

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ B₄C TAKVİYELİ
KOMPOZİTLERİN DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİMİ**

Met. Müh. Fatih TOPTAN

**FBE Metalurji Mühendisliği Ana Bilim Dalı Malzeme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Işıl KERTİ (YTÜ)

İSTANBUL, 2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER	2
2.1 Kompozit Malzemeler	2
2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimine Kısa Bir Bakış.....	2
2.3 Kompozit Malzemelerin Tanımlanması	4
2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	5
2.4.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)	6
2.4.2 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK).....	6
2.4.3 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)	7
2.4.3.1 MMK'lerin Tanımlanması.....	7
2.5 Alüminyum Matrisli Kompozitler (AMK)	9
2.5.1 Matris Malzemeleri.....	12
2.5.2 Takviye Malzemeleri	14
2.5.3 AMK'lerde Matris/Takviye Arayüzeyi	15
2.5.3.1 Takviye Fazın Islatılabilirliği	16
2.5.3.2 Arayüzey Bağ Çeşitleri.....	18
2.5.4 AMK'lerin Mekanik Özellikleri	20
2.5.4.1 AMK'lerde Elastiklik Modülü.....	21
2.5.4.2 AMK'lerde Akma Mukavemeti.....	22
2.5.4.3 AMK'lerde Çekme Mukavemeti	22
2.5.4.4 AMK'lerin Aşınma Özellikleri.....	23
2.5.4.5 AMK'lerin Sürünme Özellikleri.....	24
2.5.4.6 AMK'lerin Yorulma Dayanımı	24
2.5.4.7 AMK'lerin Isıl Özellikleri	25
2.5.4.8 AMK'lerde Kırılma Tokluğu.....	26
2.5.5 AMK'lerde Mukavemet Mekanizmaları	26
2.5.6 AMK'lerin Üretim Yöntemleri.....	27
2.5.6.1 Katı Durum Prosesleri	28
2.5.6.2 Sıvı Durum Prosesleri.....	29

2.5.6.2.1	Ergiyik Metal Karıştırma Teknikleri	30
2.5.6.2.2	Sıkıştırma (Dövme) Döküm	32
2.5.6.2.3	Basıncılı Döküm	33
2.5.6.2.4	Reodöküm.....	34
2.5.6.2.5	Sıvı İnfiltrasyon Yöntemi	35
2.5.6.2.6	Basıncsız infiltrasyon Yöntemi	36
2.5.6.3	Püskürtme (Sprey) Yöntemleri	37
2.5.6.3.1	Osprey Yöntemi.....	37
2.5.6.3.2	Düşük Basınc Plazma Çöktürmesi.....	38
2.5.6.4	In Situ Üretim Yöntemleri	39
2.5.6.4.1	Lanxide Yöntemi	40
2.5.6.4.2	XD-Yöntemi	40
2.5.6.4.3	Sıvı, Katı ya da Gaz Reaksiyon Veren Yöntemler	40
2.5.7	AMK'lerin Mühendislik Malzemeleri İçindeki Yeri, Önemi ve Geleceği.....	41
2.6	Al-B ₄ C Kompozitleri	44
2.6.1	Takviye Malzemesi: B ₄ C.....	44
2.6.2	Al- B ₄ C Kompozitlerinin Döküm Yoluyla Üretimi.....	45
2.6.2.1	Al- B ₄ C Arayüzeyi.....	45
2.6.2.1.1	Al-B ₄ C Arayüzeyindeki Kimyasal Bağlar ve Reaksiyonlar	46
2.6.2.1.2	Al-B-C Üçlü Sisteminde Oluşan Fazlar	47
3.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	48
3.1	Deneylerde Kullanılan Malzemeler	48
3.2	Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar	48
3.3	Deneylerin Yapılışı.....	48
4.	DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	53
4.1	Matris/Takviye Arayüzeyi	58
4.2	Mekanik Özellikler	67
	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	82
	KAYNAKLAR	83
	ÖZGEÇMİŞ.....	86

SİMGE LİSTESİ

g	Gram
cm ³	Santimetreküp
°C	Derece Santigrat
cal	Kalori
K	Kelvin
H _s	Zaman aralığının başlangıcı
sec	Saniye
cm	Santimetre
γ_{ks}	Katı-sıvı arasındaki arayüzey kuvvetleri
γ_{sg}	Sıvı-gaz arasındaki arayüzey kuvvetleri
γ_{kg}	Katı-gaz arasındaki arayüzey kuvvetleri
θ	Temas açısı
W _{ks}	Bir katının herhangi bir sıvı ile adhezyon (yapışma) işi
$\Delta \alpha$	Matris/takviye fazı arasındaki ısı genleşme farklılığı
P	Özellik
V	Hacim oranı
E	Elastiklik modülü
σ	Mukavemet
α_k	Isıl genleşme katsayısı
μm	Mikrometre
F	Fahrenheit
kp	Kilopound

KISALTMA LİSTESİ

MMK	Metal Matrisli Kompozit
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
AMK	Alüminyum Matrisli Kompozit
CVD	Chemical Vapour Deposition (Kimyasal Buhar Çöktürme)
MPa	Mega Paskal
GPa	Giga Paskal
ASTM	Americam Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung
CTE	Isıl Genleşme Katsayısı
MIT	Massachusetts Institute of Technology
SEM	Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
HV	Vickers Hardness (Vickers Sertliği)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Metal matrisli kompozitlerde tipik takviye geometrileri	8
Şekil 2.2	A noktasında temas açısını ve arayüzey kuvvetlerini gösteren sıvı damlacığı metoduna göre ıslatma olayının şematik temsili.....	17
Şekil 2.3	Matris, fiber ve MMK'in tipik gerilme-genleme eğrisi ve oluşan safhalar	21
Şekil 2.4	Sürekli takviyeli AMK'lerin gerilme-devir eğrisi	25
Şekil 2.5	Al-SiC kompozitlerinde takviyenin yüzde oranına karşılık gelen ısı genleşme katsayısı değerleri.	25
Şekil 2.6	Toz metalurjik yöntemin üretim aşamaları	29
Şekil 2.7	Ergiyik metal karıştırma yöntemiyle AMK üretmek için tasarlanan elektrikli dikey ergitme fırını, karıştırıcı ve kontrol ünitesinin şematik gösterimi	31
Şekil 2.8	(a) Sürekli takviyeli AMK'lerin sıkıştırma döküm yöntemiyle üretiminde kullanılan düzene ve sıvı metal dökümü aşamasını gösteren fotoğraf ve (b) proses aşamalarının şematik gösterimi	32
Şekil 2.9	Sürekli takviyeli AMK'lerin basınçlı döküm yöntemiyle üretiminin şematik gösterimi	34
Şekil 2.10	AMK'lerin reodökümünün şematik gösterimi	34
Şekil 2.11	İnfiltrasyonla AMK üretiminde yaygın olarak kullanılan cihazın şematik gösterimi	36
Şekil 2.12	Basınçsız infiltrasyon yöntemiyle AMK üretimi	37
Şekil 2.13	Partikül takviyeli AMK'lerin üretimine uyarlanmış olan Osprey yönteminin şematik gösterimi	38
Şekil 2.14	Partikül takviyeli kompozitlerin üretimi için kurulan plazma sprey tesisinin şematik gösterimi	39
Şekil 2.15	Lanxide Yöntemi'nin prensibinin şematik gösterimi	40
Şekil 2.16	AMK'lerin üretiminde kullanılan gaz reaktanlarla in situ yöntemi	41
Şekil 2.17	Çeşitli AMK uygulamaları: (a) Yüksek hız trenlerinde kullanılan fren diskleri, (b) Elektronik uygulamalar, (c) AMK silindir gömleği, (d) Elektrik iletim hatları	42
Şekil 2.18	Taşıtlı ağırlığının yakıt tüketimine etkisi	43
Şekil 3.1	Ergitmenin yapıldığı Lepel İndüksiyon Fırını.	49
Şekil 3.2	Dökümlerde kullanılan grafit pota.	49
Şekil 3.3	Mekanik deformasyondan önce kullanılan ısı işlem fırını.....	50
Şekil 3.4	Numunelere mekanik deformasyon vermede kullanılan hadde cihazı.	52
Şekil 4.1	3 numaralı numunenin (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 15 takviye oranı) SEI modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	53
Şekil 4.2	5 numaralı numunenin (<10 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) SEI modunda alınan x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	54
Şekil 4.3	6 numaralı numunenin (<10 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 15 takviye oranı) SEI modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	54
Şekil 4.4	9 numaralı numunenin (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 15 takviye oranı) SEI modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	55
Şekil 4.5	10 numaralı numunenin (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) BEC modunda alınan x500 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	55
Şekil 4.6	11 numaralı numunenin (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) BEC modunda alınan x500 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	56
Şekil 4.7	12 numaralı numunenin (<10 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) BEC modunda alınan x500 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	56

Şekil 4.8	13 numaralı numunenin (<10 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) BEC modunda alınan x350 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	57
Şekil 4.9	14 numaralı numunenin (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) BEC modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	57
Şekil 4.10	15 numaralı numunenin (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) BEC modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	58
Şekil 4.11	1 numaralı numunede (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) B ₄ C partiküllerinin BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.	59
Şekil 4.12	2 numaralı numunede (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) B ₄ C partiküllerinin BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.	59
Şekil 4.13	4 numaralı numunede (<10 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) B ₄ C partiküllerinin BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.	60
Şekil 4.14	7 numaralı numunede (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) B ₄ C partikülünün SEI modunda x1100 büyütmedeki SEM görüntüsü.	60
Şekil 4.15	8 numaralı numunede (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) B ₄ C partiküllerinin BES modunda x1000 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	61
Şekil 4.16	14 numaralı numunede (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) B ₄ C partiküllerinin BEC modunda x1000 büyütmedeki SEM görüntüsü.	61
Şekil 4.17	15 numaralı numunede (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) B ₄ C partiküllerinin BEC modunda x1300 büyütmedeki SEM görüntüsü.	62
Şekil 4.18	8 numaralı numunenin (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları....	63
Şekil 4.19	11 numaralı numunenin (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları....	63
Şekil 4.20	14 numaralı numunenin (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları....	64
Şekil 4.21	15 numaralı numunenin (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları....	64
Şekil 4.22	15 numaralı numunenin (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) diğer bir SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları.	65
Şekil 4.23	9 numaralı numunede (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 15 takviye oranı) matris üzerinde Ti birikimini gösteren BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.....	65
Şekil 4.24	9 numaralı numunede (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 15 takviye oranı) tek bir B ₄ C tanesini gösteren SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüde takviye tanesine ait Ti elementel haritası.....	66
Şekil 4.25	3 nolu numuneye ait (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 15 takviye oranı) B ₄ C partikülünün SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ni (c) elementel haritaları.	66
Şekil 4.26	4 nolu numuneye ait (<10 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) B ₄ C partiküllerinin SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ni (c) elementel haritaları.....	67
Şekil 4.27	Çizelge 4.1’de verilen döküm sonrası sertlik değerlerinin değişiminin, partikül boyutuna göre karşılaştırmalı gösterimi.....	68
Şekil 4.28	Çizelge 4.2’de verilen sıcak hadde sonrası sertlik değerlerinin değişiminin, partikül boyutuna göre karşılaştırmalı gösterimi.	69
Şekil 4.29	Çizelge 4.3’te verilen soğuk hadde sonrası sertlik değerlerinin değişiminin, partikül boyutuna göre karşılaştırmalı gösterimi.	70
Şekil 4.30	10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin döküm, sıcak ve soğuk hadde sonrası ulaşılan sertlik sonuçlarının karşılaştırmalı gösterimi.	70

Şekil 4.31	10 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.72
Şekil 4.32	10 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.73
Şekil 4.33	11 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.73
Şekil 4.34	11 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.74
Şekil 4.35	14 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.74
Şekil 4.36	14 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.75
Şekil 4.37	15 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.75
Şekil 4.38	15 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.76
Şekil 4.39	10 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 77
Şekil 4.40	10 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 77
Şekil 4.41	11 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 78
Şekil 4.42	11 numaralı (1–7 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 78
Şekil 4.43	14 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 79
Şekil 4.44	14 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 79
Şekil 4.45	15 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 80
Şekil 4.46	15 numaralı (22–59 µm B ₄ C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi. . 80

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	AMK'lerin, takviyesiz Al alaşımları, PMK'ler ve SMK'lere göre üstünlükleri ve eksikliklerinin karşılaştırılması	10
Çizelge 2.2	Alüminyumun fiziksel özellikleri	12
Çizelge 2.3	AMK malzemelerde kullanılan başlıca matris malzemelerinin mekanik özellikleri	13
Çizelge 2.4	AMK'lerde kullanılan başlıca takviye malzemelerinin özellikleri.....	14
Çizelge 2.5	Bor Karbür'ün başlıca fiziksel özellikleri.....	45
Çizelge 4.1	10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin, döküm sonrası sertlik değerleri.....	68
Çizelge 4.2	10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin, sıcak hadde sonrası sertlik değerleri.	69
Çizelge 4.3	10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin, soğuk hadde sonrası sertlik değerleri.	69
Çizelge 4.4	Aşınma testi koşulları.	71

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, başta otomotiv sanayi olmak üzere çeşitli alanlarda gelecek vadeden bir malzeme olan alüminyum matrisli bor karbür takviyeli kompozit malzemeler için ekonomik bir üretim modeli araştırılmış, mikroyapı ve özellik ilişkileri incelenmiştir.

Çalışmaların başlangıcından son aşamaya gelinceye kadar, değerli fikir ve tecrübeleriyle beni yönlendiren tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Işıl KERTİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalar sırasında özellikle teorik hesaplamalar ve kritik kararlarda değerli fikirlerini esirgemeyen Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM'e; mekanik testler ve bu test sonuçlarının yorumlanması sırasında değerli katkı ve fikirlerini bize cömertçe sunan Doç. Dr. Ahmet KARAASLAN'a şükranlarımı sunarım.

Dökümlerin yapılmasında büyük emeği geçen Arş. Gör. Murat LUŞ başta olmak üzere BCACT'nin değerli çalışanlarına; SEM görüntülerinin alınmasındaki değerli katkılarından ötürü YTÜ'den Uzm. Polat TOPUZ'a, ASSAN ALÜMİNYUM'dan Met. Yük. Müh. Bilal KERTİ ve Tek. Hüsnü ÖZTÜRK'e; aşınma testlerindeki değerli katkılarından ötürü İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na ve Arş. Gör. Harun MİNDİVAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, çalışmalar sırasında katkılarını benden esirgemeyen değerli arkadaşım Met. Yük. Müh. Eray ERKAN'a ve tezimin redaksiyonunu yapan Gazeteci Devrim ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

B₄C, Alüminyum metali için takviye elemanı olarak kullanıldığında elde edilen Al-B₄C kompozitleri, fren malzemesi olarak kullanılabilmesi için gerekli olan yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve rijitlik gibi mükemmel mekanik ve fiziksel özellikler kazanılmasını sağlar. Bununla birlikte, özellikle son 20 yıl içinde otomotiv endüstrisi fren malzemelerinin seri üretimi için daha ekonomik ve güvenilir olabilecek bir üretim yöntemine artan rekabet nedeniyle gereksinim duymaktadır. Ayrıca, bu kompozitlerin bu tür uygulamalar için başarılı bir şekilde yaygın olarak kullanılabilmesi için B₄C'ün sıvı alüminyum metali tarafından ıslatılabilmesi ve arayüzeyde istenmeyen fazların oluşması gibi problemlerin de çözülmesi gerekmektedir.

Bu nedenle, bu deneysel çalışma yukarıda sıralanan problemleri çözmek için ekonomik bir döküm tekniğini tanıtmaktadır. Bu amaçla, deneysel çalışmalar değişik boyutlarda B₄C tozlarının ticari saflıktaki alüminyuma döküm yöntemi kullanılarak takviyesi için yürütülmüştür. Yapılan çalışmalardan elde edilen deneysel verilere göre üretim parametrelerinin ve mikroyapının kontrolü ile kullanılan döküm tekniği, fren malzemesi olarak kullanılacak yüksek performanslı Al-B₄C kompozitlerinin üretimi için ideal bir yöntem olarak görünmektedir.

Anahtar kelimeler: Alüminyum, Bor Karbür, Kompozitler, Arayüzey.

ABSTRACT

When B_4C is used as a reinforcement material for Al, it provides excellent mechanical and physical properties, such as high hardness, high wear resistance and stiffness which make Al- B_4C composites ideal candidate materials for brake systems. However, especially during the last two decades, automotive industry urgently required a cost-effective processing technique to produce competitive brake components for mass production. Furthermore, wetting problem between B_4C and liquid Al metal as well as the formation of undesirable phases at the interface are yet to be solved for successful application of these composites.

Therefore, the present work introduces a cost-effective and reliable casting technique to overcome the above mentioned issues. For this aim, experimental work was carried out using B_4C powders with different particle sizes to reinforce commercially available Al using casting technique. It was shown that using the casting technique reported here a new range of high performance composite materials suitable for braking systems could be produced by controlling both the process parameters and hence the final microstructure.

Keywords: Aluminium, Boron Carbide, Composites, Interface.

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun yaklaşık 3000 yıldır kullanmakta olduğu kompozit malzemeler, teknolojinin maliyet, çevreye duyarlılık gibi etkenlerle giderek artan talepleri karşısında, gelecekte de kullanımını sürdüreceğe benzemektedir. Bu malzemeler içinde metal matrisli kompozitler (MMK) önemli bir yer tutmaktadır.

Alüminyum, MMK'ler içinde en çok rağbet gören matris malzemesidir. Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluk, yüksek korozyon dayanımı, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, kolay işlenebilirlik ve tedarik kolaylığı gibi üstün özellikleri, alüminyum matrisli kompozitler (AMK) ile geliştirilebilmekte ve bu malzemeler düşük ağırlıkları, yüksek mukavemetleri, üstün aşınma özellikleri ile, birçok mühendislik uygulaması potansiyel malzeme haline gelmektedir.

Bor karbür, etkili bir takviye malzemesinden beklenen, özellikle yüksek sertlik (elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir) ve rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin çoğunu gösterdiğinden, alüminyum ve alaşımları için çekici ve talep gören bir takviye malzemesidir. Yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci ve rijitlik gibi üstün mekanik özellikleriyle Al-B₄C kompozitleri, özellikle fren malzemeleri için kullanılmaya aday durumdadır.

Dünyadaki bu gelişmelere ve Türkiye'nin bilim ve teknoloji politikalarında altı çizilen bu önemli alanlardaki gelişmeye katkıda bulunmayı amaçlayan bu çalışmada, B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler için döküm yöntemi kullanılarak ekonomik bir üretim yöntemi araştırılmıştır. Al-B₄C kompozitlerinin üretiminde karşılaşılan en büyük sorun, matris malzemesinin takviye partikülleri tarafından ısıtılmaması sorunudur. Bu çalışmada bu sorun, K₂TiF₆ flaksı kullanılarak aşılıma çalışılmıştır.

2. ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzemeler

Kompozit sistemlerin özelliklerini belirleme sorunu, Maxwell ve Einstein gibi büyük bilim insanlarının da ilgisini çekmiş, bilimde ve mühendislikte klasik hale gelmiş bir sorundur (Torquato, 2000). Bu ilgi, geleneksel malzemelerin sunduğu özelliklerle yetinmeyecek noktaya ulaşan teknolojinin yeni talepleriyle birleşince, modern kompozitler üzerine 20. Yüzyıl'ın ilk yarısında başlayan çalışmalar, bugüne değin artarak devam etmiştir ve günümüzde de, teknolojinin yeni taleplerini karşılamak amacıyla büyük bir hızla devam etmektedir.

Roylance'ın belirttiği gibi [1], 'kompozit' terimi, tek başına pek bir anlam ifade etmez. Yeterli derecede detaylı incelendiğinde, tüm malzemelerin farklı malzemelerden oluştuğu görülür. Ancak, modern malzeme mühendisliğinde bu terim genellikle, bir takviye malzemesiyle takviye edilmiş matris (anayapı) malzemesine karşılık kullanılmaktadır. Buradan hareketle, kompozit malzemeler, en geniş anlamıyla, iki veya daha fazla malzemenin, kendilerinden daha iyi özelliklere sahip olacak yeni bir malzeme oluşturmak amacıyla birleştirilerek üretilen malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Modern kompozitler, her ne kadar teknolojinin geldiği nokta itibarıyla ihtiyaçlarını geleneksel malzemelerle karşılayamaması sonucu ortaya çıkmışsa ve tarihleri çok yeni sayılabilse de, insanoğlu aslında, malzeme ihtiyaçlarını, dönemin kısıtlı koşulları içinde karşılamaya çalıştığı çok eski çağlardan itibaren, çağın koşullarına göre kompozit malzemeleri kullanmaktadır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimine Kısa Bir Bakış

Ağaç, kemik, diş gibi doğal kompozit malzemelerin dışında, insan üretimi olan kompozit malzemelerin tarihte bilinen ilk kullanımına, bundan yaklaşık 3000 yıl önce, Mısır'da rastlanmıştır. Söz konusu malzeme, duvar yapımında kullanılmak için, saman ile takviye edilen kil tuğlalardır [2].

Lamelli metal kompozitlerin bilinen ilk kullanımının ise, Gize'deki Büyük Piramit'te 1837'de bulunan lamelli çeliğe dayanarak, M.Ö. 2750 yılına kadar geri götürülebileceği öne sürülmektedir. Bunun dışında da, tarihte, Çin, Tayland, Endonezya, Almanya, İngiltere, Belçika, Fransa ve İran'da bulunan çeşitli kompozit yapıları malzemeler mevcuttur (Wadsworth ve Lesuer, 1999).

Scala, (1996) ABD’de kompozitlerin tarihini incelediği çalışmasında, metalurji öğreniminde, metal fiziğine olan yönelmeye dikkat çeker ve metalurji mühendisliğinin malzeme bilimine doğru kayışını vurgular. Scala, 1950’lerin ortalarında ve 1960’larda, ABD’de kompozit malzemelere olan ilgilinin başlıca üç nedenini şöyle sıralar: Özellikle havacılık, uzay, elektronik, spor malzemeleri gibi alanlardaki tasarımlarda duyulan hafif ve rijit malzeme ihtiyacı; yüksek mukavemet ve elastiklik modülü ve ABD ekonomisini geliştirmek. Scala’nın ABD için belirttiği bu noktaların, tüm dünyada kompozitlere duyulan ilginin de ana nedenleri olduğu söylenebilir.

1935’lerde cam elyafın ticari malzeme haline gelmesi, 1939’da doymamış polyester reçinenin keşfi, elyaf takviyeli kompozitlerin başlangıcını oluşturmuştur (Ankara, 1995). II. Dünya Savaşı sırasında, havacılıkta kullanılan polimer matrisli kompozitler (PMK), mevcut yapısal malzemelere göre üstün dayanım ve sertlik değerleri göstermekteydi. Buna ek olarak, dönemin mevcut malzemelerinde görülen, korozyon ve yorulma sonucu ortaya çıkan hasarların da önüne geçilmesine olanak tanımaktaydı. Savaşın hemen ardından, cam fiber takviyeli plastikler, havacılık uygulamalarında başarıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler, 1950’lerde kendilerine daha geniş bir kullanım alanı bulmuş, 1960’larda ise, farklı pazarlarda talep görmeye başlamıştır. Soğuk Savaş’ın körüklediği askeri endüstri ve 1970’lerin enerji krizinin oluşturduğu şartlar içinde, PMK’ler üzerindeki araştırmalar, artarak devam etmiştir.

Metal matrisli kompozitler (MMK) üzerine yapılan çalışmalar ise, 1950’ler ve 1960’ların başlarına dayanmaktadır. 1960’ların sonları ve 1970’lerin başlarında, bor ve silisyum karbür gibi yüksek dayanımlı mono filamanların geliştirilmesiyle, fiber takviyeli metal matrisli kompozitlerin üzerindeki çalışmalar artmıştır. 1970’lerin sonlarında ise çalışmalar, SiC visker (whisker) takviyeler kullanılarak üretilen süreksiz takviyeli MMK’ler üzerinde yoğunlaşmıştır. MMK’lerin üretiminde 1980’lerde büyük bir artış yaşanmıştır. Partikül veya fiber takviyeli alüminyum, magnezyum, demir ve bakır matrisli MMK’ler, otomotiv ve havacılık endüstrileri, ısı yönetimi, triboloji gibi alanlarda en büyük ilgiyi görmüştür. Bu ilgi, bugüne dek artarak sürmüştür. Bugün, MMK’ler, pek çok alanda, kendisinde kullanım alanı bulmuş durumdadır. Daha da yaygınlaşmalarının önündeki en büyük engel ise, birçok uygulamada maliyetlerinin istenilen düzeylere çekilememiş olmasıdır.

Seramik matrisli kompozitler (SMK) üzerindeki çalışmaların tarihi, diğerlerine oranla yenidir. Çevreye duyarlı, yüksek dayanımlı ve özellikle, diğer malzemelerle ulaşılmayan yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek SMK’ler üzerine yürütülen çalışmalar, günümüzde olanca hızıyla

devam etmektedir (Miracle ve Donaldson, 2001).

2.3 Kompozit Malzemelerin Tanımlanması

Gelişen teknolojinin taleplerinin her geçen gün artması, farklılaşması, çeşitlenmesi ve buna paralel olarak gelişen malzeme bilimi, farklı pek çok malzemeyi kombine etmekte ve istenilen özellikteki yeni malzemeleri üretmektedir. Bu noktada, kompozit malzemeler için başta verilen tanım çok genel kalmaktadır. Bu tanıma biraz da daraltmak gerekirse, bir malzemenin kompozit olarak değerlendirilmesi için, kabaca şu özellikleri taşıması gerekmektedir:

- i) Kimyasal olarak birbirlerinden farklı en az iki bileşenin kombinasyonu ile üretilmesi,
- ii) Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin üç boyutlu olarak birleşmeleri,
- iii) Nihai malzemenin, bileşenlerinin tek başlarına sahip olamayacağı özellikleri göstermeleri.

Bir malzemenin kompozit ya da monolitik malzeme olduğu belirlenirken, atomik, mikroyapısal ve makroyapısal yapı seviyelerini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Atomik seviyede, iki veya daha fazla sayıdaki farklı atomun bir arada bulunması durumunda, malzeme kompozit olarak ifade edilirken, mikroyapısal seviyede, kristal, faz, molekül ve bileşenlerin, iki veya daha fazla sayıdaki kristal, molekül ve faz yapılarından meydana gelmesiyle oluşan yapılar kompozit malzeme olarak tanımlanabilirler. Ne var ki, geleneksel olarak homojen ve monolitik olarak sınıflandırılan pek çok malzeme bu tanımlama ile kompozit sınıfına girebilmektedir. Buna rağmen, pirinçler, bronzlar gibi tek fazlı alaşımlar, monolitik malzeme olarak ele alınmaktadır. Çok fazlı bir karbon alaşımı olan çelikler ve dökme demirler ise kompozit malzemeler sınıfına girmektedirler.

Bir malzemenin kompozit ya da monolitik malzeme olduğu belirlenirken göz önünde bulundurulması gereken bir diğer seviye ise makroyapısal seviyedir. Makroyapısal seviye ile kabaca, iki bileşenin oluşturduğu yapılar ifade edilir. Makroyapısal seviye tanımı, birçok kompoziti içerirken, genel olarak kompozit olarak bilinen bazı malzemeleri de kapsamamaktadır. Daha kapsayıcı olması bakımından, kompoziti meydana getiren bileşenlerin hemen hemen iki farklı kimyasal yapıya sahip olmaları ve birbiri içinde çözünmemeleri gibi özellikler dikkate alınmaktadır. Bu bilgilerin ışığında, hem yapısal olarak, hem de malzeme bileşenlerinin kompozisyonu açısından, kompozit malzemelerin tanımı şu şekilde yapılmaktadır: “Bir kompozit malzeme, temel olarak birbiri içinde çözünmeyen ve

birbirinden farklı şekil ve/veya malzeme kompozisyonuna sahip iki veya daha fazla makrobileşenin karışımından veya birleşmesinden meydana gelen malzeme sistemidir”.

Kompozit malzemeler için verilmiş yukarıda gelişmiş tanım da bazı noktaları aydınlatamamaktadır. Bu tanım, bazı mühendislik dalları için oldukça geniştir; çünkü ön kaplanmış malzemeler, doldurulmuş plastikler, beton ve doldurulmuş seramik ve metaller gibi birçok mühendislik malzemesi, genelde kompozit olarak değerlendirilmemesine rağmen, kompozit olarak işlem görmekte ve kompozit gibi üretilmektedirler. Yukarıdaki tanımın eksik bıraktığı bir diğer nokta da, dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımlar ve sermetler gibi partikül takviyeli kompozitlerin, makroskobik seviyede değil de, mikroskobik seviyede bulunmasıdır. Sonuç olarak, bu tanımın, ‘kompozit yapı’ ve ‘kompozit malzemeler’ arasındaki çizgiyi belirleyemediği görülmektedir ve ‘Beş veya altı tabakadan oluşmuş bir roket nozülü, çok sayıda tabakadan meydana gelen otomobil lastiği veya kumaş takviyeli matrisler bir yapı olarak mı, yoksa bir kompozit malzeme olarak mı sınıflandırılmalıdır?’ gibi tartışmaları ortaya çıkarmaktadır. Buna karşı, ‘kompozit yapılar’ ve ‘kompozit malzemeler’ arasında bir ayrım kurmayı denemenin yerine, ‘yapısal kompozitler’ ve ‘özel kompozitler’ arasında bir ayrıma gitmenin çok daha yararlı olduğu belirtilmektedir (Akbulut, 1994).

2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler ile ilgili, metal-organik, metal inorganik gibi malzeme kombinasyonları; matris sistemleri, tabaka yapılar gibi bileşen fazların karakteristikleri; sürekli, süreksiz gibi bileşenlerin dağılımları; elektriksel, yapısal gibi fonksiyonlar ve özellikleri göz önünde bulundurularak çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Yapısal bileşenlerin şekline göre yapılan genel bir sıralama şöyledir:

1. Fiberli kompozitler
2. Levhasal kompozitler
3. Partikül kompozitler
4. Doldurulmuş (veya iskelet) kompozitler
5. Tabakalı kompozitler

Kompozit malzemeler üzerinde, kullanılan matris malzemesinin türüne göre sınıflandırmalar yapılmaktadır. Matris malzemesi üzerine yapılan sınıflandırmada kompozitler genel olarak, polimer, seramik ve metal matrisli kompozitler olmak üzere üç ana sınıfta incelenmektedir (Akbulut, 1994; Ögel, 1997).

2.4.1 Polimer Matrisli Kompozitler (PMK)

Polimerler, metal ve seramiklere göre daha karmaşıktırlar. Matris malzemesi olarak kullanılan polimerler, düşük maliyetli ve nispeten kolay çalışılabilir malzemeler olmakla birlikte, bu malzemelerin düşük elastiklik modülü ve düşük kullanım sıcaklıklarına sahip olmaları, kullanım alanlarını sınırlamaktadır. PMK'lerde, matris yapısı termoset veya termoplastik polimerlerden oluşur. Kullanılan takviye malzemelerinin başlıcaları ise, cam fiber, kevlar fiber, bor ve karbon fiberlerdir.

PMK'lerin üretiminde en çok kullanılan yöntemler, elle sıvama, tel sarma, kese kalıplama işlemi, pultrüzyon metodu, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve termo oluşum yöntemleridir (Akbulut, 1994).

PMK'lerin başlıca kullanım alanları ise, korozyon direnci sebebiyle denizcilik uygulamaları, hafifliği sebebiyle otomotiv ve diğer taşımacılık endüstrileri ile spor malzemeleri, yanmazlık özelliği istenen, otomotiv iç dekorasyonu gibi alanlar olarak gösterilebilir (Ögel, 1997).

2.4.2 Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek elastik özellikler göstermeleri, kimyasal olarak inert olmaları ve düşük yoğunluğa sahip olmaları gibi üstün özelliklerin yanında, çok sert ve kırılğındırlar. Bunun yanında, düşük termal şok direnci ve tokluğa sahiptirler. Seramik malzemelerin, seramik fiberler ile takviye edilmesi durumunda, mukavemet yükselmekte, tokluk, monolitik seramiklere oranla 20 kata kadar artırılabilir. SMK'lerin tokluk değerlerinin artmasındaki en önemli etken, kullanılan takviye malzemesinin çatlak ilerlemesini engellemesi veya geciktirmesidir. Oluşan çatlak, takviye malzemesi ile karşılaştığında, yön değiştirmekte ve ilerlemesi durmaktadır.

SMK'lerin üretimi iki aşamalı olarak gerçekleştirilir. İlk aşamada takviye malzemeleri matris içine verilir ve ikinci aşamada matris yoğunlaştırılır. İnfiltrasyon, sıcak izostatik presleme, sol-jel, polimer piroliz, kimyasal reaksiyon ve toz metalurjisi kapsamında incelenebilecek tüm yöntemler, SMK'lerin üretim yöntemlerine örnek olarak gösterilebilir.

SMK'lerin kullanım alanları ise, roket ve turbojet motorlarda egzoz çıkışları, uydularda boyutsal kararlılık istenilen parçalar ve bazı biyomedikal malzemeler olarak örneklenebilir (Akbulut, 1994; Ögel, 1997).

2.4.3 Metal Matrisli Kompozitler (MMK)

Enerji, iletişim, ulaşım, havacılık, uzay gibi alanlarda yaşanan teknolojik gelişmeler, güvenilirlik, ekonomik zorluklar ve çevresel kaygıların da bunlara eklenmesiyle, geleneksel malzemelerin ötesinde yeni malzemelere ihtiyaç duymaktadırlar (Cöcen ve Önel, 1996). MMK'ler, bu alanda duyulan ihtiyacı hâlihazırda bir ölçüde karşılayan ve gelecekte de karşılamaya aday olan malzemelerden en önemlileri arasında bulunmaktadır.

MMK'ler üzerine yapılan çalışmaların tarihi, PMK'ler kadar eski olsa da, bu malzemelerin kendilerine pratik uygulama alanları bulması, PMK'lere göre daha yeni olmuştur (Ögel, 1997; Miracle ve Donaldson, 2001). Seramiklerin yüksek elastiklik modülü ve metallerin yüksek süneklik özelliklerini bir araya getiren MMK'ler, havacılık, askeri endüstri ve otomotiv endüstrisi gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yukarıda belirtilen özelliklere, bu malzemelerin yüksek aşınma dirençleri de eklendiğinde, MMK'ler, modern mühendislik malzemeleri içinde önem kazanmaktadırlar (Akbulut, 1994). Ancak hepsinden önce, MMK'lerin, monolitik alaşımlara göre esas üstünlüğünün, bu malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin, mikroyapıları üzerinde yapılan değişikliklerle, mühendislik uygulamalarının ihtiyacı duyduğu seviyeye çıkarılabilmesi olduğu vurgulanmaktadır (Peng vd., 2000). MMK'lere üstünlük sağlayan ana noktalar şu başlıklarda toplanabilir:

- a) Yüksek elastiklik modülüne sahiptirler,
- b) Yüksek mukavemete (çekme, basma, aşınma, sürünme ve kayma) sahiptirler,
- c) Yüksek sıcaklıklarda çalışabilirler,
- d) Tekrar üretilebilir mikroyapı ve özelliklere sahiptirler,
- e) Düşük yoğunluğa sahiptirler,
- f) Sıcaklık değişimlerine veya ısıl şoka karşı düşük hassasiyet gösterirler,
- g) Yüksek yüzey dayanıklılığına sahiptirler,
- h) Yüksek elektrik ve ısıl iletkenlik özelliklerine sahiptirler (Akbulut, 1994).

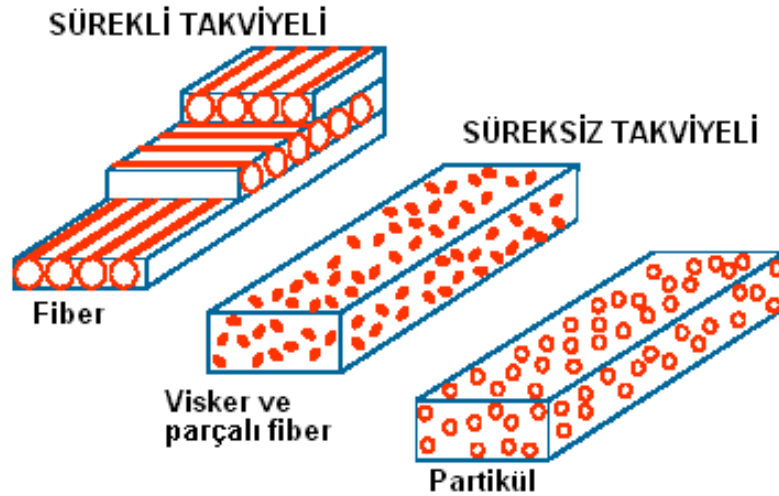
2.4.3.1 MMK'lerin Tanımlanması

MMK'ler, en geniş anlamıyla, istenen özellikleri sağlamak amacıyla, en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir. Genel anlamda, dökme demir ve bazı alüminyum-silisyum alaşımları gibi fazların şekil ve hacminin denge diyagramları ile yönlendirildiği döküm kompozitler, çok uzun süreden beri bilinmekte ve kullanılmaktadır. Ancak, modern kompozitler, takviyenin cinsi, şekli ve boyut miktarı bakımından farklıdır (Cöcen ve Önel, 1996). MMK'ler, monolitik metallere kıyasla,

yüksek mukavemete, yüksek mukavemet/yoğunluk oranına, yüksek yorulma dayanımına, yüksek sıcaklıklarda daha iyi özelliklere, düşük sürünme oranına, düşük ısı genleşme katsayısına ve yüksek aşınma dayanımına sahiptir [3].

MMK'ler yapısal olarak, tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere metal alaşımlı matris içinde sürekli veya süreksiz (kısa) fiber, visker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir (Şekil 2.1). Takviye fazına göre MMK'ler başlıca üç grupta incelenmektedir:

- i) Rijitliğin ve yoğunlukla da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bir bağlayıcı matris içine tane şeklindeki takviyelerin ilavesi ile elde edilen partikül esaslı kompozitler,
- ii) Yüksek uzunluk/çap oranı nedeniyle daha büyük yük iletimi yeteneğine sahip, dolayısıyla yüksek dayanımlı visker, kısa fiber veya lamel esaslı kompozitler,
- iii) Fiberlerin yüksek yeterlikli tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı kompozitler.



Şekil 2.1 Metal matrisli kompozitlerde tipik takviye geometrileri (Froyen ve Verlinden, 1994).

Yukarıda verilen MMK sistemlerinin, birbirlerine göre bazı üstünlükleri ve eksiklikleri bulunmaktadır. Örneğin, partikül takviyeli MMK'ler, diğerlerine göre düşük maliyet, yüksek rijitlik ve hemen hemen izotropik özellikler gösterirken, mukavemetteki gelişmenin az olduğu ve kopmadaki şekil değişimi ile kırılma tokluğunun düşük olduğu görülmektedir. Visker veya kısa fiber takviyeli MMK'ler ise, partikül takviyelilere göre daha yüksek maliyetli iken daha mukavim olduğu görülmektedir. Sürekli fiber katkılı MMK'ler ise, katılık ve mukavemetin en

iyi bileşimini verirken, özelliklerinin anizotropik olması ve daha da önemlisi, kullanılan fiberlerin ve üretim prosesinin maliyetinin yüksek olması, bu malzemelerin dezavantajları olarak öne çıkmaktadır (Cöcen ve Önel, 1996).

MMK'lerin üretiminde eğilim süreksiz takviyeli malzemeler yönündedir. Bunun başlıca nedeni, takviye malzemelerinin daha kolay üretilibilmeleri ve daha kolay temin edilebilmeleridir. Bunun yanı sıra, süreksiz takviye malzemeleri ile üretilen MMK'lerin dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi standart metalurjik proseslerle şekillendirilebilir olmalarının da bu eğilimde payı bulunmaktadır. Süreksiz takviyeli MMK'lerin üretiminin nispeten kolay olması, bu malzemelerin kullanımındaki artışın sebebi olarak gösterilmektedir (Akbulut, 1994).

2.5 Alüminyum Matrisli Kompozitler (AMK)

Alüminyum, MMK'lerde en yaygın olarak kullanılan matris malzemesidir. Alüminyum alaşımları; düşük yoğunlukları, çökelme sertleşmesi ile dayanımlarını artırabilme kabiliyetleri, yüksek korozyon dayanımları, yüksek ısı ve elektrik iletkenlikleri, kolay işlenebilirlikleri ve tedarik kolaylıkları sebebiyle, rekabet halinde olduğu malzemelere kıyasla avantaj sağlayarak gelişmiş uygulamalarda kullanılır hale gelmiştir. Al alaşımlarının yukarıda verilen başlıca özellikleri, alüminyum matrisli kompozitler (AMK) kullanılarak geliştirilebilir (Froyen ve Verlinden, 1994; Cayron, 2000). AMK'ler, düşük ağırlıkları, yüksek mukavemetleri, üstün aşınma özellikleri ile birçok mühendislik uygulamasında potansiyel malzeme haline gelmektedir.

AMK'ler, takviye malzemesinin geometrisine göre çeşitli gruplara ayrılabilir. Yapılabilecek bir gruplandırma şöyledir:

- a) Partikül takviyeli AMK'ler
- b) Visker veya kısa fiber takviyeli AMK'ler
- c) Sürekli fiber takviyeli AMK'ler
- d) Monofilament takviyeli AMK'ler (Surappa, 2003)

AMK'ler, takviyesiz Al alaşımlarına, PMK'lere ve SMK'lere göre belirli avantajlar ve bazı dezavantajlar sunmaktadırlar. Genel bir görüntü Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 AMK'lerin, takviyesiz Al alaşımları, PMK'ler ve SMK'lere göre üstünlükleri ve eksikliklerinin karşılaştırılması (Froyen ve Verlinden, 1994).

ÜSTÜNLÜK	EKSİKLİK
Takviyesiz Al Alaşımlarına Göre	
Yüksek özgül mukavemet Yüksek özgül rijitlik Yüksek sıcaklıkta sürünme direncinde artış Artan aşınma dayanımı	Düşük tokluk ve süneklik Daha karmaşık ve pahalı üretim yöntemleri
PMK'lere Göre	
Çapraz yönde mukavemette artış Yüksek tokluk Yüksek hasar toleransı Çevresel etkilere karşı dayanımda artış Yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik Yüksek sıcaklıkta dayanım	Daha az geliştirilmiş teknoloji Daha az tecrübe Yüksek maliyet
SMK'lere Göre	
Yüksek tokluk ve süneklik Üretim kolaylığı Düşük maliyet	Yüksek sıcaklıkta dayanımın düşük olması

a) Partikül takviyeli AMK'ler: Partikül takviyeli AMK'ler genellikle eş eksenli seramik takviyeler içermektedirler. Seçilen seramik takviyeler ise genellikle oksitler, karbürler ya da borürlerdir ve yapısal ya da aşınma dayanımı gerektiren uygulamalar için kullanıldıklarında %30'dan az hacim oranındadırlar. Hem katı hem de sıvı durum prosesleriyle üretilebilmektedirler. Sürekli fiber takviyeli AMK'lere göre daha düşük maliyetlidirler. Mekanik özellikleri, visker, kısa fiber ve sürekli fiber takviyeli AMK'lere göre daha düşük olsa da, takviyesiz alüminyum alaşımlarının oldukça üzerindedir. İzotropik özellik sergilerler ve ekstrüzyon, haddeleme, dövme gibi geniş bir çeşitlilikteki ikincil şekillendirme işlemlerine tabi tutulabilirler.

b) Visker veya kısa fiber takviyeli AMK'ler: Visker takviyeli kompozitler, toz metalurjisi

veya infiltrasyon teknikleriyle üretilebilmektedirler. Visker takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, partikül ya da kısa fiber takviyeli kompozitlere göre oldukça üstündür. Kısa fiber takviyeli AMK'ler ise, sürekli fiber ve partikül takviyeli AMK'lerin arasında kalacak değerlerde karakteristik özellikler sergilemektedir.

c) Sürekli fiber takviyeli AMK'ler: Bu tür AMK'lerde, 20 μm 'den küçük çapta ve sürekli fiber formunda takviyeler (Al_2O_3 , SiC ya da C) kullanılmaktadır. Fiberler, paralel veya örgü şeklinde olabilmektedir. Sürekli fiber takviyeli AMK'lerde, üretim yöntemine göre %40'a varan oranda hacim oranına sahip olunabilmektedir.

d) Monofilament takviyeli AMK'ler: Monofilamentler, geniş çaplı (100–150 μm) fiberlerdir. CVD (Chemical Vapour Deposition/Kimyasal Buhar Çöktürme) yöntemiyle üretilmektedir. Esneklikleri, multifilamenlere göre daha düşüktür. Multifilament takviyeli AMK'ler, difüzyon bağlama teknikleriyle üretilmektedir (Surappa, 2003).

Bunların dışında, lamelli kompozitler, kompozit kaplamalar, sermetler, dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımlar metal matrisli kompozit olarak değerlendirilmemektedir.

Sürekli fiber takviyeli kompozitler aşağıdaki ana özelliklere sahiptir:

- Gelişmiş rijitlik ve mukavemet
- Aşınma ve sürünme dayanımlarında azalma
- Anizotropik özellikler
- Fiber yönüne göre mukavemetin artması
- Maliyeti yüksek karmaşık üretim teknikleri

Süreksiz takviyeli kompozitler, istenilen ana özellik mukavemet değil de yüksek rijitlik, daha iyi aşınma dayanımı, kontrol edilebilir ısıl genleşme ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme gibi özellikler olduğu durumlarda geliştirilir (Froyen ve Verlinden, 1994). Ayrıca, parçacık takviyeli AMK'lerin üretimi, fiber takviyelilere göre daha kolay ve ucuzdur. Bu yüzden, parçacık takviyeli AMK'lerin geniş bir uygulama potansiyelinin olduğu vurgulanmaktadır (Yılmaz ve Altıntaş, 1993).

Amerikan Alüminyum Birliği'nin önerisine göre, AMK'ler, 'kabul edilen matrisin ismi/takviye malzemesinin kısaltması/yüzde hacim oranı ve takviye tipinin sembolü' şeklinde isimlendirilebilirler. Örneğin, %22 hacim oranında, alümina parçacık takviyeli alüminyum alaşımı şu şekilde isimlendirilebilir: AA6061/Al₂O₃/22p (Cayron, 2000).

2.5.1 Matris Malzemeleri

MMK'lerin üretiminde kullanılan matris malzemelerinin bir ayrımının yapılmasının mümkün olmadığı, geleneksel olarak kullanılan tüm metal ve alaşımlarının MMK üretiminde kullanılabilmesinin mümkün olduğu ifade edilmektedir (Akbulut, 1994). MMK'de seçilecek matris malzemeleri, istenilen özelliklere, kullanım yerine ve MMK'de kullanılacak takviye malzemesine göre belirlenmektedir.

MMK'lerde matris malzemesinin seçimi çeşitli etkenlerce belirlenir. Bu etkenlerden biri, üretilen MMK'nin sürekli ya da süreksiz takviyeli olmasıdır. Takviye olarak sürekli fiberler kullanıldığında, yükün büyük bir kısmı fiberler tarafından taşınacağından, matris alaşımının birincil görevi, yükün fiberlere etkili bir şekilde aktarılmasını sağlamak ve fiberde oluşabilecek hasarlara karşı çatlak oluşumunu azaltmaktır. Bu sebeple, sürekli takviyeli MMK'lerde kullanılan matris malzemeleri seçilirken, mukavemet değerlerinden çok, tokluk değerlerine dikkat edilir. Süreksiz takviyeli MMK'lerde ise, kompozitin mukavemetinde matris malzemesinin mukavemeti etkili olacağından, yüksek mukavemetli matris alaşımları tercih edilmektedir [4]. Bunun yanında, matris ve takviye malzemeleri arasında kimyasal veya fiziksel uygunluk olmasına da dikkat edilmektedir (Akbulut, 1994).

Çok çeşitli malzemeler MMK'lerin üretimi için uygunken, alüminyum ve alaşımları, MMK'lerin üretiminde en çok kullanılan malzemelerdir. Bunun en önemli sebepleri, hafif ve ekonomik olmaları, üretim aşamasında farklı yöntemlere olanak tanınması, yüksek mukavemet ve üstün korozyon özellikleridir (Rajan vd., 1998).

Çizelge 2.2 Alüminyumun fiziksel özellikleri [5].

Fiziksel özellik	Değer	Birim
Yoğunluk	2,70	g/cm^3 (20 °C'ta)
Ergime derecesi	660	°C
Özgül ısı	0,2241	$\text{cal.g}^{-1}\text{K}^{-1}$ (100 °C'ta)
Ergime gizli ısı	94,7	cal.g^{-1}
Elektrik iletkenliği	%64,94	(Uluslararası Sertleştirilmiş Bakır Standardı'na göre)
Isı iletkenliği	0,5	$\text{cal.sec}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Matris malzemesi olarak kullanılan alüminyum ve alaşımları, geniş bir özellik çeşitliliğine sahiptir ve bu özellikler nihai kompozit malzemenin özelliklerini direkt olarak etkilemektedir. Alüminyumun en kilit özelliği, düşük yoğunluklu olmasıdır. Alüminyum, manyetik değildir ve kıvılcımlanmaz. Saf alüminyumun, soğukta ve sıcakta şekil değiştirme kabiliyeti çok iyidir. % 99,996 saflıktaki alüminyumun gerilme mukavemeti yaklaşık 49 MPa'dır ve çeşitli alaşımlama ve ısıtma işlemleriyle bu, 700 MPa'a kadar çıkarılabilir.

Çizelge 2.3 AMK malzemelerde kullanılan başlıca matris malzemelerinin mekanik özellikleri (Akbulut, 1994).

Matris Malzemesi	Akma Mukavemeti (MPa)	Maksimum Mukavemet (MPa)	Kopmadaki Uzama Miktarı (%)	Elastiklik Modülü (Gpa)
Saf Al (Ticari)	30	80	40,0	72
Al-6 Fe	280	350	12,5	82
Al-4,5Cu-T6	107	182	17,0	71
Al-Cu-Mg-T6	319	345	1,20	72
Al 1100-T6	63	99	41,0	-
2014 Al-T6	414	409	10,0	72
2024 Al-T4	268	388	8,20	-
2014 Al-T4	350	479	12,0	-
A 356 Al-T6	200	275	6,00	69
6061 Al-T6	276	326	15,0	68
7010 Al-T6	490	550	10,5	70

Alüminyum ve çoğu alaşımı birçok korozyon türüne karşı oldukça iyi direnç göstermektedir. Alüminyum, yüzeyinde oluşan doğal oksit tabakası sayesinde havanın, sıcaklığın, nemin ve kimyasal saldırıların etkisinden korunmaktadır. Alüminyum, elektriği çok iyi iletmektedir.

Elektrik iletkenliği kimyasal bileşime, ısıl işlem durumuna göre değişmektedir. Bu özelliği ve diğer kendine özgü özellikleriyle alüminyum, birçok uygulamada bakırın yerini alır. Alüminyumun manyetik ve yanıcı olmaması, onu elektronik ve diğer u teknolojilerde paha biçilmez bir malzeme haline getirmektedir [5]. Alüminyumun fiziksel özellikleri izelge 2.2’de, AMK malzemelerde kullanılan başlıca matris malzemelerinin mekanik özellikleri ise izelge 2.3’de verilmiştir.

2.5.2 Takviye Malzemeleri

MMK malzemelerin üretiminde, temin edilebilmelerindeki kolaylık, yanında kullanılacakları matris malzemeleri ile uyumluluk, elastiklik modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık, ısıl genleşme katsayısı, boyut ve şekil, kimyasal bileşim, kristal yapı gibi özellikler göz önünde tutularak, kimyasal yapılarına göre i) oksitler, ii) karbürler, iii) nitrürler ve iv) diğer (paslanmaz elik, karbon vs.) olmak üzere dört ana grupta incelenebilecek takviye malzemeleri kullanılmaktadır (Akbulut, 1994; Kerti, 1998). AMK’lerde kullanılan başlıca takviye malzemelerinin özellikleri izelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.4 AMK’lerde kullanılan başlıca takviye malzemelerinin zellikleri (Kerti, 1998).

Takviye Malzemesi	Yoğunluk ($\times 10^3 \text{kgm}^{-3}$)	Isıl Genleşme Katsayısı (10^{-6}C^{-1})	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Mukavemet (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
Al_2O_3	3,98	7,92	2100	221 (1090 $^{\circ}\text{C}$)	379 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
SiC	3,21	5,40	2750	-	324 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
C	2,18	-1,44		-	690
SiO_2	2,66	<1,08	1710	-	73
AlN	3,26	4,84	2375	2069 (24 $^{\circ}\text{C}$)	310 (1090 $^{\circ}\text{C}$)
B_4C	2,52	6,08	2420	2759 (24 $^{\circ}\text{C}$)	448 (24 $^{\circ}\text{C}$)

Bu malzemeler arasında, yüksek ergime sıcaklıkları, sertlikleri ve düşük kimyasal reaktivitelerinden ötürü, kararlı karbürler, oksitler, nitrürler, silikatlar ve borürler gibi seramik malzemeler ön plana çıkmaktadırlar [4]. Geçiş metallерinin karbürleri, yüksek sertliklerinden

dolayı ticari önem taşımaktadırlar. Mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı ve modülleri, bu karbürleri, yüksek sıcaklıkta (250°C ve üzeri) çalışan ve özellikle havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılan malzemelerde kullanılır hale gelmesinde etkin olduğu belirtilmektedir.

AMK’lerde takviye malzemesi olarak genellikle Al_2O_3 , SiC ve C kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra; SiO_2 , B, BN, AlN ve B_4C de takviye malzemesi olarak kullanılmaktadır (Cayron, 2000).

2.5.3 AMK’lerde Matris/Takviye Arayüzeyi

Metal-seramik sistemlerinde, kompozitin tüm özellikleri, önemli ölçüde metal-seramik arayüzeyinin özelliklerine bağlıdır (Akbulut, 1994; Kerti, 1998; Rajan vd., 1998). Kompozitin takviye fazlarla kuvvetlendirilmesi, matris ile takviye malzemesi arasındaki bağın kuvvetine bağlıdır. Güçlü bir arayüzey, yükün takviye malzemesinden matris malzemesine iletilmesini ve matris malzemesinde dağıtılmasını sağlar. Rijitlik, kırılma tokluğu, yorulma, ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik ve sürünme gibi özellikler de arayüzeyin doğasından etkilenmektedirler (Rajan vd., 1998).

Arayüzey genelde, element konsantrasyonlarının, kristal yapının, atomik düzenin, elastiklik modülünün, yoğunluğun ve ısı genleşme katsayısının bir taraftan diğerine değiştiği iki boyutlu bir süreksiz alandır (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

AMK’lerin başarısında, alüminyum matris ile takviye arasındaki arayüzeyin kontrol edilmesi oldukça önem taşımaktadır. Dikkat edilmesi gereken ana noktalar şunlardır:

- Özellikle düşük basınçta sıvı durum üretim yöntemleri kullanıldığında, üretimi kolaylaştırmak için iyi ıslanma gerekmektedir.
- Matris ve takviye malzemesi arasında, takviyenin özelliklerini kaybetmesini ve yeni gevrek fazların oluşumunu önlemek amacıyla gerçekleştirilen arayüzey reaksiyonları çok sınırlı bir düzeyde olmalıdır.
- Doğru bağlama, istenilen özelliklerin dağıtımı açısından önemlidir.

Matris malzemesi olarak seçilen Al alaşımları için, ıslanma, takviye malzemesi ile arayüzey enerjisini düşürecek bir kimyasal reaksiyon ile geliştirilebilir. Ayrıca, sıvı alüminyumu kaplayan oksit yüzeyin engellenmesi de ıslanmayı artırabilir. Seramiklerin yani takviye malzemelerinin alüminyum tarafından ıslatılmasına etki eden parametreler sıcaklık (yükselen sıcaklıklar daha iyi ıslanma değerleri verirler), temas süresi (ıslanma uzun temas sürelerinde artar), çevredeki atmosferin basıncıdır (vakumda, adsorbe edilmiş gazlar uzaklaşır ve ıslanma

davranışını iyileştirir). Bu koşullar, genelde zayıf olan ıslanmayı mekanik veya kimyasal olarak artırılabilir. Bunlar dört kategoriye ayrılabilir; (a) takviye ön ısıtması; (b) matris alaşımı modifikasyonları; (c) takviyenin kaplanması; (d) mekanik yöntemler.

Genel bir durum olarak, arayüzeyin kimya mühendisliği anlamında özellikler bakımından optimize edilmesi ile ilgili verilmiş bir genel kurallar listesi bulunmamaktadır. Maliyetleri de göz önünde bulundurarak, uygun işlemlerin seçilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.3.1 Takviye Fazın Islatılabilirliği

Çoğu zaman, matris ve fiber arasında düzgün bir arayüzeyden çok, düzgün olmayan bir arayüzey ortaya çıkmaktadır. Bu durumda, matris ve fiber arasındaki teması, ıslatılabilirlik kavramı açısından ele almak faydalı olmaktadır (Akbulut, 1994). Seramik yüzeylerin ergiyik metal tarafından ıslatılması, bir MMK tasarlarken düşünülmesi gereken en önemli noktadır (Fujii vd., 1993).

Islatmanın meydana gelmesi için arayüzey bağ mukavemetinin sıvının yüzey gerilimine galip gelmesi gerekmektedir (Kerti, 1998). Araştırmacılar, arayüzey reaksiyonlarının, seramik fazların metal matris tarafından ıslatılabilirliğini artırmaya katkıda bulunabileceğini belirtmektedir (Oh vd., 1989).

Islatılabilirlik, temas açısı ' θ ' ölçülerek anlaşılmaktadır. Şekil 2.2'de, sıvı, katı ve gaz fazları arasında oluşan temas açısı ve oluşan arayüzey kuvvetleri görülmektedir. Şekildeki sistemde katı-sıvı (γ_{ks}), sıvı-gaz (γ_{sg}) ve katı-gaz (γ_{kg}) arasındaki farklı arayüzey kuvvetleri birbirine etki etmektedir. İdeal bir ıslanma için temas açısının (θ) sıfır olması, yani yüzeyin tamamen kaplanması gerekmektedir. Etkin bir ıslanma için ise katı-sıvı arayüzey enerjisinin düşük olması, sıvı-metal yüzey geriliminin düşmesi ve temas açısının 90 dereceden düşük olması gerekmektedir. Temas açısının 180 derece olması ise ıslanmanın olmadığı anlamına gelmektedir. Temas açısı Thomas-Young eşitliği kullanılarak hesap edilebilmektedir:

$$\gamma_{kg} = \gamma_{ks} + \gamma_{sg} \cos \theta \quad (2.1)$$

Eşitlikten de anlaşılacağı gibi, temas açısı θ 'nın 90 dereceden düşük olmasını sağlamak için $\gamma_{kg} - \gamma_{ks}$ değeri pozitif olmalıdır. Gaz fazı içinde katının yüzey geriliminin ölçülmesi çok zor olduğundan, bir katının herhangi bir sıvı ile adhezyon (yapışma) işi (W_{ks}), aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$W_{ks} = \gamma_{kg} + \gamma_{sg} - \gamma_{ks} \quad (2.2)$$

Kararlı bir katı-sıvı arayüzeyi için W_{ks} değerinin yüksek olması gerektiği bilinmektedir. Sistemin katı-katı durumuna soğutulması durumunda, yukarıdaki (2.3) eşitliğinin modifiye edilmesi gerekmektedir. Böylece arayüzeyde, ısı genleşmeler de göz önüne alınmaktadır.

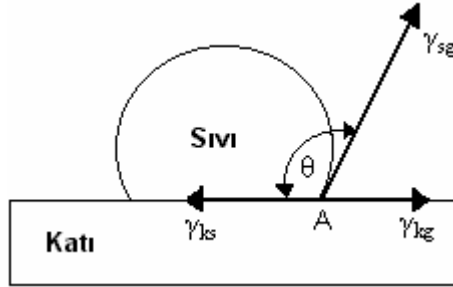
$$W_{kk} = \gamma_{kg} + \gamma_{sg} - \gamma_{ks} - f(\Delta \alpha) \quad (2.3)$$

(2.3) denklemindeki W_{kk} , sistemin soğutulması sonucunda arayüzeydeki adhezyon işi, $f(\Delta \alpha)$ ise genleşmelerin de göz önüne alındığı sistemlerde matris/takviye fazı arasındaki ısı genleşme farklılıklarının bir fonksiyonudur. Eşitlik (2.1) ve (2.2)'nin birleşmesi ile adhezyon işi basit olarak;

$$W_{ks} = \gamma_{sg} (1 + \cos \theta) \quad (2.4)$$

denklemini ile temsil edilmektedir. Eşitlik (2.4)'ten açıkça görülebileceği gibi, bir sıvının bir katı fazı ıslatabilmesi için ya da temas açısının 90 dereceden küçük olabilmesi için $W_{ks} > 2 \gamma_{kg}$ şartının sağlanması gerekmektedir.

Temas açısının düşürülmesi ise, a) katının yüzey enerjisinin yükseltilmesi, b) katı sıvı arayüzey enerjisinin düşürülmesi ve/veya c) sıvı metalin yüzey enerjisinin düşürülmesiyle mümkün olmaktadır.



Şekil 2.2 A noktasında temas açısını ve arayüzey kuvvetlerini gösteren sıvı damlacığı metoduna göre ıslatma olayının şematik temsili (Akbulut, 1994).

Kompozit malzemenin nihai özellikleri açısından arayüzeyin karakteristiği, sıcaklığı, difüzyon, kalıntı gerilmeler gibi etkilerin, arayüzeyi ne derece etkilediği de göz önüne alınmalıdır. Arayüzeyde oluşan kompozisyona bağlı metaller arası bileşikler, karşılıklı difüzyon etkileşimleri sonucu değişen yüzey geometrisi ve boyutları, morfolojisi, fiziksel, kimyasal, mekanik ve ısı özellikler de kompozit malzemenin kalitesini önemli derecede etkilemektedir (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

2.5.3.2 Arayüzey Bağ Çeşitleri

Matris ve takviye faz arasındaki bağın özelliğini ve seviyesini kontrol edebilmek çok önemlidir. Bu kontrolü gerçekleştirebilmek için herhangi bir kompozit sisteminde mümkün bağ tipi veya tiplerinden hangisinin veya hangilerinin sistemi kontrol ettiğini anlamak şarttır. Bağ çeşitlerini temel olarak, mekanik bağ ve kimyasal bağ olmak üzere iki ana gruba ayırmak mümkündür (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

A. Mekanik Bağ: Mekanik bağ, matris ile takviye arasında, bağlanmada kimyasal etkenlerin yokluğunda, iki yüzey arasındaki mekanik kenetlenme ile oluşur (Rajan vd., 1998). Mekanik bağın, kompozit özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği bilinmektedir. Takviye fazın yüzeyinde matris fazının çekirdeklenmesi, takviye fazının matris fazı ile çevrelenmesine neden olur. Bunun anlamı, arayüzeyde yük transferinden ziyade, kütle transferinin gerçekleşmesidir. Mühendislik özellikleri açısından uygun bir kompozit elde edebilmek için çoğu zaman sadece mekanik bağın kendi başına yeterli olmadığı saptanmıştır. Mekanik bağın kontrollü kimyasal reaksiyonlarla oluşan bağlarla desteklenmesi durumunda çok daha iyi özelliklerin ortaya çıktığı kaydedilmiştir (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

B. Kimyasal Bağ: Kimyasal bağ, matris ve takviye atomları doğrudan temas halindeyken meydana gelir ve elektronların değişimi ile gerçekleşir. Bu bağ, metalik, iyonik ya da kovalent olabilir. Metalik bağın olduğu arayüzey, diğer bağlara göre sünek olur ve MMK'lerde tercih edilir (Rajan vd., 1998).

a) Yeniden Çözünme ve Islatabilirlik Bağı: Takviye fazı ve matris arasındaki yüzeyler göz önüne alındığında, bu etkileşim çok küçük seviyede meydana gelmekte ve bileşenlerin birbirleriyle etkileşimleri atomik seviyede olmaktadır. Etkileşimin bu seviyede olmasından dolayı kalıntı ve safsızlıkların ortamdan uzaklaştırılması için takviye fazın yüzeylerinin uygun bir şekilde ön işleme tabi tutulması gerekmektedir. Takviye faz yüzeylerinin herhangi bir şekilde kirlenmesi veya gaz kabarcıkları, yağ, hava gibi safsızlıkların bulunması, takviye ve matrisin birbiriyle temasını zorlaştırmakta ve oluşan bağın zayıflamasına sebep olmaktadır (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

b) Reaksiyon Bağı: Bağlanmanın kimyasal reaksiyonlarla meydana gelmesi durumunda, atom transferi bir bileşenden diğerine ve bileşenlerden birbirlerine olmakta ve bu transferden dolayı oluşan etkileşim arayüzeyi ortaya çıkarmaktadır. Bileşenler arasındaki bu atomik transfer difüzyon prosesi ile kontrol edilir. Takviye-matris arayüzeyinde oluşan bileşiklere en tipik örnekler, $\text{Al-Li-Al}_2\text{O}_3$ alaşımlarında Li_2O ve LiAlO_2 arabileşiklerinin, $\text{Al-B}_4\text{C}$

sisteminde B_2O_3 fazının ve Al-SiC alaşımlarında Al_4C_3 fazlarının oluşmuş olmasıdır.

Yukarıda bahsedildiği gibi, arayüzeyin özellikle kimyasal reaksiyonlarla kontrol edilmesi halinde takviye fazın yüzeylerinin safsızlıklardan arındırılmasının yanında, arayüzeyin doğasının da büyük önem taşıdığı tespit edilmiştir. Takviye fazı ile matris alaşımları arasındaki ısı genleşme farklılıkları ve arayüzey enerjileri farklılıkları dolayısı ile iki faz arasındaki uyumun desteklenmesi gerekmektedir. Arayüzey bağ dayanımını artırabilmek için kompozit üretim işleminden önce genel olarak üç değişik ön işlem yapılmaktadır. Bunlar;

- i) Takviye fazın metalik malzeme ile kaplanması,
- ii) Metalik matrisin reaktif bir element ile alaşımlanması,
- iii) Takviye fazların ısıl işlemidir (Kerti, 1998).

i) Takviye fazın metalik malzeme ile kaplanması: Seramik partiküllerin yüzeylerinin kaplanması işlemi iki amaç için yapılmaktadır. Bunlar, takviye-matris arayüzeyinde yapışma ve ıslatılabilirliği artırmak ve yüksek sıcaklıklarda takviye-matris arasında oluşumu istenmeyen kimyasal reaksiyonları önlemektir. Kaplama işleminin ıslatılabilirliği artırmasındaki ana prensip, metal ve seramik arasındaki atom transferini kolaylaştırmak veya ‘metal-seramik’ etkileşim sistemini ‘metal-metal’e çevirmektir. Al matrisi için B_4C fiberlerinin SiC ile kaplanması; Ti matrisi için değişik seramiklerin B_4C ile kaplanması örnek olarak gösterilebilir (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

ii) Metalik Matrisin Reaktif Bir Element ile Alaşımlanması: MMK’lerin üretimindeki başarı, matris-seramik arasındaki bağın kuvvetli olmasına bağlıdır. Bu sistemlerde üretim sırasında arayüzey mukavemetinin yüksek olması için proses parametrelerinin iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. Metal ve seramik arasında tercih edilen bağ mekanik bağlanmadır. MMK sistemlerinde seramik ve metal arasındaki ıslanmayı artırmak için sıvı metal Li, Mg, Ca, Ti, Zr ve P gibi bazı reaktif elementlerle alaşımlandırılmaktadır. Bu reaktif elementlerin ilavesinin amacı; ergiyiğin yüzey gerilimini düşürmek, ergiyiğin katı-sıvı arayüzey enerjisini azaltmak ve kimyasal reaksiyonlar sonucu metal ve seramik malzeme arayüzeyinde bir metaller arası bileşik veya spinel oluşturup atomik ölçüde bağlanmayı sağlamaktır (Kerti, 1998).

iii) Takviye Fazın Isıl İşlemi: Takviye fazın kimyasal durumunu değiştirmenin bir diğer yolu da ısıl işlemdir. Takviye fazların yüzeylerinden istenmeyen gaz veya yağ gibi safsızlıkların uzaklaştırılması ıslanmayı artırmaktadır. Üretim öncesi ısıl işlem ile oksit olmayan seramik partikül veya fiberlerin yüzeylerini oksitleyerek matris malzemesi ile kimyasal reaksiyona

girmesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Yüzeyde oksit oluşumunun, oksitlerin metal ile bağlanabilirliği, metal atomlarının oksijen anyonları ile etkileşimi sonucu ıslanmayı arttırdığı kabul edilmektedir. Ancak, bir kural olarak oksitlerin sıvı metal ile ıslanabilirliğinin zayıf olduğu belirtilmektedir (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

2.5.4 AMK'lerin Mekanik Özellikleri

Kompozit malzeme teknolojileri, alüminyumun özelliklerini biçimlendirmede eşsiz fırsatlar sunar. Bunlar, artan dayanım, azalan ağırlık, yükselen çalışma sıcaklığı, gelişmiş aşınma dayanımı, daha yüksek elastiklik modülü, kontrol edilebilen ısı genleşme katsayısı ve gelişmiş yorulma gibi özelliklerdir.

Kompozitin istenen özelliklerinin hesaplanabilmesi veya belirlenebilmesini için kuralların ve modellerin oluşturulması azami önem taşımaktadır. İlk hesaplamalar için karışımlar kuralı faydalı olabilmektedir:

$$P_k = P_m V_m + P_t V_t \quad (2.5)$$

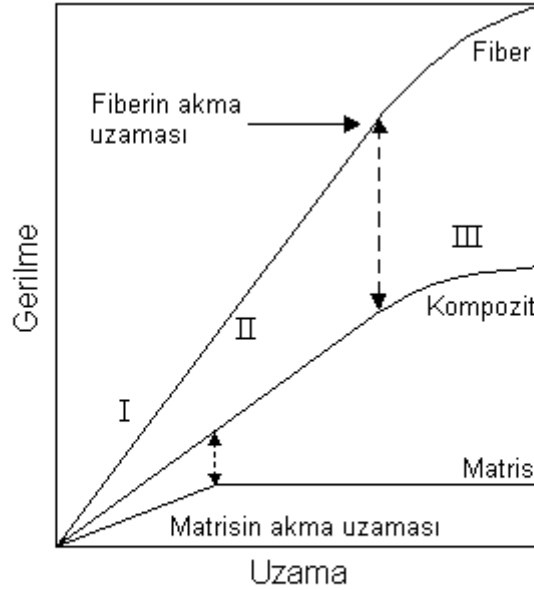
Eşitlikte P özelliği, V hacim oranını, alt simgelerdeki k, m ve t ise sırasıyla kompozit, matris ve takviyeyi belirtir (Froyen ve Verlinden, 1994).

AMK malzemelerin mekanik özelliklerini iki gruba ayırarak incelemek mümkündür; oda sıcaklığındaki temel mekanik özellikler ve değişik ortamlardaki temel mekanik özellikler.

Sürekli fiberlerle takviye edilen bir AMK malzemenin tipik gerilme-uzama eğrisi üç safhayı içermektedir. İlk safhada, hem matris hem de fiber elastik olarak deforme olmaktadır. İkinci safhada, fiber elastik olarak davranmaya devam ederken, matris plastik deformasyona uğramaktadır. Üçüncü safhada ise, hem matris hem de fiber plastik olarak deforme olmaktadır. AMK'lerin genel gerilme-uzama davranışları Şekil 2.3'te verilmiştir.

Bir AMK'in gerilme-uzama eğrisinde ikinci ve üçüncü safhaların bulunmasının, matris metali ve fiberin tipine ve aynı zamanda gerilme-uzama eğrisinin elde ettiği ortama bağlı olduğu ifade edilmektedir. Bununla beraber AMK malzemelerin çoğunda birinci ve ikinci safhaların gözlemlendiği kaydedilmektedir. Kısa fiberlerle takviye edilmiş AMK malzemelerde, gerilme-uzama eğrisinde birbirinden ayrı üç safhayı görmenin mümkün olmadığı belirtilmektedir. Bu tür kompozitlerin gerilme-uzama eğrisi iki safhaya ayrılmaktadır. İlk safhada, sürekli fiberlerle takviyeli kompozitlerdeki I. safhaya karşılık gelen ve gerilme-uzama eğrisinin ilk kısmında görülen lineer bir bölge oluşmaktadır. İlk safhayı takiben, sürekli fiberli

kompozitlerdeki III. safhaya karşılık gelen parabolik gerilme-uzama eğrisi meydana gelmektedir (Akbulut, 1994).



SAFHA I : Matris ve fiber elastik kalmaktadır.
 SAFHA II : Matris plastik olarak deforme olurken fiber elastik kalmaktadır.
 SAFHA III: Matris ve fiber plastik olarak deforme olmaktadır.

Şekil 2.3 Matris, fiber ve MMK'in tipik gerilme-genleme eğrisi ve oluşan safhalar (Akbulut, 1994).

2.5.4.1 AMK'lerde Elastiklik Modülü

MMK'lerde elastiklik modülünü belirleyen elastik sabitler, takviye fazının özelliklerine ve malzeme geometrisine bağlı olarak anizotropiktir. AMK'lerde elastik özellikler, üzerinde en fazla çalışılan mekanik özelliklerden biri olmuştur. Üzerinde çalışılan bu elastik özelliklerden en önemlisi, fiberlere paralel (E_L) ve sonrasında fiberlere dik (E_T) elastiklik modülleridir. Partikül takviyeli kompozitlerde E_L , E_T 'ye eşit olmaktadır. Şekil 2.3'te gerilme-uzama eğrisinin elastik olan bölümünde I. deformasyon safhası sırasında elastik mukavemetin artması mekanizması, uygulanan σ_c gerilmesinin matris ve fiber tarafından paylaşılmasına dayanmaktadır. Matris/fiber arayüzeyi boyunca matristeki gerilme fiberlere transfer edilmektedir. Kompozit malzemelerde sürekli fiberler için bugüne değin kullanılan en basit model, karışımlar kuralıdır.

Karışımlar kuralı, sürekli fiberlerle takviye edilen AMK'lerde doğru sonuçlar vermekteyken, kısa fiberlerle takviye edilen AMK'lerde, fiberlerin değişik yönlerde yönlenebilmeleri nedeniyle, sürekli fiber takviyeli kompozitlere göre daha düşük E_L sonuçları vermektedir.

Karışımlar kuralı yaklaşımının kısa fiberli AMK'ler için zayıf sonuç vermesinin, elastik özelliklerin tespit edilmesinde daha karmaşık ve kapsamlı yaklaşımların kullanılmasını zorunlu kıldığı vurgulanmaktadır (Akbulut, 1994).

2.5.4.2 AMK'lerde Akma Mukavemeti

AMK'lerin yüksek spesifik elastiklik modüllerinin yanında kullanımlarını önemli kılan bir diğer faktör akma mukavemetidir. Akma mukavemetinin, mühendislik malzemelerinin kullanımlarını belirleyen en önemli özelliklerden biri olduğu iyi bilinmektedir. Akma mukavemeti, plastik uzamanın % 0,2 olduğu noktada ele alınacak olduğunda, birçok sürekli fiber takviyeli AMK malzemenin akma noktasına ulaşmadan kırıldığı ifade edilmektedir. Üretim ve mekanik deney sırasında çok talihsiz bir hata yapılmadıkça, AMK'lerin akma gerilmesi her zaman takviye edilmemiş alaşımdan yüksek olmaktadır. Sürekli fiberli kompozitler için akma gerilmesi de elastiklik modülünde olduğu gibi karışımlar kuralından faydalanılarak elde edilebilmektedir.

Mühendislik uygulamalarında akma gerilmesi bir bakıma malzemenin emniyetli çalışma gerilmesini belirlediğinden, akma gerilmesinin yüksek olması istenmektedir. Bunun yanında, herhangi bir malzeme yüksek sıcaklıklarda kullanılacaksa, akma mukavemetinin yüksek sıcaklıkta bile kararlı kalması tercih edilmektedir. AMK'lerde, takviye fazlarının yüksek elastiklik modülüne sahip olmalarının ve yükleme sırasında deformasyon sergilemelerinin, akma mukavemetinin takviyesiz alaşımlara göre yükselmesinin temel nedeni olduğu ifade edilmektedir. Elastiklik modülü yüksek takviye fazları, birer dispersiyon fazı gibi davranarak, malzemelerde plastik deformasyonun meydana geldiği kayma düzlemlerinde dislokasyonların hareketini kısıtlamaktadır. Böylece AMK'ler, kritik bir yüke kadar takviye malzemelerine benzer deformasyon davranışı sergilemektedirler. AMK'lerde akma mukavemetini artıran bu mekanizmalar, çekme mukavemeti için de geçerli olmaktadır (Akbulut, 1994).

2.5.4.3 AMK'lerde Çekme Mukavemeti

Sürekli fiberlerle takviye edilen AMK'lerin çekme mukavemeti özelliklerinin, elastiklik modülü özelliklerine benzer olarak yük uygulama yönüne bağımlı olduğu vurgulanmaktadır. Karışımlar kuralına göre, sürekli fiber takviyeli AMK'lerin fiberlere paralel mukavemeti (σ_L), (2.6) eşitliğine göre değişmektedir.

$$\sigma_L = V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m \quad (2.6)$$

Eşitlikte, σ_f ve σ_m sırasıyla, fiber ve matrisin mukavemetleridir. (2.6) eşitliği, fiber ve matris metalinin beraber kırıldığı uzama durumları için geçerlidir. Bu eşitlik, fiberin kırılma uzamasının matrisinkinden çok düşük olduğu AMK sistemlerinin çoğu için geçerli olmamaktadır. AMK malzemelerin çoğunda fiberlerin kırılma uzaması matrisinkinden düşüktür ve dolayısıyla karışımlar kuralı eşitliği, aşağıdaki gibi değişmektedir:

$$\sigma_L = V_f \sigma_f + (1 - V_f) \sigma_m^1 \quad (2.7)$$

Bu eşitlikte, σ_m^1 , uygulanan uzamanın kırılma uzamasına (ϵ^1) ulaştığı anda matristeki gerilmeyi temsil etmektedir.

Kısa fiber takviyeli AMK’lerde fiberler, üretim şartlarına bağlı olarak değişik yönlerde yönelmiş ve değişik boyutta olabilmektedir.

AMK’lerde, ilave edilen partiküller veya fiberler, sahip oldukları yüksek mukavemetin yanında, matrisin mikroyapısında da değişikliğe yol açmaktadırlar. Al alaşımlarına ilave edilen takviye malzemelerinin tane incelmeye ve dislokasyon yoğunluğunun artmasına yol açtıkları belirtilmektedir. AMK’lere ilave edilen takviye elemanları aynı zamanda, malzemelerin yüksek sıcaklıklarda da kullanımlarına imkân vermektedir (Akbulut, 1994).

2.5.4.4 AMK’lerin Aşınma Özellikleri

Aşınmanın, bir ‘malzeme’ özelliğinden çok bir ‘sistem’ özelliği olduğu vurgulanmaktadır. AMK’lerin üstün aşınma direncine sahip olmaları için bazı şartlar gerekmektedir. AMK’lerin, aşınma özellikleri bakımından, matris alaşımına göre oldukça üstün olduğu belirtilmektedir (Froyen ve Verlinden, 1994). Aşınma deneylerinin yapıldığı uluslararası bir aşınma deneyi standardı, aşınma cihazı veya bir aşınma metodu bulunmadığından, laboratuarlarda yapılan testlerde; aşındırıcının pozisyonu, boyutu, şekli, sertliği, uygulanan yük ve aşındırma hızı gibi çok sayıda aşınma deneyi türü mevcuttur. Uluslararası alanda kabul gören belli bir aşınma standardı olmamasına rağmen, ASTM ve DIN normları ile sınıflandırılmış dört temel aşınma deneyi türü mevcuttur. Bunlar;

- Hareketli bir çember üzerinde blok (çember: aşındırıcı; blok: numune); ASTM G77.
- Birbirine çapraz dönen silindirler (silindir: aşındırıcı; silindir: numune); ASTM G83.
- Disk üstünde pin (disk: aşındırıcı; pin: numune); DIN 50324.
- Yatay plaka üstünde pin (plaka: aşındırıcı; pin: numune); ASTM G98 (Akbulut, 1994).

2.5.4.5 AMK'lerin Sürünme Özellikleri

AMK'lerde yüksek elastiklik modülüne sahip seramiklerin bulunmasının sürünme ve yorulma dayanımlarını olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir. Sürekli fiberlerle takviye edilmiş AMK'lerde, fiberlerin sürünme sırasında elastik olarak deforme olduğu, matrisin ise üssel ilişkili sürünmeye maruz kaldığı, gerilmelerin matris tarafından fiberlere transfer edildiği ve dolayısıyla sürünme direncinin önemli derecede arttığı ifade edilmektedir. Sürekli fiberlerle takviye edilen AMK'lerde fiber hacim oranının % 10'dan % 40'a çıkmasının, sürünme direncini % 400'ler oranında artırdığı vurgulanmaktadır.

AMK'lerde metallere benzer şekilde sürünme uzaması-zaman eğrisinde üç safhanın da meydana geldiği, ancak kararlı hal sürünmesi süresinin daha yüksek olduğu ifade edilmektedir. AMK'lerde sabit hacim oranlı bir kompozitte sürünmeyi en etkin olarak fiber/matris arayüzey tabiatının etkilediğine işaret edilmektedir. Arayüzey bağının zayıf olduğu AMK'lerde, sürünmede oluşan kayma gerilmelerinin karşılanamamasından dolayı sürünme dayanımının düştüğü belirtilmektedir.

Kısa fiber veya visker takviyeli AMK'lerde sürünme hızının sürekli fiber takviyeli malzemelere göre daha yüksek olduğu belirtilmesine rağmen, matris alaşımına göre oldukça yüksek sürünme dayanımı sağladıkları vurgulanmaktadır.

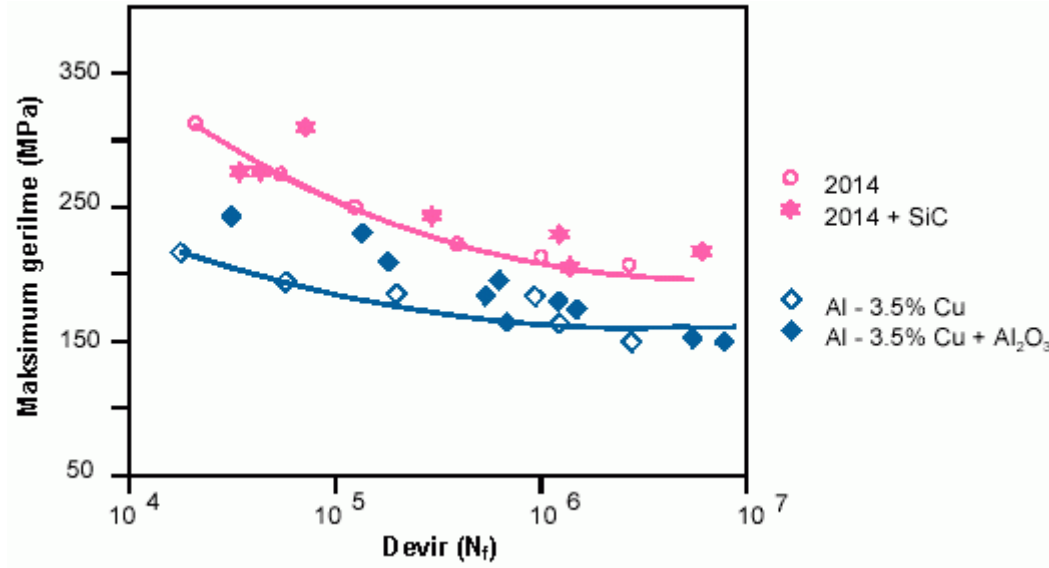
2.5.4.6 AMK'lerin Yorulma Dayanımı

AMK'lerin yorulma davranışı, döngüsel ya da dinamik yüklere maruz kalan mühendislik uygulamalarında çok önemli bir faktördür. Sert seramik partiküllerin katılmasının, takviyesiz rakiplerine göre, özellikle düşük ΔK seviyelerinde, düşük çatlak yayılma oranları verdiği rapor edilmiştir (Uygur ve Külekçi, 2002).

Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde elastiklik modülü değerlerinin yorulmada çok iyi korunduğu, emniyet çalışma gerilmesinin yükseldiği ifade edilmektedir (Akbulut, 1994). Tek eksenli takviye edilmiş kompozitler genellikle, fiber eksenine paralel yüklerde üstün yorulma özellikleri sergiler. Yorulma/çekme dayanımı oranları (10^7 devirde) genellikle 0,55 ila 0,8 arasındadır. Bu, takviye edilmemiş alüminyum alaşımlarının yorulma performansının iki katına çıkması anlamına gelmektedir (Froyen ve Verlinden, 1994).

Süreksiz olarak takviye edilen kompozitlerde ise, takviye, çekme dayanımında artış sağlıyorsa, genellikle, bilhassa düşük devir koşullarında, yorulma dayanımının da arttığı söylenebilir (Şekil 2.4). Bununla birlikte, partikül takviyenin etkisi, partikül boyutuna ve

hacim oranına bağlıdır. Safsızlıkların varlığı ve partikül kümelenmeleri de yorulma dayanımına olumsuz etkide bulunurlar (Froyen ve Verlinden, 1994).



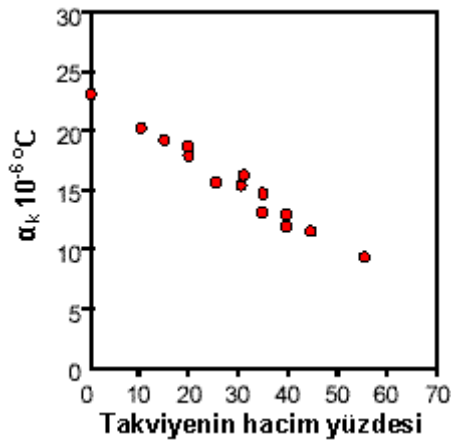
Şekil 2.4 Süreksiz takviyeli AMK'lerin gerilme-devir eğrisi (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.4.7 AMK'lerin Isıl Özellikleri

AMK'lerde ısı genleşme katsayısı (CTE veya α_k), karışımlar kuralından türetilmiş şu formülle yaklaşık olarak hesaplanabilir:

$$\alpha_k = (\alpha_m V_m K_m + \alpha_t V_t K_t) / (V_m K_m + V_t K_t) \quad (2.8)$$

(2.8) eşitliğinde K ısı iletkenliği simgelemektedir.



Şekil 2.5 Al-SiC kompozitlerinde takviyenin yüzde oranına karşılık gelen ısı genleşme katsayısı değerleri (Froyen ve Verlinden, 1994).

Yeterince yüksek hacim oranını verecek takviye kullanıldığında, AMK'lerin ısı genleşme katsayılarının çeliğinki kadar azaltılabileceği ifade edilmektedir (Şekil 2.5). Negatif ısı genleşme katsayılarına sahip karbon veya grafit fiberlerle ısı genleşme katsayıları sıfıra yaklaşan AMK'lerin üretilebileceğine dikkat çekilmektedir (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.4.8 AMK'lerde Kırılma Tokluğu

MMK'lerde istenmeyen tek olumsuz mekanik özelliğin kırılma tokluğu değerlerinin düşmesi olduğu belirtilmektedir. Partiküller çatlakları daha iyi absorbe ettiklerinden, partikül takviyeli kompozitlerde kırılma tokluğundaki düşüş, visker takviyeli kompozitlerdeki düşüşe göre daha alt seviyelerde kalmaktadır (Akbulut, 1994).

Tek eksenli sürekli fiber takviyeli kompozitlerde, karışımlar kuralı, eksenel gerilme durumunda, kırılma dayanımının (σ_k^F) hesaplanmasında kullanılabilir:

$$\sigma_k^F = \sigma_t V_t + \sigma_m V_m \quad (2.9)$$

Eşitlikte σ çekme mukavemetini simgelemektedir.

Süreksiz takviyeli kompozitlerde kırılma mukavemeti tipe, en boy oranına, hacim oranına, takviyenin dağılımına, alaşıma ve alaşımın ısı işlem koşullarına ve fiber-matris bağına bağlı olarak değişmektedir (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.5 AMK'lerde Mukavemet Mekanizmaları

Kompozit malzemelerin mukavemetlerinin artışı üzerine çok sayıda mekanizma ileri sürülmüştür. Mantıksal olarak bu mekanizmaların çoğunda dislokasyon oluşumunun mukavemeti arttırdığı görüşü hâkimdir. 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 (ΔCTE) dolayı dislokasyon meydana gelmiyor demek değildir (Akbulut, 1994). Sürekli fiberlerle takviye edilen kompozitlerde dislokasyon oluşumunun mukavemet artışında birinci derecede etkin olmadığı, mukavemetin matrisin gerilmeleri fiberlere transfer etmesi ile yükseldiği ifade edilmektedir (Akbulut, 1994; Kashyap vd., 2000). Sürekli fiber takviyeli AMK'lerde, mukavemet, artan fiber hacim oranıyla doğru orantılı olarak artmaktadır [6]. Ancak, süreksiz olarak takviye edilen MMK'ler göz önüne alındığında, dislokasyon yoğunluğunda meydana gelen artışın son derece önemli olduğu vurgulanmaktadır (Akbulut, 1994; Kashyap vd., 2000). Tekstür ve kalıntı gerilmelerin kompozit mukavemetini

artırmasının yanında, takviye malzemelerinin matris alaşımının tane boyutunu takviyesiz alaşıma göre birkaç kat düşürerek mukavemeti artırdığı belirtilmektedir.

MMK’lerde potansiyel mukavemet artış mekanizmaları aşağıdaki şekilde özetlenmektedir:

- a) Klasik kompozit mukavemet artışı (yük transferi)
- b) Dispersiyonla mukavemet artışı
- c) Kalıntı elastik gerilmeler
- d) Tekstür farklılıkları
- e) Isıl genleşme katsayıları arasındaki farkın bir sonucu olarak dislokasyon oluşumuna bağlı yüksek dislokasyon yoğunlukları
- f) Yüksek dislokasyon yoğunluğu oluşumunun sonucu olarak küçük alt tane boyutu (Akbulut, 1994).

2.5.6 AMK’lerin Üretim Yöntemleri

AMK’lerin üretiminde kullanılan yöntemler, çeşitli araştırmacılar tarafından, bazı ortak noktalar bulunmakla beraber, bazı farklı başlıklar kullanılarak gruplandırılmaktadır. Katı durum ve sıvı durum yöntemleri, araştırmacıların çoğunda ortak olarak kullanılan başlıklar olarak görülürken (Srivatsan vd., 1991; Akbulut, 1994; Froyen ve Verlinden, 1994; Cayron, 2000; Mortensen vd., 2000; TRC ve ALMMC Consortium, 2002; Surappa, 2003; Naher vd., 2004), bazı araştırmacılar, bu ortak başlıkların yanında, in-situ (yerinde çekirdeklenme) (Akbulut, 1994; Froyen ve Verlinden, 1994), püskürtme (spray) yöntemleri (Froyen ve Verlinden, 1994; Cayron, 2000), buhar durumu yöntemleri (Mortensen vd., 2000), gibi prosesleri ayrı birer kategoride incelemişlerdir. Bu çalışmada ise, üretim yöntemleri, a) katı durum prosesleri, b) sıvı durum prosesleri, c) püskürtme yöntemleri ve d) in situ üretim yöntemleri ana başlıkları altında incelenecektir.

Mevcut üretim yöntemlerinden, sıvı durum prosesleri başlığı altında toplananlar, bazı ayrıntılar dışında, dökümhanelerde yaygın olarak kullanılan yöntemlerle gerçekleştirildiğinden, maliyet yönünden avantaj sunmaktadırlar (Kerti, 1998). Ancak, kompozitin bu yöntemle üretimi, yeniden işlenmesi ve geri kazanımı sırasında takviye malzemesi ile matris malzemesinin yüksek sıcaklıklarda uzun süre teması söz konusudur. Bu durum, takviye malzemesi ile matris malzemesi arasında istenmeyen fazların açığa çıkmasına

neden olmaktadır (Yılmaz vd., 1995). Uygulama çoğu kez seramik partiküllerin sıvı alüminyuma ve alaşımına mekanik yöntemlerle karıştırılması şeklindedir. Ancak, takviye malzemesi olarak seçilen seramik bileşikler, alüminyum tarafından ıslatılamadığından, başarılı bir karıştırma her zaman mümkün değildir. Bunun için, ya sıvı alaşıma ya da seramik partiküllere ıslanma/ıslatmayı geliştirecek şekilde müdahale edilmesi gerekmektedir. Ancak, bu tür ilave işlemler, üretim maliyetlerine de yansımaktadır (Kerti, 1998).

2.5.6.1 Katı Durum Prosesleri

1826 yılında Rusya’da çıkarılan platin paralarla bilinen ilk endüstriyel uygulamasına rastlanılan toz metalurjisi yöntemi [7], AMK’lerin üretiminde kullanılan katı durum prosesleri içinde en yaygın yöntemdir. Toz metalurjisinde, genellikle yüksek ergime derecesine sahip matrisler ile, geniş bir çeşitlilikte matris takviye kompozisyonlarıyla üretimi olanaklı kılmaktadır (Cayron, 2000; Fogagnolo vd., 2004). Toz metalurjisi, sıvı durum proseslerinde meydana gelen segregasyon etkilerini ve gevrek reaksiyon ürünü oluşumunu engeller (Cayron, 2000). Düşük sıcaklıklarda işlem yapılabilirdiğinden, takviye ve matris malzemesi arasındaki etkileşim azdır ve bu, iyi mekanik özelliklerin oluşmasına olanak tanır. Bunların yanında, matris malzemesi olarak herhangi bir alaşımın rahatlıkla kullanılabilmesi, yüksek hacim oranında takviye kullanımının mümkün olması –ki bu kompozitin elastiklik modülünü artırmakta ve ısıl genleşme katsayısını düşürmektedir-, toz metalurjisi yönteminin avantajları olarak öne çıkmaktadırlar. Ancak, yöntemin maliyetinin yüksek olması, bu avantajların karşısındaki en önemli dezavantajı olarak öne çıkmaktadır (Froyen ve Verlinden, 1994; Kerti, 1998).

Bu yöntemde, matris metal tozları ve fiberler beraber karıştırılarak değişik yöntemlerle yoğunlaştırılmakta ve teorik yoğunluğa ulaşmak için sinterlenmektedir (Akbulut, 1994). Temel proses aşamaları şunlardır (Şekil 2.6):

i) Karıştırma, harmanlama (ıslak ya da kuru) ya da matris tozlarıyla takviyelerini mekanik alaşımlama. Bu adımda, üniform takviye dağılımını elde etmek gereklidir.

ii) Gaz giderme. Bu adımda daha çok alüminyum esaslı kompozitlerde, adsorbe edilmiş gazları, suyu ve /veya hidroksitleri uzaklaştırmak için gereklidir. Eğer gaz giderme işlemi düzgün bir şekilde yapılamazsa, ilerleyen aşamalarda hidrojenin varlığı kompozitin özelliklerini oldukça kötü bir şekilde etkileyebilir.

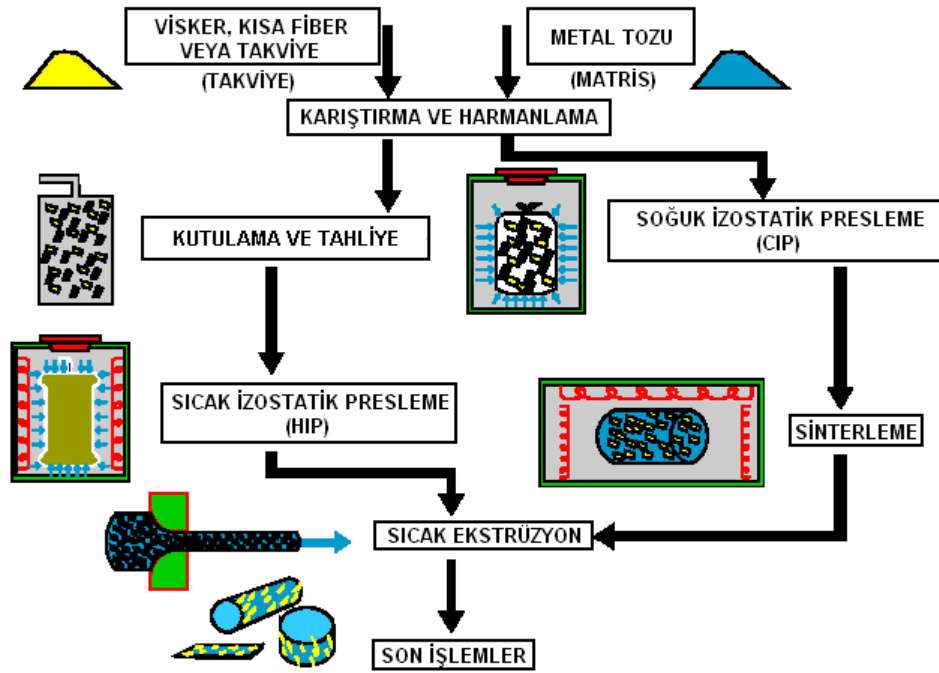
iii) Birleşme. Birleşme aşaması, soğuk ve/veya sıcak presleme, soğuk ve/veya sıcak

izostatik presleme, ekstrüzyon, dövme, enjeksiyon kalıplama, sıcak haddeleme gibi işlemleri içerir (Froyen ve Verlinden, 1994).

Katı durum proseslerinde, toz metalurjisinin dışında, sürekli fiber takviyeli AMK'lerin üretiminde kullanılan difüzyonla bağlama (diffusion bonding), yüksek enerjili şekillendirme (high energy rate forming) gibi çeşitli yöntemler mevcuttur (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.2 Sıvı Durum Prosesleri

Sıvı durum yöntemleri, takviyenin sıvı alüminyuma katılması (dökümden önce ergiyik metal karıştırma) ya da preformun infiltrasyonu (basınç veya vakum infiltrasyonu, dövme döküm) ile gerçekleştirilir. Bu yöntemler basit ve ucuz olmaları, karmaşık üç boyutlu parçaların üretimini olanaklı kılmaları açısından oldukça caziptir. Temel dökümhane teknikleri, süreksiz takviyeli alüminyum kompozitlerinin üretimine kolaylıkla uyarlanabilir. Sıvı üretim yöntemlerinin başlıca dezavantajları, takviyenin alüminyum tarafından düşük ısıtılması, son üründe, çekme, gaz boşlukları gibi döküm hatalarının görünmesi, takviye ile matris arasında tatmin edici dereceye ulaşmayan bağlanma ve/veya takviyenin aşırı reaksiyonla bozunması sayılabilir (Froyen ve Verlinden, 1994).



Şekil 2.6 Toz metalurjik yöntemin üretim aşamaları (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.2.1 Ergiyik Metal Karıştırma Teknikleri

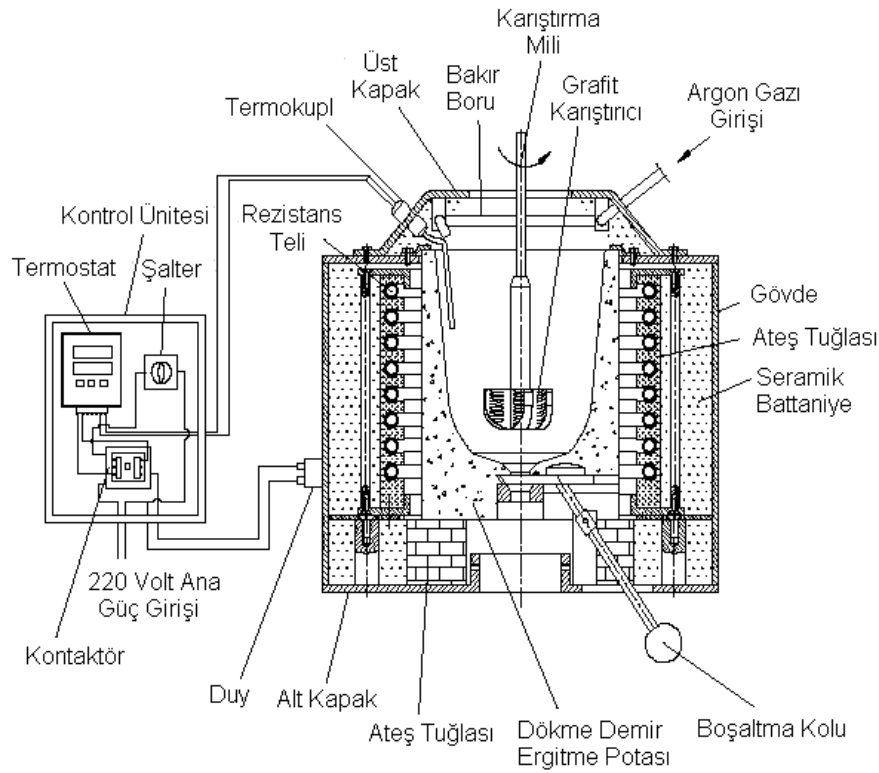
Seramik partiküllerin sıvı alaşıma ilavesi üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur ve bu yöntemler, tek başına kullanılmalarının yanında, diğer döküm yöntemlerinden önce de uygulanabilir (Akbulut, 1994; Froyen ve Verlinden, 1994). Geleneksel karıştırma döküm (stir casting) yöntemi, partikül takviyeli AMK'lerin üretiminde uzunca bir süredir kullanılmaktadır. AMK'lerin döküm teknikleri kullanılarak üretimi üzerinde çokça çalışma yapılmıştır. Bu teknikteki en büyük sorun, takviye fazın sıvı metal tarafından ısıtılmaması ve seramik partiküllerin homojen dağılım göstermemesidir. Bunun yanında, porozite, topaklaşma, oksit kalıntıları ve arayüzey reaksiyonları, döküm teknolojisinde gözlenen istenmeyen durumlardır. Bazı araştırmacılar, partikül takviyeli AMK'leri döküm yoluyla başarıyla ürettiklerini rapor etseler de, kullandıkları yöntemin detaylarını saklı tutmaktadırlar. Karıştırmalı döküm yöntemi, diğer sıvı durum proseslerine göre, özellikle düşük maliyetiyle büyük bir potansiyel oluşturmaktadır (Zhou ve Xu, 1997).

Ergiyik metal karıştırma (Şekil 2.7), partikül takviyeli kompozitler için kolay bir üretim yöntemidir (Froyen ve Verlinden, 1994). Karıştırma, mekanik, elektromanyetik yöntemler ya da gaz enjeksiyonu yoluyla yapılabilir. Yukarıda, karıştırma dökümde sözü edilen sorunlar, tüm ergiyik metal karıştırma tekniklerinde potansiyel bir engel olarak mevcuttur. Ayrıca partiküllerin birleştikten sonra tekrar dağılmaları, mekanik özellikleri kötü etkileyebilir. Bütün bu sorunlar, aşağıdaki gibi teknikler kullanılarak çözülebilir:

- Partiküllerin, bir karıştırıcı vasıtasıyla oluşturulan girdap (vortex) üzerinden eklenmesi,
- Partiküllerin yüzey işlemlerine tabi tutulması ya da matrisin alaşımlanması,
- Karıştırmadan önce partiküllerin ön ısıtılması,
- Ultrasonik ya da elektromanyetik titreşim kullanılması,
- Partikül ve metal matris tozlarının briket ya da pelet olarak katılması (Froyen ve Verlinden, 1994).

Vorteks metodu olarak da anılan, partiküllerin bir karıştırıcı vasıtasıyla oluşturulan girdap üzerinden eklendiği yöntemde, ergitilen metal matrisin içine daldırılan bir karıştırıcı yardımıyla oluşturulan girdap içine seramik takviye malzemeleri kontrollü olarak verilerek kompozit malzeme elde edilir. Bu yöntem, genelde partikül takviyeli AMK'ler için daha uygun olmasına karşın, kısa fiber veya visker takviyeli kompozitlerin üretilmesi de mümkündür. Bunun, AMK üretim yöntemleri içinde en ucuz ve en kolay yöntem olduğu belirtilmektedir. Ancak, azımsanmayacak ölçüde dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle, karıştırma ve ilavelerin kontrollü atmosferde yapılmasına gerek duyulmaktadır. Proses

değişkenlerinin iyi kontrol edilmediği durumlarda porozite oranı % 30'lara kadar çıkabilmektedir. Vorteks metodu içine kompozit döküm işlemini de almak mümkün olabilmektedir. Sıvı-katı aralığında şiddetli bir şekilde karıştırılan alaşım, bünyesinde % 60 kadar sıvı içerdiği durumda, karıştırma sebebiyle dendrit kolları kırılarak alaşımın akışkanlığı artmakta ve bu durumda seramik takviye elemanları alaşıma verilmektedir. Seramik fiber veya partiküllerin alaşıma ilave edilmesinden sonra alaşım ya yarı sıvı halde veya reodökümde olduğu gibi geleneksel döküm sıcaklığına çıkarılıp döküm gerçekleştirilmektedir. Sistemin en önemli dezavantajı sıkıştırma dökümdeki gibi basınç altında katılaştırmaya gereksinim duymasıdır. Aksi halde yüksek oranlara varan poroziteli malzemeler elde edilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir (Akbulut, 1994).

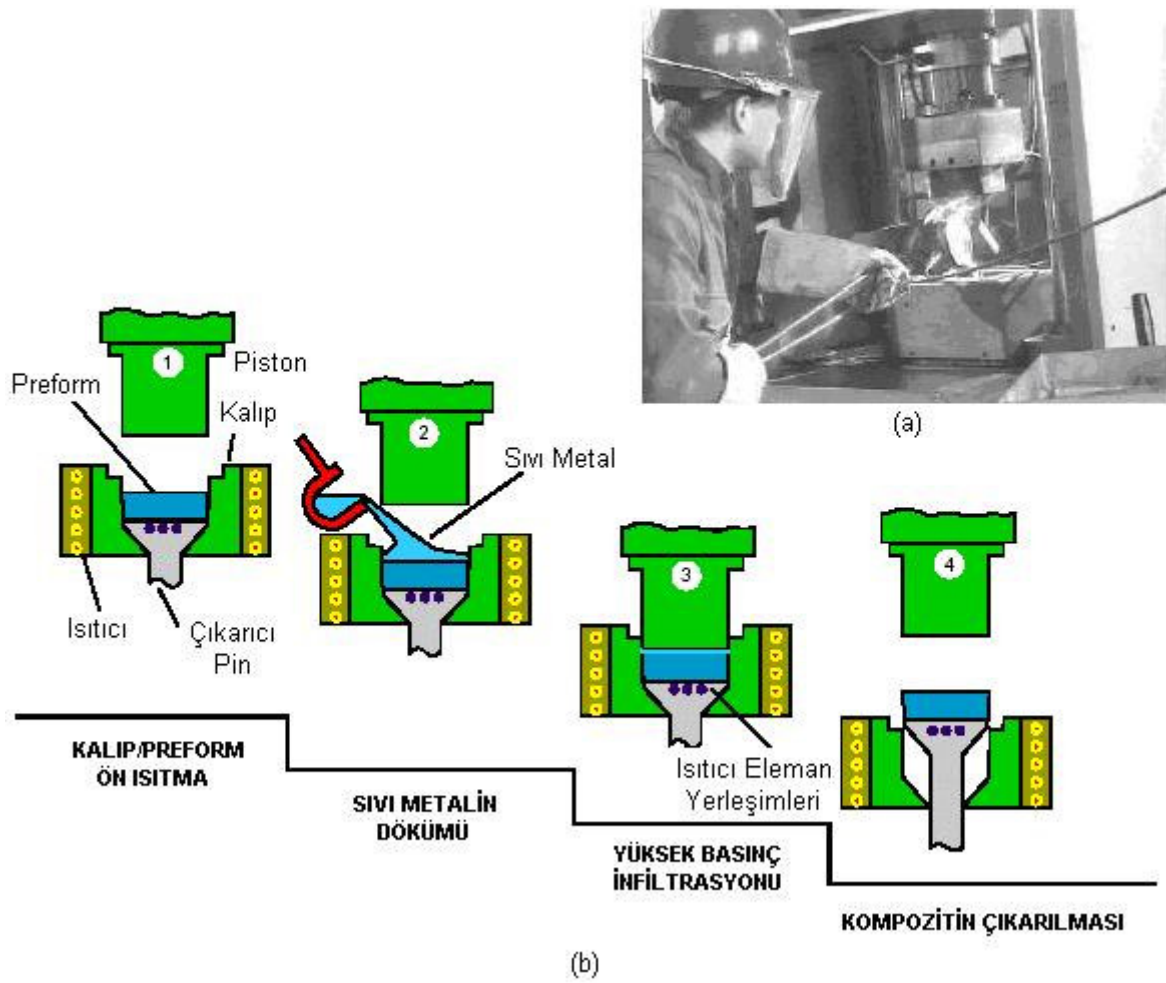


Şekil 2.7 Ergiyik metal karıştırma yöntemiyle AMK üretmek için tasarlanan elektrikli dikey ergitme fırını, karıştırıcı ve kontrol ünitesinin şematik gösterimi (Sur vd., 2005).

Başlıcalarına yukarıda değinilen ergiyik metal karıştırma teknikleri içinde, pelet yöntemi olarak da bilinen, sıvıya küçük briketlerin ilavesi ve ardından şiddetli olarak karıştırılmasıyla gerçekleşen yöntemler de bulunmaktadır. Bunun yanında, santrifüj ile partiküllerin sıvı alaşıma dispersiyonu, sıvı ultrasonik olarak titreştirilirken partiküllerin enjeksiyonu gibi yöntemler de bu kategoride anılmaktadır (Akbulut, 1994).

2.5.6.2.2 Sıkıştırma (Dövme) Döküm

Sıkıştırma döküm, AMK'lerin üretiminde popüler bir yöntemdir (Froyen ve Verlinden, 1994). Yöntem, metalin basınç altında katılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu yöntemle hemen hemen her tipte takviye malzemesi kullanılarak kompozit malzeme üretiminin mümkün olduğu vurgulanmaktadır (Akbulut, 1994). Ayrıca, sıkıştırma dökümün, basınçlı döküm ve şekillendirme proseslerini birleştirdiğine ve nispeten düşük maliyetle ve yüksek üretim hızlarında (>5 dakika/AMK döküm) üretimi olanaklı kılmasına da dikkat çekilmektedir (Cayron, 2000). Bunların yanında yöntem, iyi yüzey özellikleri vermektedir (Froyen ve Verlinden, 1994).



Şekil 2.8 (a) Süreksiz takviyeli AMK'lerin sıkıştırma döküm yöntemiyle üretiminde kullanılan düzenek ve sıvı metal dökümü aşamasını gösteren fotoğraf (Cayron, 2000) ve (b) proses aşamalarının şematik gösterimi (Froyen ve Verlinden, 1994).

Sıkıştırma döküm yönteminde, takviye malzemesi bir kalıp içine yerleştirilmekte ve döküm sıcaklığına çıkarılmış sıvı metal belli bir sıcaklığa ısıtılan takviye malzemesi (partikül, fiber) üzerine dökülmektedir. Ardından, katılaşma tamamlanıncaya kadar sıvı metal üzerine yüksek

miktarda basınç uygulanmaktadır (Şekil 2.8). Basınç altında katılaştırma ile takviye malzemesi ile matris metali arasında arayüzey bağ mukavemetinin oldukça olumlu yönde etkilendiği vurgulanmaktadır.

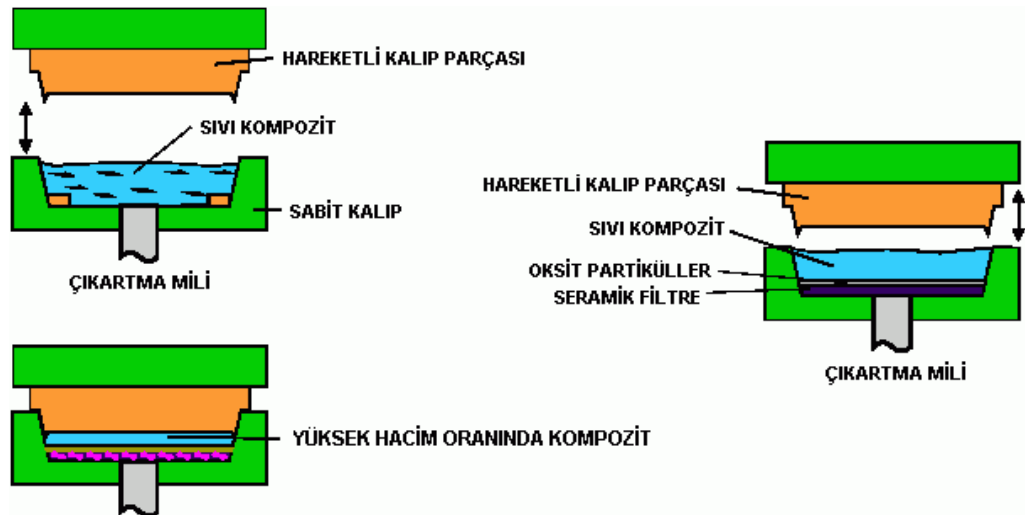
Sıkıştırma döküm, geleneksel döküm yöntemlerine göre daha fazla basınca gereksinim duymaktadır. Fiber ve matris arasındaki sürtünme kuvvetlerini ve kapiler etkileri yenmek için 70–150 MPa arasında basınç uygulanması gerekmektedir (Akbulut, 1994; Froyen ve Verlinden, 1994). Sıkıştırma döküm, tek yönlü basınç infiltrasyonudur. Farklı takviye türleri kullanılabilir. En yaygın olanı preformların kullanılması olsa da, ön karışım (premix) veya pelet de kullanılabilir. İnfiltrasyon oranı, uygulanan basınca, kapilariteye, dağılmış partiküller (viskerler) arasındaki boşluğa, sıvı metalin viskozitesi, preform geçirgenliğine; kalıp, preform ve ergiyiğin sıcaklığına bağlıdır (Froyen ve Verlinden, 1994).

Katılma süresince uygulanan basınç sayesinde ince taneli, porozitesiz ve pürüzsüz yüzeye sahip malzemeler elde edilebilmektedir. Yüksek basınca gereksinim duyulduğundan, parçanın boyutu sınırlayıcı bir faktördür. Bir diğer sorun ise, yine yüksek basınçtan dolayı takviye malzemelerine mekanik bir hasar verme ihtimalinin var olmasıdır (Akbulut, 1994). İyi mekanik özellikler verecek sağlam yapıyı elde etmek için ergiyiğin aşırı ısınması ve ön ısıtma sıcaklığı gibi parametreler kontrol ve optimize edilmelidir. Parametrelerin optimizasyonu; analiz, simülasyon ve tüm infiltrasyon ve katılma prosesinin modellenmesi ile sağlanabilir. Laboratuarlardan endüstriye kadar, sıkıştırma döküm proseslerinde, vuruş kontrollü basınçlı döküm makineleri vasıtasıyla karmaşık AMK dökümleri başarıyla yapılabilmektedir (Cayron, 2000).

2.5.6.2.3 Basınçlı Döküm

İyi bilinen bu yöntem (Şekil 2.9), partikül ve viskerlerin, hızlı soğuma oranı sebebiyle, homojen dağılım gösterebilmesiyle karakterize edilmektedir.

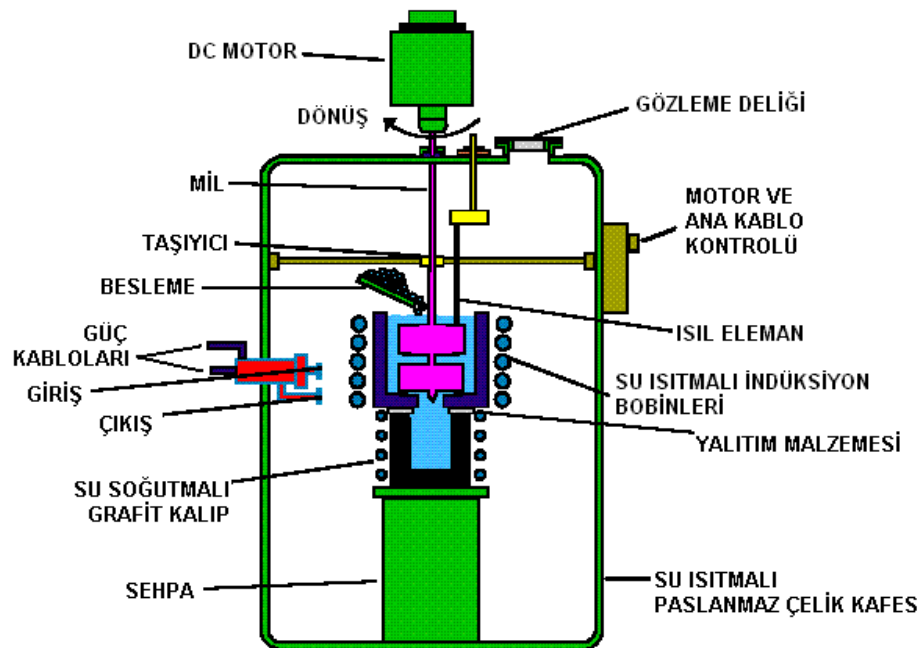
AMK'lerin üretiminde, düşük basınçta basınçlı döküm yöntemi de uygulanmaktadır. Bu yöntem, büyük ölçüdeki şekilli parçaların üretimi için uygun bir yöntemdir. Katılma zamanı kısadır, döküm hatalarının miktarı azdır ve takviye hacmi yüksek olabilir. Uygulanan basınç genellikle 15 MPa'nın altındadır (Froyen ve Verlinden, 1994).



Şekil 2.9 Süreksiz takviyeli AMK’lerin basınçlı döküm yöntemiyle üretiminin şematik gösterimi (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.2.4 Reodöküm

Reodöküm (Compocasting veya Rheocasting) yönteminde (Şekil 2.10), partikül veya kısa fiber takviyeler, çalkalanan ve kısmen katılaşmış alüminyum bulamaca (slurry) katılır (Froyen ve Verlinden, 1994). Böylece, takviyeler, bir segregasyon göstermeksizin matrise katılmış olur.



Şekil 2.10 AMK'lerin reodökümünün şematik gösterimi (Froyen ve Verlinden, 1994).

Devam eden karıştırma ile, ağdalı (viskoz) yapı, düşük ağdalı, dentritik olmayan bulamaca dönüşür. Bu, matris metali ile takviye fazı arasında karşılıklı etkileşim oluşmasıyla sonuçlanır ve iki faz arasındaki ıslatma ve bağlanmanın artmasını sağlar (Ejiofor ve Reddy, 1997).

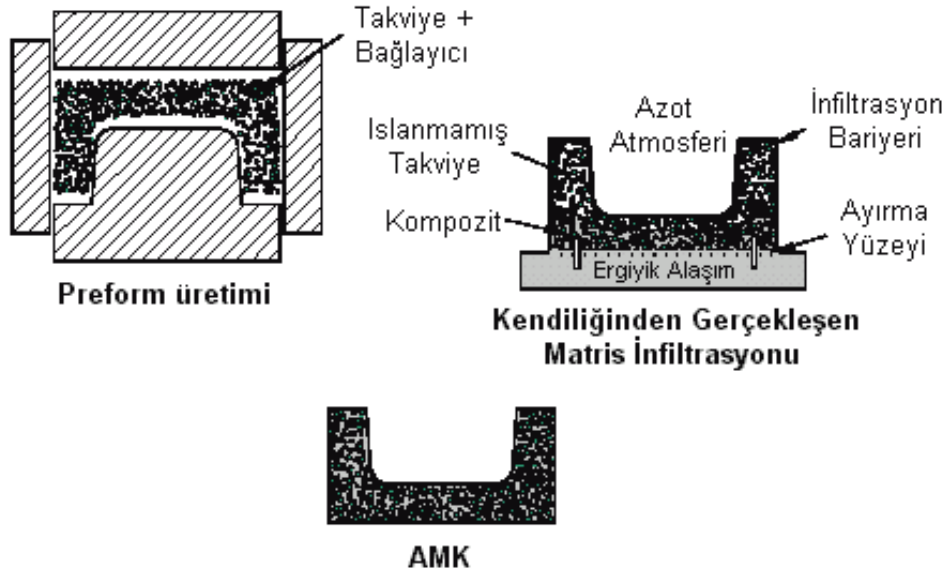
2.5.6.2.5 Sıvı İnfiltrasyon Yöntemi

AMK'lerin üretiminde kullanılan farklı yöntemlerden biri de sıvı infiltrasyon yöntemidir (Şekil 2.11). Bu yöntem, sürekli fiber veya kısa fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanıldığı gibi, partikül takviyeli AMK'lerin üretiminde de verimli bir şekilde uygulanmaktadır (Akbulut, 1994). Diğer pek çok üretim yönteminin yanında, sıvı infiltrasyon yönteminin çokça tercih edilmesinin ana nedenleri arasında yöntemin verimliliği, düzgün şekilli parçaların üretime imkan vermesi ve yüksek üretim kalitesi ön plana çıkmaktadır (Peng vd., 2000).

Sıvı infiltrasyon yöntemi, inert bir gaz kullanılarak ilk kez ALCOA tarafından denenmiştir. Orijinal çalışmalarda, vakum altında çalışan bir fırına, tabanında seramik bir preform bulunan bir potaya sıvı metal dökülüp, üzerine inert bir gazla basınç uygulanarak infiltrasyon gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda da özellikle MIT'de (Massachusetts Institute of Technology) yapılan araştırmalarda, infiltrasyon işleminde üretim prosesi değişkenlerinin detayları araştırılmış ve yöntem daha da geliştirilmiştir. Ayrıca prosesin kontrolü, kompozit malzemenin nihai özelliklerinin, üretim ve katılma şartlarına göre değişimleri araştırılmıştır. Sıvı infiltrasyon yöntemiyle AMK üretiminde karşılaşılan en önemli dezavantajlar; a) birbirine çok yakın olan fiberlerden dolayı çok küçük boşluklara metalin nüfuz edememesi, b) fiber/matris arayüzeyinde metallerarası bileşiklerin oluşması, c) bazı durumlarda fiberlerin matriste homojen dağılımlarının bozulması olarak sıralanabilir.

İnfiltrasyonun, mümkün olabilecek en kısa sürede tamamlanması gerekmektedir. Bu da ancak dışarıdan uygulanan basıncın, seramik preformdaki fiberler arasındaki kapiler (kılcal) basıncı yenebilecek derecede yüksek olarak seçilmesiyle sağlanabilmektedir. Ancak, infiltrasyon yöntemiyle kompozit üretiminde uygulanacak basınç miktarının yanında, temel olarak metal ve kalıp sıcaklığı gibi iki önemli değişkenin de kontrol altına alınması gerekmektedir. En uygun üretim şartı, seramik malzemelerin ısıtılabilmesini sağlayacak minimum kalıp ve metal sıcaklığında çalışmaktır. Çok yüksek sıcaklıklarda fiber ve matris arasında kontrol edilemeyecek ölçüde reaksiyonlar meydana gelmektedir. Bu reaksiyonlar da arayüzeylerde kompozit özellikleri açısından yıkıcı etkilere yol açan kırılmalı izole tabakaların oluşumuna yol açmaktadır.

atmosferi altında üretimi şematik olarak gösterilmiştir.



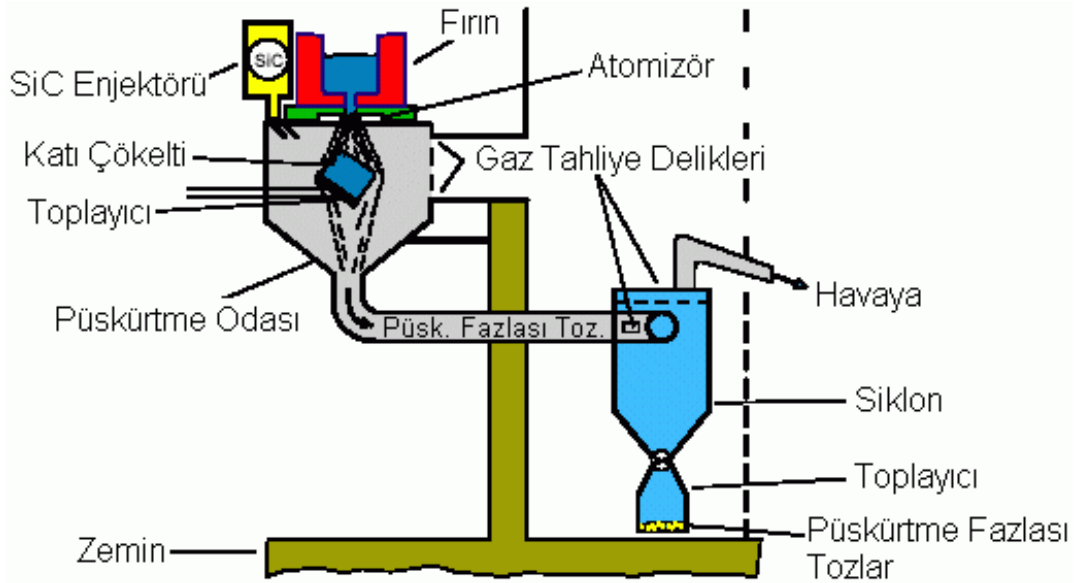
Şekil 2.12 Basıncsız infiltrasyon yöntemiyle AMK üretimi [8].

2.5.6.3 Püskürtme (Sprey) Yöntemleri

Püskürtme yöntemlerinde, sıvı metal damlaları ve takviye partikülleri, çıkarılabilir bir alt tabakaya (substrate) uygulanmaktadır. Matrisin hızlı katılaşması sebebiyle kazanılan mukavemet artışı ve takviye ile matris arasındaki reaksiyon süresinin kısılması, püskürtme yöntemlerinin üstünlükleri olarak gösterilmektedir. Bunun yanında, toz metalurjisi yöntemlerinde tipik olarak uygulanan harmanlama gibi kademelerin kaldırılmış olması, yöntemin bir diğer avantajıdır (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.3.1 Osprey Yöntemi

Osprey Prosesi, sıvı alüminyumun, tek aşamada, yoğun, iyi tane yapısına sahip, % 0,2–2,0 arasında poroziteye sahip ve homojen bir ürüne dönüştürüldüğü bir tekniktir. Alaşım, indüksiyon ocağında, argon gazı altında ertitilir ve yüksek hızlı nitrojen gazıyla atomize edilir. Osprey Prosesi'nin konvansiyonel toz metalurjisi tekniklerine göre üstünlüğü, atomizasyon ile birleştirme arasındaki birçok ara kademeyi kaldırarak üretim maliyetlerini düşürmesidir (Butzer, 1999).

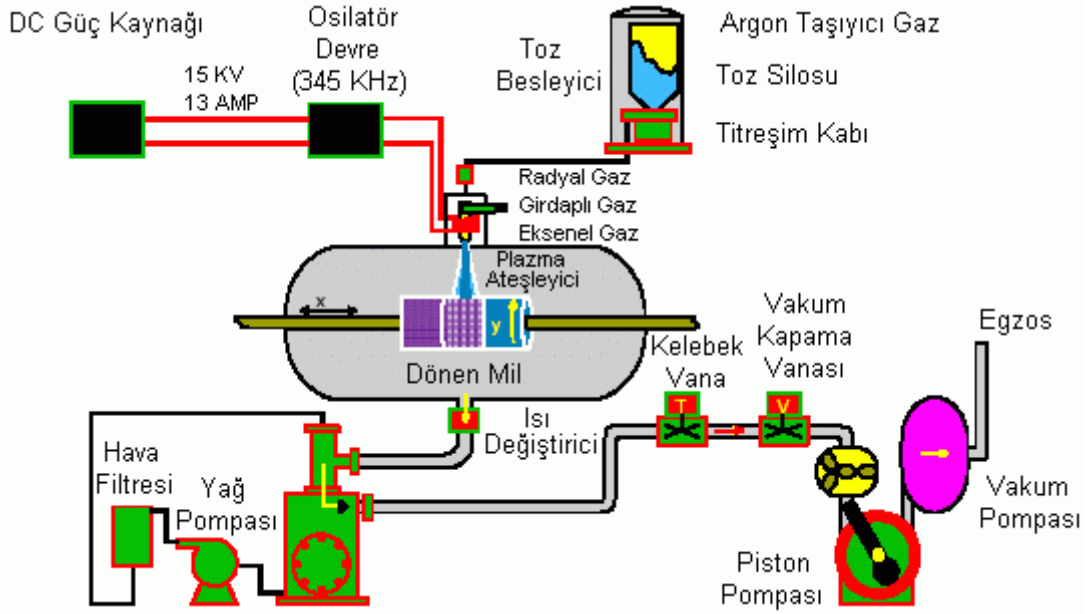


Şekil 2.13 Partikül takviyeli AMK'lerin üretimine uyarlanmış olan Osprey yönteminin şematik gösterimi (Froyen ve Verlinden, 1994).

İngiltere'de bulunan Osprey Metals Ltd. tarafından geliştirilen bu yöntem, partikül takviyeli AMK'lerin üretimine uyarlanabilmektedir. Yöntemde, ana üretim adımları, gaz atomizasyonuna benzer şekilde ergiyik damlaların oluşturulması ve püskürtme yönünde bulunan soğutulmuş alt tabakaya çarptırılmasıdır (Şekil 2.13). Takviye partiküller, atomize olmuş spreye direkt olarak enjekte edilebilir. Elde edilen yapı iyi bir tane yapısına sahiptir (genelde 15 μm) ve teorik yoğunluğun % 95-98'indedir. 100 kg'lık ingotlar ya da daha çeşitli malzemeler, bu yöntemle başarıyla üretilebilmektedir. Bu yöntem sonunda elde edilen yarı mamuller, ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi sıcak işleme yöntemleriyle şekillendirilebilmektedir (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.3.2 Düşük Basınç Plazma Çöktürmesi

Alüminyum toz ve takviye, düşük basınç plazmaya yüklenir. Plazmada, matris, ergime derecesinin üzerine ısıtılır ve hızlı hareket eden plazma gazlarıyla hızlandırılır. Ardından bu damlalar, takviye partikülleriyle birlikte alt tabakaya püskürtülür (Şekil 2.14).



Şekil 2.14 Partikül takviyeli kompozitlerin üretimi için kurulan plazma spray tesisinin şematik gösterimi (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.4 In Situ Üretim Yöntemleri

Takviye fazın ergiyik malzeme içerisinde çekirdeklendiği yöntemler olarak tanımlanan in situ üretim yöntemleri, ekonomik ve teknik açıdan önemli avantajlar sağlamaktadır. In situ üretim yöntemlerinde, partikül miktarının ve şeklinin kontrol edilmesi mümkündür. Bu durum, kompozit malzemenin özelliklerinin iyileşmesine olanak tanır. Diğer üretim yöntemlerinde görülen ıslatılabilirlik problemi ve matris ve takviye faz arasındaki arayüz uyumsuzluğu, bu yöntemde görülmemektedir. Ergiyik bileşimi ve reaksiyon kimyası kontrol edilerek karbürler, nitrürler, oksitler, borürler ve silikatlar oluşturulabilmektedir. Başlangıç fazlarına bağlı olarak reaksiyonlar genellikle gaz-sıvı, sıvı-katı ve sıvı-sıvı olarak kategorize edilebilir. Düşük ve yüksek sıcaklık alaşım sistemlerinde ergiyik faz içinde çekirdeklenecek oluşan takviye fazın bulunması, ana alaşım malzemesinin dayanımını ve elastiklik modülünü olumlu yönde etkilemektedir. Diğer bir faydası da, yüksek sıcaklık performansını artırmasıdır (Kerti, 1998).

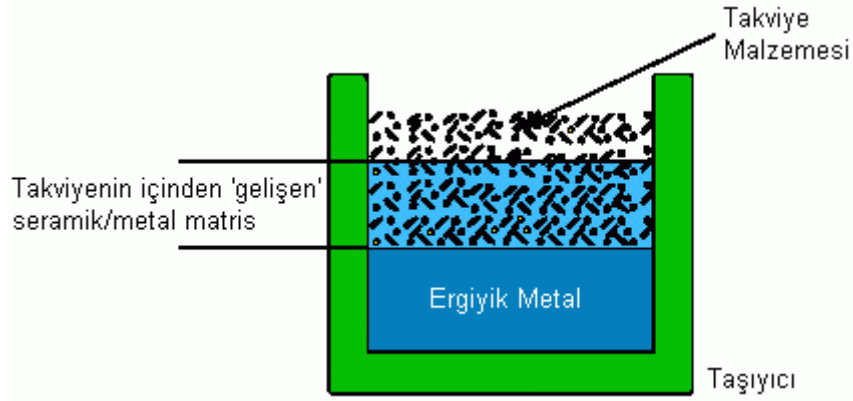
Genellikle, süreksiz takviyeli metalik ya da intermetalik takviyeli in-situ kompozitlerinde takviye boyutu 0,5–5 μm arasında; hacim oranı ise % 0–50 arasındadır. In- situ kompozitlerinin, diğer yöntemlerle üretilen süreksiz takviyeli metal-seramik kompozitlere göre avantajları şöyle sıralanabilir (Aikin, 1997):

- Küçük tane boyutu, yüksek mukavemet, yüksek yorulma ve sürünme direnci sergilemesi,
- Küçük, tek kristal takviyelere sahip olması,

- Temiz, oksitlenmemiş partikül-matris arayüzeylerine sahip olmaları ve arayüzey mukavemetlerinin yüksek olması; ıslatılabilirliğin artması,
- Termodinamik açıdan stabil partikülleri içermeleri ve buna bağlı olarak kaynak yapılabilir ve dökülebilir olmaları, artan sıcaklıklarda yapılarını koruyabilmeleri,
- Daha iyi partikül boyutu dağılımına sahip olmaları ve bunun da mekanik özelliklere olumlu etkide bulunması,
- Daha düşük maliyetli ve konvansiyonel ekipmanla üretime olanak tanınmaları.

2.5.6.4.1 Lanxide Yöntemi

Lanxide Corporation tarafından geliştirilen Lanxide Yöntemi (Şekil 2.15), metal-seramik karışımlar elde etmek için (örneğin Al-Al₂O₃ ya da Al-AlN) ergiyik alüminyum alaşımlarının, dıştan kontrollü oksidasyonunu ve nitrasyonunu gerektirir. Diğer takviyeler de (örneğin Al₂O₃ fiberler, TiB, B₄C) sıvı alüminyuma eklenebilir (Froyen ve Verlinden, 1994).



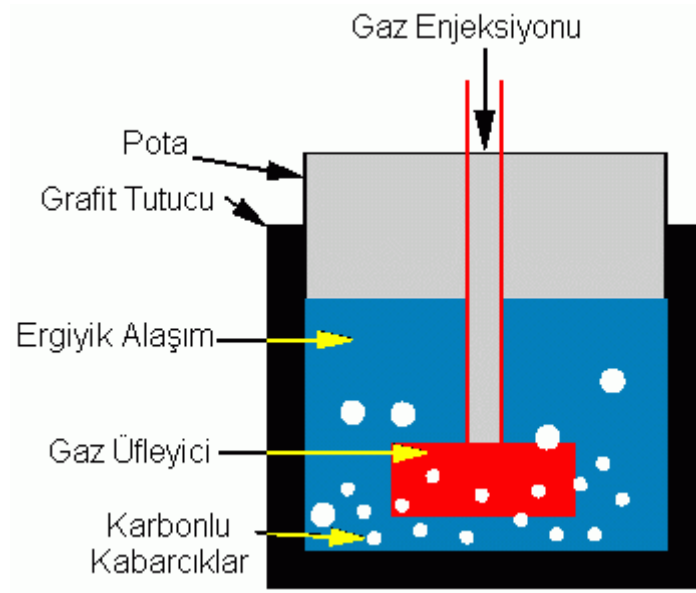
Şekil 2.15 Lanxide Yöntemi'nin prensibinin şematik gösterimi (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.4.2 XD-Yöntemi

Martin Marietta Corporation tarafından patenti alınan XD-Yöntemi'nde, seramik ve metal tozu harmanı, genellikle metalin ergime derecesinin üzerinde bulunan reaksiyon sıcaklığına ısıtılır. Bileşenler birbirleriyle reaksiyona girer (tercihen egzotermik) ve matrisin içinde yeni bir seramik faz oluşur (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.6.4.3 Sıvı, Katı ya da Gaz Reaksiyon Veren Yöntemler

Sıvı, katı ya da gaz reaksiyon veren yöntemler olarak tanımlanan yöntemlerde, kontrollü sıvı alaşım-gaz ya da sıvı alaşım-katı reaksiyonları, alüminyum matriste karbür, nitrür veya borür partiküllerin oluşmasına olanak tanımaktadır (Şekil 2.16) (Froyen ve Verlinden, 1994).

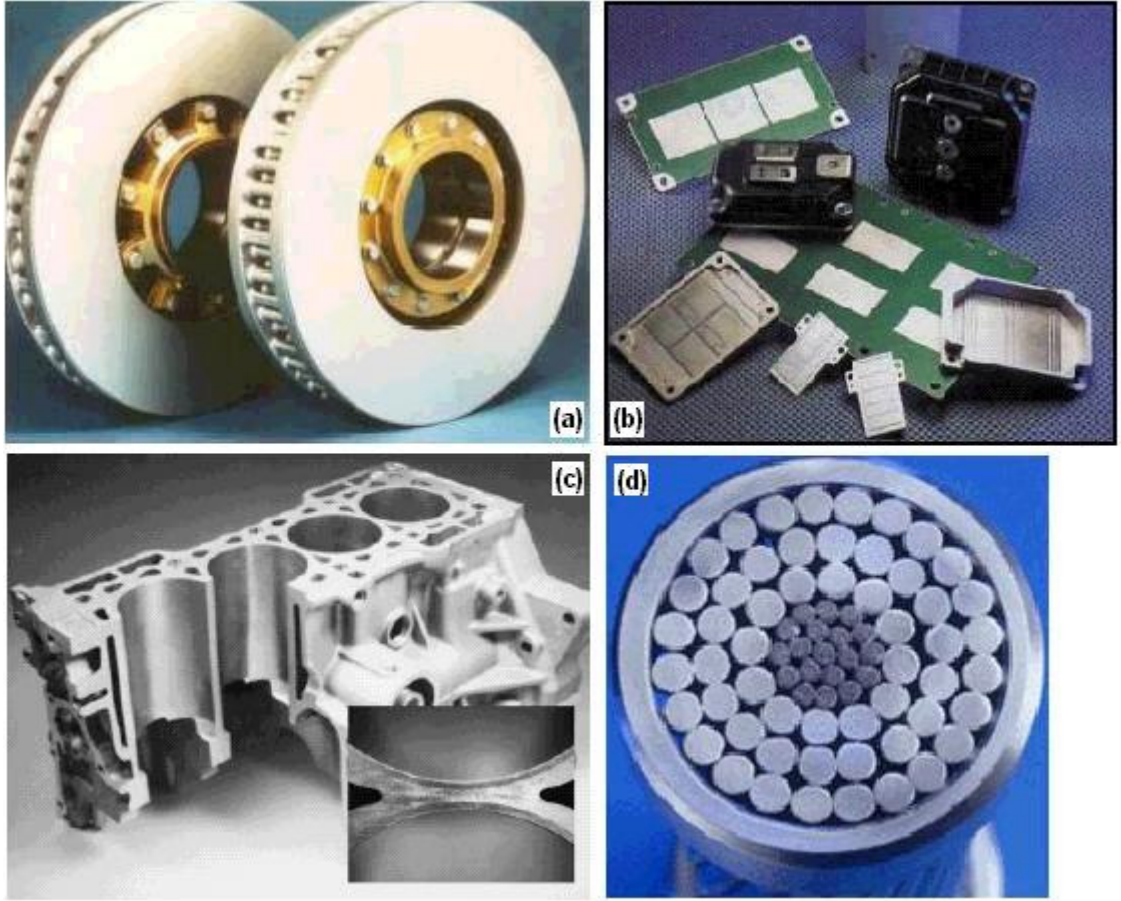


Şekil 2.16 AMK'lerin üretiminde kullanılan gaz reaktanlarla in situ yöntemi (Froyen ve Verlinden, 1994).

2.5.7 AMK'lerin Mühendislik Malzemeleri İçindeki Yeri, Önemi ve Geleceği

Günümüzde AMK'ler, geniş bir çeşitlilikteki uygulama alanları içinde, başarılı bir yüksek teknoloji malzemesi olduğunu kanıtlamıştır (Surappa, 2003). Pazar rakamlarına bakıldığında, AMK'lerin büyük bir oranda -geniş anlamıyla- kara taşımacılığı uygulamalarında kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanında ısı uygulamalar ve diğerlerine göre oranı düşük kalmakla beraber, uzay, havacılık, askeri uygulamalar (TRC ve ALMMC Consortium, 2002), elektronik ve spor malzemeleri sektörlerinde de AMK'ler başarıyla kullanılmaktadır (Şekil 2.17).

Teknolojik uygulamalardaki çalışma ve yakıt masraflarını düşürmek için otomotiv ve havacılık uygulamalarında malzeme ağırlığının düşürülmesi ve bu yolla mukavemet/yoğunluk (spesifik mukavemet) oranlarının artırılması önemlidir. Bu oran, mühendislik malzemelerinin elastiklik modülü, mukavemet, korozyon, oksidasyon, ısı kararlılık, sürünme, aşınma ve yorulma uygulamalarında en önemli parametrelerden biridir. Bununla beraber, seramiklerde olduğu gibi AMK'lerin uygulamaya aktarılmasındaki en önemli dezavantaj, düşük kırılma toklukları ve matris/takviye elemanı arasındaki ısı genleşme farklılıklarıdır. AMK'ler çok sayıdaki yapısal uygulamalar için iyi bir potansiyele sahiptirler; ancak, mukavemet ve elastiklik modülü kazanımının yüksek maliyete üstün geldiği uygulamalar dışında kullanımları sınırlandırılmıştır. Bunun yanında, aşınma dirençleri çok iyi olduğundan, aşınma uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilir. AMK'ler çok sayıdaki yapısal uygulamalar için iyi bir potansiyele sahiptirler; ancak, mukavemet ve elastiklik modülü kazanımının yüksek maliyete üstün geldiği uygulamalar dışında kullanımları sınırlandırılmıştır. Bunun yanında, aşınma dirençleri çok iyi olduğundan, aşınma uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilir.



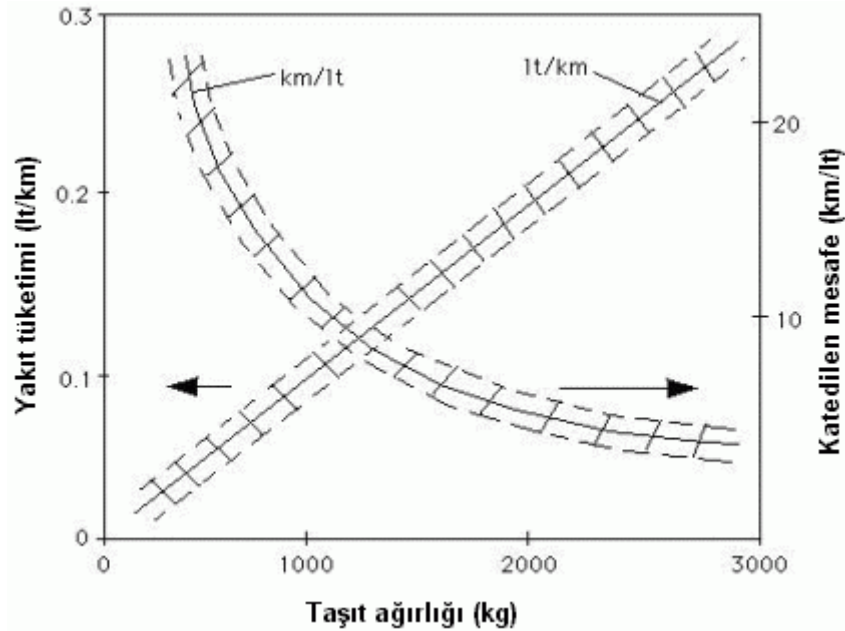
Şekil 2.17 Çeşitli AMK uygulamaları: (a) Yüksek hız trenlerinde kullanılan fren diskleri (Cayron, 2000), (b) Elektronik uygulamalar (Hunt ve Herling, 2004), (c) AMK silindir gömleği (Hunt ve Miracle, 2001), (d) Elektrik iletim hatları [9].

Bu malzemeler büyük bir potansiyele sahip olmasına rağmen, bunların uygulamaya yeterince aktarılamamasının önündeki ana engel, maliyettir. Maliyeti yükselten ana neden ise üretim yöntemlerinin pahalılığı ve bu yöntemler üzerinde istenilen pratiğin henüz kazanılamamış olmasıdır (Akbulut, 1994).

Alüminyumun kendisini bağımsız bir ticari ürün haline getirmesi, otomobilinkiyle aynı zamanlarda, 19. Yüzyıl'ın sonlarında gerçekleşmesine karşın, otomotiv sektörünün ilk yıllardaki malzeme tercihi, ağırlıklı olarak çelikten yanaydı (Kelkar vd., 2001). Otomotiv endüstrisindeki gelişmeler bir süredir, enerji tüketimini ve çevre kirliliğini azaltmak için uygun malzemeleri aramak yönündedir. 1970'den beri, üstün mekanik özellikleri ve düşük ağırlıkları sebebiyle, SiC ya da Al_2O_3 takviyeli Al matrisli kompozitleri üzerinde, dizel motor pistonları, piston segmanları, biyel kolları, çevirme milleri, fren diskleri, silindir gömlekleri gibi alanlarda çalışmalar yapılmaktadır (Lee ve Kang, 2001).

Otomotiv pazarı, büyük ve yüksek teknolojiyi kullanan bir pazardır; ancak maliyetler mümkün olduğunca düşük olmalıdır. Buna rağmen, AMK'lerin kullanılması için pek çok nedenleri vardır. Bunlar şu başlıklarla toplanabilir:

- Motor parçalarının ağırlığının azaltılması (taşıt ağırlığının yakıt tüketimine etkisi Şekil 2.18'de verilmiştir),
- Motorun çalışma sıcaklığının artırılması (Froyen ve Verlinden, 1994),
- Aşınma dayanımının ya da yağlama özelliklerinin artması,
- Mukavemetin artırılması,
- Düşük ısı genleşme katsayılarına sahip olmaları (Kevorkijan, 1999),
- Özellikle süreksiz takviyeli AMK'lerin üretiminde, geleneksel yöntemlere yakın yöntemlerin kullanılabilmesi (Froyen ve Verlinden, 1994).



Şekil 2.18 Taşıt ağırlığının yakıt tüketimine etkisi (Ünal ve Bakkaloğlu, 1988).

Otomotiv sektöründe kullanılan AMK'lerin, bu üstünlüklerin yanında, ön plana çıkan bazı eksik yanları ise ana başlıklar halinde şöyle sıralanabilir:

- Düşük süneklik ve tokluğa sahip olmaları,
- Takviyesiz alüminyum alaşımlarına göre maliyetlerin yüksek olması,
- Bu malzemelerle ilgili tecrübenin az olması,
- Geri dönüşüm konusundaki belirsizlikler (Kevorkijan, 1999).

Havacılık ve uzay uygulamalarında ise, malzemelerden beklenen özelliklerin en başında

hafiflik gelmektedir (Froyen ve Verlinden, 1994). AMK'lerin havacılık ve uzay uygulamalarında tercih edilir olmasındaki ilk etken, diğer malzemelere oranla, spesifik mukavemet ve rijitlik değerleri arasındaki dengenin oldukça iyi olmasıdır. Havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılan süreksiz takviyeli AMK'ler, izotropik özellikler ve bu alanda kullanılan diğer metal alaşımlarına göre % 100 daha fazla rijitlik değerleri sergilerler (Miracle ve Donaldson, 2001).

2.6 Al-B₄C Kompozitleri

B₄C; yüksek sertlik, darbe-aşınma dayanımı ve düşük yoğunluk gibi üstün fiziksel ve mekanik özellikler göstermektedir. Fakat gevrek kırılmaya karşı aşırı hassas oluşu ve yoğun B₄C malzemelerin imalatının zor olması, B₄C'ün endüstriyel uygulama alanları sınırlanmıştır. Bu problemler, Al-B₄C kompozitlerinin üretimiyle önemli oranda azaltılmıştır (Lee ve Kang, 2001).

2.6.1 Takviye Malzemesi: B₄C

Bor mineralleri insanlık tarihi boyunca çeşitli amaçlarla kullanılmıştır. Bor, günümüzdeki çağdaş uygulamalar içinde de, tekstil elyaflarından camlara, nükleer uygulamalardan ileri mknatıslara ve hatta gübrelelere kadar çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [10].

Bor karbür, etkili bir takviye malzemesinden beklenen, özellikle yüksek sertlik (elmas ve kübik bor nitrürden sonra en sert üçüncü malzemedir) ve rijitlik gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin çoğunu gösterdiğinden, alüminyum ve alaşımları için çekici ve talep gören bir takviye malzemesidir (Kennedy ve Brampton, 2001). Bor karbürün ısı kararlılığı çok yüksek değerlerdedir ve kimyasal inertliği çok iyi değerlerdedir (Viala vd., 1999). Bor karbür rombohedral kristal yapısındadır. Yüksek nötron absorpsiyon kesitine sahiptir. Bor karbürün diğer özellikleri Çizelge 2.5'te verilmiştir [11].

B₄C tozları, SiC veya Al₂O₃ gibi aşındırıcı tozlara kıyasla daha yüksek maliyetli olması sebebiyle, B₄C takviyeli AMK'ler üzerinde yapılan araştırmalar nispeten sınırlı kalmıştır (Zhang vd, 2004).

Çizelge 2.5 Bor Karbür'ün başlıca fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer	Birim	Kaynak
Yoğunluk	2,52	g/cm ³	(Akbulut, 1994; Halverson vd., 1989)
Ergime noktası	2420	°C	(Kerti, 1998)
Kaynama noktası	3500	°C	(ETİ HOLDİNG A.Ş., 2003)
Isıl genleşme katsayısı	6,08	10 ⁻⁶ °C ⁻¹	(Kerti, 1998)
Elektriksel özdirenç	0,1-10	ohm.cm (25 °C'de)	[11]
Mukavemet	2800 (75 °F)	Mpa	(Srivatsan vd., 1991)
Elastiklik Modülü	450 (75 °F)	Gpa	(Halverson vd., 1989)

2.6.2 Al- B₄C Kompozitlerinin Döküm Yoluyla Üretimi

Döküm yöntemi, diğer MMK'lerde olduğu gibi, Al- B₄C kompozitlerinde de, düşük maliyetli bir üretim seçeneğini sunmaktadır. Ancak, 1100°C'in altındaki sıcaklıklarda alüminyum ile bor karbür arasındaki düşük ıslanma sebebiyle, bu sıcaklıklarda Al-B₄C kompozitleri, parçacıkları sıvı faz içinde karıştırma yöntemiyle üretim zordur. B₄C partiküllerin alüminyum üzerindeki ıslatabilirliğini artırmak ve sıvı alüminyum ile birleşebilirliğini kolaylaştırmak için, partiküller genellikle ısıtılma işlemine tabi tutulur veya kaplanırlar (Kennedy ve Brampton, 2001).

2.6.2.1 Al- B₄C Arayüzeyi

MMK'lerin birçoğunun üretiminde olduğu gibi, Al-B₄C kompozitlerinin de üretiminde, matris-takviye arayüzeyi kilit rol oynamaktadır. Mukavemet, sertlik, tokluk, yorulma ve sürtünme dayanımları, ısıtılma genleşme katsayısı, ısıtılma iletkenlik gibi özellikler, arayüzeyle yakından ilişkilidir. Eğer bu arayüzey, istenen şekilde düzenlenmezse, kompozitin istenen özellikleri elde edilemez. Arayüzeyle ilgili problemlerin başlıcaları arayüzeydeki kimyasal reaksiyonlar ve takviye malzemesinin matrisi yeterince ıslatamamasıdır (Rajan vd., 1998).

2.6.2.1.1 Al-B₄C Arayüzeyindeki Kimyasal Bağlar ve Reaksiyonlar

MMK'lerde, takviyenin birincil görevi, uygulanan yükün büyük kısmını taşımaktır. İyi ıslanma, döküm yoluyla üretilen AMK'lerde de, arayüzeydeki bağların istenilen şekilde oluşmasının temel koşuludur. Arayüzeydeki güçlü bağların oluşması için iyi ıslanmaya gereksinim duyulur (Shorowordi vd., 2003). MMK sistemlerinde bağ çeşitleri temel olarak mekanik bağ ve kimyasal bağ olmak üzere iki grupta incelenmektedir. Arayüzey bağ dayanımını artırmak için, üretimden önce bazı ön işlemler yapılmaktadır. Bunlar; takviye fazın kaplanması, matris malzemesinin reaktif bir element ile alaşımlanması ve takviye fazın ısıtılmasıdır (Akbulut, 1994; Kerti, 1998).

Kaplama, arayüzeydeki kimyasal reaksiyonları engelleme ve takviye fazının matris malzemesini ıslatmasını artırmak için uygulanan başarılı bir tekniktir (Rajan vd., 1998). Kaplama işleminin ıslatılabilirliği artırmasındaki temel prensip, metal ve seramik arasındaki atom transferini kolaylaştırmak ve metal-seramik etkileşim sistemini metal-metal'e çevirmektir (Kerti, 1998). Kennedy ve Brampton (2001), Al-B₄C üretiminde, B₄C partiküllerini titanyum tozları ile kaplamıştır. B₄C parçacıklarının Ti tozuyla reaksiyona sokulması, karmaşık TiB₂ ve TiC yüzey katmanlarının oluşumu ile sonuçlanmıştır. Bu reaksiyon ürünleri, bağlardaki metalik karakteri artırdığından, partikül ilavesini kolaylaştırmıştır. Kennedy ve Brampton tarafından ayrıca, Al-B₄C kompozitleri üretmek için mekanik karıştırma yerine K-Al-F flakslarının kullanıldığı bir kompozit üretim işlemi geliştirilmiştir. Flaks, ergimiş yüzeyden oksit filmini uzaklaştırarak TiC ve TiB₂ gibi metal karbür, borür ve nitrürlerin dönüşümüne imkân vererek birleşmelerini sağlamaktadır. Arslan vd. (2002) ise, infiltrasyon yöntemiyle Al-B₄C kompozitleri ürettikleri çalışmalarında, B₄C ile Al arasındaki tepkime kinetiğini yavaşlatmak için B₄C tozlarını izopropilalkol ile karıştırdıktan sonra yüzeyleri amorf SiO₂ tabakası ile kaplamışlardır.

Kaplamanın dışında diğer bir yöntem olan matrisin reaktif bir element ile alaşımlanmasında ise amaç, ergiyiğin yüzey gerilimini düşürmek, ergiyiğin katı-sıvı arayüzey enerjisini azaltmak ve kimyasal reaksiyonlar sonucu metal ve seramik malzeme arayüzeyinde bir intermetalik bileşik veya spinel oluşturup atomik ölçüde bağlanmayı sağlamaktır. Takviye fazın kimyasal durumunu değiştirmenin bir diğer yöntemi olan takviye fazın ısıtılmasında ise, üretim öncesinde ısıtılma işlemi uygulanarak oksit olmayan seramik partikül veya fiberlerin yüzeyleri oksitlenerek matris malzemesi ile kimyasal reaksiyona girmesinin sağlanması amaçlanmaktadır (Kerti, 1998).

2.6.2.1.2 Al-B-C Üçlü Sisteminde Oluşan Fazlar

Yapılan araştırmalar incelendiğinde, Al-B-C üçlü sisteminde, en az dokuz faz belirlenmiştir. Bu yüzden, Al-B₄C kompozitlerinin üretimi sırasında, proses şartlarını, istenmeyen fazların oluşumunu engelleyecek şekilde düzenlemek oldukça büyük önem taşımaktadır (Halverson vd., 1989). Viala vd.'nin (1999) çalışmasında, 627-1000°C arasında B₄C ile metalik Al arasındaki kimyasal reaktivite incelenmiştir. Bu aralıkta, B₄C'ün, katı ve sıvı Al ile reaksiyona girdiği görülmüştür. Alüminyumun ergime sıcaklığı olan 660°C'ın altındaki sıcaklıklarda, alüminyum katı halde olduğundan, etkileşiminin çok yavaş olduğu, Al₃BC ve AlB₂ olduğu belirtilmiştir. 660°C ve üzerindeki sıcaklıklarda ise, Al sıvı durumdadır ve reaksiyon oranının hızla arttığı belirtilmiştir. 868 ± 4°C'a kadar, reaksiyon ürünlerinin Al₃BC, AlB₂; 868°C'ın üzerindeki sıcaklıklarda ise Al₃BC sistemde mevcut olmaya devam ederken, AlB₂'nin yerine Al₃B₄₈C₁₂ (β- AlB₁₂) olduğu rapor edilmiştir. Her üç durumda da, etkileşimin aynı mekanizmayla yürüdüğü belirtilmiştir; kuluçka dönemi, alüminyumun B ve C içinde doyması, Al₃BC ve karbonca fakir borun eriyik çökeltide çekirdeklenmesi ve büyümesi ve son olarak B₄C'ün Al₃BC tarafından pasifleştirilmesi.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneylerde, B_4C takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler, K_2TiF_6 flaksı kullanılarak döküm yoluyla üretilmiştir.

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Deneylerde matris malzemesi olarak kullanılan ve kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilen ticari saf alüminyum, Seydişehir Eti Alüminyum’dan temin edilmiştir. Takviye malzemesi olarak ise, Alfa Aesor’dan temin edilen, 3 farklı tane boyutuna sahip (1–7, <10 ve 22–59 μm) B_4C tozu kullanılmıştır. B_4C ’ün Al üzerindeki ıslatılabilirliğini artırmak için ise, Honeywell’dan temin edilen K_2TiF_6 flaksı kullanılmıştır.

Çizelge 3.1 Matris malzemesinin kimyasal kompozisyonu (%).

Al	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Cr	Co
99,78	0,001	0,003	0,009	0,145	0,002	0,001	0,005	0,016	0,027	0,004	0,011	0,000

3.2 Deneylerde Kullanılan Alet ve Cihazlar

Deneylerde, ergitme işlemi Lepel İndüksiyon Fırını’nda (Şekil 3.1) ve grafit potada (Şekil 3.2) gerçekleştirilmiştir. B_4C tozları ile flaksın karıştırılması için bilyeli değirmen ve alümina bilyeler kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri infrared termometre ile yapılmıştır. Dökümler metal kalıba yapılmış ve numuneler şerit testere kullanılarak kesilmiştir. Metalografik incelemeler için numunelerin hazırlanmasında Struers’den temin edilen elmas zımpara ve solüsyonlar kullanılmıştır. Metalografik incelemeler ışık metal mikroskopunda ve JEOL JSM-5410LV ile JEOL JSM-5600 tarama elektron mikroskoplarında (SEM) gerçekleştirilmiştir. Mekanik muayeneler için Vickers sertlik ölçme cihazı, laboratuvar tipi hadde cihazı ve karşı yüklemeli aşınma test cihazı kullanılmıştır.

3.3 Deneylerin Yapılışı

Literatürde, Ti tozlarının, Al- B_4C arayüzeyinde metalik karakteri artırarak partikül ilavesini kolaylaştırdığına dair bilgiler bulunmaktadır. Buradan yola çıkarak, ıslatılabilirliği sağlamak amacıyla, K_2TiF_6 flaksı kullanılmıştır. Flaksın % 50’sinin ergiyiğe karıştığı da göz önüne alınarak, molekül ağırlıklarından yola çıkılarak yapılan hesaplamaların sonunda, katılacak flaksın oranının, B_4C oranına eşit olacağı saptanmıştır.



Şekil 3.1 Ergitmenin yapıldığı Lepel İndüksiyon Fırını.



Şekil 3.2 Dökümlerde kullanılan grafit pota.

Dökümler için, 1–7, <10 ve 22–59 µm tane boyutlarındaki B₄C tozlarının her birinden, % 5, 10 ve 15 oranlarında hazırlanmış, aynı oranda flaksla beraber bilyeli değirmende 3 saat karıştırılmıştır.

Yapılan tüm dökümlerde, matris malzemesi olarak 500 gram ticari saf alüminyum kullanılmıştır. Ergitme işlemi grafit potada, indüksiyon fırınında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan değişik oranlardaki B₄C-flaks karışımı ergiyik haldeki alüminyuma ilave edilmiştir. Toz ilavesinin hemen ardından, Çizelge 3.2’de belirtilen dökümlerde, tozun ergiyik alüminyumun içine geçebilmesi için, seramik kaplı karıştırıcı kullanılarak, el ile kısa süreli karıştırma yapılmıştır. Takviye partiküllerinin ergiyik metal içine homojen dağılımını sağlamak amacı ile sabit sıcaklıkta 5 dakika beklenmiş ve daha sonra döküm sıcaklığına çıkılarak metal kalıba döküm yapılmıştır. Döküm koşulları, Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Deney numuneleri, zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından, mikroyapı karakterizasyonu ışık metal mikroskobu ve tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Döküm parçalarından alınan diğer numunelerle de, sertlik ölçümleri yapılmış; aşınma testlerine tabi tulumuş ve sıcak ve soğuk hadde ile mekanik deformasyon verilerek sertlik oranlarındaki artışlar incelenmiştir. Sıcak hadde işleminde numuneler 470 °C’de 2 saat ısıtıl işlem fırınında tutulmuş; soğuk haddede ise, numuneler 580 °C’de 8 saat tavlandıktan sonra havada soğutulmuş, her iki hadde işleminde de numunelere % 70 oranında deformasyon verilmiştir. Hadde işleminin yapıldığı cihaz ve haddede kullanılan ısıtıl işlem fırını Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.3 Mekanik deformasyondan önce kullanılan ısıtıl işlem fırını.

Çizelge 3.2 Döküm koşulları.

Döküm No	B ₄ C Tane Boyutu (μm)	Ağ. B ₄ C Oranı (%)	Toz Ekleme Sıcaklığı (°C)	Döküm Sıcaklığı (°C)	Karıştırma
1	1-7	5	800	1100	Yok
2	1-7	10	800	840	Yok
3	1-7	15	800	840	Yok
4	<10	5	800	1000	Yok
5	<10	10	800	1100	Yok
6	<10	15	1100	1150	Yok
7	22-59	5	800	840	Yok
8	22-59	10	800	840	Yok
9	22-59	15	800	840	Yok
10	1-7	5	920	1100	Var
11	1-7	10	900	1100	Var
12	<10	5	930	1100	Var
13	<10	10	920	1100	Var
14	22-59	5	930	1100	Var
15	22-59	10	930	1100	Var

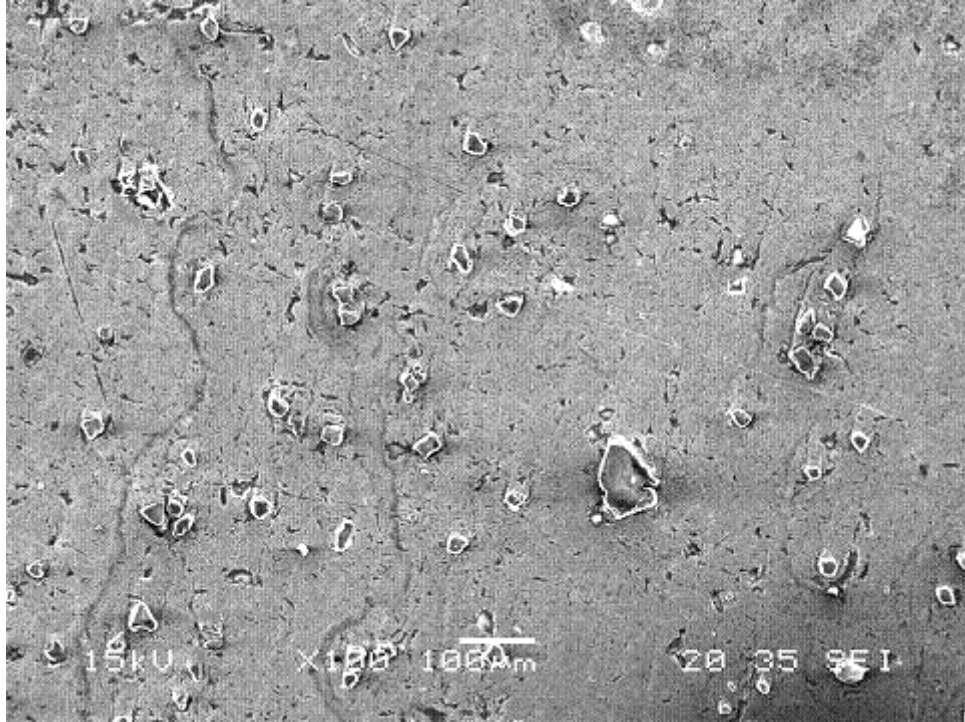


Şekil 3.4 Numunelere mekanik deformasyon vermede kullanılan hadde cihazı.

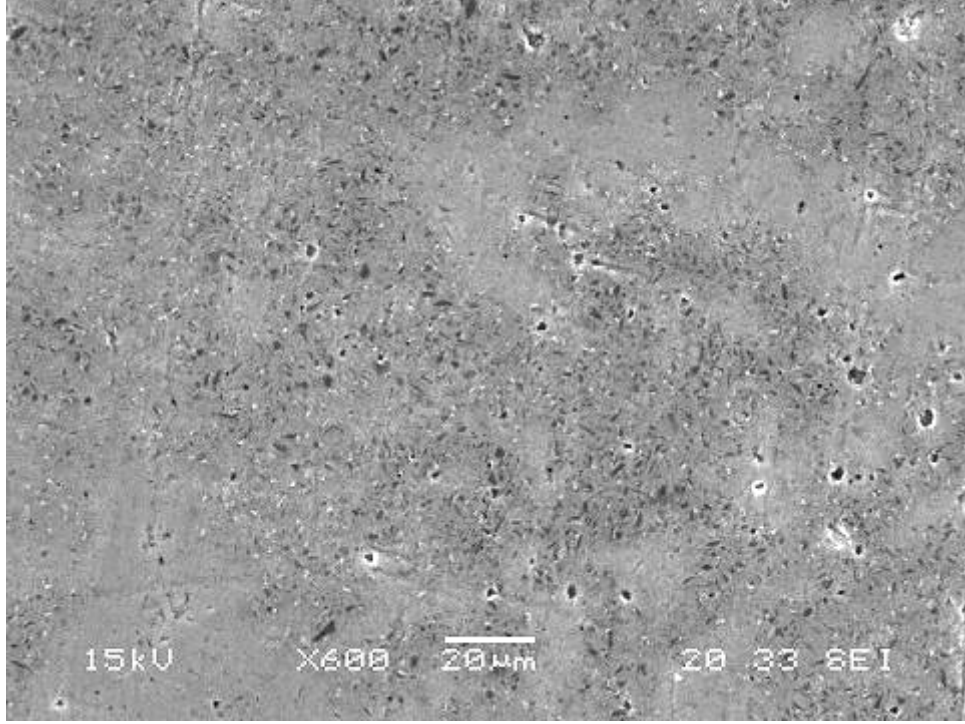
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Al matrisli B_4C takviyeli kompozit malzemelerin döküm yoluyla üretimi, indüksiyon ocağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ergiyik haldeki ticari saf alüminyuma 1–7, <10 ve 22–59 μm tane boyutlarındaki B_4C tozları, ağırlıkça % 5, 10 ve 15 oranında, B_4C ile eşit ağırlıkta flaksla beraber katılmıştır.

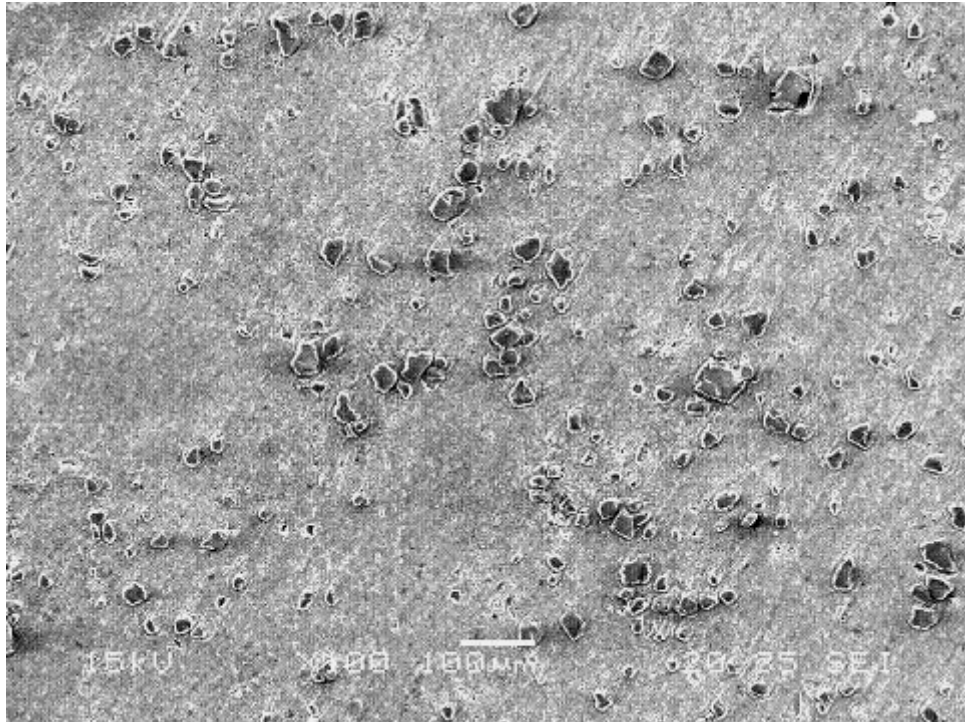
Şekil 4.1–4.10’da, kullanılan çeşitli tane boyutu ve oranlar için verilen mikroyapı görüntülerinde de görülebileceği üzere, takviye malzemesinin yapıda homojen bir şekilde dağıldığı, ancak karıştırma yapılmayan numunelerde (1–9 numaralı numuneler) ilave edilen miktarda yapıya geçmediği tespit edilmiştir. Bunun yanında, küçük tane boyutuna sahip numunelerde (1–7 ve <10 μm), takviye taneleri tüm yapıya dağıtılmasına rağmen, yer yer öbeklenmeler görülmüştür.



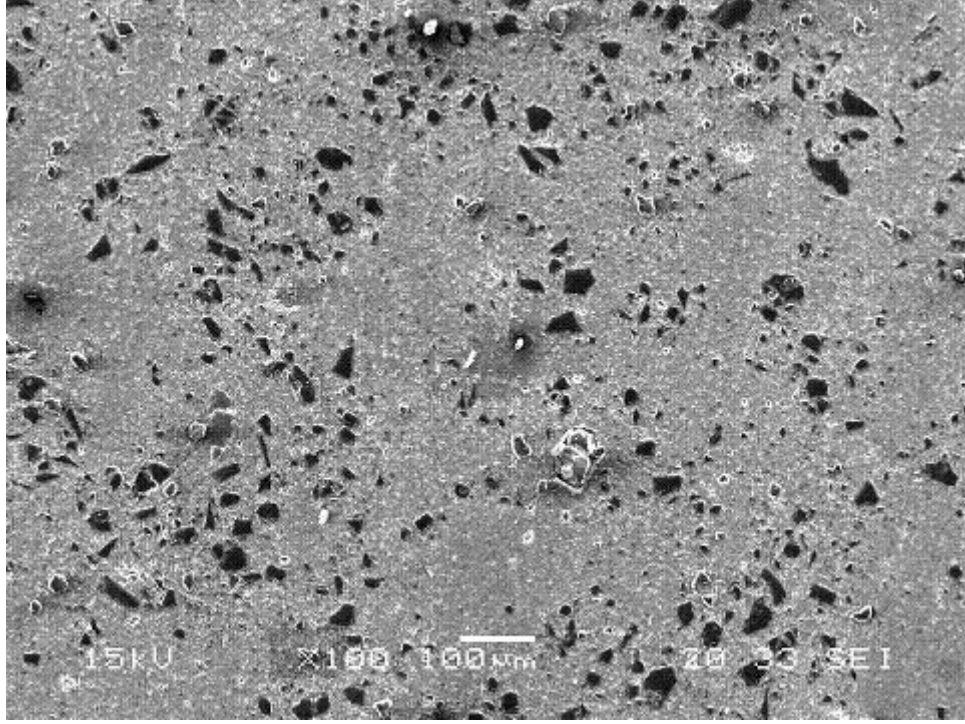
Şekil 4.1 3 numaralı numunenin (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağırlıkça % 15 takviye oranı) SEI modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.



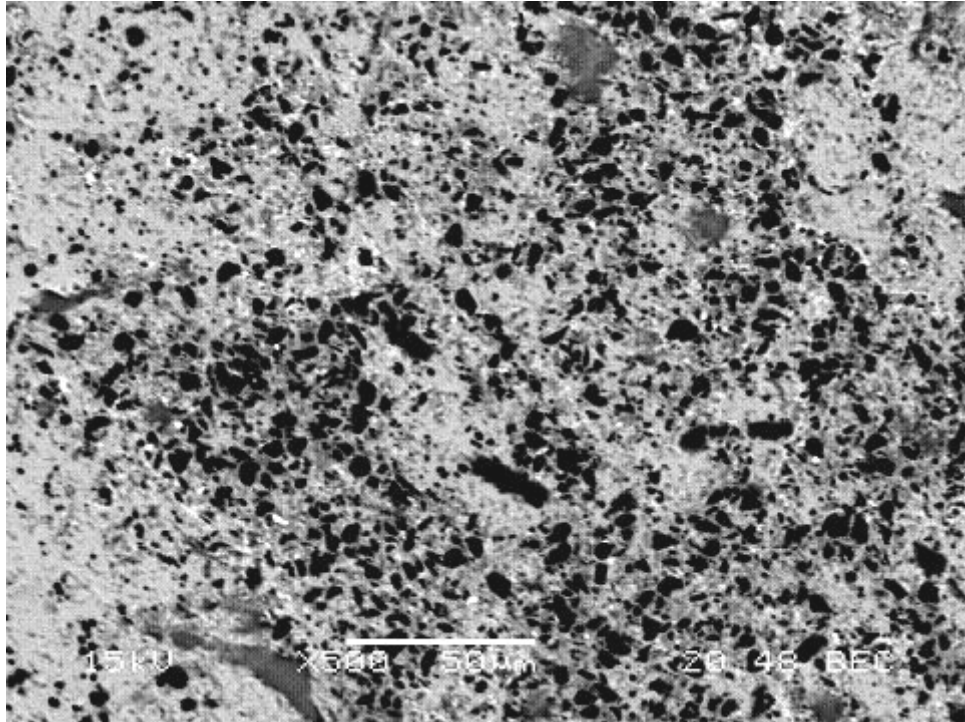
Şekil 4.2 5 numaralı numunenin (<10 µm B₄C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) SEI modunda alınan x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.



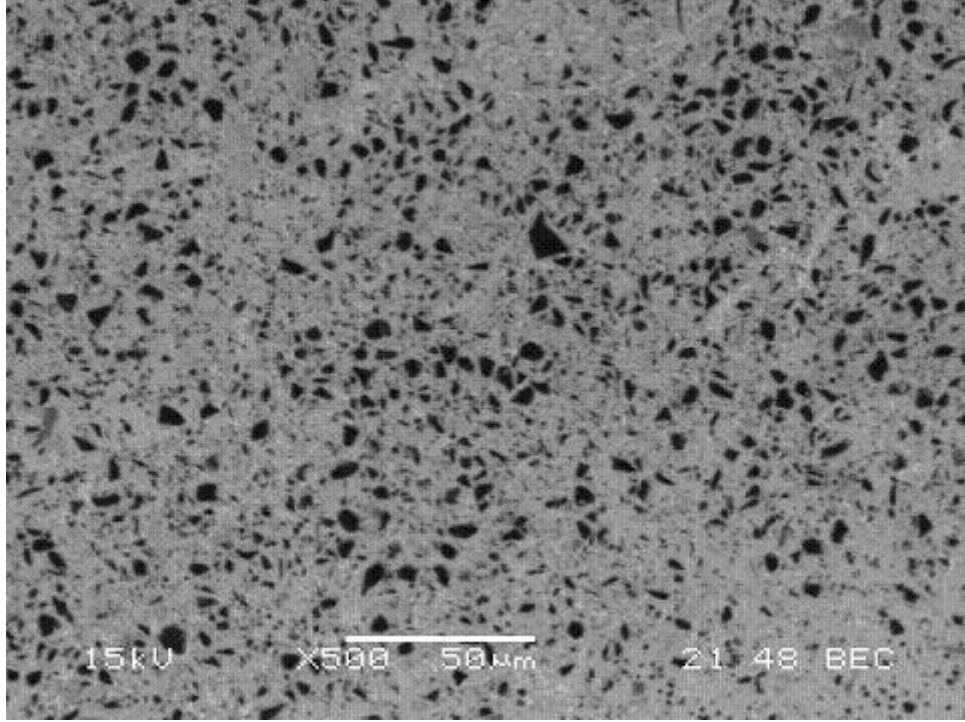
Şekil 4.3 6 numaralı numunenin (<10 µm B₄C tane boyutu, ağı. % 15 takviye oranı) SEI modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.



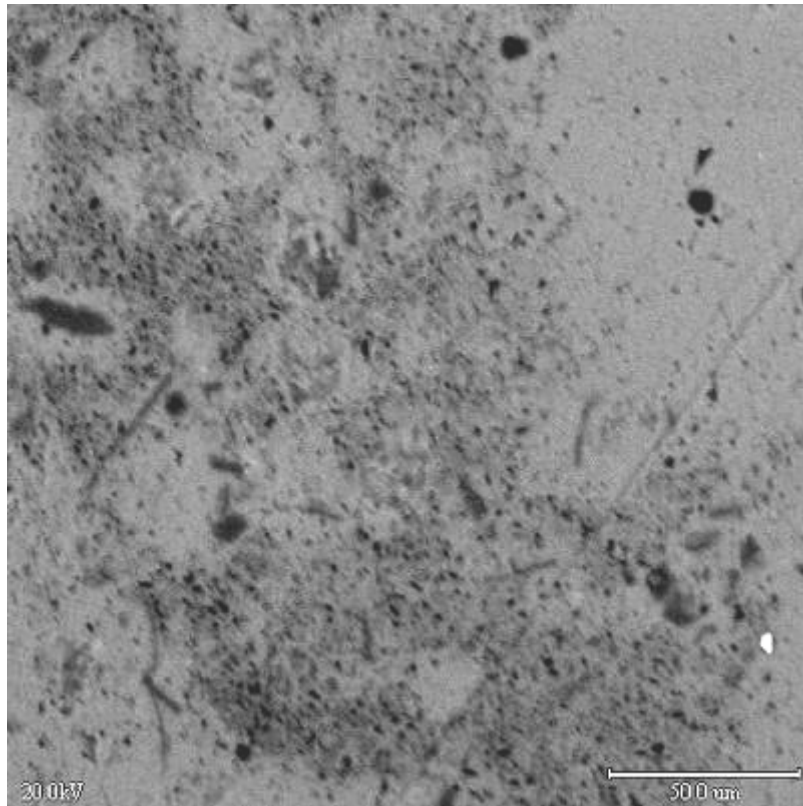
Şekil 4.4 9 numaralı numunenin (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 15 takviye oranı) SEI modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.



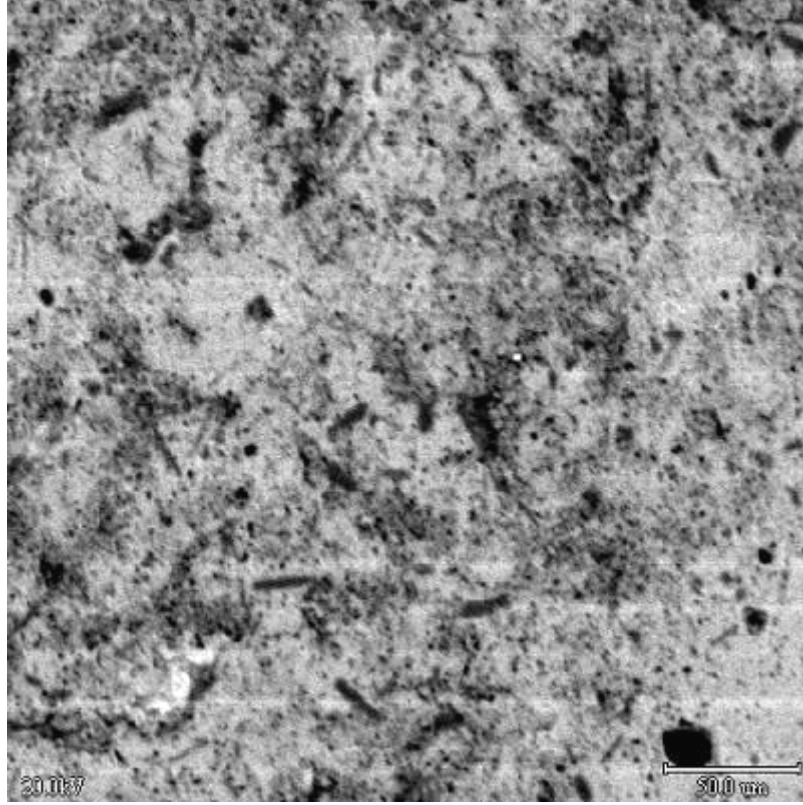
Şekil 4.5 10 numaralı numunenin (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) BEC modunda alınan x500 büyütmedeki SEM görüntüsü.



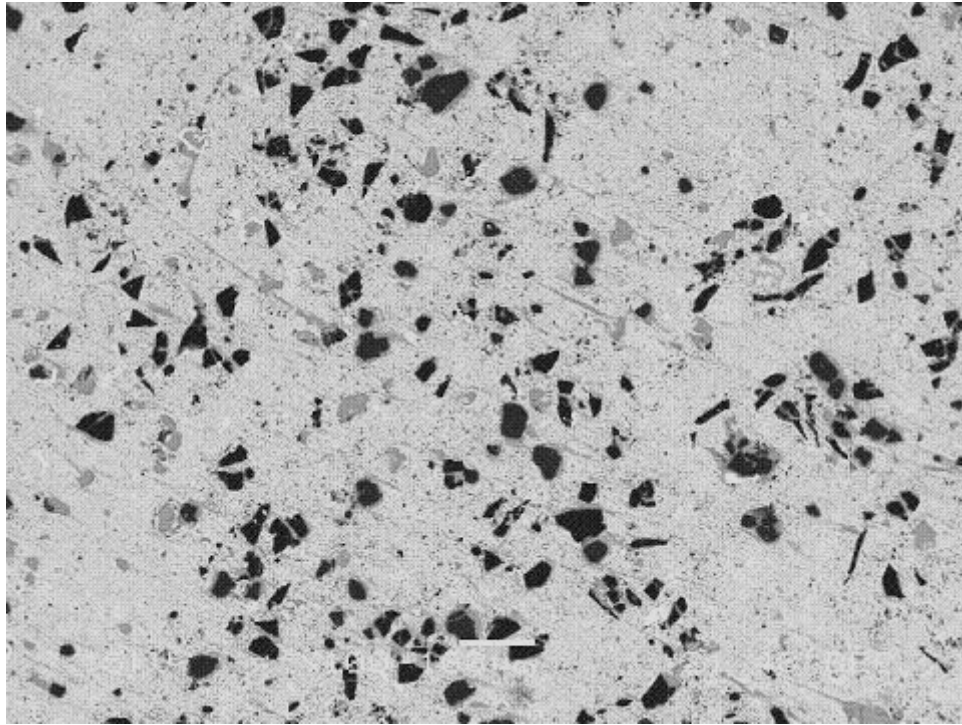
Şekil 4.6 11 numaralı numunenin (1–7 μm B₄C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) BEC modunda alınan x500 büyütmedeki SEM görüntüsü.



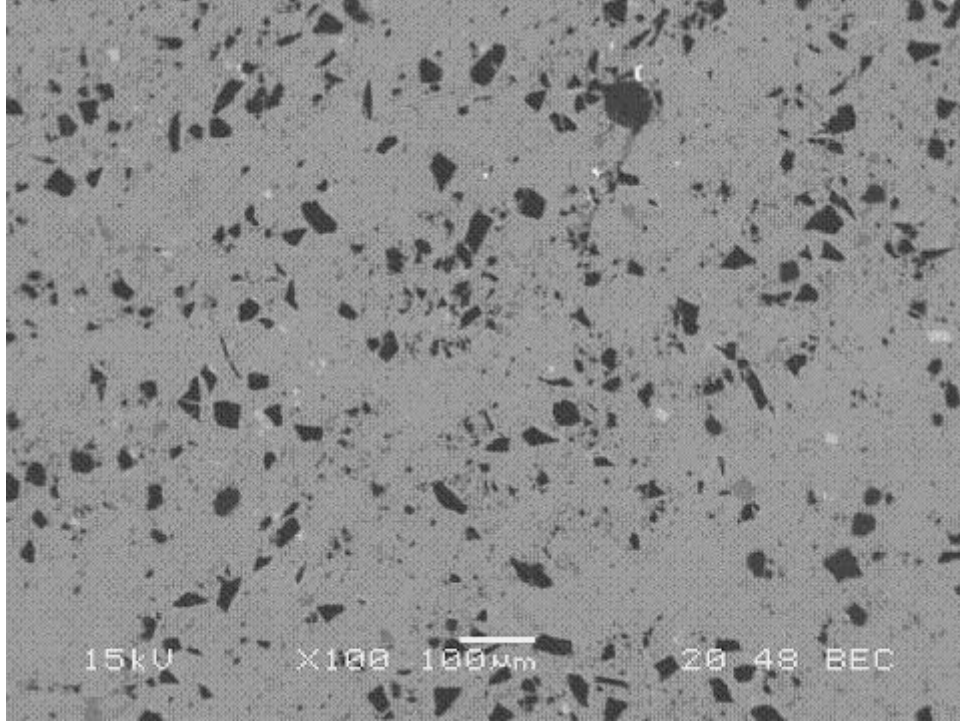
Şekil 4.7 12 numaralı numunenin (<10 μm B₄C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) BEC modunda alınan x500 büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 4.8 13 numaralı numunenin ($<10\ \mu\text{m}$ B₄C tane boyutu, ağırlık % 10 takviye oranı) BEC modunda alınan x350 büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 4.9 14 numaralı numunenin ($22\text{--}59\ \mu\text{m}$ B₄C tane boyutu, ağırlık % 5 takviye oranı) BEC modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.

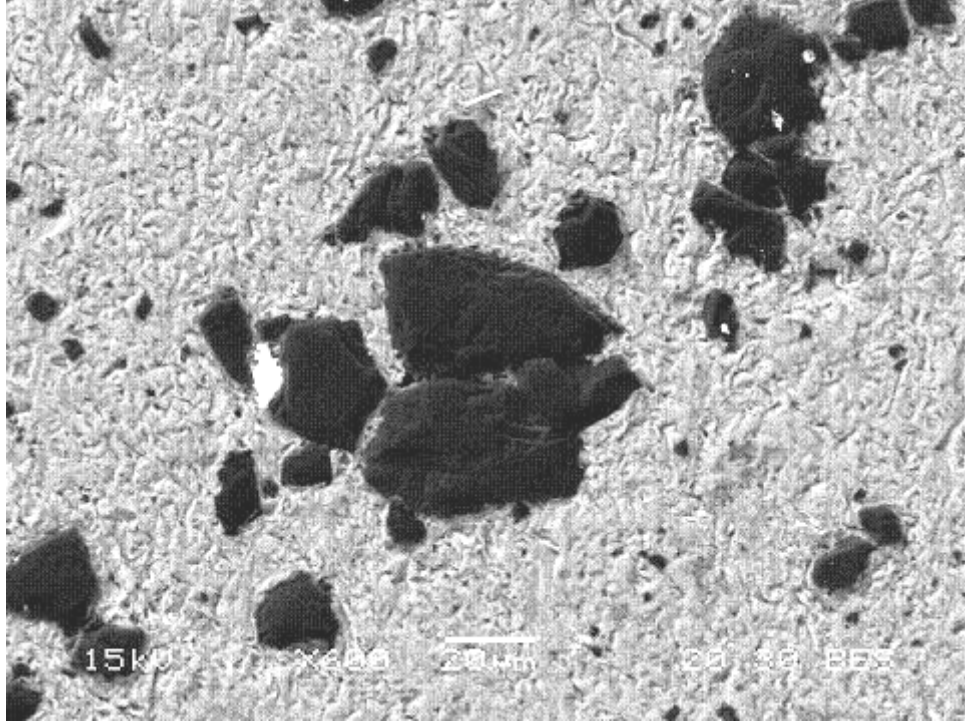


Şekil 4.10 15 numaralı numunenin (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağırlık % 10 takviye oranı) BEC modunda alınan x100 büyütmedeki SEM görüntüsü.

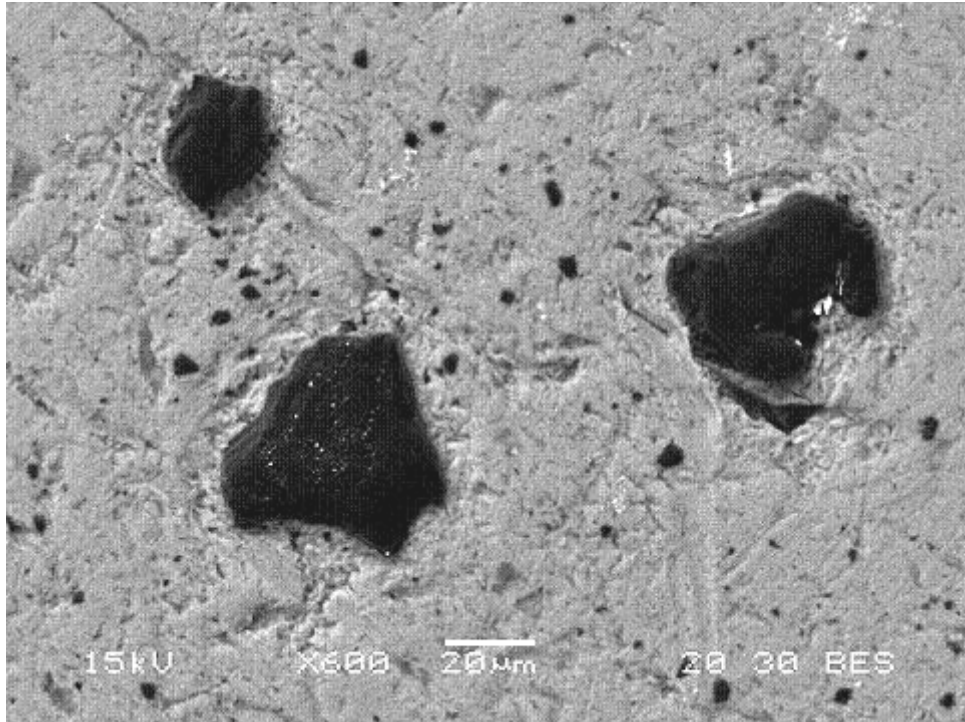
4.1 Matris/Takviye Arayüzeyi

Şekil 4.11–4.17’de alüminyum matris içinde bulunan B_4C partiküllerinin SEM görüntüsü verilmiştir. Partiküllerin etrafında oluşmuş reaksiyon tabakası, parlatma sırasında arayüzeyden taşınmış olduğu ve tabaka kalınlığı çok az olduğu için net olarak görülmemektedir.

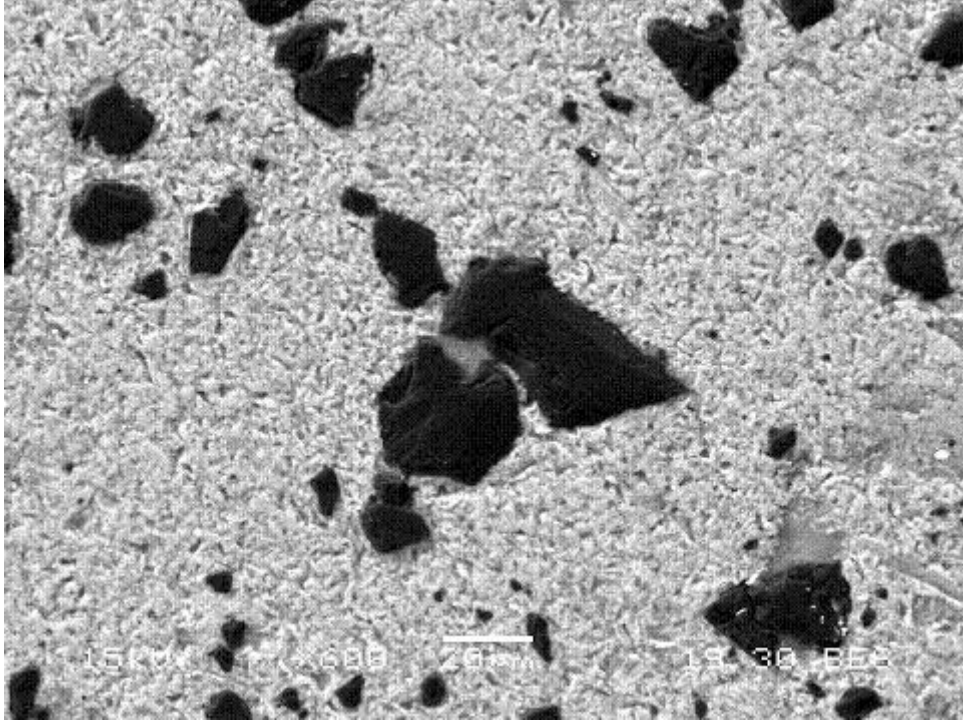
Al ile B_4C arasında düşük sıcaklıkta görülen ıslatma problemini aşmak için arayüzeyde TiC ve TiB_2 gibi bileşiklerin oluşmasını sağlamak amacıyla K_2TiF_6 flaksı kullanılmıştır. Al- B_4C kompozitlerinin döküm yoluyla üretiminde kullanılan flaksın oranı önem taşımaktadır. Kennedy ve Brampton (2001), K-Al-Ti-F flaksıyla Al ile B_4C arasındaki ıslatılabilirlik problemini aşmaya çalıştığı çalışmalarında, $\text{Ti}/\text{B}_4\text{C}$ oranının 0,07’ye eşit ve üzeri olması durumunda ilave edilen takviye fazın tamamının yapıya girdiğini rapor etmişlerdir. Yapılan hesaplamalarda, bu çalışmada kullanılan K_2TiF_6 flaksının % 50’sinin ergiyiğe geçtiği hesaplanmış, buradan yola çıkarak molekül ağırlıkları üzerinden, $\text{Ti}/\text{B}_4\text{C}$ oranını 0,1’e getirecek miktarda flaks hesaplanarak bunun iki katı alınmıştır. Sonuçta, katılması gereken flaks miktarının, ağırlıkça B_4C miktarına eşit olması gerektiği görülmüştür. Bu oranın altında flaks katılarak yapılan denemelerde başarısız olduğu saptanmıştır.



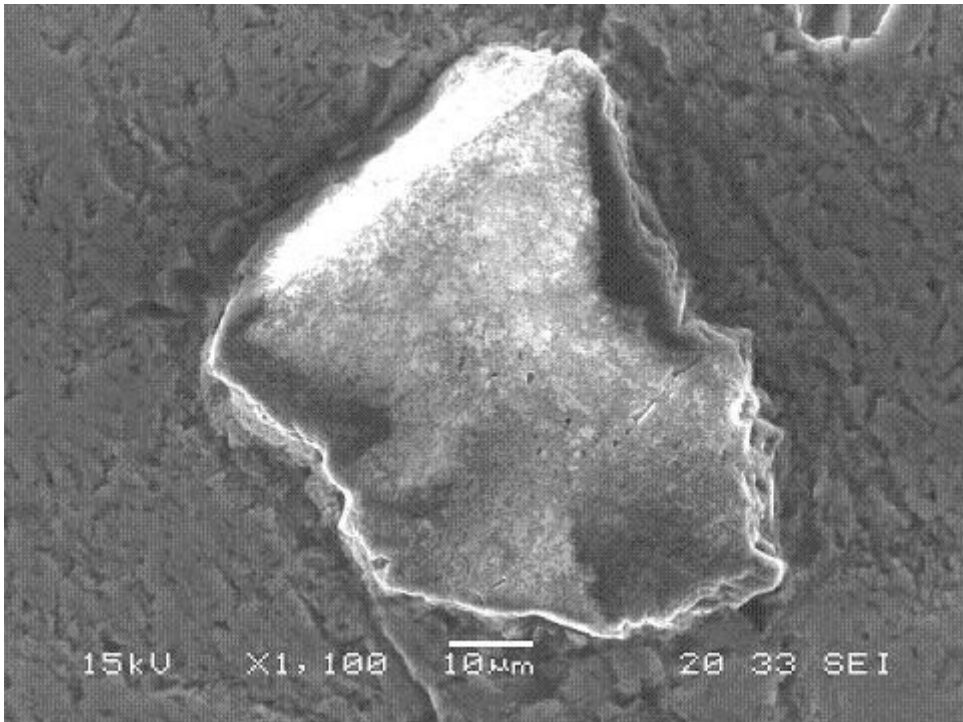
Şekil 4.11 1 numaralı numunede (1–7 µm B₄C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) B₄C partiküllerinin BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.



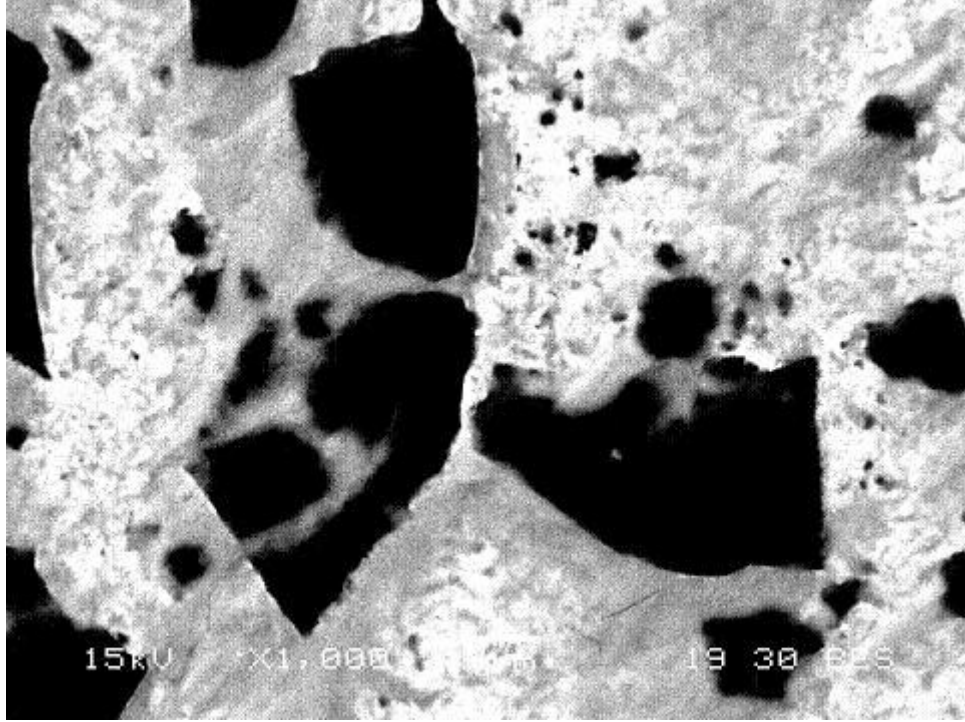
Şekil 4.12 2 numaralı numunede (1–7 µm B₄C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) B₄C partiküllerinin BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.



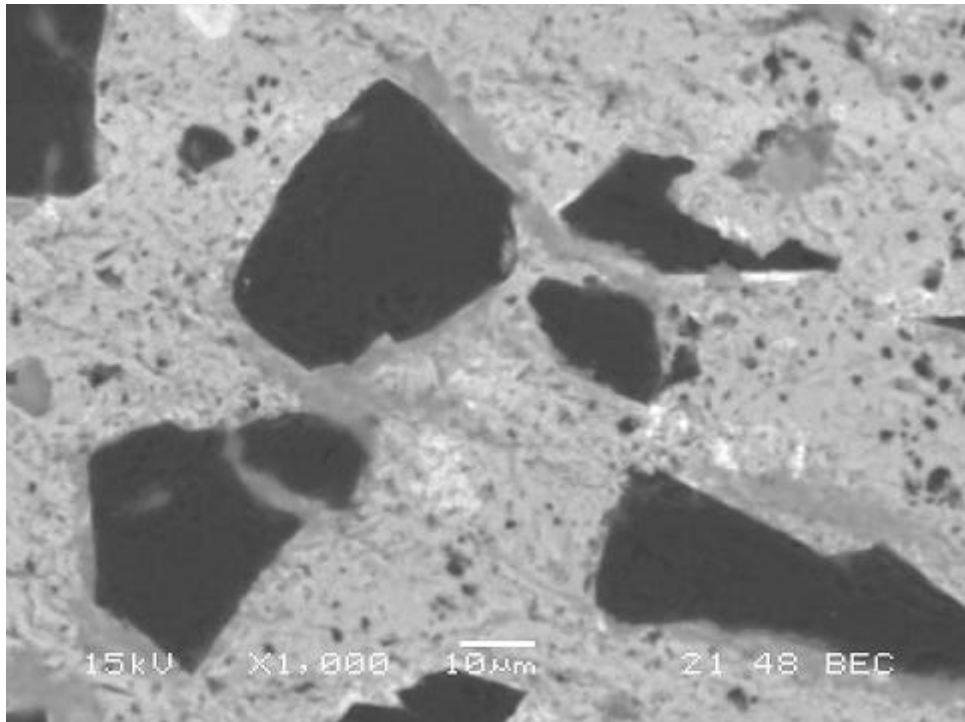
Şekil 4.13 4 numaralı numunede ($<10\ \mu\text{m}$ B_4C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) B_4C partiküllerinin BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.



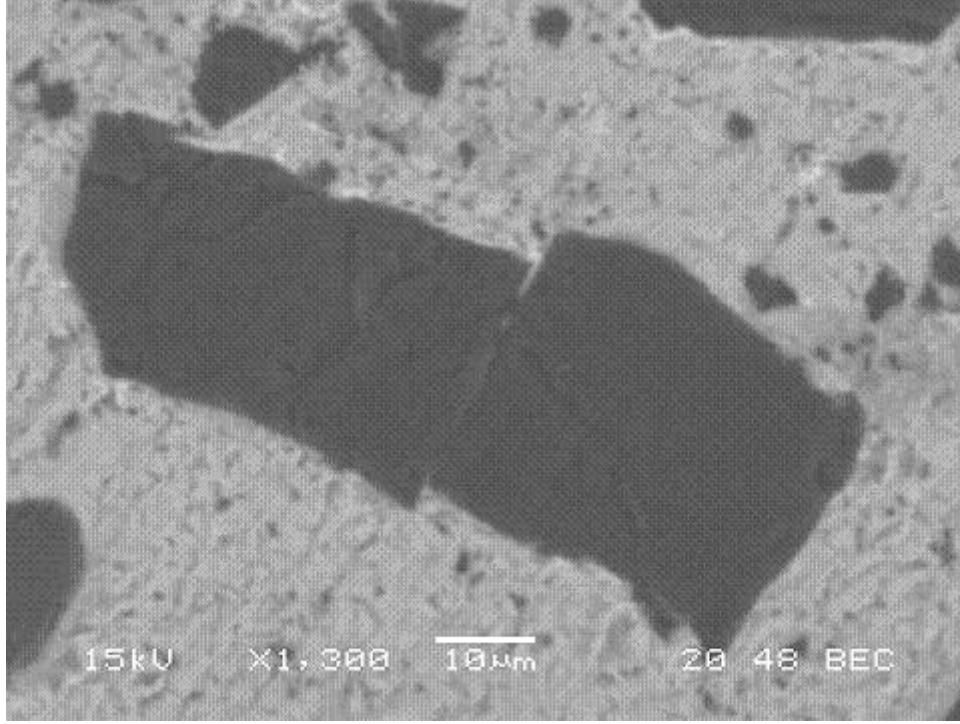
Şekil 4.14 7 numaralı numunede ($22\text{--}59\ \mu\text{m}$ B_4C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) B_4C partikülünün SEI modunda x1100 büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 4.15 8 numaralı numunede (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) B_4C partiküllerinin BES modunda x1000 büyütmedeki SEM görüntüsü.



Şekil 4.16 14 numaralı numunede (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) B_4C partiküllerinin BEC modunda x1000 büyütmedeki SEM görüntüsü.

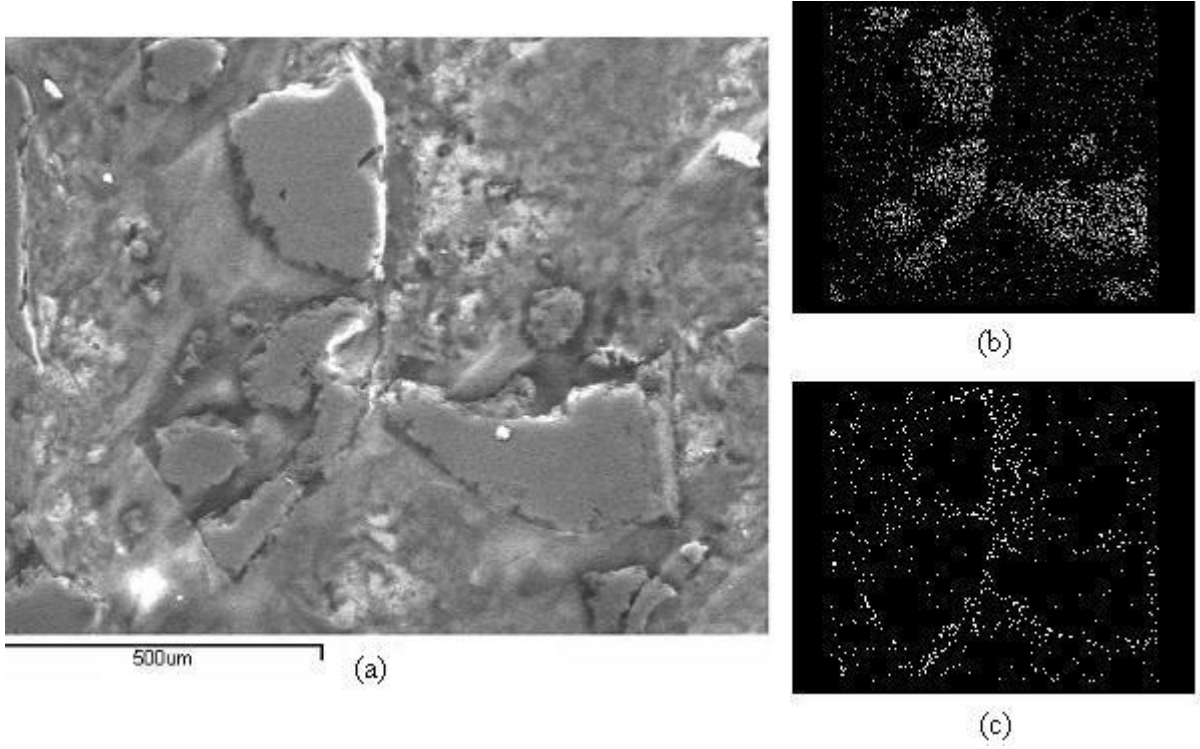


Şekil 4.17 15 numaralı numunede (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) B_4C partiküllerinin BEC modunda x1300 büyütmedeki SEM görüntüsü.

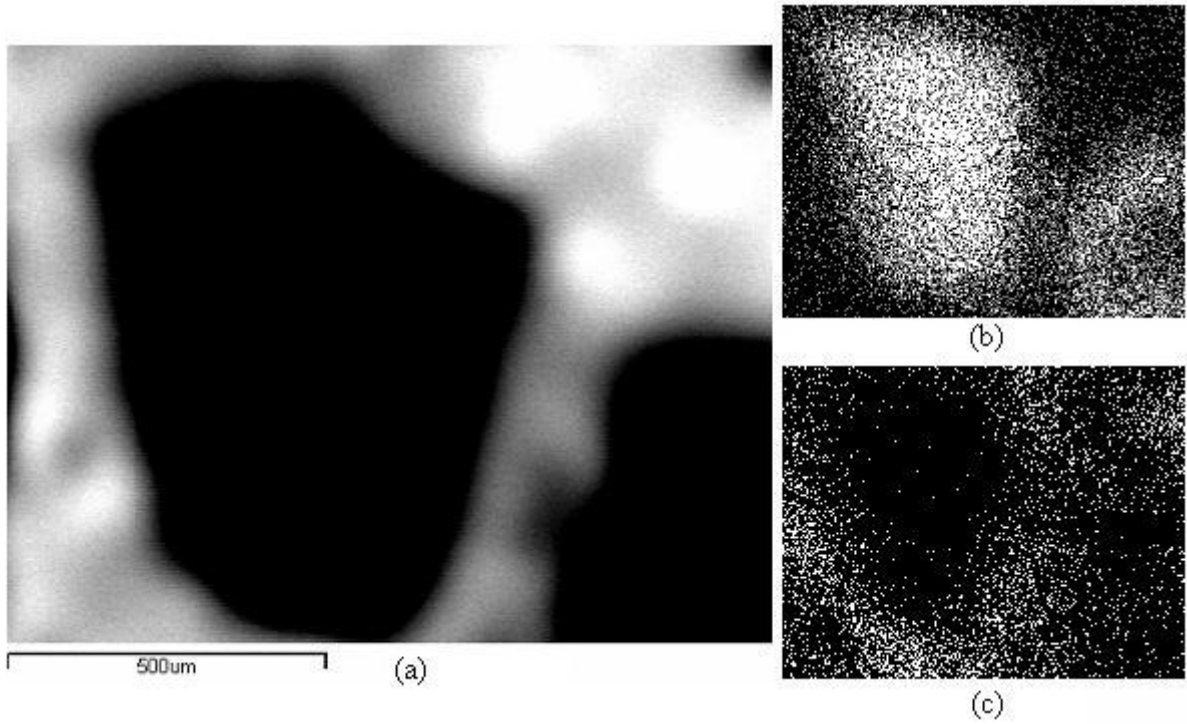
B_4C tanelerinden alınan X-ışını haritalarında, titanyumun, belirlenen amaç doğrultusunda tanelerin etrafında bulunduğu saptanmıştır. Bu durum, Şekil 4.18–4.22’de verilen SEM görüntülerine ait X-ışını haritalarında açıkça görülmektedir. SEM görüntülerinde, partiküllerin etrafında oluşmuş reaksiyon tabakası, parlatma sırasında arayüzeyden taşınmış olduğu ve tabaka kalınlığı çok az olduğu için net olarak görülmemektedir.

Yukarıda sözü edilen, takviye tanelerinin titanyumlu bileşiklerle kaplanma durumu, ağırlıkça % 5 ve % 10 takviyeli numunelerde net olarak gözlemlenirken, % 15 takviyeli numunelerde gözlemlenememiştir. Farklı sıcaklıklarda yapılan ağırlıkça % 15 takviyeli dökümlerde de benzer durumla karşılaşılması sonucu, bunun karıştırmanın yetersizliği ve takviye malzemelerine herhangi bir ön işlem uygulanmamasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

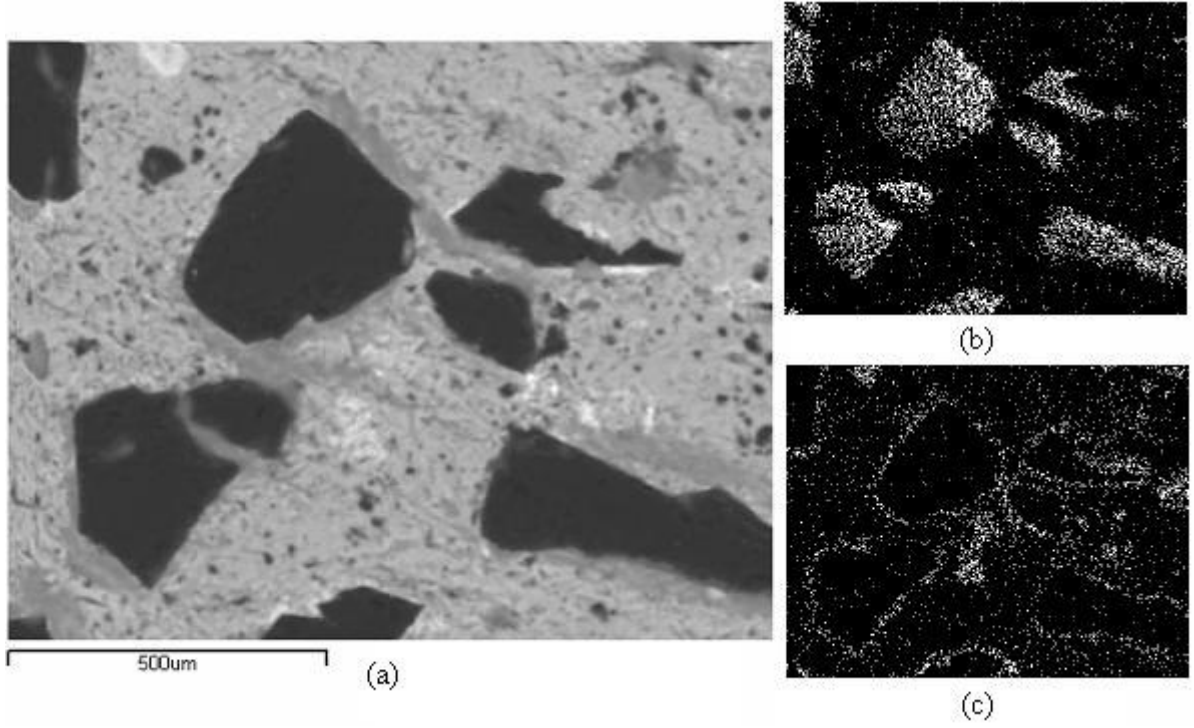
% 15 takviyeli numunelerde takviye partikülleri etrafında gözlemlenmeyen titanyumun, yapılan incelemeler sonucunda, matris üzerinde çeşitli bölgelerde biriktiği saptanmıştır. Bu durum, titanyumun matris üzerinde belli noktalarda toplandığını gösteren Şekil 4.23’teki SEM görüntüsünde ve tek bir B_4C tanesini ve bu tanenin etrafında Ti bulunmazken, matris üzerinde belli bir noktada (Şekil 4.24 (b)’deki elementel haritada sağ üst köşe) Ti birikimini veren SEM görüntüsü ve Ti elementel haritası veren Şekil 4.24’te görülmektedir.



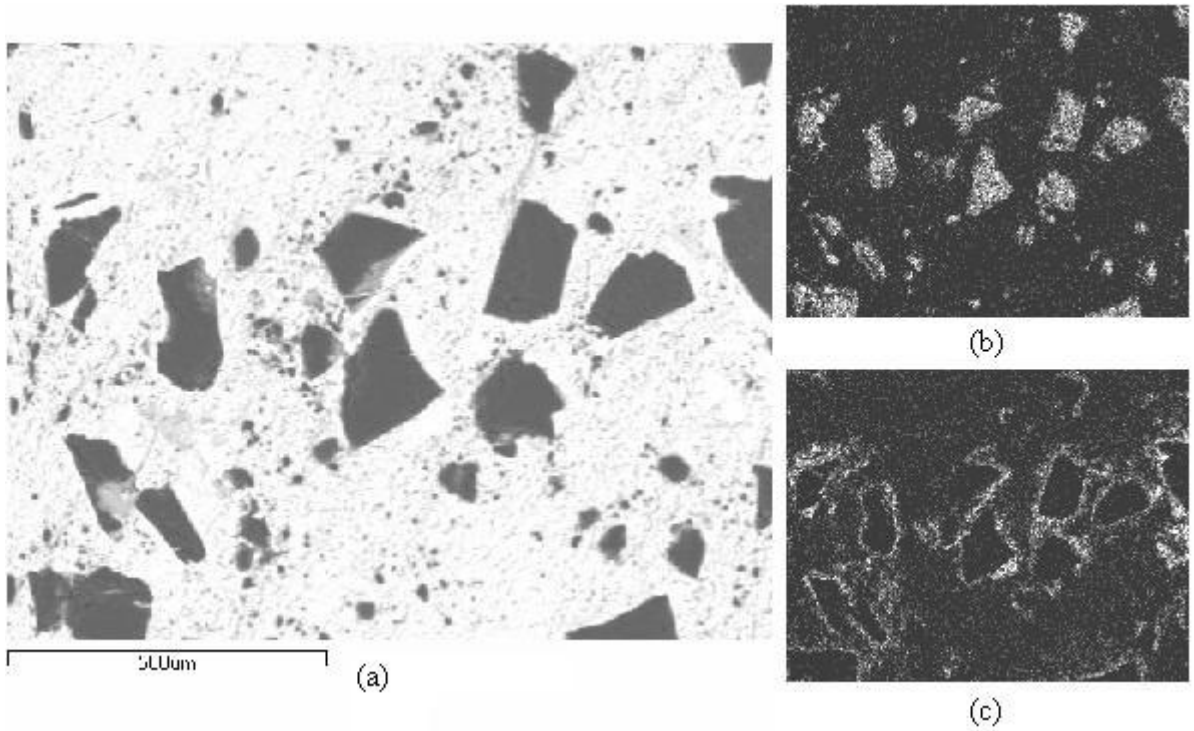
Şekil 4.18 8 numaralı numunenin (22–59 μm B₄C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları.



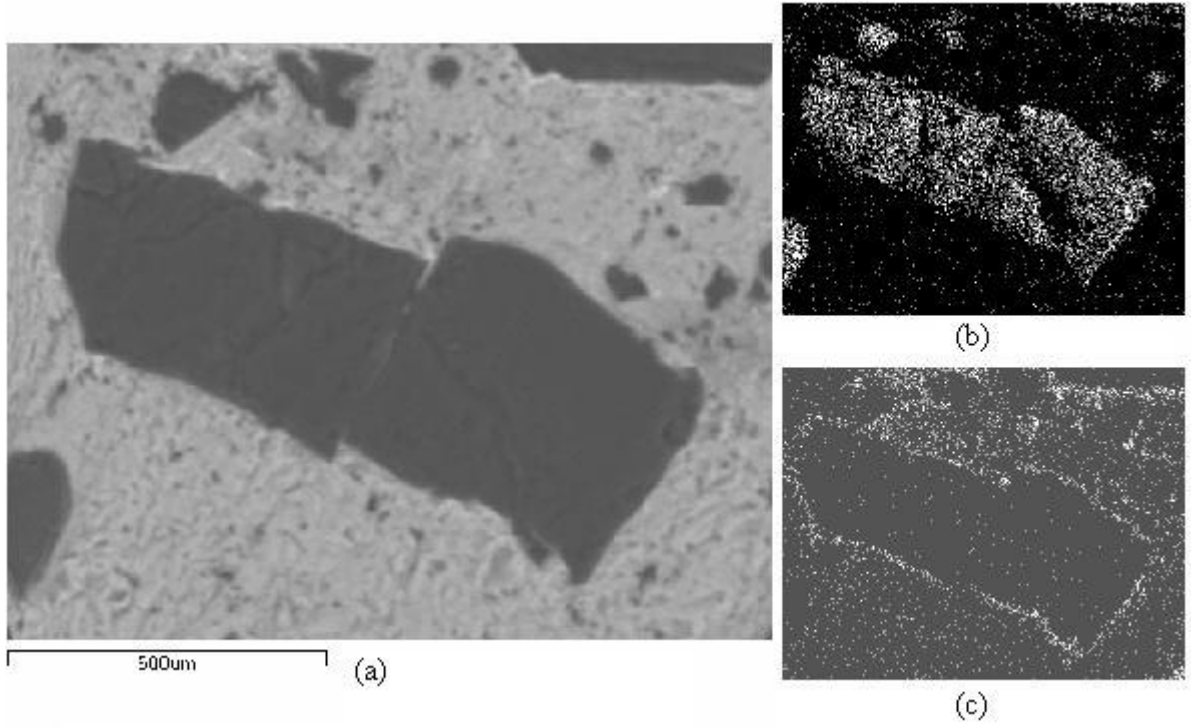
Şekil 4.19 11 numaralı numunenin (1–7 μm B₄C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları.



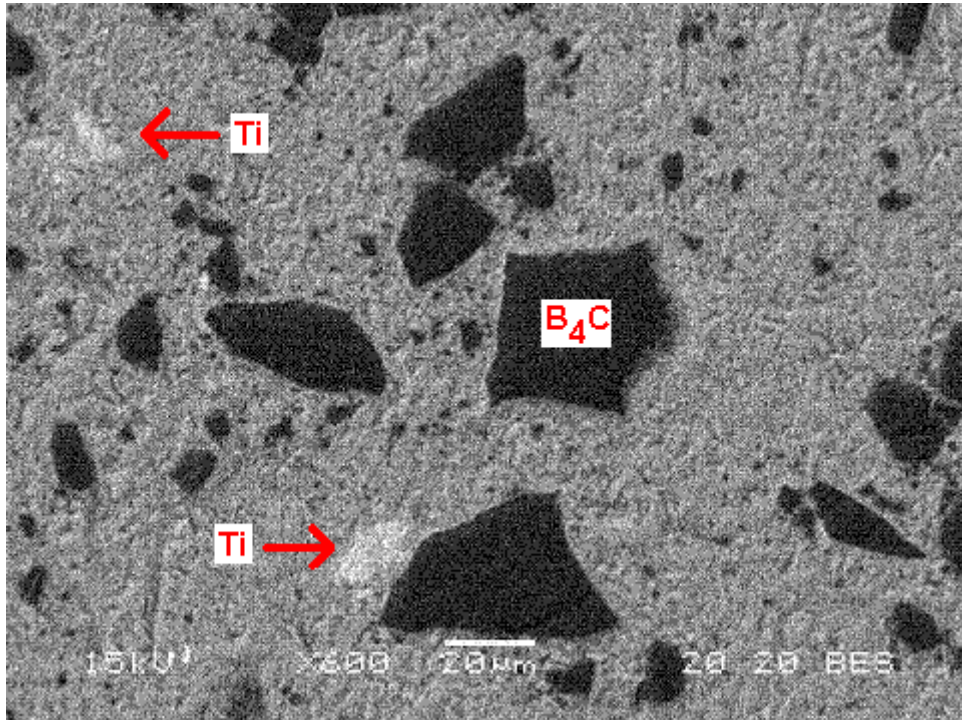
Şekil 4.20 14 numaralı numunenin (22–59 μm B₄C tane boyutu, ağırlık % 5 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları.



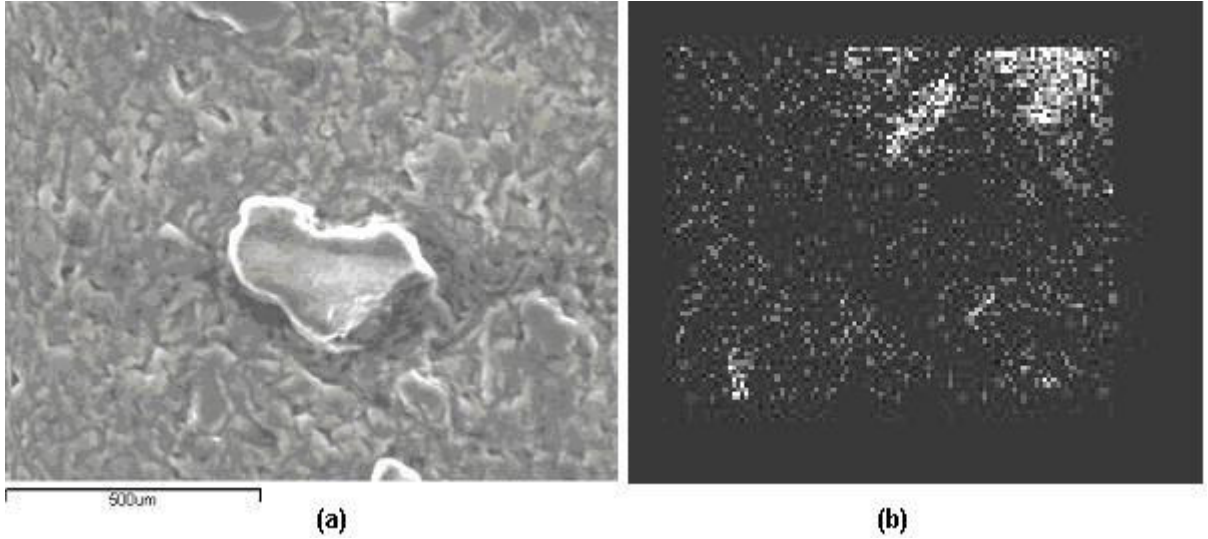
Şekil 4.21 15 numaralı numunenin (22–59 μm B₄C tane boyutu, ağırlık % 10 takviye oranı) SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları.



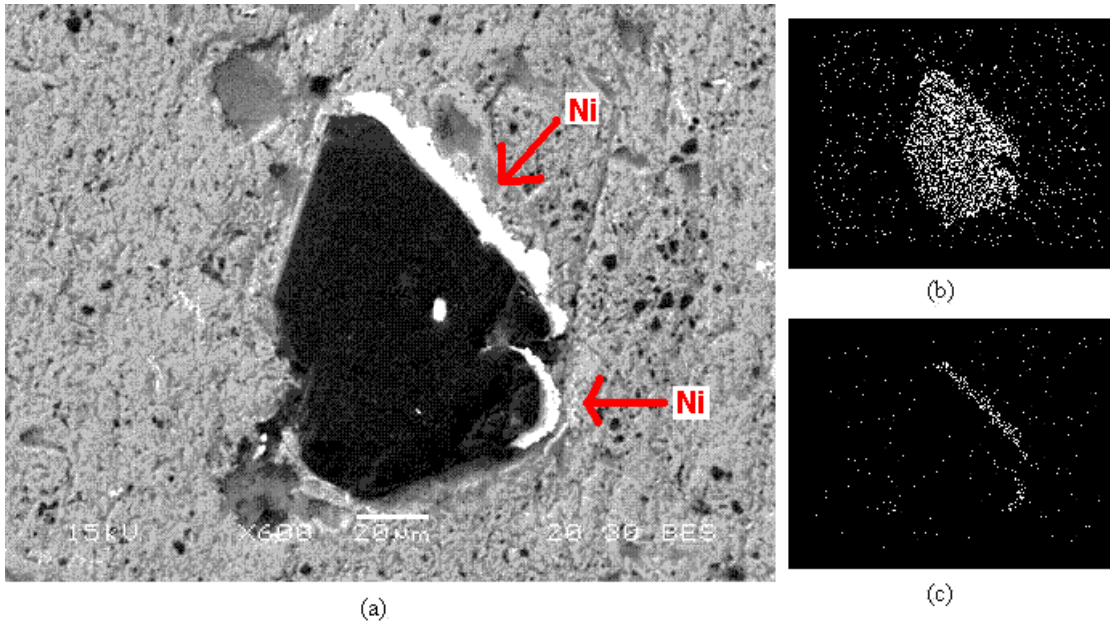
Şekil 4.22 15 numaralı numunenin (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağırlık % 10 takviye oranı) diğer bir SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ti (c) elementel haritaları.



Şekil 4.23 9 numaralı numunede (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağırlık % 15 takviye oranı) matris üzerinde Ti birikimini gösteren BES modunda x600 büyütmedeki SEM görüntüsü.



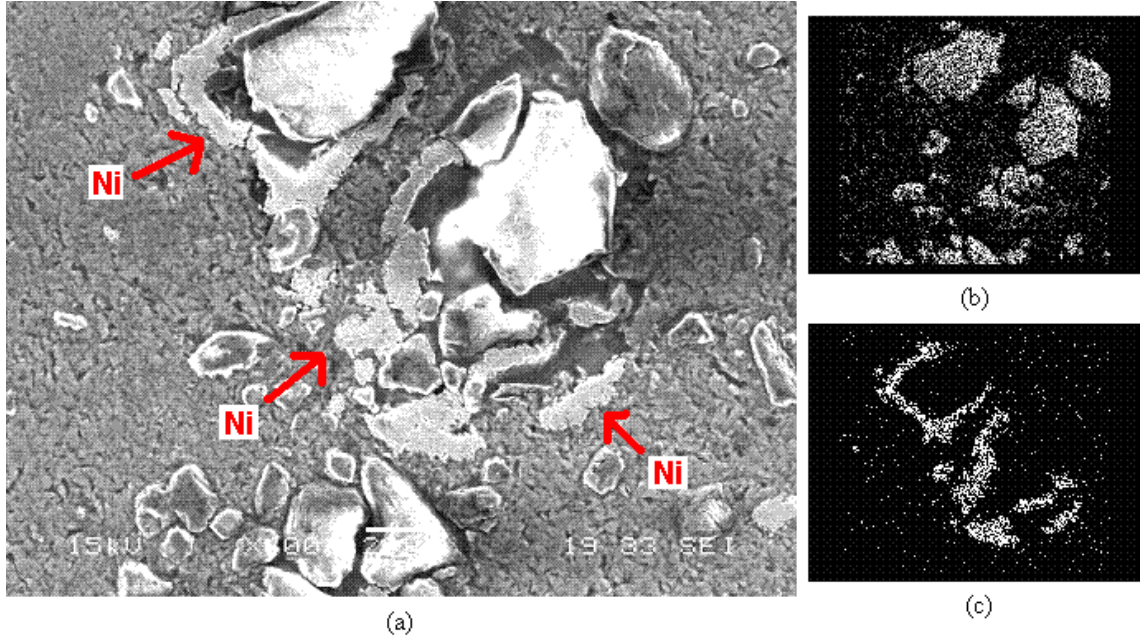
Şekil 4.24 9 numaralı numunede (22–59 μm B₄C tane boyutu, ağı. % 15 takviye oranı) tek bir B₄C tanesini gösteren SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüde takviye tanesine ait Ti elementel haritası.



Şekil 4.25 3 nolu numuneye ait (1–7 μm B₄C tane boyutu, ağı. % 15 takviye oranı) B₄C partikülünün SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ni (c) elementel haritaları.

Döküm numunelerinde, Al-B₄C arayüzeyinde yapılan incelemelerde, paslanmaz çelik karıştırma çubuğunun kaplamasının aşınması sonucu döküm yapısına karışan nikelin, arayüzeye yerleşerek B₄C'ün alüminyumu ıslatmasına yardımcı olduğu saptanmıştır. Bu çalışmanın odak noktalarının dışında kalan, literatürde bu yönde bir çalışmaya rastlanmayan, tesadüfî bir şekilde oluşan ve gözlemlenen bu durum, Al-B₄C kompozitlerinin döküm yoluyla

üretiminde yeni bir yöntem olmaya adaydır. Şekil 4.25 ve 4.26'da, Ni ile kaplanmış B₄C tanelerinin SEM görüntüleri ve X-ışını haritaları verilmiştir.



Şekil 4.26 4 nolu numuneye ait (<10 µm B₄C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) B₄C partiküllerinin SEM görüntüsü (a) ve bu görüntüye ait B (b) ve Ni (c) elementel haritaları.

4.2 Mekanik Özellikler

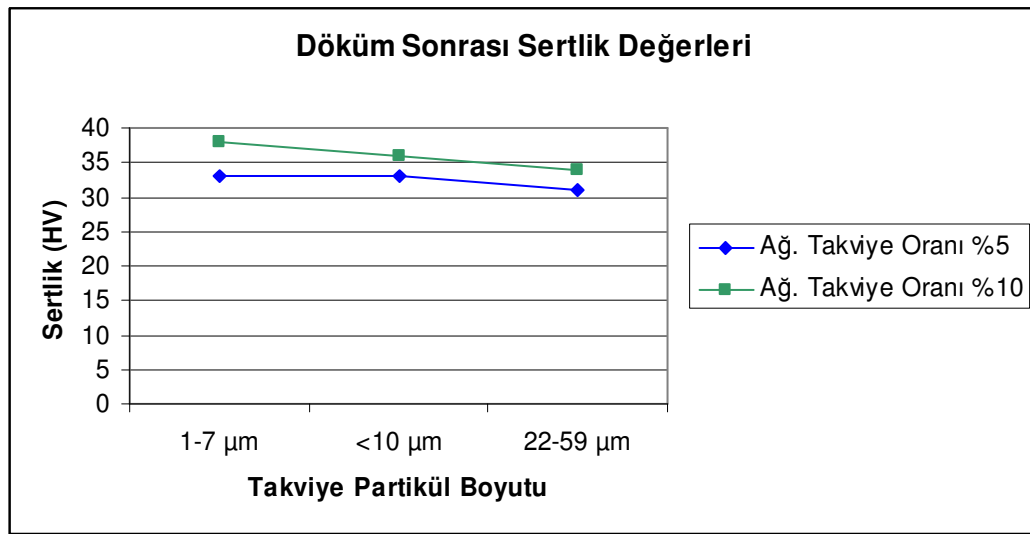
Al-B₄C numunelerinin döküm sırasında karıştırma yapılmayan ve döküm sıcaklığı düşük olanları, döküm yapıları istenildiği gibi olmadığı için, mekanik incelemeler, döküm sırasında karıştırma yapılan ve döküm sıcaklığı yüksek olan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Mekanik incelemeler, numunelerin sertlik ölçümleri ile başlamıştır. Daha sonra, numuneler sıcak ve soğuk hadde ile mekanik deformasyona uğratılmış ve sertlik artışı ölçülmüştür. Numuneler son olarak karşı yüklemeli aşınma cihazında aşınmaya maruz bırakılmış ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır.

Tüm numunelerin, 10 kp yük ile vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Döküm numunelerinin sertlik sonuçları Çizelge 4.1'de, partikül boyutuna göre sertliklerin değişim grafikleri ise Şekil 4.27'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin, döküm sonrası sertlik değerleri.

Partikül Boyutu	Sertlik (HV)	
	Ağ. Takviye Oranı %5	Ağ. Takviye Oranı %10
1–7 μm	33	38
<10 μm	33	36
22–59 μm	31	34



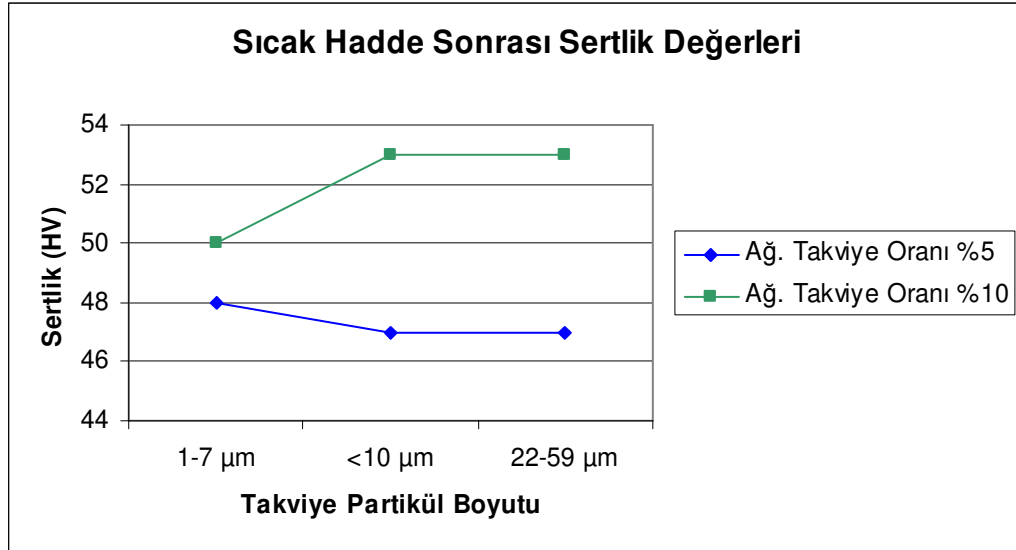
Şekil 4.27 Çizelge 4.1’de verilen döküm sonrası sertlik değerlerinin değişiminin, partikül boyutuna göre karşılaştırmalı gösterimi.

Sertlik incelemeleri yapılan 10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelere mekanik deformasyon verilmiştir. Öncelikle, bu numuneler, ısıtma fırınında 2 saat 470 °C’de bekletildikten sonra, 6 pasoda % 70 deformasyon verilecek şekilde sıcak haddelenmiştir. Sıcak hadde numunelerinin sertlik sonuçları Çizelge 4.2’de, partikül boyutuna göre sertliklerin değişim grafikleri ise Şekil 4.28’de verilmiştir.

Sıcak haddeden sonra aynı bileşim ve orandaki numuneler, ısıtma fırınında 580 °C’de 8 saat tavlandıktan sonra havada soğutulmuş ve soğuk haddelenerek 5 pasoda % 70 deformasyon verilmiştir. Soğuk hadde numunelerinin sertlik sonuçları Çizelge 4.3’te, partikül boyutuna göre sertliklerin değişim grafikleri ise Şekil 4.29’da verilmiştir.

Çizelge 4.2 10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin, sıcak hadde sonrası sertlik değerleri.

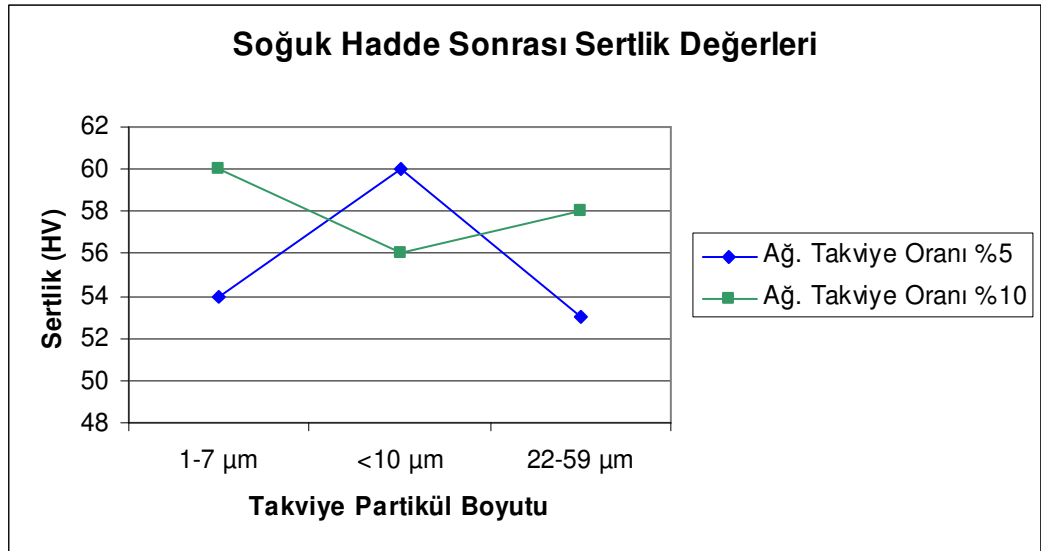
Partikül Boyutu	Sertlik (HV)	
	Ağ. Takviye Oranı %5	Ağ. Takviye Oranı %10
1–7 μm	48	50
<10 μm	47	53
22–59 μm	47	53



Şekil 4.28 Çizelge 4.2’de verilen sıcak hadde sonrası sertlik değerlerinin değişiminin, partikül boyutuna göre karşılaştırmalı gösterimi.

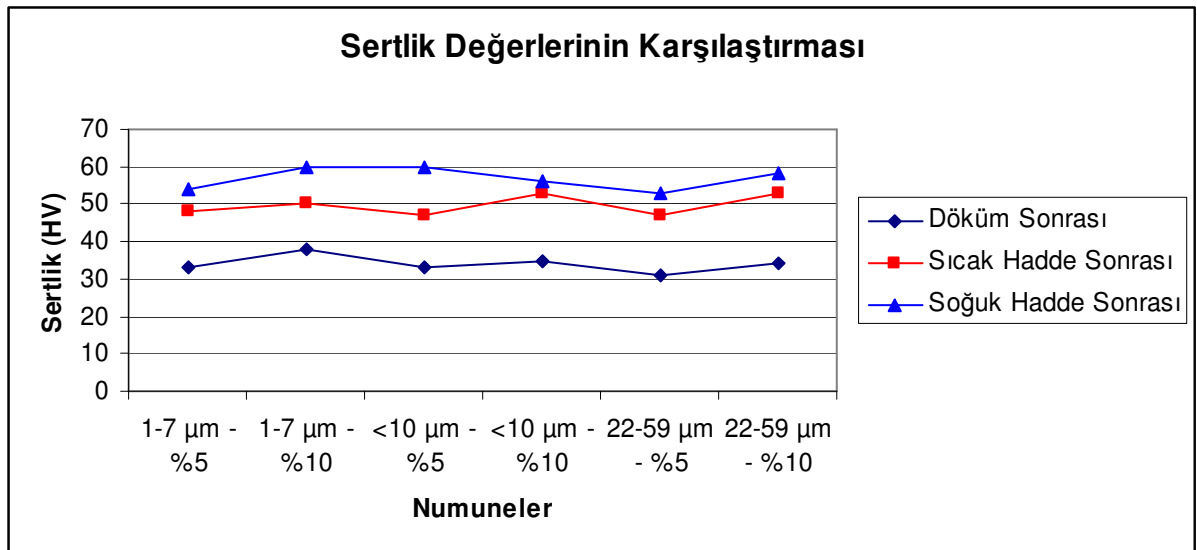
Çizelge 4.3 10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin, soğuk hadde sonrası sertlik değerleri.

Partikül Boyutu	Sertlik (HV)	
	Ağ. Takviye Oranı %5	Ağ. Takviye Oranı %10
1–7 μm	54	60
<10 μm	60	56
22–59 μm	53	58



Şekil 4.29 Çizelge 4.3'te verilen soğuk hadde sonrası sertlik değerlerinin değişiminin, partikül boyutuna göre karşılaştırmalı gösterimi.

Döküm, sıcak ve soğuk hadde sonrasında numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde, elde edilen değerlerin birbirlerine göre değişimi, genel olarak beklenildiği gibi olmuştur. Beklenen, ortalama tane boyutu küçük olan B_4C ile takviye edilen kompozitin sertlik değerinin yüksek olmasıdır. Değerlerdeki en büyük sapma, <10 μm tane boyutuna sahip ağırlıkça % 10 B_4C içeren 13 numaralı numunede görülmüştür. Döküm, sıcak ve soğuk hadde sonrasında ulaşılan sertlik değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30 10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin döküm, sıcak ve soğuk hadde sonrası ulaşılan sertlik sonuçlarının karşılaştırmalı gösterimi.

10, 11, 12, 13, 14 ve 15 numaralı numunelerin, döküm sonrası ve soğuk haddelenen örnekleri ‘karşı yüklemeli aşınma test cihazı’nda aşınmaya tabi tutulmuş ve sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Aşınma testi koşulları Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4 Aşınma testi koşulları.

Numune	Nem (%)	Sıcaklık (°C)	Karşı Malzeme	Yük (g)	Devir
10 (Döküm)	51	24	Al ₂ O ₃	100	2000
11 (Döküm)	54	22	Al ₂ O ₃	100	2000
12 (Döküm)	52	20	Al ₂ O ₃	100	2000
13 (Döküm)	51	22	Al ₂ O ₃	100	2000
14 (Döküm)	50	24	Al ₂ O ₃	100	2000
15 (Döküm)	51	25	Al ₂ O ₃	100	2000
10 (Soğ. Had.)	51	26	Al ₂ O ₃	100	2000
11 (Soğ. Had.)	51	24	Al ₂ O ₃	100	2000
12 (Soğ. Had.)	51	25	Al ₂ O ₃	100	2000
13 (Soğ. Had.)	50	25	Al ₂ O ₃	100	2000
14 (Soğ. Had.)	50	26	Al ₂ O ₃	100	2000
15 (Soğ. Had.)	49	26	Al ₂ O ₃	100	2000

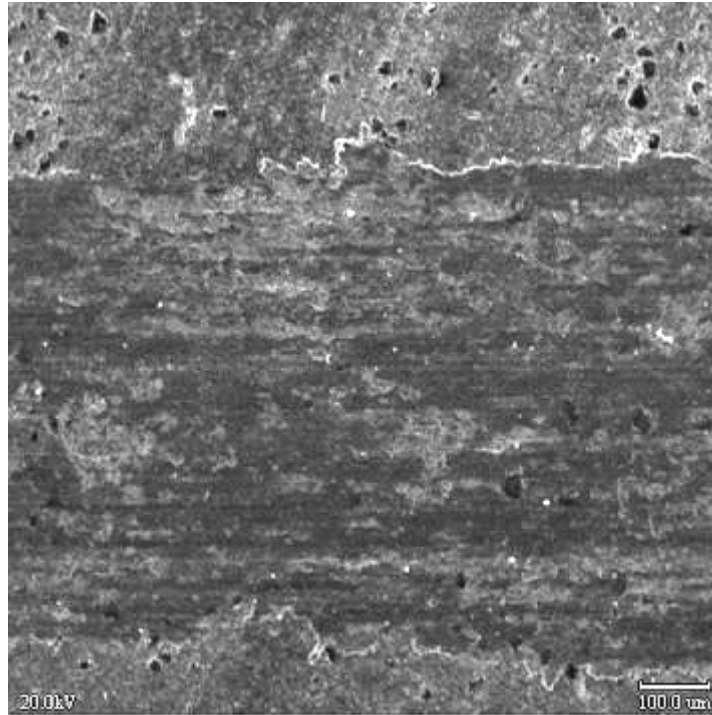
B₄C takviyeli Al matrisli kompozitlerde karakteristik olarak, döküm, sıcak ve soğuk hadde sonrası maksimum sertlik değerleri 1–7 µm boyutlu ve ağırlıkça % 10 oranında B₄C ilavesi ile elde edilmiştir.

Döküm sonrası elde edilen mikroyapılarda B₄C partiküllerinin homojen dağılımlı olduğu gözlemlenmiş, buna bağlı olarak malzemenin dokusu ile mekanik özelliklerinde izotropik dağılım belirlenmiştir. Partiküllerin matris içinde dağıtılması sonucu haddeleme ile çok büyük sertlik farklılıkları elde edilmemiş olmasına karşın, matrisin izotropik yapıdan anizotropik dokuya dönüşmesi ile sertlik sistematik biçimde döküm malzemelere göre daha yüksek

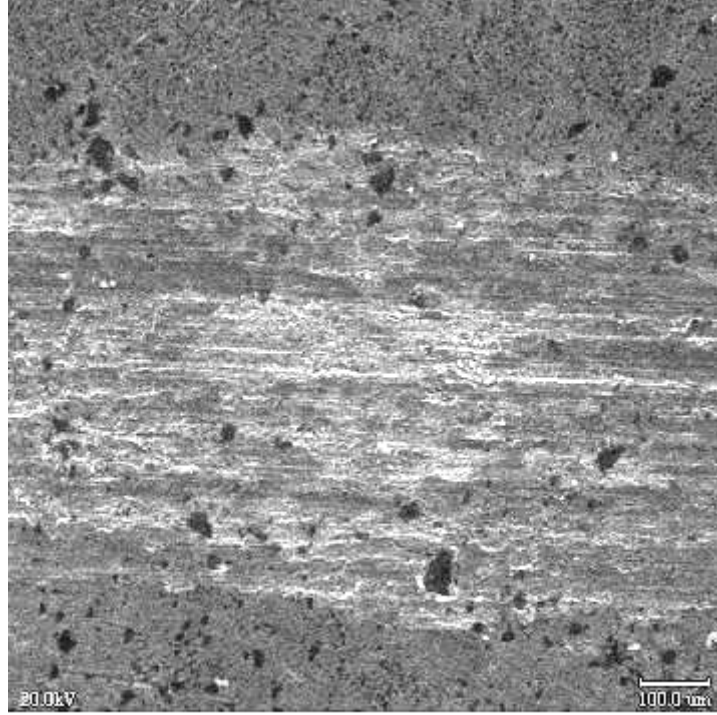
çıkıştır.

İzotropik yapıya sahip döküm numunelerinin en yüksek sertlik değeri 1–7 μm ortalama tane boyutuna sahip ağırlıkça % 10 B_4C takviyeli malzemede bulunmuştur. Araştırmada, malzemenin mekanik özelliklerine bağlı olarak direncinin de artırılması amacı ile haddeleme işlemleri yapılmıştır. Haddeleme ile özellikle matris malzemeye anizotropik özellik kazandırılarak sertlik değerlerinde artışlar elde edilmiştir. Sıcak hadde sıcaklığının yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde olması nedeni ile hadde sırasında kısmi rekristalizasyon bölgeleri oluşmuş ve bu oluşuma bağlı olarak sıcak haddeden sonra elde edilen mekanik özellikler, soğuk haddede elde edilen değerlerden düşük çıkmıştır.

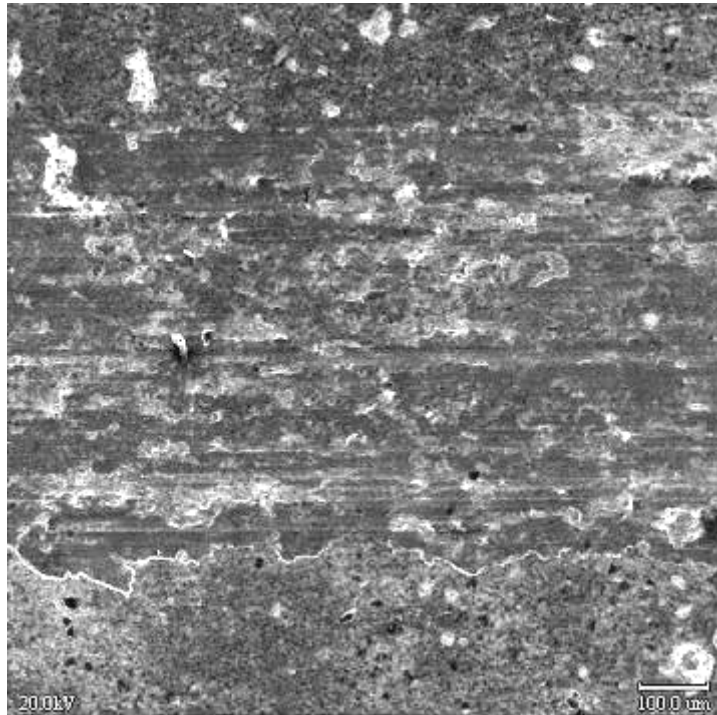
Şekil 4.33'teki sertlik değerleri ile Şekil 4.31–4.38'de verilen doku fotoğraflarına göre üretilmiş malzemeler içinde en iyi mekanik özellik değeri, 1–7 μm ortalama tane boyutuna sahip ağırlıkça % 10 B_4C takviyeli malzemede bulunmuştur. Bu malzemeler içinde soğuk hadde ile mekanik özelliklerdeki artış, malzemenin aşınma direncini de olumlu yönde etkilemiştir.



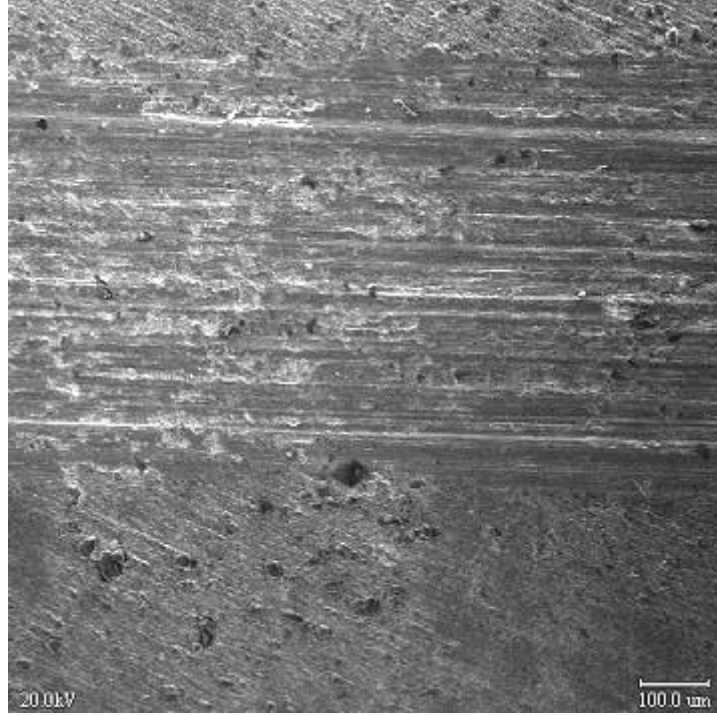
Şekil 4.31 10 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağırlıkça % 5 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.



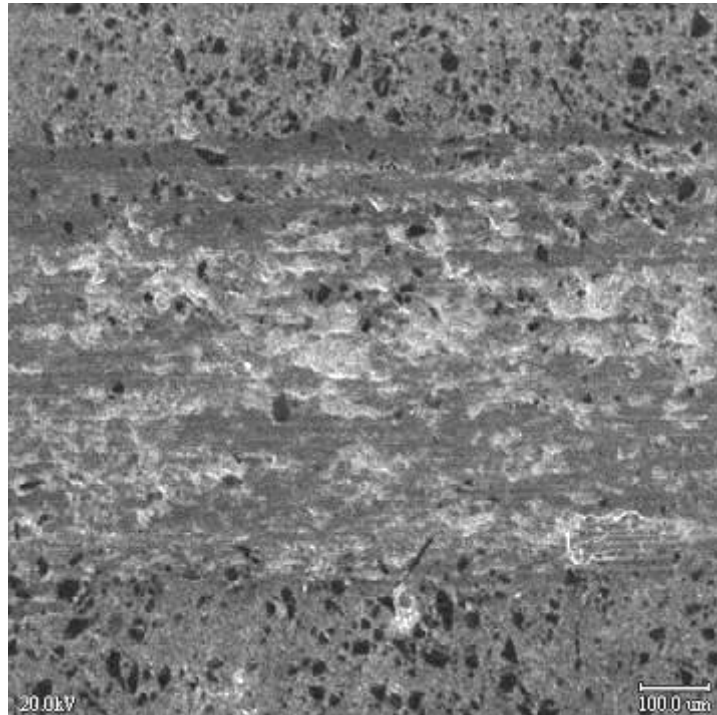
Şekil 4.32 10 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.



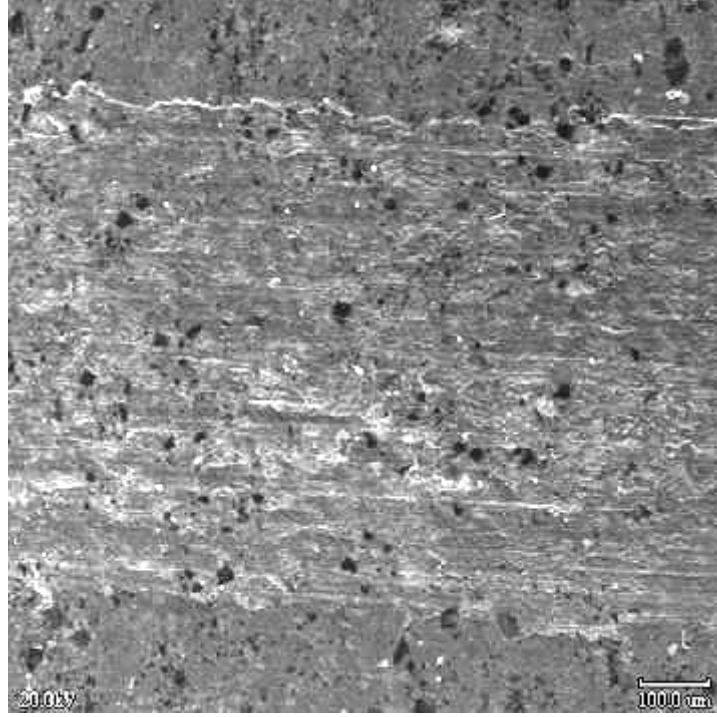
Şekil 4.33 11 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.



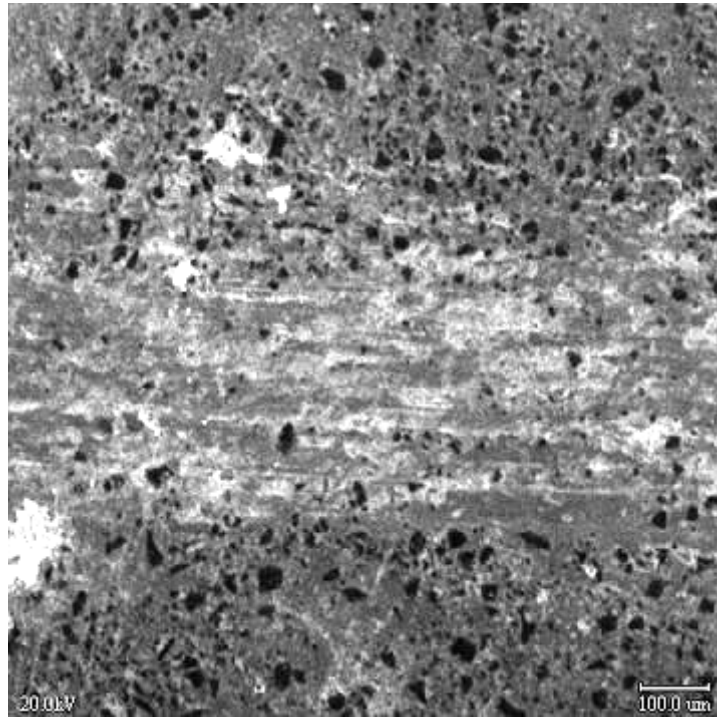
Şekil 4.34 11 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağırlık % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.



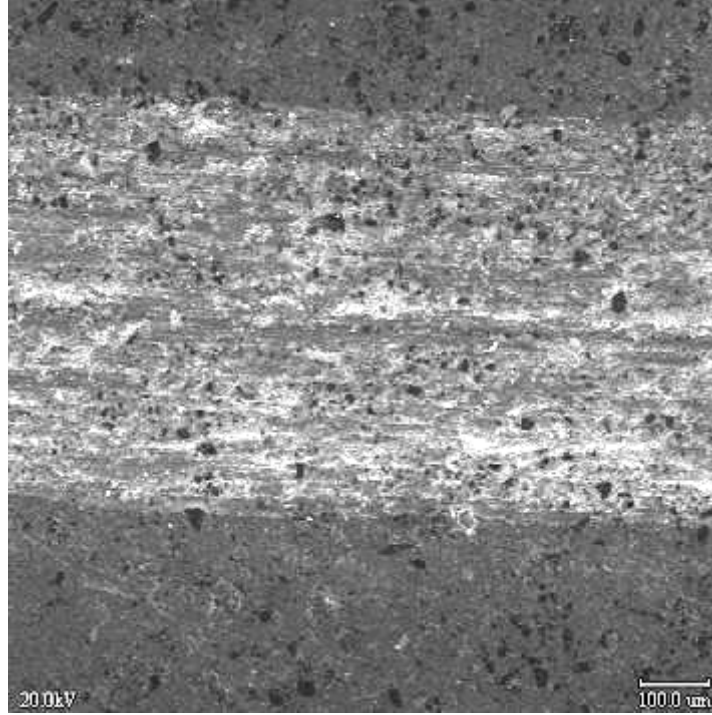
Şekil 4.35 14 numaralı (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağırlık % 5 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.



Şekil 4.36 14 numaralı (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.



Şekil 4.37 15 numaralı (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.



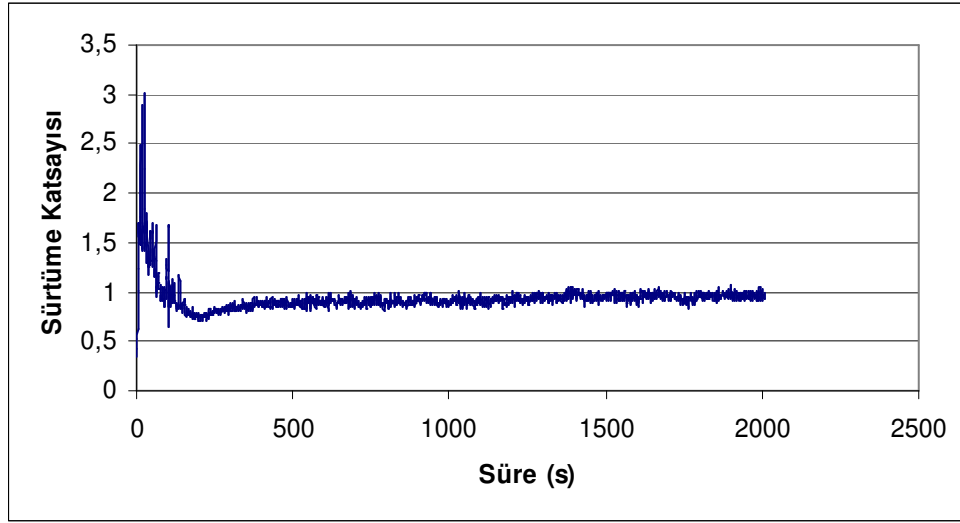
Şekil 4.38 15 numaralı (22–59 µm B₄C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde aşınma izini gösteren x100 büyütmede alınmış SEM görüntüsü.

Şekil 4.31–4.38’deki aşınma testleri karşılaştırıldığında aşağıdaki sonuçlar verilebilir:

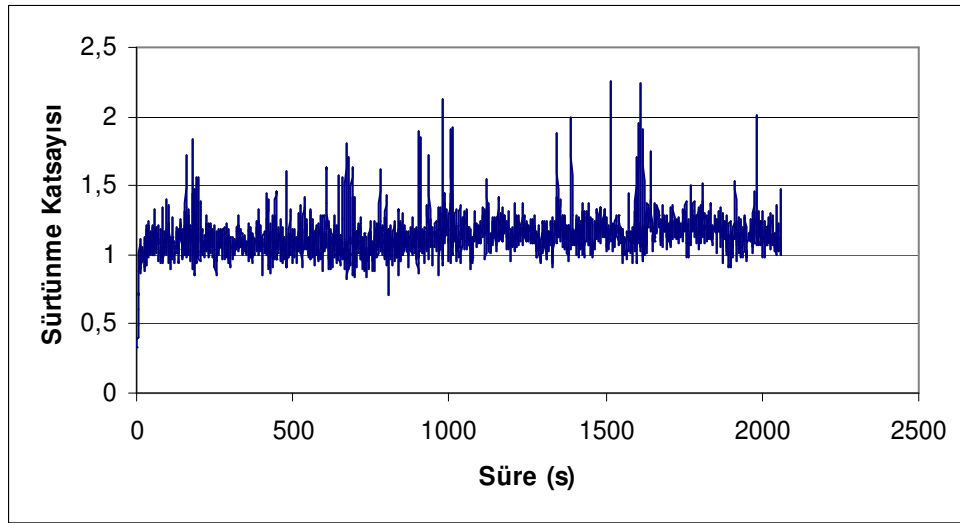
- 1–7 µm ortalama tane boyutuna sahip ağırlıkça % 5 B₄C takviyeli döküm ve hadde numuneleri: aşınma testi sonucunda döküm malzemedeki aşınma, hadde yapılan numuneden daha yüksektir. Dökümle elde edilen dokuda aşınma sonrası daha fazla partikülün yerinden ayrıldığı görülmektedir.
- 1–7 µm ortalama tane boyutuna sahip ağırlıkça % 10 B₄C takviyeli döküm ve hadde numuneleri: Ağırlıkça % 5 B₄C içeren numunelere göre daha az sayıda partikül yerinden ayrılmıştır. Hadde numunesindeki aşınma dayanımı daha yüksektir.
- 22–59 µm ortalama B₄C tane boyutuna sahip numuneler: 22–59 µm ortalama B₄C tane boyutuna sahip ağırlıkça % 5 takviye oranına sahip döküm numunesinin aşınma direnci, 1–7 µm ortalama tane boyutuna sahip ağırlıkça % 5 B₄C takviyeli döküm numunesinin aşınma direncinden daha yüksektir. Aynı durum ağırlıkça % 10 oranında takviye içeren numuneler için de geçerlidir. SEM görüntülerinde, 22–59 µm ortalama B₄C tane boyutuna sahip numunelerin dağılımının, 1–7 µm ortalama B₄C tane boyutuna sahip olanlardan daha homojen olduğu ve buna bağlı olarak aşınma direncinin 22–59 µm ortalama B₄C tane boyutuna sahip numunelerde daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Yukarıda aşınma izi görüntüleri verilen numunelerin, aşınma testlerinde süreye bağlı olarak

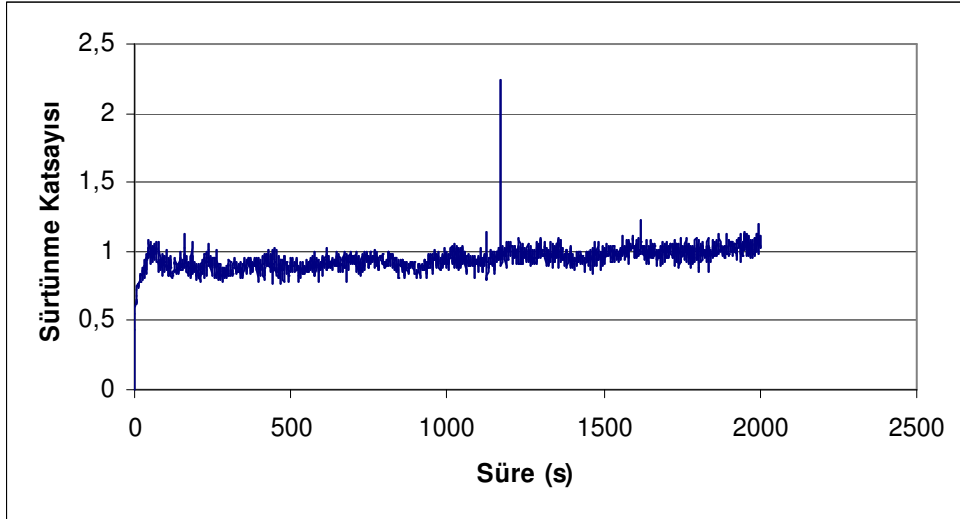
sürtünme katsayılarının değişimini gösteren grafikler Şekil 4.39–4.46’te verilmiştir.



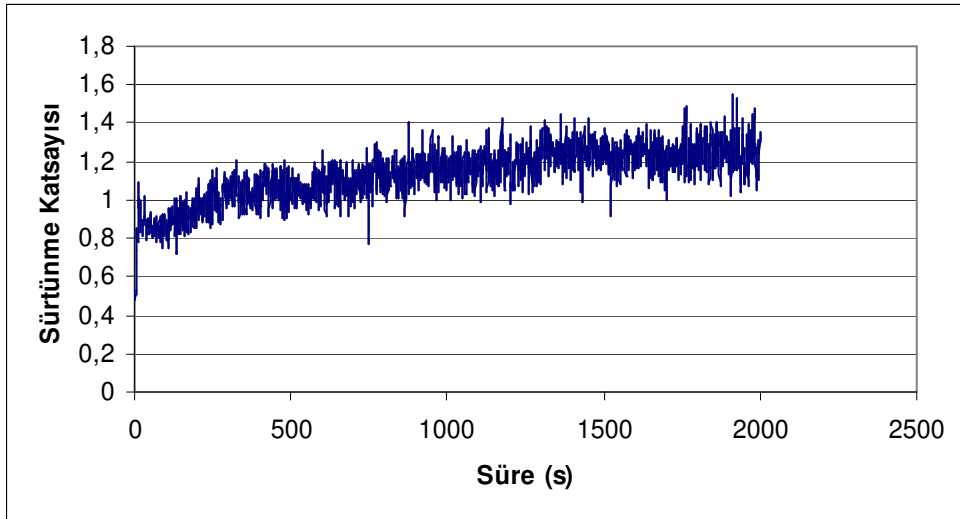
Şekil 4.39 10 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



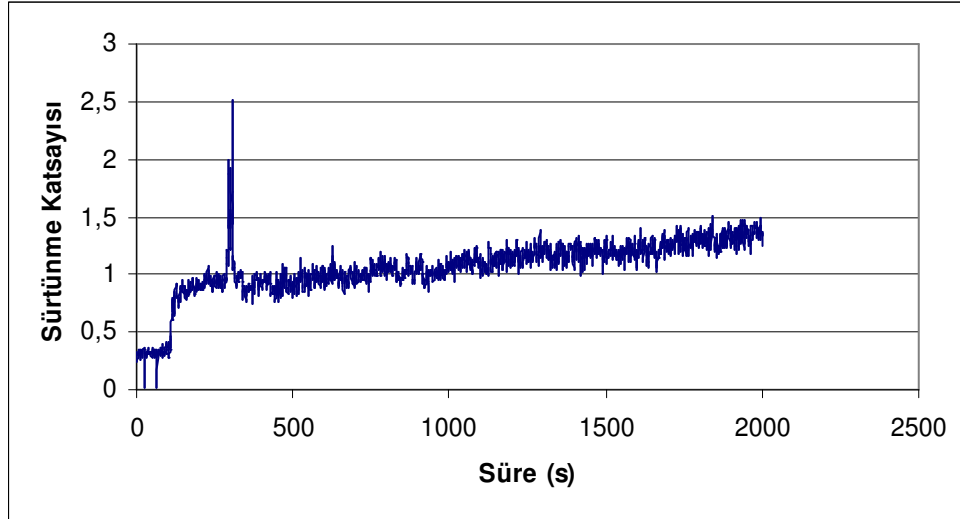
Şekil 4.40 10 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



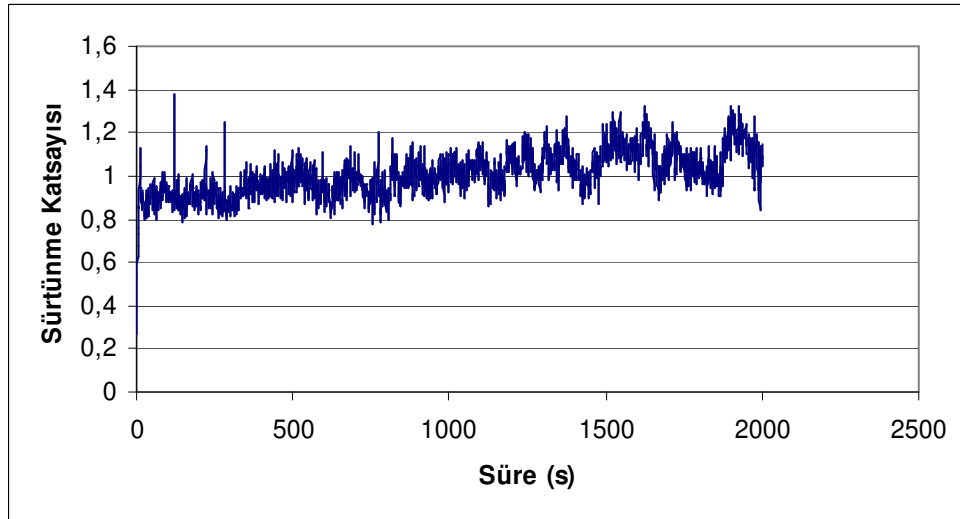
Şekil 4.41 11 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



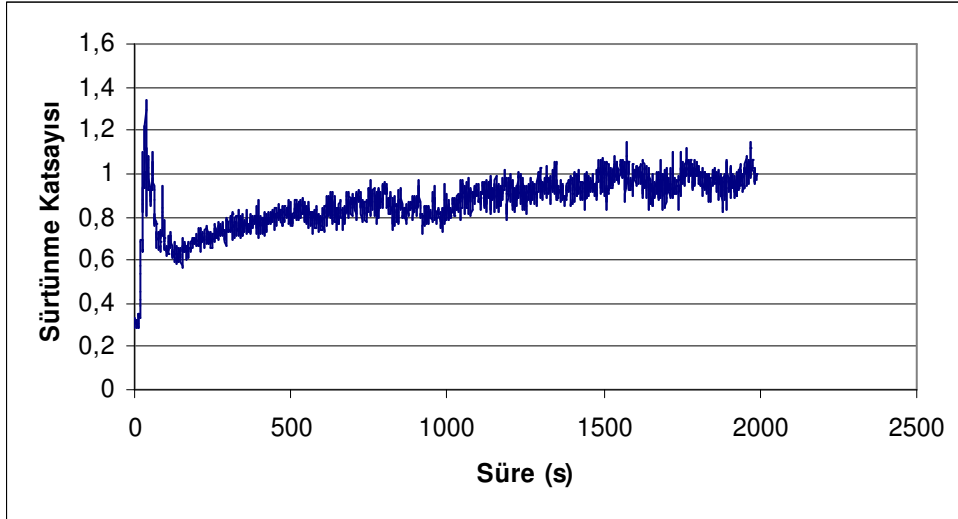
Şekil 4.42 11 numaralı (1–7 μm B_4C tane boyutu, ağ. % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



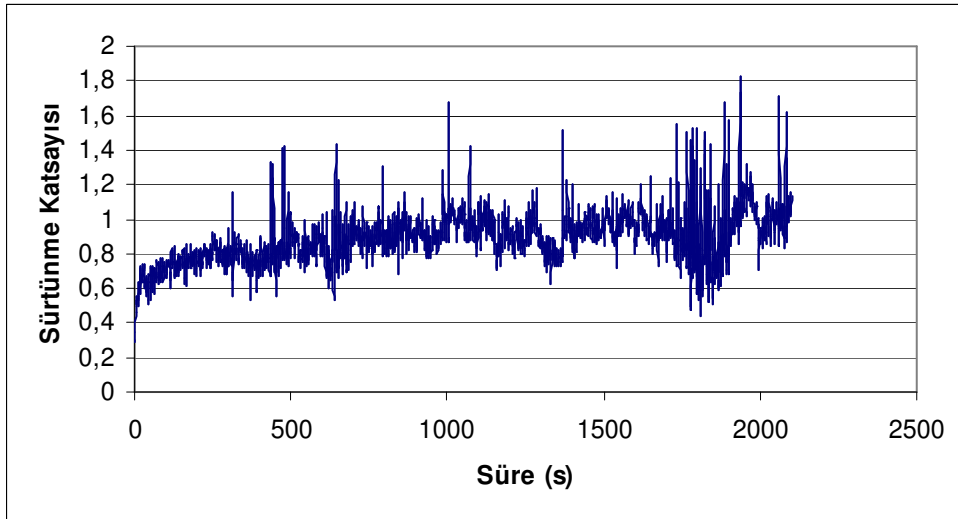
Şekil 4.43 14 numaralı (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 4.44 14 numaralı (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağ. % 5 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 4.45 15 numaralı (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) döküm numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 4.46 15 numaralı (22–59 μm B_4C tane boyutu, ağı. % 10 takviye oranı) soğuk hadde numunesinde sürtünme katsayısı değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.

$\text{Al-B}_4\text{C}$ kompozitlerinin, özellikle aşınma uygulamaları için kullanılmaya aday bir malzeme olduğu düşünüldüğünde, yukarıda verilen sürtünme katsayısı değerlerinin istenilen rakamlardan uzak olduğu söylenebilir. Bu çalışmada maliyet odaklı hareket edilerek uygulanmayan takviye tanelerine ön işlem uygulanması, sürekli karıştırma ve bekleme sürelerinin artırılması gibi önlemlerle, arayüzeyde ıslatmanın daha etkin bir şekilde gerçekleşeceği, böylelikle daha yüksek hacim oranlarına çıkılırken aynı zamanda mekanik özelliklerin de iyileşeceği düşünülmektedir. Ayrıca bu çalışmada, B_4C 'ün alüminyum

üzerindeki ıslatılabilirliğini net olarak ölçümleyebilmek için ticari saf alüminyum kullanılmıştır. Ancak, ticari saf alüminyum, mekanik özellikler bakımından yeterli değildir. Ticari saf Al yerine, daha üstün mekanik özelliklere sahip uygun bir Al alaşımının kullanılması, nihai kompozitin de özelliklerini artıracaktır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1. K_2TiF_6 flaksı kullanılarak düşük sıcaklıkta Al matrisli B_4C takviyeli kompozit malzeme üretimi mümkündür.
2. Al matrisli B_4C takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde flaksın miktarı takviye miktarının altında tutulduğunda, takviye partikülleri yapıya istenilen oranda geçememektedir.
3. Ağırlıkça % 15 ve üzeri takviye oranlarına çıkılmak istendiğinde;
 - a. Takviye partiküllerinin ısıtılma tabi tutulması,
 - b. Takviye fazın kaplanması,
 - c. Flaksın tablet halinde verilmesi,
 - d. Karıştırmanın sürekli olarak uygulanması,
 - e. Partiküllerin ergiyikte bir vorteks oluşturacak şekilde verilmesi, bekleme süresinin artırılması gibi ek işlemlerin biri veya birkaçının uygulanması gerekmektedir.
4. Bu malzemeden beklenen mekanik özelliklere ulaşabilmek için, takviye oranının artırılmasının yanında, ticari saf alüminyuma göre daha üstün mekanik özelliklere sahip bir matris malzemesi seçilmelidir.
5. Bu çalışmada arayüzeyde ıslatmayı sağlamak amacıyla kullanılan titanyuma alternatif olarak Ni kullanılabilir.
6. Bu malzeme, üzerinde üretim pratiği artırıldıkça, otomotiv fren sistemlerinde kullanılmaya aday bir malzemedir.

KAYNAKLAR

- Aikin, Jr., R.M. (1997), "The Mechanical Properties of In-Situ Composites", JOM, 49(8):35-39.
- Akbulut, H., (1994), Alümina Fiber Takviyeli Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı-Özellik ilişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).
- Ankara, A. (1995), "İleri Teknoloji Kompozit Malzemeler", 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 6-9 Haz. 1995, İstanbul, 665-672.
- Arslan, G., Kara, F., Turan, S. (2002), "Bor Karbür-Al Kompozitlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu", SAVTEK 2002, Savunma Teknolojileri Kongresi, 24-25 Ekim 2002, ODTÜ, Ankara, 87-95.
- Butzer, G.A. (1999), "The Production-Scale Spray Forming of Superalloys for Aerospace Applications", JOM, 51(4).
- Cayron, C. (2000), TEM Study of Interfacial Reactions and Precipitation Mechanisms in Al₂O₃ Short Fiber or High Volume Fraction SiC Particle Reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5 Ag Squeeze-Cast Composites, Doktora Tezi, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2000 (Yayımlanmamış).
- Cöcen, Ü., Önel, K. (1996), "Metal Matrisli Kompozitler: Özellikleri ve Uygulamaları", Metalurji, (104):18-31.
- Ejiofor, J.U., Reddy, R.G. (1997), "Developments in the Processing and the Properties of Particulate Al-Si Composites", JOM, 49(11):31-37.
- ETİ HOLDİNG A.Ş. Genel Müd., Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başk. (2003), Bor Karbür Ön Fizibilite Etüdü, Ankara.
- Froyen, L., Verlinden, B. (1994), Aluminium Matrix Composites Materials, TALAT Lecture 1402, European Aluminium Association.
- Fujii, H., Nakae, H., Okada, K. (1993), "Interfacial Reaction Wetting in the Boron Nitride/Molten Aluminium System", Acta metall. mater. 41(10):2963-2971.
- Halverson, D.C., Pyzik, A.J., Aksay, I.A., Snowden, W.E. (1989), "Processing of Boron Carbide-Aluminium Composites", J. Am. Ceram. Soc., 72 (5):775-780.
- Kashyap, K.T., Ramachandra, C., Dutta, C., Chatterji, B. (2000), "Role of Work Hardening Characteristics of Matrix Alloys in the Strengthening of Metal Matrix Composites", Bull. Mater. Sci., 23(1):47-49.
- Kelkar, A., Roth, R., Clarck, J. (2001), "Automobile Bodies: Can Aluminum Be an Economical Alternative to Steel?", JOM, 53(8):28-32.
- Kennedy, A.R., Brampton, B. (2001), "The Reactive Wetting and Incorporation of B₄C Particles into Molten Aluminium", Scripta Materiala, 44:1077-1082.
- Kerti, I.Ç. (1998), Gaz Enjeksiyon ve Elementel Karbon İlavesi Yöntemleri ile TiC Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (yayımlanmamış).
- Kevorkijan, V.M. (1999), "Aluminum Composites for Automotive Applications: A Global

Perspective", JOM, 51(11):54–58.

Lee, B.-S., Kang, S. (2001), "Low-temperature Processing of B₄C-Al Composites Via Infiltration Technique", Materials Chemistry and Physics, 67:249-255.

Miracle, D.B. ve Donaldson, S.L. (2001), ASM Handbook, Volume 21, Composites, ASM International.

Mortensen, A., Marchi, C.S., Degischer, H.P. (2000), Glossary of Terms specific to Metal Matrix Composites, MMC-Assess Consortium.

Naher, S., Brabazon, D., Looney, L. (2005), "Development and Assessment of a New Quick Quench Stir Caster Design for the Production of Metal Matrix Composites", Journal of Materials Processing Technology, 166(3): 430-439.

Oh, S.-Y., Cornie, J.A., Russel, K.C. (1989), "Wetting of Ceramic Particulates with Liquid Aluminium Alloys: Part II. Study of Wettability", Metallurgical Transactions A, 20A:533-541.

Ögel, B. (1997), "Kompozit Malzemelerde Son Gelişmeler ve İleriye Dönük Beklentiler", 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 11–15. Haz. 1997, İstanbul, 639–649.

Peng, H.X., Fan, Z., Evans, J.R.G. (2000), "Novel MMC Microstructures Prepared by Melt Infiltration of Reticulated Ceramic Preforms", Materials Science and Technology, 16:903-907.

Rajan, T.P.D., Pillai, R.M., Pai, B.C. (1998), "Review, Reinforcement Coatings and Interfaces in Aluminium Metal Matrix Composites", Journal of Materials Science, 33:3491-3503.

Scala, E.P. (1996), "A Brief History of Composites in the U.S. -The Dream and the Success", JOM, 48(2):45–48.

Shorowordi, K.M., Laoui, T., Haseeb, A.S.M.A., Celis, J.P., Froyen, L. (2003), "Microstructure and Interface Characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ Reinforced Al Matrix Composites: A Comparative Study, Journal of Materials Processing Technology, 142:738-743.

Srivatsan, T.S., Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A., Lavernia, E.J. (1991), "Processing Techniques For Particulate-reinforced Metal Aluminium Matrix Composites", Journal of Materials Science, 25:5965-5978.

Sur, G., Şahin, Y., Gökkaya, H. (2005), Ergimiş Metal Karıştırma ve Basıncılı Döküm Yöntemi İle Alüminyum Esaslı Tanecik Takviyeli Kompozit Üretimi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 20(2):233-238.

Surappa, M.K. (2003), "Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities", Sadhana 28:319–334.

Technologies Research Corporation (TRC) and Aluminum Metal Matrix Composites Consortium (ALMMC Consortium) (2002), Aluminum Metal Matrix Composites Technology Roadmap, Michigan USA.

Torquato, S. (2000), "Modeling of Physical Properties of Composite Materials", International Journal of Solids and Structures, 37:411–422.

Uygur, İ., Külekçi, M.K. (2002), "Low Cycle Fatigue Properties of 2124/SiCp Al-Alloy

Composites", Turkish J. Eng. Env. Sci., 26:265-274.

Ünal, A., Bakkaloğlu, A. (1988), "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Malzemelerdeki Son Gelişmelere Toplu Bir Bakış", 5. Metalurji Kongre ve Sergisi, 21-25 Kas. 1988, İstanbul, 155-176.

Viala, J.C., Bouix, J., Gonzales, G., Esnouf, C. (1997), "Chemical Reactivity of Aluminium with Boron Carbide", Journal of Materials Science, 32:4559-4573.

Wadsworth, J., Lesuer, D.R. (1999), "Ancient and Modern Laminated Composites - From the Great Pyramid of Gizeh to Y2K", International Metallographic Society 1999 Conference, Cincinnati, October 21 - November 3, 1999.

Yılmaz, M., Altıntaş, S. (1993), "Parçacık SiC Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Mikroyapı ve Aşınma Özellikleri", 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 4-8 May. 1993, Ankara, 1175-1182.

Yılmaz, M., Durlu, N., Mısırlı, Z., Altıntaş, S. (1995), "Alüminyum Esaslı SiC Takviyeli Kompozitte Arayüzey Reaksiyonu", 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 6-9 Haz. 1995, İstanbul, 1323-1328.

Zhang, H., Ramesh, K. T., Chin, E.S.C. (2004), "High Strain Rate Response of Aluminium 6092/B₄C Composites", Materials Science and Engineering, A 384:26-34.

Zhou, W., Xu, Z.M. (1997), "Casting of SiC Reinforced Metal Matrix Composites", Journal of Materials Processing Technology, 63:358-363.

INTERNET KAYNAKLARI

[1]<http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Materials-Science-and-Engineering/3-11Mechanics-of-MaterialsFall1999/5991E176-AC60-4399-87F0-86AE35963750/0/composites.pdf>

[2]<http://www.clc.tno.nl/projects/recent/flax.html>

[3]<http://www.arcs.ac.at/AMTT/reports/reportII-50.pdf>

[4]<http://www-glast.slac.stanford.edu/MechanicalSystems/Analysis/References/MIL/MIL-HDBK-17/HDBK17-4A.pdf>

[5]<http://www.world-aluminium.org>

[6]<http://www.csupomona.edu/~jis/2003/Okhuysen.pdf>

[7]http://www.msb.gov.tr/Birimler/ARGETeknoD/ARGESemineri/Pdf/S09_Toz_Metalurji.pdf

[8]<http://www.mmmmt.com/Technotes/InfilMMCNote.pdf>

[9]<http://www.3m.com/market/industrial/mmc/AlMatrixTech.html>

[10]<http://vizyon2023.tubitak.gov.tr/teknolojiongorusu/paneller/makinevemalzeme/raporlar/Ek2h.pdf>

[11]<http://www.concentric.net/~ctkang/b4c.shtml>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 25.09.1979

Doğum yeri Rize

Lise 1993-1997 İzmir Atatürk Lisesi

Lisans 1997-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fak.,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2003-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Müh. Anabilim Dalı,
Malzeme Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2002-Devam ediyor Global Bilgi A.Ş.