)



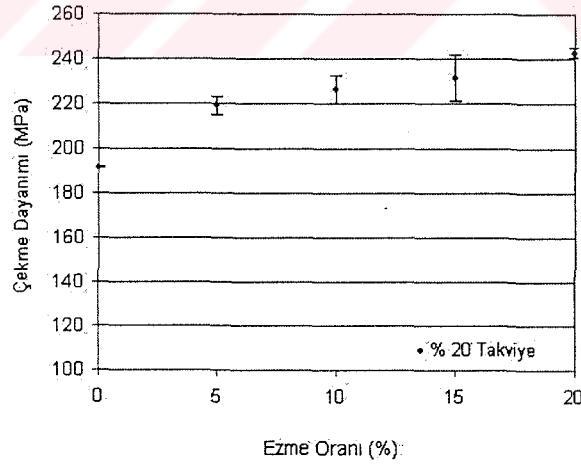
(b)



(c)

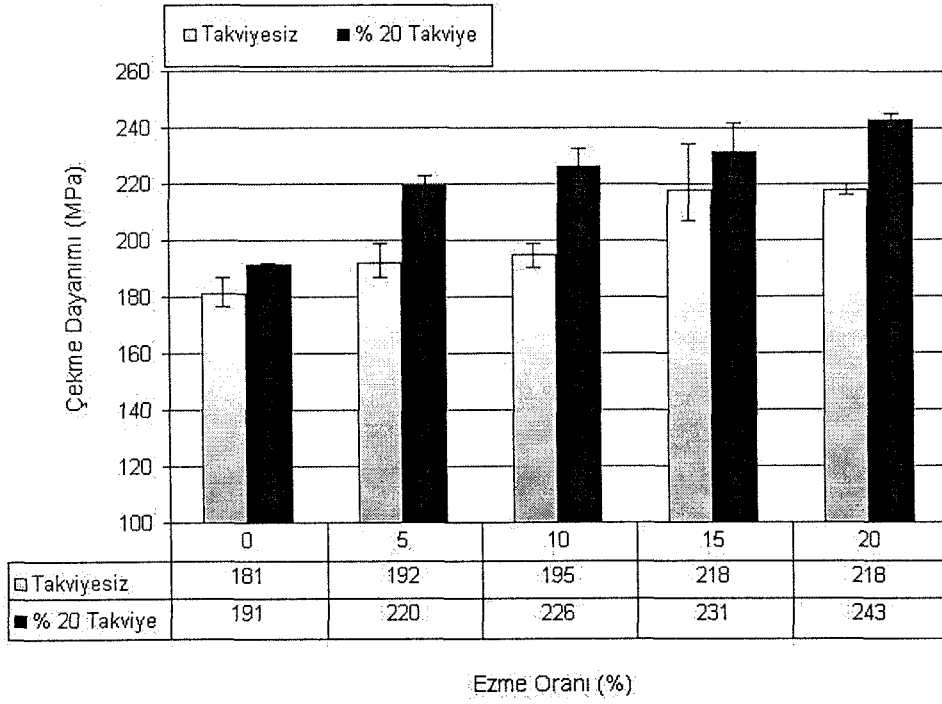


(d)



(e)

Şekil 4.16 Farklı takviye oranlarında üretilmiş kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının ezme oranları ile değişimi (a) Takviyesiz (b) %5 Takviye (c) %10 Takviye (d) %15 Takviye (e) % 20 Takviye

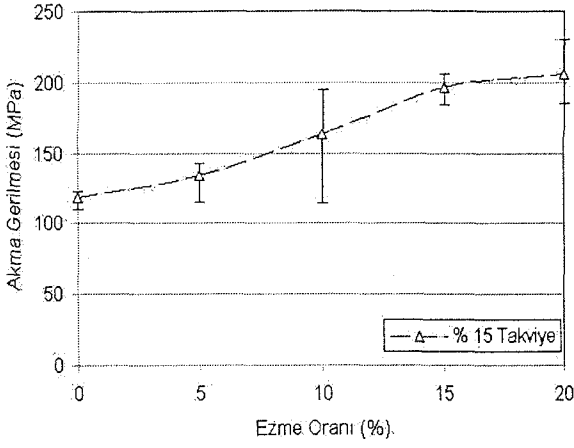


Şekil 4.17 Takviyesiz ve %20 takviyeli kompozit malzemelerin çekme dayanımlarının ezme oranları ile değişimi

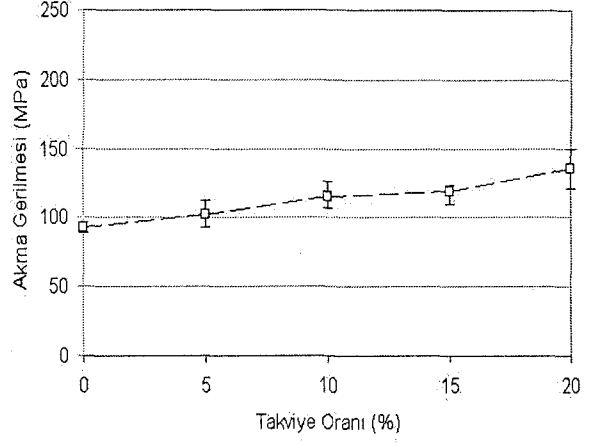
Ezme uygulanmamış, %20 oranında takviyeli kompozit malzemelerde, matris malzemesine nazaran çekme dayanımında yaklaşık %6 oranında artış meydana gelmiştir. Ezme oranlarının artışı ile birlikte çekme dayanımı değerlerinde yükselme görülmüştür. Wusatowski ve arkadaşlarının çelik malzeme üzerinde yaptıkları denemelerde soğuk şekil verme işlemlerinde, küçük şekil değişimi oranlarında malzemenin çekme dayanımlarında artışlar olduğu belirlenmiştir(Wusatowski, 1963). Bu çalışmada da artan takviye ve ezme işlemi çekme dayanımını arttırıcı yönde etki etmektedir. (Şekil 4.17).

Kontrol numuneleri esas alınarak yapılan karşılaştırmada, çekme dayanımındaki artış, %20 takviyeli kompozit malzemelerin %20 ezme işleminden sonra, %34 olarak tespit edilmiştir.

Akma gerilmelerinin tespitinde malzemeler belirgin akma bölgesi göstermediklerinden %0.2 kalıcı şekil değiştirmeye karşılık gelen gerilme değeri akma gerilmesi olarak alınmıştır. AA5754 matris malzemesinin akma gerilmesi takviye oranı artışı ile artmaktadır. %20 SiC takviyeli kompozitin akma dayanımı matris malzemesine göre yaklaşık %46 oranında artış göstermektedir (Şekil 4.18a).



(a)



(b)

Şekil 4.18 (a) AA5754 matris alaşımasının akma gerilmesinin takviye ve ezme oranları ile değişimi (b) AA5754 / %15 SiC kompozitin akma gerilmesinin ezme oranları ile değişimi

%15 SiC takviyeli kompozit malzemeye farklı oranlarda ezme uygulanmış ve %20 ezme sonucu akma gerilmesi %73 artmıştır (Şekil 4.18 b).

Çizelge 4.11 'da 5754 alaşımasının döküldüğü halde akma gerilmesi değerleri görülmektedir. Bu değerler esas alındığında, sıkıştırma döküm uygulaması ile kontrol numunesi olarak üretilen matris malzemesinin akma gerilmesi literatürdeki sonuçlara benzer sonuç elde edilmiş artış olmadığı görülmüştür.

Çizelge 4.12'de 5754 alaşımasının O/H111 temper şartlarındaki akma gerilmesi değerleri ile bu çalışmada değişik oranlarda ezme uygulanması sonucu elde edilen akma gerilmesi değerleri karşılaştırılmaktadır. Bu değerler esas alındığında, sıkıştırma döküm uygulaması ile üretilen numunelere uygulanan takviye ve ezme işlemlerinin malzemelerin akma gerilmelerinde artış meydana getirdiği görülmektedir.

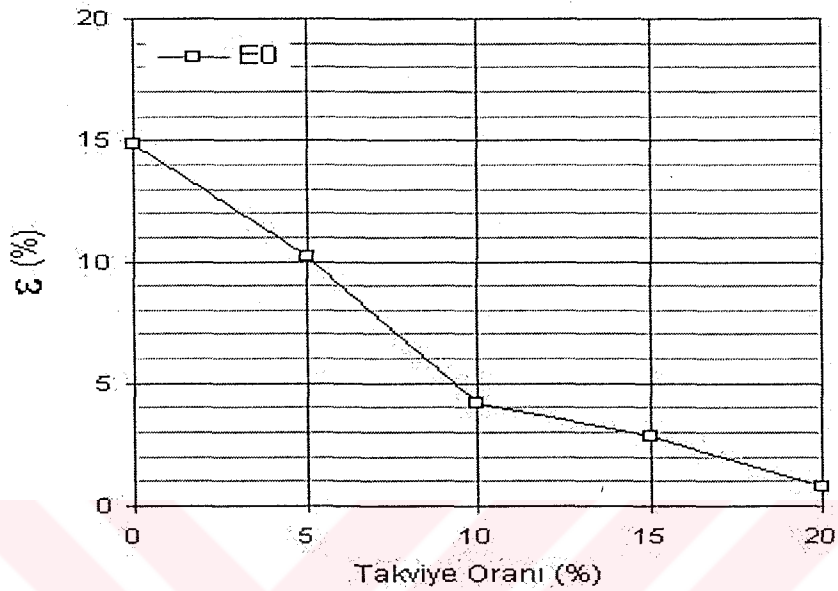
Çizelge 4.11 Matris malzemesinin döküldüğü haldeki akma gerilmesi değerleri

	Döküldüğü Halde(Rina Rules 2003)	Bu çalışmada döküldüğü halde
Akma Gerilmesi (MPa)	90 -100	93

Çizelge 4.12 Hadde ürünü matris malzemelerinin akma gerilmesi değerleri

	O/H111 temper şartlarındaki (Rina Rules 2003)	Bu çalışmada %15 takviye ve %20 ezme uygulandığı halde
Akma Gerilmesi (MPa)	85	206

Takviye oranlarının ve ezme oranlarının artışı ile kompozit malzemelerin kopma uzaması değerlerinde düşme olmaktadır. Özellikle %15 ve %20 oranlarında takviye ilavesi ile kopma uzaması değerleri oldukça fazla azalmakta ve malzeme kopma sırasında tamamen gevrek bir malzeme davranışı göstermektedir (Şekil 4.19- Çizelge 4.13).



Şekil 4.19 Takviye oranları ile kopma uzaması değerlerinin değişimi

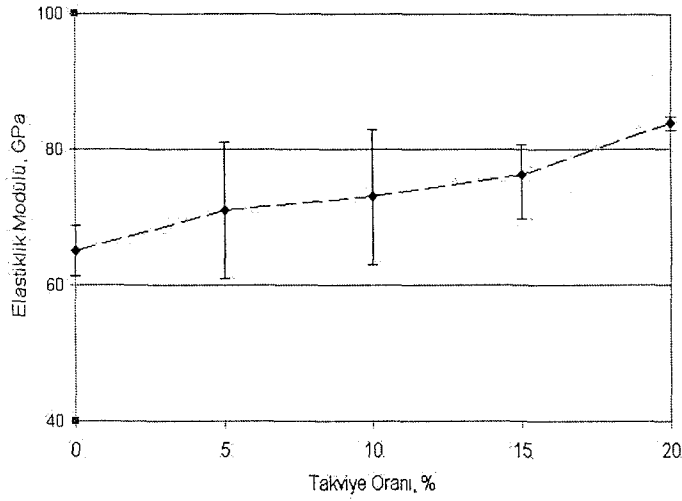
Çizelge 4.13 Üretilen kompozit malzemelerinin % kopma uzaması değerleri

	O/H111 temper şartlarındaki (Rina Rules 2003)	Bu çalışmada %5 takviye uygulandığı halde	Bu çalışmada %20 takviye uygulandığı halde
Kopma Uzaması (%)	18 -17	10	1

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen ve malzemenin dayanımını belirleyen sabitlerden elastiklik modülü, literatürde de belirtildiği gibi kompozit malzemelerde takviye ilavesi ile sürekli artan bir mekanik özelliktir ve genellikle elastik modülün belirlenmesinde etkin olan faktörün hacımsal takviye oranı olduğu belirtilmektedir.

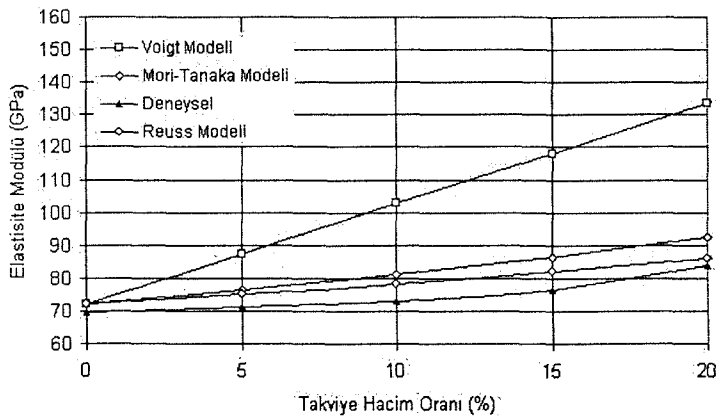
Çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-gerinim eğrileri kullanılarak beş farklı kompozit malzeme türü için elastiklik modülleri belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 4.20’de gösterilmiştir.

Hacımsal takviye oranı artışı ile elastiklik modülünün değişimini gösteren grafikte yüksek elastiklik modülüne sahip SiC parçacıklarının etkisi ile elastiklik modülü değerlerinde artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.20 Takviye oranları ile elastiklik modülünün değişimi

Takviye oranlarının artması ile birlikte, kompozit malzemenin elastiklik modülü artmaktadır. %20 hacımsal takviyeli kompozit numunelerin elastiklik modülü değerleri takviyesiz numunelerine göre %29 oranında artmıştır. Deneysel olarak elde edilen elastiklik modülü değerleri, bazı mikro mekanik modellerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmış ve deneysel çalışmaların yapıldığı %20 hacımsal takviye oranına kadar olan değerler model sonuçları ile yaklaşıklık göstermiştir. (Şekil 4.21)



Şekil 4.21 Deneysel elastiklik modülleri ile bazı mikro mekanik modellerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması

4.8 Mikroyapı İncelemeleri

Kompozit malzemelerin mikroyapıları üzerinde yapılan çalışmalarda, SiC parçacıklarının matris malzemesi içinde düzenli bir şekilde dağıldığı, seyrek olarak az sayıda küçük tanelerin bir araya gelmesi ile oluşan toplanmalar meydana geldiği görülmüştür.



(a)



(b)

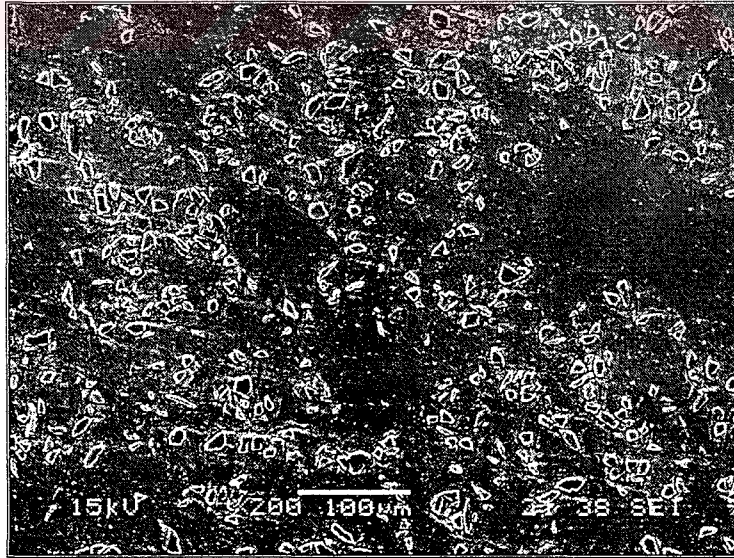
Şekil 4.22 AA5754 / %20SiCp kompozit malzemesinin %20 ezme uygulanmış (a) ve ezme uygulanmamış (b) mikroyapılarının SEM fotoğrafları

Mikroyapıların SEM görüntüleri incelendiğinde, karıştırma işlemleri sırasında takviye oranı arttıkça kompozit malzemedeki oluşması muhtemel yüksek seviyede poroziteli yapının

oluşmadığı ve uygulanan basınçlı katılaştırma işleminin porozite seviyesini azalttığı gözlenmiştir. Şekil 4.22’te AA5754 / %20SiCp kompozit malzemesine %20 ezme uygulanması sonucunda takviye malzemesinin matris malzemesi içinde daha homojen dağıldığı, tanelerin birbirine yaklaştığı ve malzeme akış yönüne bağlı olarak yönlendikleri görülmektedir. Basınç altında katılaştırma işleminin etkisi ile SiC parçacıkları matris malzemesi tarafından iyi sarılmış, yakın parçacıkların aralarında boşluk oluşmamıştır(4,23-4,26).

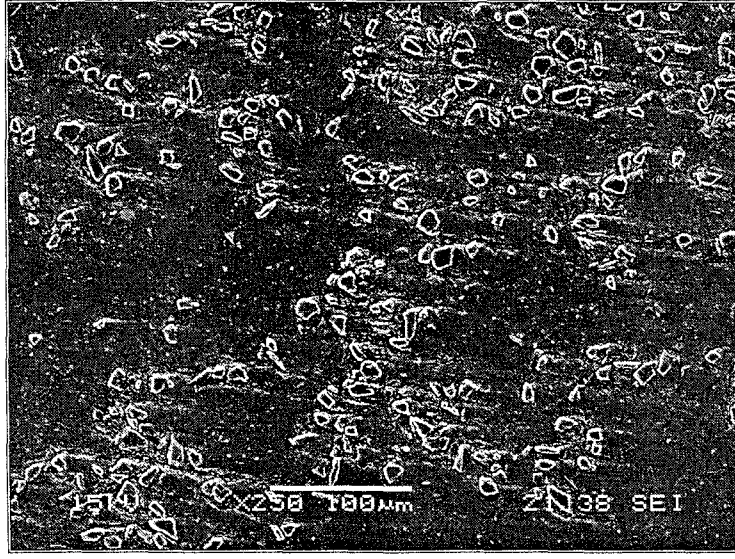


(a)

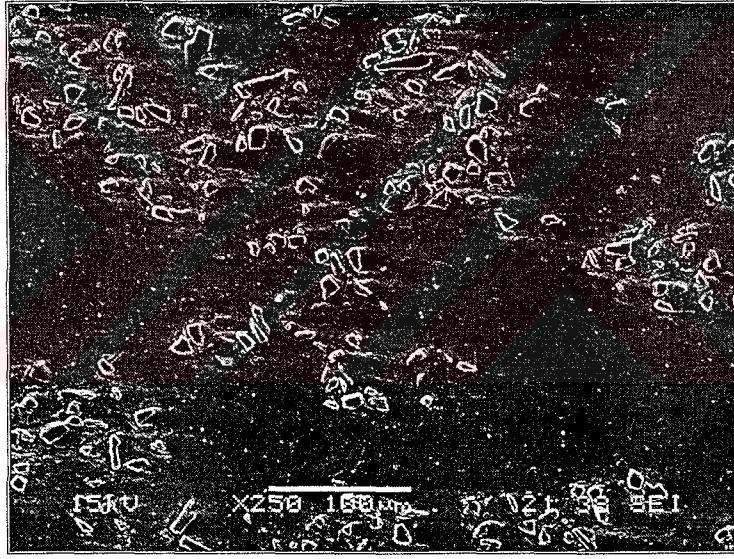


(b)

Şekil 4.23 AA5754/ %15 SiC kompozit malzemesinin %20 ezme uygulanmış (a) ve ezme uygulanmamış (b) mikroyapıları

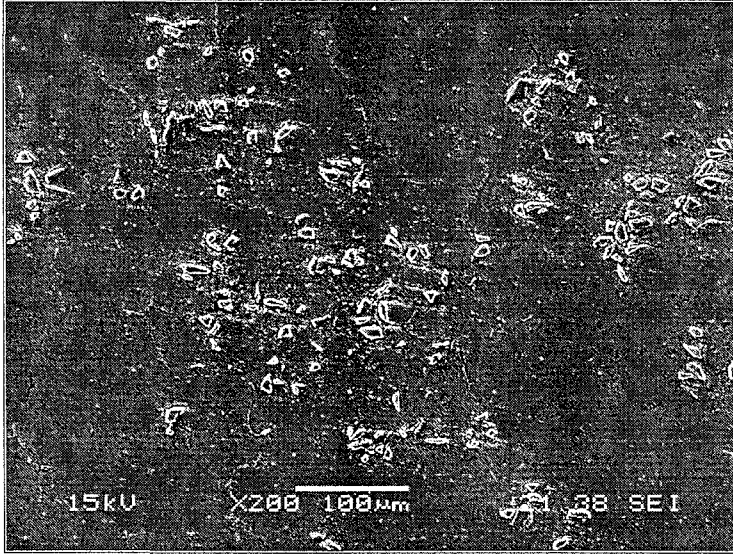


(a)

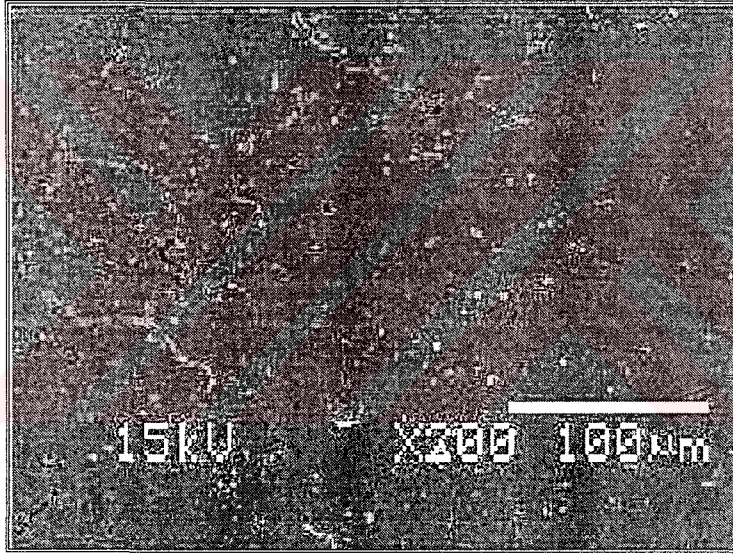


(b)

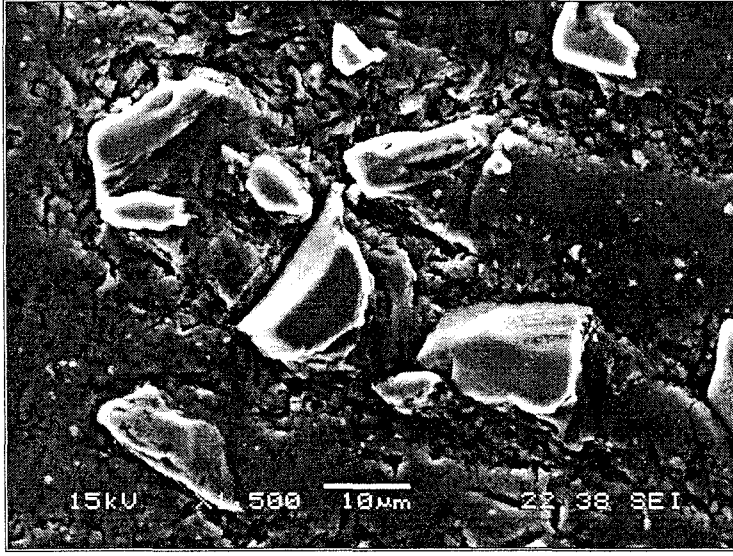
Şekil 4.24 AA5754/ %10 SiCp kompozit malzemesinin %20 ezme uygulanmış (a) ve ezme uygulanmamış (b) mikroyapıları



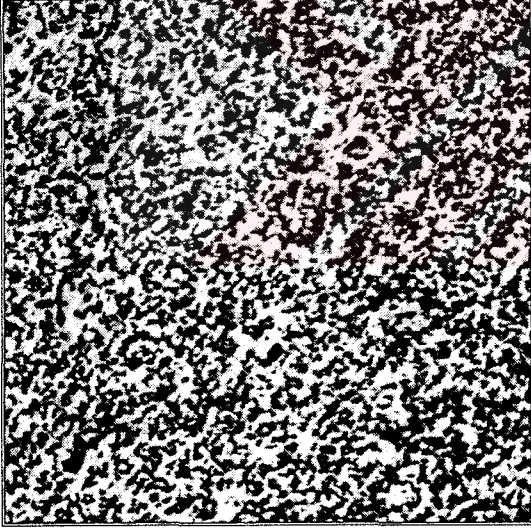
Şekil 4.25 Ezme uygulanmamış AA5754 / %5 SiCp malzemesinin SEM görüntüsü



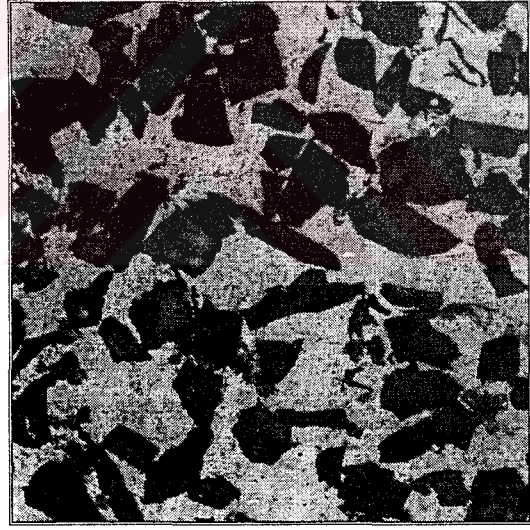
Şekil 4.26 Matris malzemesi AA5754 alaşımının döküm sonrası SEM görüntüsü



Şekil 4.27 Ezme uygulanmamış AA5754 / %15 SiC kompozitinin SEM görüntüsü

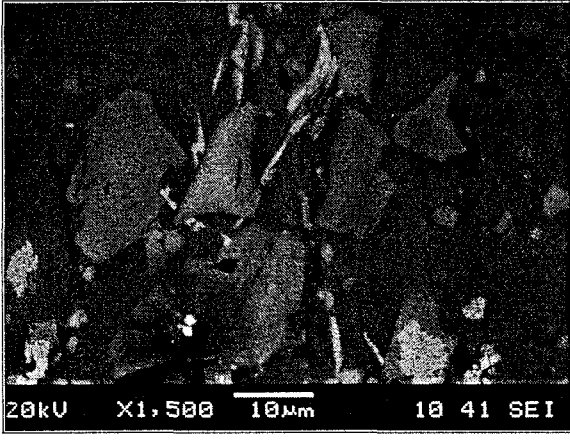


(a)

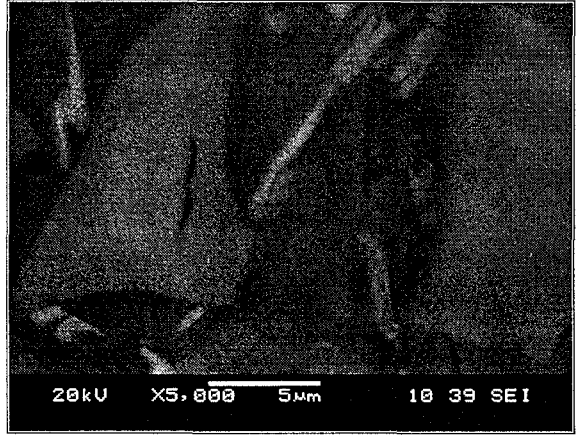


(b)

Şekil 4.28 AA5754 / %35 SiC malzemenin mikroyapısı (a) x100 (b) x1000

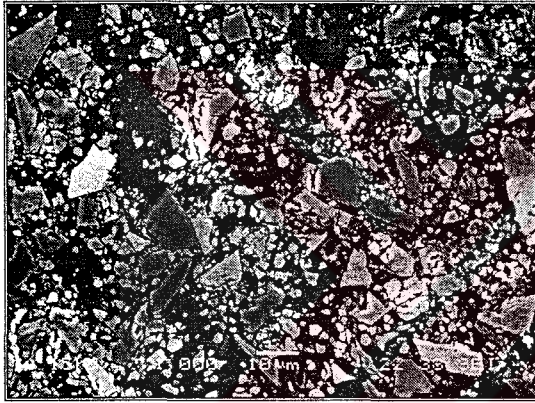


(a)

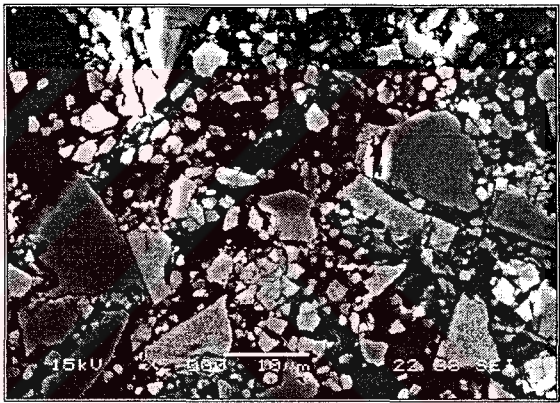


(b)

Şekil 4.29 AA5754 / %35 SiC malzemenin SEM görüntüleri (a) x1500 (b) x5000



(a)



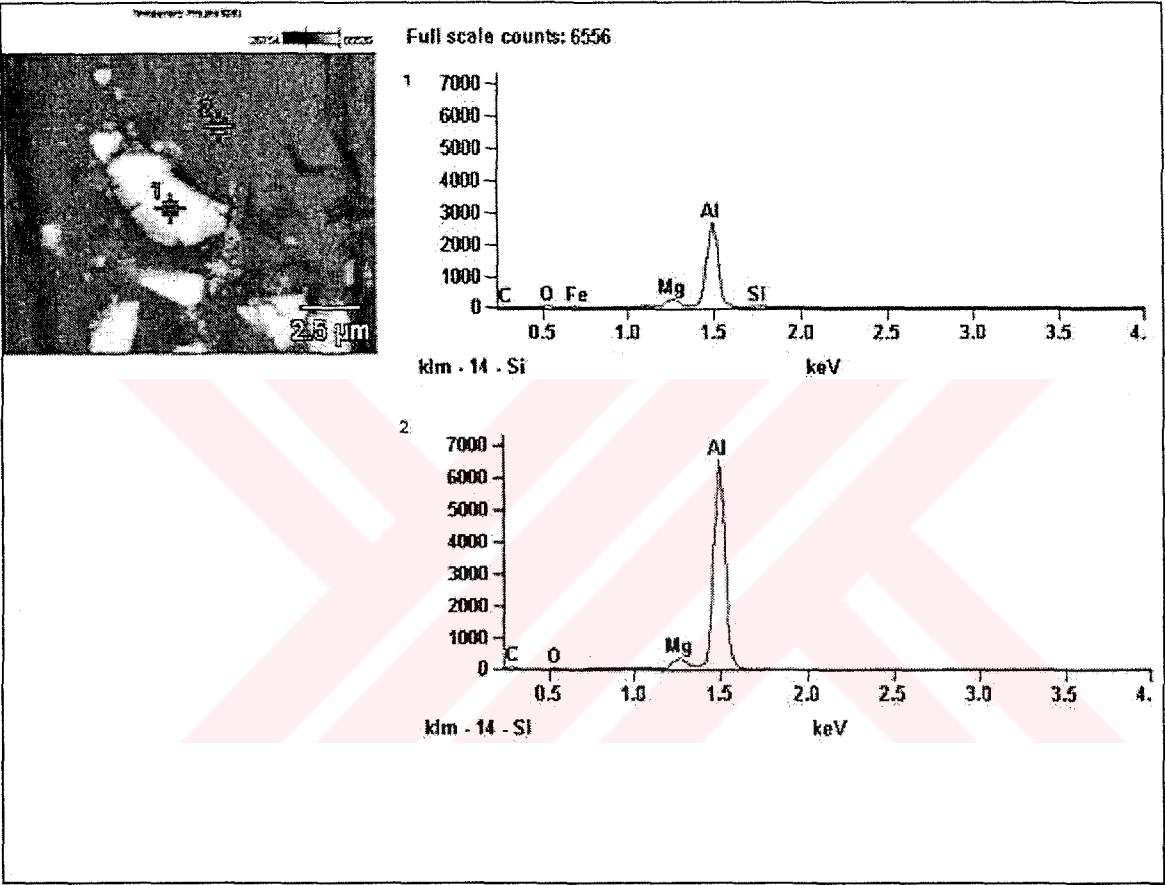
(b)

Şekil 4.30 AA5754/ %35 SiCp malzemesinin SEM görüntüleri.

Hacimce %35 SiC takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı incelemelerinde SiC tanelerinde parçalanmalar meydana geldiği gözlenmiştir. %35 SiC takviyeli kompozit malzemelere ezme işlemleri uygulanmamış, tane kırılmaları karıştırma ve sıkıştırarak katılaştırma işlemleri sırasında oluşmuştur. Daha düşük takviye oranlarında üretilen kompozit malzemelerde tane kırılmalarının daha az olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.27 – 4,28).

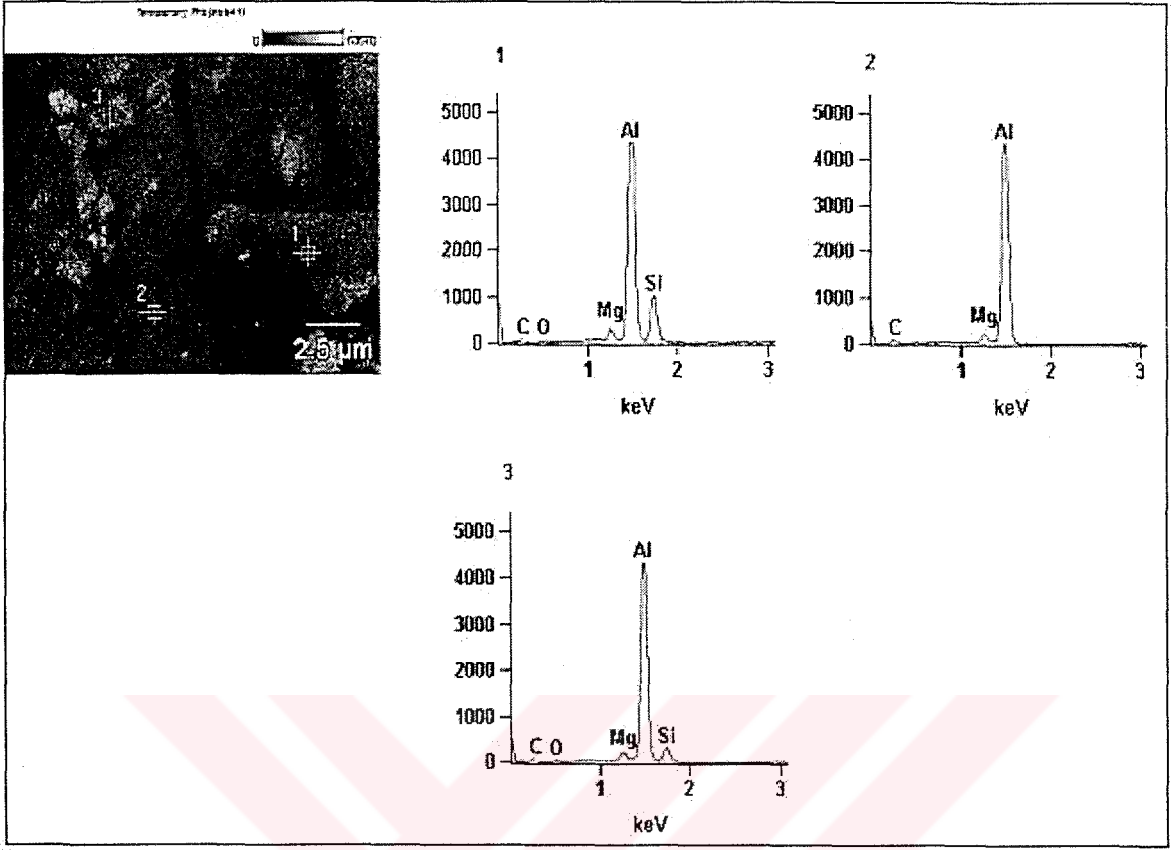
4.8.1 Tarama Elektron Mikroskobu ve EDS Analiz Sonuçları

Farklı takviye oranlarına sahip kompozit numunelerde yapılan EDS analizlerinde, takviye malzemesi ve matris malzemesi üzerinde seçilen bölgelerde analiz yapılmış ve analiz sonuçları bu bölgelerde oluşan oksit ve bileşikler hakkında tam olarak bilgi veremese de bu bölgelerdeki oluşumların içerdikleri elementler ve oranları hakkında fikir vermektedir.



	% Bileşik konsantrasyonu				
Analiz bölgesi	C	O	Mg	Al	Si
1	7,19	6,03	6,18	73,19	2,23
2	21,54	2,34	3,38	72,74	-

Şekil 4.31 %15 takviyeli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları



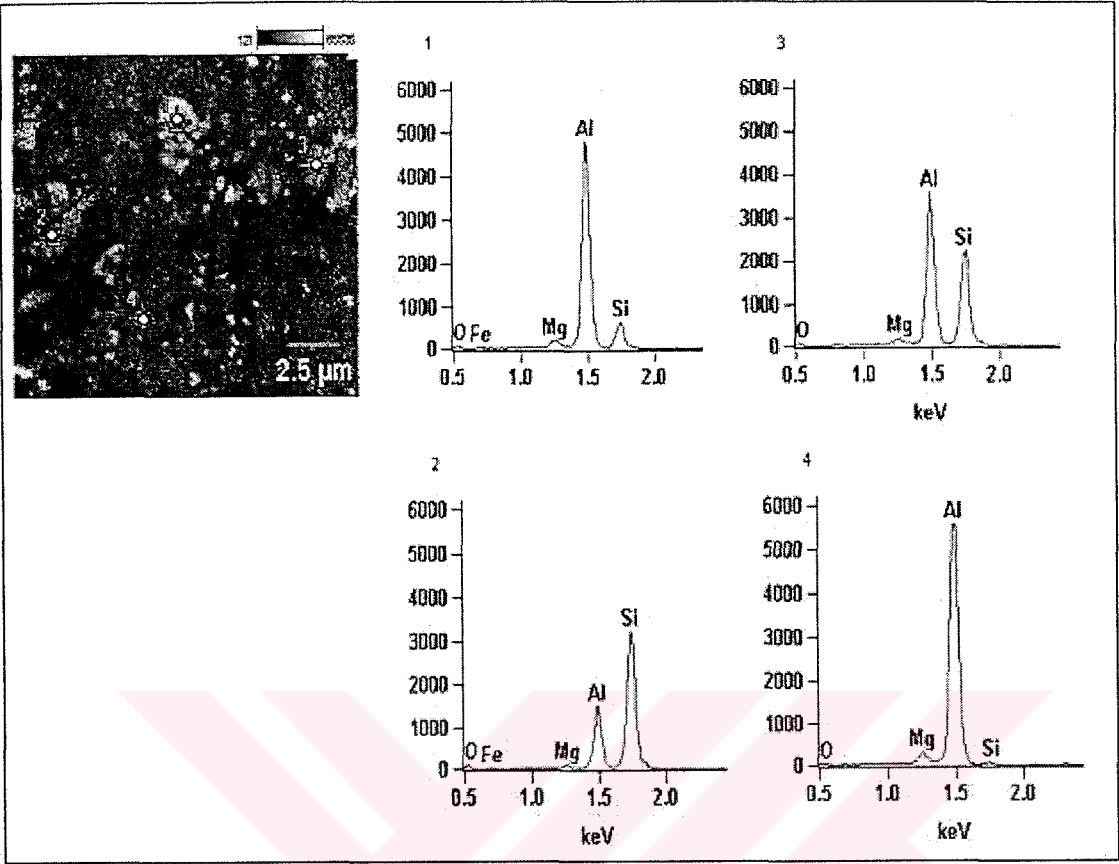
% Bileşik konsantrasyonu

Analiz bölgesi	C	O	Mg	Al	Si
1	16,65	3,07	2,12	57,62	20,54
2	28,68		2,06	69,26	-
3	26,98	2,22	2,44	60,82	7,54

Şekil 4.32 %20 takviyeli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları

Takviye malzemesinin matris malzemesi tarafından ıslatılabilmesini ve daha iyi sarılabilmesini sağlamak ve ayrıca ara yüzeyde istenmeyen alüminyum karbür oluşumunu en aza indirmek amacı ile karıştırma öncesinde takviye ön işlemi yapılmıştır. Bu işlemle SiC'ün oksitlendirilmesi amaçlanmış ancak, yapılan analizlerde oksit tabakası ile kaplanıp kaplanmadığı tam olarak belirlenemese de SiC üzerinde %O₂ ve %Mg miktarlarının artışı göstermesi, takviye malzemesi ön işlemleri sonucu SiC üzerinde oksit bileşiklerinin oluşmuş

olabileceğini göstermektedir.



% Bileşik konsantrasyonu

Analiz bölgesi	C	O	Mg	Al	Si
1	20,36	6,82	1,65	55,90	14,11
2	26,35	11,04	0,79	15,40	45,78
3	26,50	5,64	1,10	32,62	34,13
4	25,89	3,55	2,17	67,64	0,75

Şekil 4.33 %35 takviyeli kompozit numunenin EDS analiz sonuçları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, silisyum karbür parçacıkları ile takviyeli AlMg3 alaşımı matrisli kompozit malzemeler kompozit döküm ve basınç altında sıkıştırma teknikleri kullanılarak üretilmiştir. Kompozit döküm tekniğinde değişiklikler yapılarak, üretim parametreleri incelenmiştir. Üretilen kompozit malzemeler değişik oranlarda soğuk haddelenerek, ezme oranlarında ve takviye oranlarındaki değişimin mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1. SiC parçacıkları ile takviyeli AlMg3 matrisli kompozit malzemeler, modifiye edilmiş kompozit döküm tekniği ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bu çalışmada, karıştırma işlemini takiben karışımın sıcaklığının döküm sıcaklığına yükseltilmesi çok kısa sürede gerçekleştirildiği için takviye ile matris malzemesinin temas süresi, uygulanmakta olan yarı katı karıştırma yöntemlerine nazaran daha da kısa olmaktadır.
2. Modifiye edilmiş kompozit döküm tekniği ile SiC parçacıkları matris malzemesi tarafından daha iyi ıslatılmış, yüksek oranlarda takviye ilavesi mümkün olmuş ve parçacıklar matris içinde daha homojen dağılmıştır. Takviye malzemesinin matris malzemesi içine karıştırılma işlemleri sırasında karışımın yarı katı sıcaklık aralığında tutulması gerekmiştir. Homojen parçacık dağılımı için özel profillerdeki karıştırıcılar kullanılmış ve karıştırıcı profili, karıştırma hızı ve süresi karıştırma sağlanmasında oldukça etkili olmuştur. Farklı profillerdeki karıştırıcılarla uygulanan düşük hızlı karıştırma ve yoğurma işlemleri ile takviye malzemesinin dibe çökmesi, topaklanması ve takviye malzemesinin karışımın dışına itilmesi engellenmiştir. Takviye malzemesinin matris malzemesi içine karıştırılması sırasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerektiği görülmüştür:

- Kompozit malzeme hazırlama işlemleri sırasında koruyucu ortam sağlanmadığı takdirde, karışım ortamdan oldukça fazla gaz almakta, matris ve takviye malzemeleri oksitlenerek karışım oluşturmak güçleşmekte, topaklanmalar oluşmakta ve istenen oranda takviye sağlanamamaktadır.
- Küçük tane boyutuna sahip ($<10\ \mu\text{m}$) takviye malzemeleri ile yapılan karıştırma işlemlerinde, kurutma ve oksitlendirme işlemleri yapılmasına rağmen takviye malzemesinin topaklanması ve karışımın üzerinde toplanmasını engellemek oldukça güç olmaktadır, büyük boyutlu tanelere sahip takviye malzemesi ile karışımı sağlamak daha kolay olmaktadır

- Takviye malzemesinin 1100 °C üzerinde 5 saat bekletilerek oksitlendirilmesi ve Takviyenin ergimiş metal içine katılmasından önce, yüksek sıcaklıklara (500 -750 °C) ısıtılması takviyenin ergimiş metalin içine daha kolay karışmasını sağlamaktadır.
 - Koruyucu gazın sisteme verilış hızı oldukça önemli olup, gereğinden az olduğunda koruma sağlayamamakta, fazla olduğunda ise yeterince ısınmayıp, kompozit karışımın sıcaklık dengesini bozarak, karıştırma süresinin uzamasına ve/veya takviye malzemesinin topaklanmasına sebebiyet verebilmektedir.
3. Takviye oranı arttıkça kompozit malzemede oluşması muhtemel yüksek seviyede poroziteli yapının oluşmadığı ve uygulanan basınçlı katılaştırma işleminin porozite oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Kompozit malzemelere basınç altında katılaştırma ve ezme uygulanması sonucunda takviye malzemesinin matris malzemesi içinde daha homojen dağıldığı, SiC parçacıklarının matris malzemesi tarafından iyi sarıldığı, tanelerin birbirine yaklaştığı ve malzeme akış yönüne bağlı olarak yönlendikleri görülmektedir. Elde edilen deneysel ve teorik özgül ağırlık sonuçları karşılaştırıldığında, uygulanan basınçlı katılaştırma neticesinde % 20 takviyeli kompozit malzemeler dahil olmak üzere oldukça düşük (<2 %) porozite oranı sağlanmıştır. %25 hacımsal takviye oranından sonra daha düşük takviye oranlarındaki kompozit malzemelere nazaran porozite oranlarında artış gözlenmiştir.
4. Hacımsal takviye oranlarının artımı ve kompozit malzemelere ezme uygulanması sonucu malzemelerin sertliğinde artışlar meydana gelmiştir. Eşit oranda ezme uygulanmış kompozit malzemelerin yüzey sertliklerindeki artış oranı içerdikleri takviye yüzdesine göre değişmiştir. Hadde yüzeyleri ile malzemelerin iç bölgelerinde oluşan sertlik değişimlerinin incelenmesi sonucu, hadde yüzeyine dik olarak malzemenin kalınlığı boyunca sertlik değerlerinin değiştiğı, hadde yüzeylerinin malzemenin iç bölgesine nazaran daha fazla sertleştiiği görülmüştür. Ezme işlemi uygulanan yüksek takviye oranlarındaki malzemelerde, malzeme yüzeyi ile iç bölgeleri arasındaki sertlik farklılıklarının düşük oranda takviyeli kompozit malzemelere göre çok daha az olduğu belirlenmiştir.
5. Takviye oranlarının artışı ile kompozit malzemenin elastiklik modülü artmaktadır. Artan takviye ve ezme işlemi kompozit malzemelerin çekme dayanımlarını ve akma gerilmelerini arttırıcı yönde etki etmektedir.

6. Takviye oranlarının ve ezme oranlarının artışı ile kompozit malzemelerin kopma uzaması değerlerinde düşme olmaktadır. Özellikle %15 ve %20 oranlarında takviye ilavesi ile kopma uzaması değerleri oldukça fazla azalmakta ve malzeme kopma sırasında tamamen gevrek bir malzeme davranışı göstermektedir.
7. %35 SiC takviyeli kompozit malzemelerde karıştırma ve sıkıştırarak katılaştırma işlemleri sırasında tane kırılmaları oluşmuştur. Daha düşük takviye oranlarında üretilen kompozit malzemelerde tane kırılmalarının daha az olduğu gözlenmiştir.



6. KAYNAKLAR

- Aboudi, J. (1991), *Mechanics of Composite Materials; A unified Micromechanical Approach*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam
- Afset, A., Nordlien, J.H., Scamans, G.M., Nisancioğlu, K., (2001), "Influence of heat treatment and surface conditioning on filiform corrosion of aluminium alloys AA3005 and AA5754", *Corrosion Science*, 43, 2359-2377
- Ataş, E., Gür. C.H., (2000), "Determination of Properties of SiC Reinforced Aluminium metal matrix composites by Ultrasonic Techniques", www.ndt.net
- Bader, M.G., (2002), "Selection of composite materials and manufacturing routes for cost-effective performance", *Composites: Part A* 33 (2002) 913–934
- Beljajev, A. I., Firsanova, L. A. , (1974), *Alüminyum Metalurjisi*, T.M.M.O.B. Makina Mühendisleri Odası Yayın No: 99
- Bhat, B.V.R., Prasad, Y.V.R.K. and Mahajan, Y.R., (1995), "Hot Working Characteristics of Discontinuously Reinforced Aluminium Alloy Metal Matrix Composites", *Key Engineering materials* vols. 104-107 pp. 241-258
- Bolt, P. J., Lamboo, N.A.P.M, Rozier, P.J.C.M., (2001), "Fizibility of Warm Drawing of Aluminium Products", *Journal of Materials Processing Technology*, 115, 118-121
- Brophy, H. J., Rose, R. M., Wulff, J., (1986) *Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, İç Yapıların Termodinamiği*, Cilt 2, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, Güşsuyu, Sayı: 1325
- Calladine, C. R., (1996), *Mühendislikte Plastisite, Bilimsel ve Teknik Yayınları Çeviri Vakfı Basım ve Ciltvi-İST.*
- Cheng, X. M., Morris, J.G, (2002), "Texture, microstructure and formability of SC and DC cast Al–Mg Alloys", *Materials Science and Engineering A* 323, 32–41
- Clyne T.W, (2001), "Metal Matrix Composites: Matrices and Processing", "Encyclopaedia of Materials: Science and Technology", §3.7 – "Composites: MMC, CMC, PMC", A Mortensen (ed.), Elsevier
- Cöcen, Ü., Önel, K., (1996), "The Production of Al-Si Alloy SiCp Composites via Compocasting: Some Microstructural Aspects", *Material Science and Engineering*, A221, 187-191
- Davis, L.C., (1996), "Flow Rule the Plastic Deformation of Particulate Metal Matrix Composites", *Computational Material Sciences*, 6, 310-318
- D.O.D., (1999), *Department of Defense Handbook, Composite Materials Handbook, Metal Matrix Composites*, Vol.4.
- Dodd, B., Petitcorps, L., (1997), "Cold Plastic Formability of Aluminium- Based MMCs", *Key Engineering Materials*, Vols. 127-131, 517-524
- Ejiofor, J.U., Reddy, R.G., (1997), "Developments in the Processing and Properties of Particulate Al-Si Composites", *JOM*, 49(11), 31-37
- Eliasson, J. Sandström, R. (1995), "Aplications of Aluminium Matrix Composites", *Key Engineering Materials* Vols. 104-107, 3-36

- Estrin, Y. Arndt, S., Heilmaier, M.Y., Chet, B., (1999), "Deformation Behaviour of Particle Strengthened Alloys: A Voronoi Mesh Approach" *Acta Mater.* Vol. 47, No. 2, pp. 595 -606
- Gasik, M. M., (1998), "Micromechanical Modelling of Functionally Graded Materials", *Computational Materials Science*, 13:42-55
- Geçkinli, A. E., (1992), *İleri Teknoloji Malzemeleri, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, Güşsuyu, Sayı: 1454*
- Gui, M.C., Wang, D.B., Wu, J., Yuan, G. Li, C.G., (2000), "Microstructure and Mechanical Properties of Cast (Al-Si)/SiCp Composites Produced by Liquid and Semisolid Double Stirring Process", *Material Science and Technology*, Vol. 16, 556-563
- Gül, F., (1999), "Döküm Yoluyla Alüminyum Temelli Parçacık Takviyeli Kompozit Geliştirme", Ph.D. Thesis, Marmara Üniversitesi
- Gül, F., İnem, B., 1997, Döküm yoluyla SiC takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi, Savunma Sanayindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu, 999-1005, 5-6 Haziran, Kara Harp Okulu, Ankara.
- Hanumanth, G.S. and Irons, G.A. 1993, Particle incorporation by molt stirring for the production of metal-matrix composites, *Journal of Material Science*, 28, 2459-2465.
- Hayden, H. W., Moffat, W. G., Wulff, J., (1993), *Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, Mekanik Özellikler, Cilt 1, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul*
- Hashim, J. Looney, L., Hashmi, M.S.J., (2001), "The Wettability of SiC Particles by Molten Aluminium Alloy", *Journal of Materials Processing Technology* 119, 324-328
- Hayden, H. W., Moffat, W. G., Wulff, J., (1993), *Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, Mekanik Özellikler, Cilt 3, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul*
- Hull,D., Clyne T. W., (1996), *An Introduction to Composite Materials, Second Edition, Cambride University Press, USA*
- Kaczmar, J.W., Pietrzak, K. , Wlosinski, W., (2000), "The production and application of metal matrix composite materials", *Journal of Materials Processing Technology* 106, 58-67
- Kang, C.G., Kim, N.H., Kim B.M., (2000), "The Effect of Die Shape on the Hot Extrudability and Mechanical Properties of 6061 Al/Al₂O₃ Composites", *Journal of Materials Processing Technology* 100, 53-62
- Kayalı, E. S., Ensari, C., Dikeç, F., (1990), *Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İ. T. Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul*
- Leggoe, J.W., Mammoli, A.A., Bush, M.B. Hu, X.Z., (1998), "Finite Element Modelling of Deformation in Particulate Reinforced Metal Matrix Composites with Random Local Microstructure Variation" ,*Acta Mater.*, Vol., 46, No., 17, 6075-6088
- Lim, C.S., Clegg, A.J., (1997), "The Production and Evaluation of Metal-Matrix Composite Castings Produced by a Pressure-Assisted Investment Casting Process", *Journal of Material Processing Technology*, 67, 13-18
- Long, S., Beffort, O., Cayron, C., Bonjour, C.,(1999), "Microstructure and Mechanical Properties of a High Volume Fraction SiC Particle Reinforced AlCu4MgAg Squeeze Casting", *Mat. Sci. And Eng. Vol A*, 269, 175-185

Looney, L.A., Monaghan, J.M., O'Reilly, P. ve Taplin, D.M.R., 1992, The turning of an Al/SiC metal-matrix composite, *Journal of Materials Processing Technology*, 33, 453-468.

Nadibo, (1993), "Metal Matrix Composites- Sector Study", The North American Defense Industrial Base Organization

Pai, B.C., Pillai, R.M., Satyanarayana, K.G., (1993), "Stir Cast Aluminium Alloy Matrix Composites", *Key Engineering Material*, Vols. 79-80, 117-128

Prangnell, P.B., Barnes, S.J., Roberts, S.M., Withers, P.J., (1996), "The Effect of Particle Distribution on damage Formation in Particulate Reinforced Metal matrix Composites Deformed in Compression", *Material Sciences and Engineering*, A220, 41-56

Rawal, S., (2001), "Metal-Matrix Composites for Space Applications, *JOM*, 53 (4), pp. 14 -17.

Reiter, T., Dvorak, G. J., Tvergaard V., (1997), "Micromechanical Models for Graded Composite Materials", *J. Mech. Phys. Solids*, Vol:45, No:8, pp. :1281-1302

Schwartz, M. M., *Composite Materials Handbook*, Second Edition, McGraw-Hill, Inc. New York

Seleznev, M.L., Seleznev, I.L., Cornie, J.A., Argon, A.S., Mason, R.P., (1998), "Effect Of Composition, Particle Size And Heat Treatment On The Mechanical Properties of Al-4.5 wt. % Cu Based Alumina Particulate Reinforced Composites" The Sea International Congress and Exposition, Detroit, MI, February 23-26, Paper 980700

Samuel, A.M., Samuel, F.H., (1995), "Foundary Aspects of Particulate Reinforced Aluminium MMCs: Factors Controlling Composite Quality", *Key Engineering Materials*, Vols. 104-107, 65-98

Seo, Y.H. and Kang, C.G., 1995, The effect of applied pressure on particle-dispersion characteristics and mechanical properties in melt-stirring squeeze-cast SiCp/Al composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 55, 370-379.

Spencer, K., Corbin, S.F., Lloyd, D.J., (2002), "The Influence of Iron Content on the Plane Strain Fracture Behaviour of AA 5754 Al-Mg Sheet Alloys", *Materials Science and Engineering A325* (2002) 394-404

ISO/ TTA 2: 1997 (E), " Tensile Test for Discontinuously Reinforced Metal Matrix Composites at Ambient Temperatures", Switzerland

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

Topbaş, M. A., (1993), *Endüstri Malzemeleri*, Prestij Basın ve Yayın, İstanbul

Torralba, J.M., Costa, C.E., Velasco, F., (2003), "P/M aluminum matrix composites: an overview", *Journal of Materials Processing Technology* 133 203-206

Vel, S. S., Batra, R. C., (2002a), "Exact Solution for the Cylindrical Bending Vibration of Functionally Graded Plates", *Proceedings Of The American Society Of Composites*, Seventeenth Technical Conference, Purdue University, West Lafayette, Indiana

Vaucher, S., Beffort, O., (2000) *Bonding and interface formation in Metal Matrix Composites*, Vol. 9, EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research Thun Switzerland, www.empa.ch

Vel, S. S., Batra, R. C., (2002b), "Exact Solution for Thermo elastic Deformations of

Functionally Graded Thick Rectangular Plates”, AIAA Journal, Vol. 40, No:7

William, C., Harrigan, Jr., (1998), “Commercial processing of metal matrix composites”, Materials Science and Engineering A244 (1998) 75–79

Wusatowski, Z., (1963), Haddemeleme Tekniğinin Esasları, Cilt1, Levent ofset matbaacılık ve yayıncılık LTD. ŞTİ. İstanbul

Yılmaz, S., Aran, A., (1999), “Finite Element Analysis of the Effect Of Particle Alignment on the Deformation Behavior for a Ductile Matrix Containing Hard Particles”, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 38, No. 3, pp. 201-205

Yılmaz, M., (1997), “ Production And Mechanical Behavior of Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composites”, Ph.D. Thesis, Boğaziçi University

Zhou, W. and Xu, Z.M., 1997, Casting of SiC reinforced metal matrix composites, Journal of Materials Processing Technology, 63, 358-363.

Zong, Z. Yu, X.B., (2000), “Plasticity Theory for Particulate Composite Materials with Imperfect Interfaces”, Key Engineering Materials, Vols, 177-180, 303-308

Zulfia, A., Atkinson, H.V., Jones, H., (1999), “Effect of hot isostatic pressing on cast A357 aluminium alloy with and without SiC particle reinforcement”, Journal of Materials Science 34, 4305 – 4310

7. ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	01.07.1965	
Doğum yeri	Merzifon	
Lise	1978-1981	Edirne Lisesi
Lisans	1981-1985	Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1991-1994	Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmalat Programı
Doktora	1997-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı

Çalıştığı Kurumlar

1986-1987	Çorlu Belediyesi Fen İşleri Kontrol Mühendisi
1987-1989	T.P.A.O. Trakya Bölge Müdürlüğü Bakım Onarım Atelye Mühendisi
1989-1991	Özel Şirket Makine Mühendisi
1991-1993	M. E. B. Lüleburgaz E.M.L. Motor Bölümü Atelye Öğretmeni
1993-1996	M. E. B. Edirne E.M.L. Motor Bölümü Atelye Öğretmeni
1996-Devam ediyor	Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü