İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AL7Sİ-xB_4C VE AL7Sİ-xZrB_2 (x= %5, %10 VE %15) KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ALAŞIMLAMA VE SİNTERLEME SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ VE KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berna KAYA

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Ekim 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AL7Sİ-xB4C VE AL7Sİ-xZrB2 (x= %5, %10 VE %15) KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ALAŞIMLAMA VE SİNTERLEME SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ VE KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berna KAYA
521091038

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU

Ekim 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 521091038 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Berna KAYA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"AL7Sİ-xB4C VE AL7Sİ-xZrB2 (x= %5, %10 VE %15) KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ALAŞIMLAMA VE SİNTERLEME SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ VE KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI "** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gökhan ORHAN .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 01.10.2014
Savunma Tarihi : 01.10.2014

ÖNSÖZ

Çalışmam sırasında bilimsel katkıları ile bana yardımcı olan, eğitimim süresince yardımlarını ve sabrını esirgemeyen, tez danışmanım ve hocam Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazım süreci ve laboratuvar çalışmalarım boyunca hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, yol göstericim Dr. Hasan GÖKÇE'ye, çalışmalarım esnasında yardımları için sevgili arkadaşlarım Yük. Müh. Ahmet Burçin BATIBAY'a, Yük.Müh. Özgür YURTSEVER'e ve Araş. Gör. Emre TEKOĞLU'na teşekkür ederim.

Yaptığım çalışma boyunca her zaman yanımda olup bana destek olan sevgili PM laboratuvarlarındaki tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışma ve eğitim hayatım boyunca bana bilgisi ve tecrübesiyle yol gösteren, hocam Prof. Dr. M. Lütfi ÖVEÇOĞLU ile tanışmama vesile olarak İTÜ'de yüksek lisans yapma şansını kazanmamı sağlayan Sinter Metal İmalat Sanayi A.Ş Yönetim Kurulu Başkanı Olgun TANBERK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, yüksek lisans eğitimim süresince maddi ve manevi desteğini esirgemeyerek ve bugünleri görmemi sağlayan sevgili teyzem Sermin YÜCEL ve tüm ailem ve arkadaşlarıma teşekkürleri ve şükranlarımı sunarım.

Ekim 2014 Berna KAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ ve AMAÇ 1
2. KOMPOZİT MALZEMELER 5
2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı 5
2.2 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri 6
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 7
2.3.1 Matriks malzemesine göre kompozit malzemeler 7
2.3.1.1 Metal matriks kompozitler 7
2.3.1.2 Polimer matriks kompozitler 9
2.3.1.3 Seramik matriks kompozitler 9
2.3.2 Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler 9
2.3.2.1 Partikül takviyeli kompozit malzemeler 10
2.3.2.2 Fiber takviyeli kompozit malzemeler 10
2.3.2.3 Tabakalı kompozit malzemeler 11
2.4 Metal Matriks Kompozit Malzemeler 11
2.4.1 Metal matriks kompozitlerin sınıflandırılması 13
2.4.1.1 Parçacık takviyeli metal matriks kompozitler 13
2.4.1.2 Sürekli fiber takviyeli metal matriks kompozitler 14
2.4.1.3 Kısa fiber takviyeli metal matriks kompozitler 15
2.4.1.4 Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş (plaka) takviyeli metal matriks kompozitler 15
2.4.1.5 Dağılım ile güçlendirilmiş metal matriks kompozitler 16
2.4.2 Metal matriks kompozitlerin üretimi 17
2.4.3 Metal matriks kompozitlerinin uygulama alanları 18
2.4.3.1 Sürekli fiber takviyeli metal matriks kompozitlerin uygulama alanları 18
2.4.3.2 Partikül, kısa fiber ve visker takviyeli metal matriks kompozitlerin uygulama alanları 19
2.5 Alüminyum Esaslı Metal Matriks Kompozit Malzemeler 20
2.5.1 Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi 21
2.5.2 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması 23
2.5.3 AMMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları 25
2.5.4 AMMK malzemelerin uygulama alanları 26
3. ANA MATRİKS MALZEMELERİ VE PEKİŞTİRİCİLER 29

3.1 Alüminyum 29
3.1.1 Alüminyumun özellikleri 29
3.1.2 Alüminyumun önemi 30
3.1.3 Alüminyum-Silisyum alaşımları 31
3.1.3.1 Al-Si faz diyagramı 33
3.1.3.2 Al-Si alaşımlarında silisyumun özelliklere etkisi 33
3.2 Silisyum 34
3.3 Bor Karbür 35
3.4 Zirkonyum Diborür 40
4. ÜRETİM YÖNTEMLERİ 43
4.1 Toz Metalurjisi 43
4.2 Toz Üretimi 45
4.2.1 Mekanik üretim yöntemleri 46
4.2.3 Elektrolizle üretim yöntemleri 48
4.2.3 Kimyasal üretim yöntemleri 49
4.2.4 Atomizasyon yöntemleri 50
4.3 Mekanik Alaşımlama 52
4.3.1 Mekanik alaşımlama mekanizması 56
4.3.2 Mekanik alaşımlamanın uygulandığı toz kombinasyonları 58
4.3.3 Mekanik alaşımlamanın avantajları 59
4.3.4 Üretim Ekipmanları 60
4.4 Tozların Sıkıştırılması 63
4.4.1 Sıkıştırma yöntemleri 66
4.4.1.1 Tek hareketli sıkıştırma 67
4.4.1.2 Çift hareketli sıkıştırma 67
4.4.1.3 Soğuk izotatik sıkıştırma 68
4.5 Sinterleme 69
4.5.1 Katı hal sinterleme teorisi 70
4.5.2 Sıvı hal sinterleme teorisi 73
4.5.3 Sinterleme atmosferleri ve etkileri 74
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 77
5.1 Malzeme Seçimi 78
5.1.1 Alüminyum (Al) 78
5.1.2 Silisyum (Si) 78
5.1.3 Bor Karbür (B_4C) 79
5.1.4 Zirkonyum diborür (ZrB_2) 79
5.2 Mekanik Alaşımlama Süreçleri 79
5.3 Toz Karakterizasyon Deneyleri 80
5.3.1 Partikül Boyutu Ölçümü 80
5.3.2 X-Işını Difraksiyon Analizleri 81
5.3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları 82
5.3.4 Metalografik Numune Hazırlama 83
5.3.5 Optik Mikroskop Çalışmaları 83
5.3.6 Presleme 84
5.3.7 Yoğunluk Ölçümleri 84
5.4 Sinterleme Çalışmaları 85
5.4.1 Bağlayıcı Giderme 85
5.4.2 Sinterleme Süreçleri 86
5.4.3 Yoğunluk Ölçümleri 87
5.4.4 XRD Çalışmaları 88

5.4.5 SEM Çalışmaları 88
5.4.6 Metalografik Numune Hazırlama 88
5.4.7 Optik Mikroskop Çalışmaları 88
5.4.8 Mikrosertlik Ölçümleri 88
5.4.9 Aşınma Testleri 89
6. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI 91
6.1 Başlangıç Tozlarının Karakterizasyonu 91
6.2 Mekanik Alaşımlanmış Tozların Karakterizasyonu 93
6.3 Sinterlenmiş Numunelerin Karakterizasyonu 110
6.3.1 Yoğunluk Ölçümleri 110
6.3.2 Faz Analizleri ve Mikroyapı Karakterizasyounları 112
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME 139
KAYNAKLAR 141

KISALTMALAR

TM	**:** Vickers Sertliği
MA	**:** Mekanik Alaşımlama
XRD	**:** X-ışınları Difraktometresi
SEM	**:** Taramalı Elektron Mikroskobu
OM	**:** Optik Mikroskop
DSC	**:** Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
TG	**:** Termogravimetrik Analiz
AMMK	**:** Aluminyum Metal Matriks Kompozit
PTMMK	**:** Partikül Takviyeli Metal Matriks Kompozit
HV	**:** Vickers Sertlik
SMK	**:** Seramik Matriks Kompozit
MMK	**:** Metal Matriks Kompozit
PMK	**:** Polimer Matriks Kompozit

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : AMMK malzemelerde kullanılan baslıca takviye malzemelerinin özellikleri. 26
Çizelge 3.1: Alüminyum-Silisyum alaşımlarının bileşimi. 34
Çizelge 3.2 : Bor karbür tozun genel özellikleri. 35
Çizelge 3.3 : Bor karbür seramiğin özellikleri..... 39
Çizelge 3.4 : ZrB_2'ün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri 42
Çizelge 6.1 : Başlangıç tozlarına ait partikül boyut değerleri…….. 91
Çizelge 6.2 : Ana matriks alaşım fazı ve MA süreleri. ……..…..93
Çizelge 6.3 : Al7Si alaşımına çeşitli miktarlarda B_4C ilavesi sonucu oluşturulan kompozit tozlar ve MA süreleri.....94
Çizelge 6.4 : Al7Si alaşımına çeşitli miktarlarda ZrB_2 ilavesi sonucu oluşturulan kompozit tozlar ve MA süreleri.....94
Çizelge 6.5 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si numunelerinin yoğunluk değerleri…….110
Çizelge 6.6 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-xB_4C numunelerinin yoğunluk değerleri…….111
Çizelge 6.7 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-x ZrB_2 numunelerinin yoğunluk değerleri…….111
Çizelge 6.8 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si numunelerinin yoğunluk değerleri. …….....127
Çizelge 6.8 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si xB_4C numunelerinin sertlik değerleri. ……..……...…..128
Çizelge 6.10 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-xZrB_2 numunelerinin sertlik değerleri. ……...130

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Takviye çeşidine göre kompozit malzemeler.....9
Şekil 2.2 : Fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri.....10
Şekil 2.3 : Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matriks kompozitler.....11
Şekil 3.1 : Al-Si alaşımlarında silisyumun mekanik özelliklere etkisi. 32
Şekil 3.2 : Al-Si faz diyagramı. 33
Şekil 3.3 : Bor karbürün yapısı.....37
Şekil 3.4 : Zirkonyum-Bor faz denge diyagramı. 41
Şekil 3.5 : ZrB_2'ün kristal yapısı. 41
Şekil 4.1 : Toz metalurjisindeki muhtemel parçacık şekilleri. 46
Şekil 4.2 : Öğütme yöntemiyle toz üretimi. 47
Şekil 4.3 : Mekanik alaşımlama. 48
Şekil 4.4 : Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi. 48
Şekil 4.5 : Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi. 53
Şekil 4.6 : Mekanik alaşımlamada kullanılan kavanoz sistemi. 54
Şekil 4.7 : Bilyaların toz ile çarpışmasının şematik gösterimi. 54
Şekil 4.8 : Mekanik alaşımlama esnasında tozlarda meydana gelen deformasyon....55
Şekil 4.9 : Mekanik alaşımlama prosesinin son kademesinde oluşan yapı.....56
Şekil 4.10 : Mekanik alaşımlamada kullanılan yüksek enerjili bilya öğütücü.....61
Şekil 4.11 : Gezegen tipi öğütücü.....61
Şekil 4.12 : Atritör tipi öğütücü.....62
Şekil 4.13 : Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası.....64
Şekil 4.14 : TM parçalarının dört sınıfı.....66
Şekil 4.15 : Tek hareketli sıkıştırma.....67
Şekil 4.16 : Çift hareketli sıkıştırma.....68
Şekil 4.17 : Soğuk izostatik sıkıştırma.....68
Şekil 4.18 : İki küresel parçaçığın sinterleme profili.....70
Şekil 4.19 : Parçaççıklar arasındaki sinter bağının atomik düzeyde gösterimi. 71
Şekil 4.20 : Sinterleme aşamalarının şematik gösterimi.....71
Şekil 4.21 : İki tip sinterleme mekanizması.....72
Şekil 4.22 : Sıvı faz sinterlemede katı tanelerin sıvı ile ıslatılması.....74
Şekil 4.23 : Sıvı faz sinterlemenin kavramsal aşamaları.....74
Şekil 5.1 : Deneysel süreçlerin akım şeması.....78
Şekil 5.2 : SPEX^{TM} yeksek enerjili öğütücü.....79
Şekil 5.3 : Kapalı ortam kutusu.....80
Şekil 5.4 : Nano-Flex^{TM} partikül boyut ölçüm cihazı.....81
Şekil 5.5 : ELGA^{TM} saf su cihazı.....81
Şekil 5.6 : Bandelin^{TM} electronic UW 2200 homojenizatör.....81
Şekil 5.7 : BRUKER^{TM} D8 Advance X-ışınları difraktometresi.....82
Şekil 5.8 : JEOL^{TM} JCM-6000 Benchtop SEM taramalı elektron miskroskobu.....82
Şekil 5.9 : Struers^{TM} Labopress-1 bakalite alma cihazı.....83
Şekil 5.10 : Struers^{TM} tegrapol-1 otomatik parlatma cihazı.....83

Şekil 5.11 : Zeiss™ Stereo mikroskop.....84
Şekil 5.12: Tek eksenli hidrolik el presi.....84
Şekil 5.13 : Micromeritics™ AccuPyc 1340 gaz piknometresi.....85
Şekil 5.14 : PROTHERM™ bağlayıcı giderme fırını.....85
Şekil 5.15 : Numunelere uygulanan bağlayıcı giderme ve tavlama fırın rejimi.....86
Şekil 5.16 : LINN™ kontrollü atmosfer sinter fırını.....86
Şekil 5.17 : Numunelere uygulanan sinterleme rejimi.....87
Şekil 5.18 : PRECISA™ arşimet terazisi.....87
Şekil 5.19 : Shimadzu™ mikrosertlik test cihazı.....88
Şekil 5.20 : Tribotester™ aşınma cihazı.....89
Şekil 6.1 : Al tozuna ait partikül boyut dağılım grafiği.....92
Şekil 6.2 : Si tozuna ait partikül boyut dağılım grafiği.....92
Şekil 6.3 : Al(x1500) tozunun taramalı elektron mikroskobu resmi.....93
Şekil 6.4 : Si(x10000) tozunun taramalı elektron mikroskobu resmi.....93
Şekil 6.5a : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si matriks toz alaşımının XRD grafikleri 95
Şekil 6.5b : MA'lanmış Al7Si ana matris sisteminde öğütme süresine göre Al'un kristalin boyut değişimi 95
Şekil 6.6 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-5B4C tozlarının XRD grafikleri.....96
Şekil 6.7 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-10B4C tozlarının XRD grafikleri.....97
Şekil 6.8 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-15B4C tozlarının XRD grafikleri.....98
Şekil 6.9 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-5ZrB2 tozlarının XRD grafikleri.....99
Şekil 6.10 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-10ZrB2 tozlarının XRD grafikleri.99
Şekil 6.11 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-15ZrB2 tozlarının XRD grafikleri.....101
Şekil 6.12 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si tozlarının partikül dağılım grafikleri.....102
Şekil 6.13 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si tozlarının SEM fotoğrafları.....103
Şekil 6.14 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-5B4C tozlarının SEM fotoğrafları.....104
Şekil 6.15 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-10B4C tozlarının SEM fotoğrafları.....105
Şekil 6.16 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-15B4C tozlarının SEM fotoğrafları.....106
Şekil 6.17 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-5ZrB2 tozlarının SEM fotoğrafları.....108
Şekil 6.18 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-10ZrB2 tozlarının SEM fotoğrafları.....109
Şekil 6.19 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-15ZrB2 tozlarının SEM fotoğrafları.....110
Şekil 6.20 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si tozlarının sinter sonrası XRD paterni.....112
Şekil 6.21 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-5B4C tozlarının sinter sonrası XRD paterni.....113
Şekil 6.22 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-10B4C tozlarının sinter sonrası XRD paterni.....113
Şekil 6.23 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-15B4C tozlarının sinter sonrası XRD paterni.....114
Şekil 6.24 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-5ZrB2 tozlarının sinter sonrası XRD paterni.....115

Şekil 6.25 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-10ZrB2 tozlarının sinter sonrası XRD paterni.....115
Şekil 6.26 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-15ZrB2 tozlarının sinter sonrası XRD paterni.....116
Şekil 6.27 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si numunelerinin SEM fotoğrafları.....117
Şekil 6.28 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-5B4C numunelerinin SEM fotoğrafları.....118
Şekil 6.29 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-10B4C numunelerinin SEM fotoğrafları.....119
Şekil 6.30 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-15B4C numunelerinin SEM fotoğrafları.....120
Şekil 6.31 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-5ZrB2 numunelerinin SEM fotoğrafları.....121
Şekil 6.32 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-10ZrB2 numunelerinin SEM fotoğrafları.....122
Şekil 6.33 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-15ZrB2 numunelerinin SEM fotoğrafları.....122
Şekil 6.34 : Al7Si sisteminin sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri
Şekil 6.35 : Al7Si-5B4C sisteminin sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.....124
Şekil 6.36 : Al7Si-10B4C sisteminin sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.....125
Şekil 6.37 : Al7Si-5ZrB2 sisteminin sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.....125
Şekil 6.38 : Al7Si-150ZrB2 sisteminin sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.....126
Şekil 6.39 : Al7Si-15B4C sisteminin sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.....127
Şekil 6.40 : Al7Si-15ZrB2 sisteminin sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.....127
Şekil 6.41 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve interlenmiş Al7Si numunelerinin sertlik değişimi.....128
Şekil 6.42 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5B_4C numunelerinin sertlik değişimi.....129
Şekil 6.43 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10B_4C numunelerinin sertlik değişimi.....129
Şekil 6.44 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15B_4C numunelerinin sertlik değişimi.....130
Şekil 6.45 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5ZrB_2 numunelerinin sertlik değişimi.....131
Şekil 6.46 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10ZrB_2 numunelerinin sertlik değişimi.....131
Şekil 6.47 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15ZrB_2 numunelerinin sertlik değişimi.....132
Şekil 6.48 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si numunelerinin aşınma hızı grafiği.....132
Şekil 6.49 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.....133

Şekil 6.50 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si numunelerinin aşınma sonrasındaki aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları.....134
Şekil 6.51 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5B4C numunelerinin aşınma hızı grafiği.....135
Şekil 6.52 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5B4C numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.....135
Şekil 6.53 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10B4C numunelerinin aşınma hızı grafiği.....136
Şekil 6.54 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10B4C numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.....136
Şekil 6.55 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15B4C numunelerinin aşınma hızı grafiği.....137
Şekil 6.56 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15B4C numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.....137
Şekil 6.57 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5ZrB2 numunelerinin aşınma hızı grafiği.....138
Şekil 6.58 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5ZrB2numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.....138
Şekil 6.59 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10ZrB2 numunelerinin aşınma hızı grafiği.....139
Şekil 6.60 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10ZrB2 numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.....139

AL7Sİ-xB4C VE AL7Sİ-xZrB2 (x= %5, %10 VE %15) KOMPOZİTLERİNİN MEKANİK ALAŞIMLAMA VE SİNTERLEME SÜREÇLERİNİN İNCELENMESİ VE KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

ÖZET

Alüminyum endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Ancak bu malzemeler tek başlarına sahip oldukları özelliklerle kullanım koşullarının gerekliliğini her zaman karşılayamamaktadır. Yeni malzemelere olan bu ihtiyacı karşılamak amacıyla kompozit malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Partikül esaslı metal matriks kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzemelerin rahatlıkla temin edilebilmesi ve toz metalurjisi gibi geleneksel bir üretim yönteminin kullanılabilmesi, düşük maliyet ve üretim kolaylığı açısından da bu malzemeleri ilgi çekici bir konuma getirmiştir.

Kompozit malzemeler teknolojik problemlerin üstesinden gelebilmek için uzun süredir kullanılmaktadır. Kompozitler, sıkça kullanılan mühendislik malzemelerindendir ve dizayn, üretim gibi aşamalarda pek çok farklı yöntem izlenerek, otomotiv parçaları, hava araçları, spor malzemeleri gibi pek çok alanda kullanılır hale gelmişlerdir. Bütün malzemeler içinde kompozit malzemeler, alüminyumu sıkça kullanılan çelikten daha iyi özelliklerle üretebilme ve çelikle yerini değiştirebilme potansiyeline sahiptirler.

Metal matriks kompozit malzemeler ileri teknoloji malzemeler grubunda yer alan, genellikle var olan malzemelerin kullanımının uygun olmadığı yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan malzeme grubudur. Kompozit malzemeler dizayn eden kişilere çok geniş bir malzeme ve sistem çözümü sunarlar. Örneğin otomotiv endüstrisinde ağırlığı azaltmak ve buna bağlı olarak da aracın yakıt tüketimini azaltmak ileri teknoloji uygulamalarında çok önemli bir yer tutmaktadır. Metal matriks kompozitler, matriks malzemeden daha maliyetli oldukları için, malzeme özelliklerinin maliyetten daha önemli olduğu uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Malzemelerin tek başlarına yeterli olmadıkları durumlarda kullanım koşulları sağlanamadığından yeni malzemelere olan ihtiyaç da giderek artar. Metal matriksli kompozit (MMK) malzemeler sınıfında yer alan partikül esaslı metal matriks kompozitler (PMMK), üretimlerinde kullanılan malzemelerin kolay temini, ayrıca toz metalurjisi yönteminin avantajları, düşük maliyetleri ve üretimlerinin kolaylığı göz önüne alındığında kuvvetli bir malzeme grubunu oluştururlar. Yüksek elastik modül, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme, düĢük yoğunluk, termal Ģok direnci, yüksek elektik ve termal iletkenlik gibi bazı avantajlara sahiptirler. Partikül takviyeli metal matriks kompozitler (PTMMK), metallerde ve aynı zamanda seramiklerde tek başlarına bulunmayan özelliklerin eşsiz bir bileşimini oluştururlar. Bu kompozitler, matriks dayanımını arttıran partiküllerin homojen dağılımları ile oluşurlar. Genel olarak, yüksek tokluk, sertlik ve takviyelendirilmemiş matriks malzeme ile

kıyaslandığında daha düşük yoğunluklarda daha fazla dayanım göstermelerinin yanı sıra iyi aşınma dayanımı gösterirler.

Bu çalışmada alüminyum ile ağırlıkça % 7 oranında silisyum içeren metal matriks toz malzemeler 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yöntemi ile üretilmiştir. Bunun yanında bor karbür (B4C) ve zirkonyum diborür (ZrB_2) pekiştirici fazları ile takviyelendirilen alüminyum (Al) ve %7 silisyum (Si) içeriğine sahip metal matriks kompozit (MMK) malzemeler mekanik alaşımlama (MA) yöntemi ile üretilmişlerdir. Ağırlıkça değişen oranlarda bor karbür (B_4C) ve zirkonyum diborür (ZrB_2) takviyesi yapılan toz malzemeler ile çeşitli sürelerde mekanik alaşımlama (MA) yapılan takviyelendirilmemiş alüminyum – silisyum metal matriks malzemelerin özelliklerindeki farklılıklar üzerinde durulmuştur.

Mekanik alaşımlama (MA) süreçleri sonrası elde edilen toz malzemelerin partikül boyutları laser partikül boyutu ölçüm cihazı ile ölçülmüş, toz malzemelerin mikroyapı ve faz analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-Işınları kırınımı (XRD) teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Toz malzemelerin sertlik ölçümleri Vickers mikrosertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ardında mekanik alaşımlanmış numuneler preslenmiş ve presleme sonrası ham yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Sinterlenmiş numunelerin yoğunlukları Arşimet tekniğiyle hesaplanmış ve mikrosertlik deneyleri Vickers mikrosertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sonrası kompozit malzemelerin optik mikroskop (OM) ile yapıları incelenmiş, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-Işınları kırınımı (XRD) teknikleri ile mikroyapı ve faz analizleri yapılmıştır. Ayrıca sinterlenmiş numunelere aşınma testi uygulanmış böylece farklı takviye fazların aşınma oranlarına etkisi incelenmiştir.

Yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda mekanik alaşımlama süresinin artması ile hem toz haldeki hemde sinterlenmiş numunelerin mekanik özelliklerinde önemli oranda artış olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak artan B_4C ve ZrB_2 miktarı ile mekanik özelliklerin daha da iyileştiği gözlemlenmiştir.

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF AL7SI-xB_4C AND AL7SI-xZRB_2 (x= 5 wt.%, 10 wt.% AND 15 wt.%) COMPOSITES VIA MECHANICAL ALLOYING AND SINTERING

SUMMARY

Aluminum is one of the most common used materials in industrial applications. In some cases these materials can not satisfy the requirements of working conditions because of their limited properties. Composite materials are needed to meet this need of new materials. As a result of availability in providing the starting materials and using of a conventional production method as powder metallurgy, particulate based composite materials are very attractive for their cost and simplicity in production.

Composite materials have been utilized to solve technological problems for a long time. They have become common engineering materials and are designed and manufactured for various applications including automotive components, aerospace parts, sporting goods etc. Among all materials, composite materials have the potential to replace widely used steel and aluminum, and often with better performance.

Metal matrix composites are a group of advanced materials designed for use mainly at elevated temperatures where existing materials are not suitable for use. Composite materials offer designers an increasing array of material and system solution. For example in automotive industry reducing weight of a vehicle and therefore reducing the consumption of fuel is very important for high technological applications. MMCs are more expensive than matrix alloys, so they are used in fields where material properties are more important than the cost.

In some cases materials can not satisfy the requirements of working conditions because of their limited properties. Composite materials are needed to meet this need of new materials. As a result of availability in providing the starting materials and using of a conventional production method as powder metallurgy, particulate based composite materials are very attractive for their cost and simplicity in production.

Composite materials have some advantages like high elastic modulus, high strength, workability at high temperatures, low density, thermal shock resistance and high electrical and thermal conductivity. Particle reinforced metal matrix composites (PRMMC) materials exhibit a unique combination of microstructure and properties which is not found in either ceramics or metals alone. These composites consist of a uniform distribution of strengthening particles within a matrix. In general, these materials exhibit good wear resistance, as well as higher stiffness, hardness and strength at a lower density when compared to the non - reinforced matrix material.

The mechanical alloying (MA) process, using ball-milling techniques, has received much attention as a powerful tool for the fabrication of several advanced materials including equilibrium, nonequilibrium (e.g., amorphous, quasicrystals, nanocrystalline, etc.), and composite materials. The MA is a unique process in which a solid state reaction takes place between the fresh powder surfaces of the reactant materials at room temperature. Consequently, it can be used to produce alloys and compounds that are difficult or impossible to obtain by the conventional melting and casting techniques. Basically the ball milling has evolved from being standard technique in milling of ores in mineral dressing and particle size reduction in powder metallurgy to important techniques for the preparation of materials with enhanced mechanical and physical properties either new phases or new engineering materials.

The MA process starts with mixing of powders in the given proportion and charging the powder into the mill along with the grinding medium. This mixture is then milled for the required time till the final state is reached. This state occurs when the composition of every powder particle is the same as the proportion of the elements in the starting powder mixture. Sometimes the powder is milled either to form metastable phases or to achieve certain desired properties. The obtained powder is further consolidated into the bulk shape and heat processed to achieve the specified microstructure and properties.

In this study aluminum and 7 % silicon based metal matrix composite powders are produced via mechanical alloying method. 1, 2, 4, 8 hours are chosen as mechanical alloying time. Another experimental kit is produced via mechanical alloying. Boron carbide and zirconuim diboride is reinforced to aluminum and silicon based metal matrix composite. 1, 2, 4 and 8 hours is chosen as mechanical alloying time. Reinforcing amount of boron carbide and zirconuim diboride is 5%, 10% and 15% weight percent of metal matrix composite.

Differences between non - reinforced metal matrix composite and 5%, 10% and 15% zirconuim diboride and 5%, 10% and 15% reinforced boron carbide metal matrix composites are researched. Their differences in properties with each other are investigated. Moreover, differences in structure cause of various mechanical alloying times were also inspected.

After mechanical alloying process composite powders particle size analysis are achieved at laser particle size analyser. Microstructural and phase characterizations were carried out via scanning electron microscope (SEM), optical microscope (OM) and X-Ray Diffraction (XRD) analyses. Density measurements of green samples were done. Hardness measurements of powder samples were carried out via Vickers microhardness. Sintered samples density measurements of sintered samples are carried out via Archimed’s technique. And after that microhardness analyses are done via Vickers microhardness device. Composite materials optical microscope (OM) images are taken and their microstructures are researched. Using scanning electron microscope (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) techniques composite materials microstructure and phase analyses were carried out. Also wear tests are done to the samples with reinforcement. So effects ofdifferent amount of reinforcing materials and different times of mechanical alloying on metal matrix composites wear behavior are investigated.

As a result of characterization studies done in this study, the mechanical properties of all powder and sintered samples are improved by increasing mechanical alloying time. Also with the increase in B_4C ve ZrB_2 amount of the samples mechanical properties also more increased.

Aluminum based metal matrix composites make up a distinct category of advanced engineering materials that provide unique advantages over conventional aluminum alloys. With the development of new forming methods and the use of low cost particulate material, the use of these composites is increasing in a wide variety of industries.

Aluminum alloys wetting behaviour of ceramic particles are also easy. Pure aluminum can be used as a matrix material also it can be used in aluminum - silicon (Al - Si) form in applications which high wear resistance is needed. For low density and high thermal conductivity aluminum - magnesium (Al - Mg) and aluminum - copper (Al - Cu) alloy forms can be used. Including powder metallurgy most interesting reinforcing elements in aluminum based composites are silicon carbide (SiC), aluminum oxide (Al_2O_3) and boron carbide (B_4C) particulates.

1. GİRİŞ ve AMAÇ

Günümüzde insanların ihtiyaçları sürekli değişmekte ve gelişmektedir. Günümüz teknolojisinin ve endüstriyel sanayisinin gelişmesinin sınırları ise malzemelerin özellikleri ile belirlenmektedir. Gelişen endüstrinin ihtiyaçlarını karşılayacak yeni malzemeler elde edebilme arayışı, malzeme bilimindeki büyük gelişmelerin temelini oluşturmuştur. Bu sayede malzeme bilimciler alışılagelmiş malzemelerden farklı olarak, üstün niteliklere sahip yeni malzemeler ve üretim metotları geliştirmektedir [1,2].

Kompozitler, aralarında kimyasal ya da fiziksel farklılıklar bulunan en az iki farklı geleneksel malzemenin, çeşitli yöntemlerle makro düzeyde bir araya getirilmesi sonucu oluşan karma yapılı malzemelerdir [1,2].

Kompozit yapı, matriks (ana faz) malzemesi, takviye elemanı ve ara yüzey bağı olmak üzere üç bileşenden meydana gelmektedir. Burada, matriks fazı kompozitin tasarlanan biçiminde takviye elemanlarını yer değiştirmeye olanak vermeden bir arada tutmak ve uygulanan dış kuvvetleri herhangi bir değişime uğramadan karşı koyarak, ara yüzey bağı vasıtası ile takviye elemanlarına dağıtma işlevine sahiptir. Takviye elemanının görevi ise, matriksi malzeme ve şekil itibari ile güçlendirmek ve matriks tarafından iletilen yükü taşımak ya da takviye elemanı tipine bağlı olarak değisen oranlarda matriks ile paylaşmakla sorumludur. Ara yüzey bağı da, matriksin takviye elemanına iletmek istediği yükü herhangi bir deformasyona uğramadan takviye elemanlarına iletilmesini sağlamakla görevlidir [2,3].

Mükemmel dayanım özelliklerine sahip kompozitler, uzun süre kullanıma elverişli olmaları nedeniyle çevrenin korunması, hammadde tasarrufu sağlamaları ve aynı zamanda enerji, emek gibi önemli üretim girdilerini azaltmalarına dayalı olarak ekonomik bir malzeme grubudur [4].

Mühendislik malzemelerin yeni bir sınıfı olan Metal Matriks Kompozit (MMK) malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için metal matriks içerisine SiC, Al_2O_3 fiberleri ve/veya parçacıkları gibi seramik takviye elemanları eklenmektedir. Bu

şekilde, metallerin süneklik ve tokluğu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastikiyet modülü özelliklerinin birleştirilmeleri neticesinde son derece önemli mühendislik malzemeleri ortaya çıkmıştır. Bu tür kompozitler gerek kullanım alanının genişlemesi ve yüksek üretim potansiyeli ve gerekse üretim ekonomisi açısından tercih edilmekle beraber üretimde karşılaşılan matriks-takviye elemanı ara yüzey bağının istenilen biçimde oluşmaması, homojen bir yapının sağlanamaması gibi problemler ile üretim yöntemlerinin zor ve zahmetli olması nedeniyle, MMK üretim yöntemlerini geliştirme çalışmaları devam etmektedir [4].

Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen MMK malzemelerin önemli bir kısmını hafif metal esaslı malzemeler teşkil etmektedir. Hafif metal alaşımlarının günümüz teknolojisindeki uygulaması ve önemi giderek artmaktadır. Bu tür alaşımlardan olan alüminyum alaşımları kolay dökülebilmeleri, özgül ağırlık ve ısıl genleşmelerinin düşük, ısıl iletkenliklerinin yüksek olması ve uygun mekaniksel özellikler göstermeleri nedeni ile teknolojik bir öneme ve çekiciliğe sahiptirler. Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunlukları ve yüksek dayanım/ağırlık özelliklerinden dolayı, birçok uygulama alanında başarı ile kullanılan vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Bugün, bazı özellikleri ile çelik ile karşılaştırılabilir durumdadır. Yeni alaşımların geliştirilmesi ve yeni üretim tekniklerinin geliştirilmesiyle, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılabilir hale getirmiştir [5-9].

Ülkemizde, otomotiv sektörü sürekli olarak gelişmekte ve yeni ve üstün nitelikli üretimler yapılabilmektedir. Mevcut alaşımların özellikleri ile farklı üretim tekniklerinin bir araya getirilmesi, elde edilen ürününde kalitesini artırmaktadır. Alüminyum hem dünyada hem de ülkemizde çok iyi bilinen ve aynı zamanda üretimi de yapılan bir metaldir. Ancak, artık klasik üretim tekniklerinden ziyade gelişen teknolojiler kullanılarak daha nitelikli ürünler elde edilmeli ve yeni teknolojilere yatırım yapılmalıdır. Ülkemiz mevcut teknoloji alt yapısı göz önünde bulundurulduğunda, yeni üretim tekniklerine ayak uydurabilecek durumdadır.

Partikül takviyeli metal veya seramik matriks kompozitler tozlarının elde edilmesinde son zamanlarda ilgi çeken yöntemlerden birisi de mekanik alaşımlama tekniğidir. Bu yöntem ile oldukça ince hatta gevrek yapılı tozlarda nano boyutlu ve yapıda düzgün dağılmış tozlar üretilebilmektedir [5-9]. Ayrıca bu teknik ile normalde oda sıcaklığında üretilemeyecek termodinamik denge bakımından teorikte mümkün

olmayan kimyasal kompozisyonlar ya da diğer üretim yöntemleri kullanılarak oluşturulamayacak alaşımlar üretilebilmektedir [5-9].

Mekanik alaşımlama bilya toz çarpışmaları sonucu oluşan yüksek enerji ile istenilen homojen yapının öğütme işlemi ile elde edilmesi prensibine dayanır [10]. Ayrıca sistemde bilyaların ve öğütücü ortamın yüksek hızla döndürülmesi neticesinde oluşan yüksek enerji ile ile tozlarda oluşan plastik deformasyon sonucunda malzemede iş sertleşmesi meydana gelir [5-9].

Sunulan bu tez çalışmasının amacı, bir ileri toz metalurjisi yöntemi olan mekanik alaşımlama (MA) yöntemi ve sinterleme süreçleri ile alüminyum - silisyum (Al - Si) esaslı kompozitlerin geliştirilmesi ile mekanik alaşımlama ve sinter sonrası mikroyapısal, fiziksel ve bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Günümüzde kullanılan ergiterek döküm ve atomizasyon gibi yöntemlerden temel farklılığı, yüksek enerjili öğütme sistemleri içerisinde mekanik öğütme işleminin kullanılmasıdır. Bu yöntem ile alüminyum - silisyum fazlarının birbirleri içerisinde homojen olarak karışması sağlanmıştır. Çeşitli sürelerde yapılan mekanik öğütme işleminin oluşturulacak kompozit malzemeye etkisinin yanı sıra, yapıya katılacak olan farklı miktarlarda B_4C ve ZrB_2 pekiştirici fazlarının yapıya olan etkisi incelenmiştir. Daha sonra sinterlenmiş numunelere karakterizasyon çalışmaları yapılarak, üretilen malzemelerde elde edilen özellikler karşılaştırılmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzemenin Tanımı

Kompozit malzeme, belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı maddenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme grubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu biraraya getirmedeki amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olamayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir.

Kompozit malzemede genelde dört ana koşul aranmaktadır:

- İnsan yapısı olması, dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması,
- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı ve belirli arayüzlerle ayrılmış en az iki malzemenin biraraya getirilmiş olması,
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak biraraya getirilmiş olması,
- Bileşenlerinin hiçbirinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, dolayısıyla bu amaçla üretilmiş olması [11].

Bir kompozit malzeme, genelde düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matriks ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan tali fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır. Ancak, molekülsel ve atomsal düzeyde birleştirilen malzemeler veya alaşımlar mikroskobik olarak homojen olduklarından kompozit malzeme olarak sınıflandırılmaz. Örneğin, çelikteki krom ve vanadyum bir karışım oluşturur ve kompozit değildir. Çünkü yapı mikroskobik olarak homojendir. Fakat karbür uçlu takımlar, yumuşak kobalt metal matriks içine sert karbürlerin yerleştirilmesi parçacıklı bir kompoziti oluşturur [12].

2.2 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden bir veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerden başlıcaları şu şekilde sıralanabilir:

- Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,
- Yorulma dayanımı, aşınma direnci,
- Korozyon direnci,
- Kırılma tokluğu, yüksek sıcaklığa dayanıklılık,
- Isı iletkenliği veya ısıl direnç,
- Elektirk iletkenliği veya elektriksel direnç,
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- Rijitlik,
- Ağırlık,
- Görünüm [11].

Bütün bu özellikler aynı zamanda oluşmaz ve herhangi bir uygulama için böyle bir gereksinime de ihtiyaç yoktur. Özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri, örneğin yoğunluk, elastik modülleri ve çekme dayanımları hesaplanabilir.

Fakat yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli şartlarda; uygun matriks ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, optimizasyonu, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğer faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür.

Bu avantajlar yanında bazı dezavantajları da mevcut olup bunlar da şu şekilde sayılabilir:

- Üretimin güçlülüğü,
- Pahalı olması,
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi,
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümünün olmayışı,
- Kırılma uzamasının az oluşu [12].

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matriks malzemesinin bulunduğu bilinmektedir. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, viskerler, kırpılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların genel fonksiyonu, gelen yükü taşımak ve matriksin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Matriksin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyaf-matriksi bir arada tutmak yanında çoğu takviye elemanları çok gevrek ve kırılgan olduğundan onların yüzeylerini ve dış ve çevresel etkilere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile elyaflarda kırılgan çatlakların yayılmasını önler. Plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirir [12].

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, matriks malzemesine ve takviye çeşidine göre iki şekilde sınıflandırılabilir.

2.3.1 Matriks malzemesine göre kompozit malzemeler

Matriks malzemelerine göre polimer, seramik ve metal matriks kompozit malzemeler olarak üç gruba ayrılırlar. Seramik Matriks Kompozit (SMK) malzemeler doğal olarak yüksek sıcaklık direncine sahip iken, kaba uygulamalarda gevrek yapısı nedeniyle kırılmaya karşı eğilimleri yüksektir. Polimer Matriks Kompozit (PMK) malzemelere göre Metal Matriks Kompozit (MMK) malzemeler yüksek özgül dayanım, yüksek özgül rijitlik ve yüksek sıcaklıktaki iyi mekanik özellikler ve seramiklere göre yüksek tokluk sergilemenin yanında, çoğunlukla iyi aşınma ve sürtünme direncine sahiptirler [13].

2.3.1.1 Metal matriks kompozitler

Metal malzemelerin iyi süneklik ve tokluk özelliklerinin, seramik malzemelerin yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modülü özelliklerinin bir araya getirilmesiyle oluşan metal matriks kompozit malzemeler, yüksek elastiklik modülü ve mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda kullanılabilme gibi önemli özelliklere sahiptirler [14].

Metal Matriks Kompozitler (MMK) Metal alaşımlarının fiber, visker ya da partiküller ile güçlendirilmesiyle oluşan kompozitleridir. Matriks malzemesinin

metal olması nedeniyle polimer matriks kompozitlere göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler ancak ağırlıkları polimer matriks kompozitlere gore daha fazladır. PMK'lere göre daha yüksek çekme mukavemeti ve kayma modülü değerlerine sahiptirler. Boyut kararlılıkları, yüksek sıcaklık ve ısıl kararlılık özellikleri, kaynak ve diğer yöntemlerle kolaylıkla birleştirilebilme özellikleri diğer kompozitlere göre avantaj sağlamaktadır [13].

Metallerin matriks malzemesi olarak kullanılması, yine metal olan çok ince liflerin (visker) üretimiyle başlamıştır. Daha önce üretilen cam lifi, polimerlerin donatılmasında başarıyla kullanılsa da, akışkanlık özelliği nedeniyle yükselen sıcaklıklarda taşıyıcılığını kaybetmektedir. Bu nedenle, çok ince aliminyum oksit lifler (Al_2O_3 – visker) üretilinceye kadar, metal matriks kompozit üretimine gidilmemiştir [11].

Metal matriks kompozitlerin gelişimine katkı sağlayan temel etkenler uçak ve uzay endüstrisindeki iskelet yapılar olmuştur. Son zamanlarda, otomotiv ve elektronik endüstrilerinde de yoğun bir biçimde kullanım alanı bulan metal matriks kompozitlerin bu denli cazip olmalarını sağlayan itici güç, istenilen malzeme özelliklerine sahip olacak şekilde dizayn edilebilmeleri ve üretim proseslerinin buna uygun biçimde geliştirilebilir olmasıdır.

Metal matriks kompozitlerin uygulama alanlarına gelince, bunlar da sadece uzay sanayi değil keza otomotiv sanayinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Makina tasarımı, spor malzemeleri ve diğer malzemeler yanında rijitlik ve hafiflik ile birlikte iyi yorulma direnci sağlaması için otomobil buji kolları, alüminyum oksit takviyeli alüminyum kompozitlerden basınçlı döküm tekniği ile yapılmıştır. Bu kompoztlerin yüksek sıcaklık özelliklerinin çok iyi olması sebebiyle otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Uçak kanatları panelleri içinde SiCw takviyeli alüminyum kompozitten üretilmiş ve %20-40 arasında hafiflik sağlanmaktadır [12]. MMK'ler ile de uçak iskeleti ve gövdenin yapımında benzer azalmalar elde edilmektedir [12].

Metal matriks kompozitler farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmalardan bir çeşidi pekiştiricinin türüne göre yapılandır. Partikül takviyeli, tabakalı, fiber takviyeli ve sızdırma kompozit malzemeler sınıflandırmanın ana başlıklarıdır. Bu tip malzemelerdeki fiber pekiştiricili kompozitler ayrıca sürekli fiber, süreksiz fiber ya da viskerler olarak alt gruplara ayrılabilir [15].

2.3.1.2 Polimer matriks kompozitler

Polimer matriks kompozit malzemeler üretim yöntemlerinin diğer kompozit malzemelere göre daha ucuz ve basit olması sebebiyle yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. Polimer matriks kompozit malzemelerde matriks malzemesi olarak; epoksi ve polyester gibi termoset plastikler ile termoplastik polyester, poliamid (PA), politetrafloretilen (PTFA), polietilen (PE) gibi termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak ise cam, aramid, karbon, polietilen, bor, Al_2O_3 ve SiC kullanılmaktadır [16].

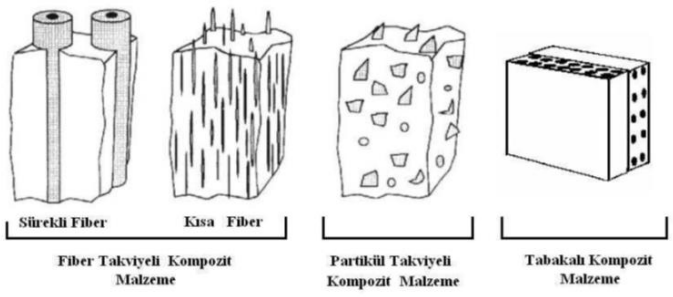
Özellikle cam, aramid ve karbon ile takviye edilmis polimer kompozitler endüstride geniş uygulama alanına sahiptirler. Bu alanlara örnek olarak uçak ve helikopter parçaları, spor malzemeleri, güçlendirme amaçlı yapı elemanları verilebilir [11].

2.3.1.3 Seramik matriks kompozitler

Seramik matriks kompozit malzemeler genellikle yüksek sıcaklıkta çalışması gereken parçalar için kullanılırlar. Sert ve kırılgan malzemeler olan seramik malzemeler, çok düşük kopma uzaması gösterirler, düşük tokluğa sahiptirler ve termal şoklara karşı dayanıksızdırlar. Buna karşılık çok yüksek elastiklik modülüne, düşük yoğunluğa ve çok yüksek çalışma sıcaklıklarına sahiptirler. Seramik matriks kompozit malzemelerde matriks malzemesi olarak Al_2O_3, SiC, Si_3N_4 ve B_4C yaygın olarak kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarakta genellikle Al_2O_3 ve SiC seramik malzemeler fiber formuna getirilerek kullanılmaktadır [17].

2.3.2 Takviye malzemesine göre kompozit malzemeler

Takviye çeşidine göre kompozit malzemeler fiber takviyeli, partikül takviyeli ve tabakalı kompozitler olmak üzere üç grupta incelenebilirler (Şekil 2.1).



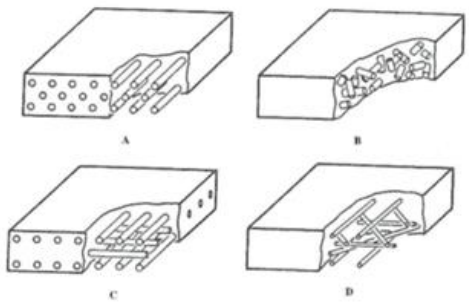
Şekil 2.1: Takviye çeşidine göre kompozit malzemeler [20].

2.3.2.1 Partikül takviyeli kompozit malzemeler

Kompozit malzemelerin üretim süreçlerindeki gelişmeler sonucunda, partikül takviyeli kompozit malzemelerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Bu kompozitler özellikle düşük maliyetleri ve iyi performanslarıyla ön plana çıkmaktadırlar. Kompozit malzeme üretimde en çok kullanılan takviye partiküller, Al_2O_3 ve SiC seramik malzemeleridir [12]. Takviye partiküller; küresel, kübik, tek tip veya farklı tip geometrilere sahip olabilmelerinin yanında kompozit malzeme içerisinde rastgele veya yönlendirilmiş şekilde konumlandırılabilmektedirler. Yönlendirilmiş partikül takviyesi ile özel zorlamalara karşı belirli yönde güçlendirme yapılabilmektedir [16].

2.3.2.2 Fiber takviyeli kompozit malzemeler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler, sünek matriks malzemesi içerisine, mukavemeti ve elastiklik modülü yüksek fiberlerin ilave edilmesiyle oluşturulurlar. Yük taşıma kapasitesinin önemli olduğu durumlarda sıklıkla kullanılan fiber takviyeli kompozit malzemelerde, matriks malzemesi kompozite uygulanan yükü fiberlere transfer eder. Bu sayede yüksek mukavemete sahip fiber yükün büyük bölümünü taşıyabilmektedir. Fiberler, kompozit malzeme içerisinde tek yönlü şekilde ya da yönlendirilmiş olarak bulunabilmektedirler. Fiberler genel olarak, malzemeye uygulanacak yüklerin doğrultusunda konumlandırılırlar. Bunların yanı sıra fiberler örgü yapı şeklinde de kullanılmaktadır. Özellikle, uzay ve havacılık sektörlerinde ihtiyaç duyulan yüksek mukavemet, rijitlik ve hafiflik gibi özelliklere sahip fiber takviyeli kompozit malzemeler, bu sektörler için vazgeçilemez bir malzeme grubudur [16]. Şekil 2.2'de fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri gösterilmiştir.



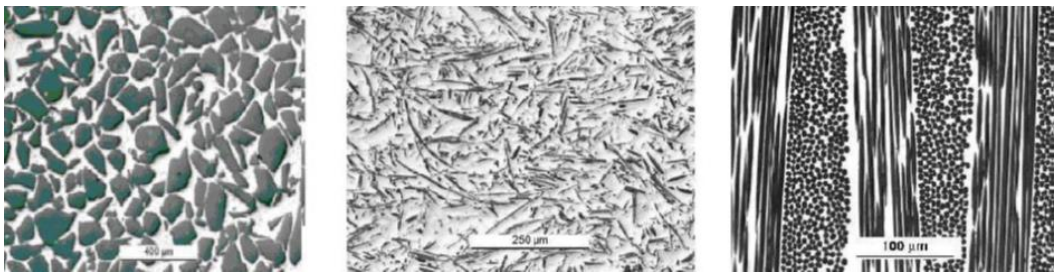
Şekil 2.2: Fiber takviyeli kompozit malzemelerin farklı morfolojileri, A- Sürekli tek yönlü fiberler, B- Rastgele yerleştirilmiş fiberler, C- Ortagonal fiberler, D- Açılı yerleştirilmiş fiberler [5].

2.3.2.3 Tabakalı kompozit malzemeler

Farklı özelliklerdeki tabakaların üst üste veya yan yana getirilmesiyle oluşturulan tabakalı kompozit malzemeler, tasarlanan tabakaların yapısına bağlı olarak aşınma direnci, korozyon dayanımı, yük aşınma kapasitesi gibi özelliklerin istendiği alanlarda kullanılabilmektedirler. Tabakalar, farklı malzemelerden oluşabileceği gibi farklı türde ve şekillerde takviye içeren kompozit malzemelerden de oluşabilmektedir. Kullanım amacına göre değişik şekillerde tasarlanabilen tabakalı kompozit malzemelerin uygulama alanlarına örnek olarak askeri ekipmanlar ve hafif zırhlar verilebilir [18].

2.4 Metal Matriks Kompozit Malzemeler

Metal matriks kompozit (MMK) malzemeler, istenen ve gerekli özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle elde edilen yeni malzemelerdir. MMK malzemeler tek bileşenli alaşımlarla elde edilemeyen özellikleri sağlamak üzere, bir metal matriks içinde sürekli veya kısa fiber, visker veya partikül şeklinde takviye fazı içerir. Günümüz şartlarında üretilebilen metal matriks kompozit malzemeler üç gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.3):



a) b) c)

Şekil 2.3: Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matriks kompozitler, a) partikül takviyeli, b) kısa fiber takviyeli, c) sürekli fiber takviyeli [21].

- Elastiklik modülünün, belli oranda da mukavemetin artmasıyla sonuçlanan, bağlayıcı matriks içine partikül şeklindeki takviye malzemelerinin ilavesi ile oluşturulan partikül takviyeli metal matriks kompozitler,

- Partikül takviyeli metal matriks kompozitlere göre daha büyük yük iletimi yeteneğine sahip, yüksek dayanımlı visker veya kısa fiber takviye metal matriks kompozitler,
- Fiberin yüksek performanslı tüm özelliklerini taşıyan sürekli fiber esaslı metal matriks kompozitler [19].

MMK malzemelerin üretiminde matriks malzemesi olarak çok değişik metal ve metal alaşımları kullanılmaktadır. MMK malzemelerde matriksin iki önemli görevi vardır. Birincisi, tasarlanan malzeme formunu koruyarak bir arada tutmak ve uygulanan her hangi bir kuvveti, tahribata uğramadan, ara yüzey bağı vasıtası ile takviye fazına iletmek ve dağıtmaktır. İkincisi ise, kompozitin imalatında seçilmiş olan matriks fazının çalıştığı ortamlarda kendisinden istenilen bir takım özellikleri de yerine getirmesidir [22]. Örneğin; sulu veya oksitlenme olabilecek bir ortamda çalışan kompozit malzemenin oksidasyona ve korozyona karşı dirençli olması, elektrik iletkenliğinin ya da elektrik iletkenliğine karşı direncin istenildiği yerlerde ise yine bu görevi matriks fazının üstlenmesi beklenmektedir. Bu görevlerinin yanında matriks fazının hafif, kolay elde edilebilir, termodinamik değişimlere karşı uyum gösterebilmesi gibi özellikleri de taşıması gerekmektedir [1]. Matriks malzemesinin seçiminde dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Tasarlanan kompozitin üretim yöntemi,
- Kullanılacak olan takviye fazının uyum durumu (matriks malzemesinin ıslatma kabiliyeti, ısıl genleşme katsayı farklılıkları, vb.),
- Üretim sırasındaki matriks fazından istenilen hal değişimleri,
- Üretim sonrası uygulanacak olan ısıl işlem,
- Mekanik şekil değiştirme kabiliyetleri,
- Kompozitin sergilediği mekanik ve fiziksel özellikler (dayanım, süneklik, tokluk vb.),
- Kullanım alanının durumu,
- Montaj işleminin tipi (civatalı, perçinli, kaynaklı, vb.),
- Üretim sonrası kullanılacak son profilin verilmesindeki işleme yöntemi şeklinde sıralanabilir [4, 22].

Genel olarak bakıldığında metal matriks kompozitlerin, metallere göre üstün olan özellikleri şunlardır:

- Yüksek mukavemet / yoğunluk oranı , başka bir deyişle spesifik mukavemet,
- Yüksek elastiklik modülü / yoğunluk oranı, başka bir deyişle spesifik modül,
- Daha iyi yorulma direnci,
- Yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyabilme ve düşük sürünme oranı gibi daha iyi yüksek sıcaklık özellikleri,
- Düşük termal genleşme katsayısı,
- Daha iyi aşınma direnci.

Metal matriks kompozitlerin dezavantajları olarak ise şu maddeler sayılabilir :

- Sürekli fiber takviyesinin söz konusu olduğu durumlarda zor ve karmaşık üretim prosesleri (döküm yöntemi hariç),
- Metallere göre sünekliğin belli oranda azalması,
- Yüksek maliyetli üretim sistemi ve teçhizat,
- Yeni gelişen bir teknoloji olması nedeniyle firmaların ve üreticilerin deneyimsiz oluşu.

Özellikle döküm yönetimi ile üretilen partikül takviyeli MMK malzemeler, sürtünme ve aşınma dayanımının istendiği alanlarda küçümsenmeyecek oranda endüstriyel uygulama alanına sahiplerdir. Örneğin, Al- Grafit ve Al-SiC MMK pistonlar, yüksek aşınma dayanımı sağlamaları ve yakıt tüketimini azaltmalarından dolayı ön plana çıkmaktadırlar. Bu tür kompozitlerin diğer kullanım şekilleri yatak malzemesi, elektrik kontak malzemesi ve silindir gömleği olabilmektedir.

MMK malzemeler bünyelerinde yer alan takviye fazlarının tiplerine göre 5 farklı yapıda sınıflandırılmaktadırlar:

i. Parçacık takviyeli metal matriks kompozitler,
ii. Sürekli fiber takviyeli metal matriks kompozitler,
iii. Kısa fiber takviyeli metal matriks kompozitler,
iv. Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş takviyeli metal matriks kompozitler,
v. Dağılım ile güçlendirilmiş metal matriks kompozitler.

2.4.1 Metal matriks kompozitlerin sınıflandırılması

2.4.1.1 Parçacık takviyeli metal matriks kompozitler

Parçacık Takviyeli Metal Matriks Kompozit (PMMK) malzemelerde, homojen olarak dağılmış sert ve/veya gevrek malzeme yumuşak bir matriksle kuşatılmıştır

[23]. PMMK'ler tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matriks ile oluşturdukları malzemelerdir. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3, SiC, B_4C Si_3N_4 gibi seramiklerdir [24]. Parçacık maliyetinin fiber maliyetine göre oldukça düşük olması, PMMK malzemelerin uzun fiber takviyeli malzemelerden daha kolay üretilebilmeleri ve üretilen MMK malzemelerin daha izotropik bir yapıya sahip olmaları nedeniyle, son yıllarda yapılan çalışmalar bu tür kompozit malzemelerin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır [25].

Döküm yoluyla üretilen bu tür kompozitlerde pratikte karşılaşılan bir problem ise, parçacık ilave edildiğinde tozların karıştırma zorluğu ve ergiyik viskozitenin düşmesi veya sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatmamasıdır. Islatabilirliğin iyileştirilebilmesi için:

- Katı yüzey enerjisinin artırılması,
- Sıvı metal yüzey geriliminin azaltılması,
- Katı ve sıvı ara yüzey enerjisinin azaltılması

gibi parametreler üzerinde durulması gerekir [24]. Bu nedenle, parçacık yüzeyine kaplama yapılması ve ısıl işlem uygulanması veya matriks bileşiminin ayarlanması gibi metotlar uygulanmaktadır. Metal matriks kompozitlerde ıslanabilirligi iyileştirebilmek için genellikle magnezyum elementi kullanılmaktadır. Bu şekilde kompozitin dayanımı:

- Parçacıkların büyüklüğüne,
- Parçacıklar arası mesafe ve homojen dağılıma,
- Matriks özelliklerine,
- Parçacıkların özelliklerine

bağlı olarak değişir [26].

2.4.1.2 Sürekli fiber takviyeli metal matriks kompozitler

Sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler, ön şekil verilmiş takviyelere veya tel dizinlerine sıvı emdirilmesi veya ön şekil verilmiş takviye-ana malzeme difüzyonu yoluyla üretilirler. Üretilmeleri otomasyonu zor olan birçok aşama gerektirir ve fiber maliyeti oldukça yüksektir. Boyutları ve şekli, standart mekanik işlemler ve mekanik yöntemlerle ikincil işlemlere uygun değildir veya sınırlıdır. Bu kompozitlerde, genellikle 0,1–250 μm çaplarında fiberler kullanılır. Karbon, bor, SiC ve Al_2O_3

sürekli fiber takviyeli kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarının en çok tercih edilenleridir [25].

Sürekli fiber takviyeli MMK malzemeler, takviye elemanına paralel yönde mükemmel mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen bu malzemelerin yüksek maliyeti yaygın olarak kullanılmalarını engellemektedir. Ayrıca, sürekli fiber takviyeli MMK'lar fiber eksenine dik yönlerde anizotropik özelliklere sahiptir. Sürekli fiber takviyeli MMK malzemelerin kullanılmaları yüksek maliyetleri nedeniyle, çoğunlukla askeri ve çok özel amaçlı uygulamalarla sınırlandırılmıştır [4].

2.4.1.3 Kısa fiber takviyeli metal matriks kompozitler

Bu tür MMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları kısa fiberler veya kılcal kristallerdir. Kısa fiber olarak adlandırılan takviyeler, yaklasık 3-5 μm çapında ve 0,5-6 mm uzunluğunda üretilirler [26]. Yapılarında hemen hemen kristal hataları olmayan kılcal kristallerin akma dayanımları teorik dayanımlarına yakındır [25]. Bu nedenle, yüksek dayanımlı süreksiz takviyeli MMK malzeme üretmek için kullanılmaktadır. Özellikle, kılcal kristalin yüksek sıcaklıktaki özellikleri diğer fiberlerden iyi olduğu için, kılcal kristallerle takviyeli MMK malzeme üretimi için çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Sürekli fiberlere göre kısa fiber takviyeli kompozitlerde üretim işleminin hızlı, maliyetinin düşük ve şekil verme yeteneğinin yüksek olması nedeniyle tercih edilirler. Kılcal kristallerin çap-uzunluk oranlarının (l/d » 50-100) yük transferine müsaade etmesi de diğer avantajlarıdır. SiC kılcal kristal takviyeli alüminyum MMK malzemeler uzay araçlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, kılcal kristallere olan bu yoğun ilgi, sağlıkla ilgili problemler oluşturduğu için azalmıştır [4].

2.4.1.4 Rasgele düzlemsel yönlendirilmiş (plaka) takviyeli metal matriks kompozitler

Plaka takviyeli kompozitler basınçsız sinterleme, gaz basıncıyla sinterleme ve sıcak presleme olmak üzere üç yolla üretilebilmektedir. Son yıllarda seramik matriks kompozitlerdeki gelişmeler (özellikle kılcal kristal takviyeli Al_2O_3 matriksli kompozitler) yüksek sıcaklıklarda mükemmel termomekanik özellikleri sayesinde yapısal uygulamalarda ve kesici takım yapımında kullanılmaktadır. Sağlık alanında

kullanılan kesme aletlerinin modifikasyonu ve kayma özelliklerinin optimizasyonu için de üretilmeye başlanmıstır [27].

Kılcal kristaller Al matriks ile birleştirildiginde çok iyi mekanik özellikler elde edilmesine rağmen, araştırmacılar, bükme testleri uygulayarak bazı sonuçlar bulmuşlardır. Hacimce %30 SiC plaka takviyeli Al_2O_3 matriksli kompozitin 9 Mpa'da, SiC kılcal kristal takviyeli kompozitin 6 MPa'da kırıldığı gözlenmiştir. Ayrıca plakalar, kılcal kristal gibi sağlık açısından tehlikeli olmaması, topaklanma problemi olmadan yüksek oranlarda matrikse uygulanması ve el ile kolaylıkla yerleştirilebilmesi gibi nedenlerden dolayı daha fazla kullanılmaktadır [28].

2.4.1.5 Dağılım ile güçlendirilmiş metal matriks kompozitler

Bu kompozitler, yüksek ısıl kararlılığa sahip mikrondan daha küçük çökeltiler veya parçacıkların metalik matriks içinde homojen dağılmasıyla elde edilir. Bu parçacıkların çapı 0,01 μm ile 0,1 μm ve uzunlugu 50-200 μm arasındadır. Kullanılan parçacıkların hacim oranı %1-15 arasında degisir [26].

Yüksek oranda izotropik özellikler gösteren kompozit malzemelerdir. Metalik malzemelerin sertliklerini, aşınma dirençlerini, yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerini geliştirmek için değişik türde oksit, karbür veya nitrür parçacıklarından faydalanılır. Tungsten karbür, titanyum karbür, krom karbür, bor karbür ve silisyum karbür gibi karbürlerin tipik özellikleri, yüksek sertlik ve aşınma dirençleridir. Parçacık boyutları, hacim oranları, parçacıklar arası mesafe, matriks içerisindeki dağılım homojenliği, çözünürlükleri ve ısıl kararlılıkları kompozit malzemelerin özelliklerini belirleyen esas faktörlerdir [9].

Kompozit oluşturulması esnasında katılan partiküllerin boyutları ve hacim oranları arasındaki fark mekanik özellikleri de etkilemektedir. Dağılımla sertleştirilmiş alaşımlarda ikinci fazın etkisi dislokasyon hareketlerini engellemesi şeklindedir. Yapı içerisinde partiküllerin boyutu arttıkça kompozitin mukavemeti düşer. Parçacık boyutu parçacıklar arası mesafeyi belirlediğinden aynı hacim oranında parçacık boyutu küçük olursa parçacıklar dislokasyon hareketlerini daha etkili olarak kontrol edeceğinden, kompozitin dayanımı artar [9].

2.4.2 Metal matriks kompozitlerin üretimi

Metal matriks kompozitler üretim yöntemleri bakımından diğer kompozit üretimi yöntemlerine benzemektedir. Metal matriks kompozitlerin üretim yöntemlerinden bazıları; sürekli döküm yöntemi (kalıptan geçirilerek kütük ya da çubuk şeklinde malzeme elde edilmesi), plazma sprey yöntemi (ince filmler), toz metalurjisi ve sıvı sızdırma şeklinde sıralanabilir. Levha şeklinde malzemeler haddeleme ya da ektruzyon ile üretilebilmektedir. Sürekli döküm üretim yöntemi olarak oldukça verimlidir. Bu yöntem ayrıca malzemeyi daha kısa süre yüksek sıcaklıklara maruz bıraktığı için geniş bir yelpazade farklı malzemelerin üretimi için uygundur. Bu yöntemde metal matriks ergime noktasının üstünde bir sıcaklığa çıkartılıp şekillendirme ve pekiştirici faz ile iyi yüzey teması sağlanabilmektedir. Son kademe olarak makina ile işleme yapılabilmektedir. Bu işlem geleneksel metal üretim yöntemleri ile benzerdir. Seramik matriks kompozitlerde olduğu gibi fiber tarzı bir pekiştirici kullanılacaksa matriks fazın onu koruması gerekmektedir. Bu nedenle metal matriks kompozitler iyi yüzey bağlanma özelliği gösterdiğinden kompozit dayanımı da oldukça yüksektir [5-9].

Metal matriks bir kompozit malzemenin üretim tekniği; üretilecek parçanın şekline, istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere, matrikse, takviye elemanı şekli ve türüne göre belirlenir. Her üretim yönteminin kendine özgü avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Ancak tüm kompozit üretim yöntemleri, geleneksel malzeme üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında, matriks ve takviye fazı arasındaki etkileşimler nedeniyle karmaşıklığıyla dikkat çekmektedir. Bu yöntemleri; katı faz üretim yöntemleri, sıvı faz üretim yöntemleri ve diğer yöntemler olarak sınıflandırılabiliriz:

A) Katı Faz Üretim Yöntemleri

- Toz Metalurjisi Teknikleri
- Difüzyon Bağı Yöntemi

B) Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

- Sıvı Metal İnfiltrasyon
- Sıkıştırma Döküm
- Sıvı Metal Karıştırma
- Plazma Püskürtme

C) Diğer Yöntemler

- Rheocasting ve Compocasting Döküm Teknikleri
- Vidalı Ekstrüzyon
- In-Situ Tekniği
- XD Tekniği

Üretim yönteminin seçiminde, üretilecek mamul veya yarı mamülün önceden belirlenen fiziksel ve mekanik özelikleri değerlendirilip, şu parametreler dikkate alınarak yöntem belirlemesi yapılır:

- Çalışma sıcaklığı aralığı,
- Takviye malzemesi şekli,
- Matriks malzemesi ile takviye malzemesinin uyumu,
- Matriks ve takviye malzemelerinin ek işlem gereksinimi,
- Matriks malzemesi ile takviye malzemesi arasında oluşabilecek reaksiyonlar,
- Elde edilecek üründen istenen boyut tamlığı,
- Takviyenin matriks malzemesi içerisinde dağılımının homojen olması,
- Matriks-takviye arayüzey bağının tam olarak sağlanabilmesi [29].

2.4.3 Metal matriks kompozitlerinin uygulama alanları

80'li yılların başında belli sektörlerdeki gelişmeler, özellikle gelişmiş motorlar ile havacılık ve uzay araçları üretimi için yüksek sıcaklık malzemelerine olan gereksinim, metal matriks kompozit malzemelere olan ilginin artmasında başlangıç noktası oluşturmuştur. Metal matriks kompozit malzemeler halen pahalı olmalarına karşın, metaller veya plastik matriks kompozitlerle karşılanamayan yüksek teknolojiye dayalı gereksinimler bu malzemelerle karşılanabilmektedir. ABD'de çoğu araştırma bazında ve askeri amaçlı olmak üzere 1988'de yirmi milyon dolar olan metal matriks kompozit pazarı 2000 yılında ortalama %20'lik bir artış göstermiştir. Dünya pazarında en büyük payı alüminyum metal matriks kompozit malzemeler almaktadır [19,30].

2.4.3.1 Sürekli fiber takviyeli metal matriks kompozitlerin uygulama alanları

Yüksek maliyetli sürekli fiber takviyeli metal matriks kompozitler, yüksek mukavemet ve ısı direnci gerektiren ancak maliyetin önemli olmadığı veya kaçınılmaz olarak katlanıldığı alanlarda havacılık, uzay endüstrisi ve enerji sektöründe uygulama olanağı bulmaktadır. Uzay araçlarının karşılaştıkları çok

yüksek sıcaklık ve basınç göz önüne alındığında, yüksek dayanımlı ve hafif malzemelerin kullanılması gereksinimi vardır. Uzay araçlarının karşılaştığı yüksek sıcaklıklar plastik matriks kompozitler ve birkaçı dışında geleneksel metaller ve alaşımları için çok yüksektir. Titanyum ve alaşımları gibi, hafif ve yüksek sıcaklıkta kullanılabilen malzemelere, elastisite modülü yüksek, yüksek dayanımlı seramik veya karbon fiberler katılarak elde edilen metal matriks kompozitler, uzay araçlarının karşılaşacağı ortamlara dayanma yeteneğine sahip olacaktır. Örneğin, uzay mekikleri, metal matriks kompozitlerin bu alandaki ilk üretim uygulamalarından birini temsil etmektedir. Ana gövdeyi destekleyen kafes sistemi ile kirişlerde ve iniş takımı parçalarında tek yönlü bor-alüminyum metal matriks kompozit borular kullanılmıştır. Gövde kafes sistemini destekleyen 159 kg gelen bor-alüminyum borular %44'lük bir ağırlık kazancı sağlamaktadır [19].

Uzay yapılarının ortam ve çalışma şartları gereği düşük ağırlık, yüksek rijitlik, düşük ısıl genleşme ve boyutsal kararlılığa sahip olması gereklidir. Bor ve karbon fiber takviyeli metal matriks kompozitler, uzay araçları ve yapılarında, boyutça kritik uygulamalar için yüksek rijitlik ve düşük ısıl genleşme katsayılı malzemeler olarak gelecek kuşak malzemeleri temsil etmektedir. Jet motorları, fan kanatları, uçak kanatlarının yüzeyleri ve yapı destekleri, iniş takımı parçaları, bisiklet iskeleti ve golf sopaları gibi alanlar sürekli bor fiber takviyeli metal matriks kompozitlerin diğer uygulama alanlarıdır [19,30].

2.4.3.2 Partikül, kısa fiber ve visker takviyeli metal matriks kompozitlerin uygulama alanları

Yaygın olarak kullanılan yapısal amaçlı metaller ve alaşımlarla karşılaştırıldığında metal matriks kompozitler çok daha yüksek spesifik modül ve spesifik mukavemet değerleri göstermektedir. Bu nedenle yapısal amaçlı metal matriks kompozitler, ağırlık bakımından kritik uygulamalar için hem başlangıçta hem de işletme ömrü boyunca oluşacak maliyetlerin düşürülmesi fırsatını vermektedir. Metal matriks partikül veya kısa fiber takviyeli kompozit malzemeler otomotiv endüstrisinde önemli bir konuma sahiptir. Yüksek spesifik modülleri ve yorulma dayanımları, aşınma dirençleri, düşük ısıl genleşme katsayıları bu alanda kullanımlarını sağlayan özelliklerden bir kaçıdır.

Metal matriks kompozitler açısından bir başka önemli husus araç ağırlığındaki % 10-20'lik azalmanın beraberinde yakıt tüketiminde % 5-10 gibi bir iyileşmeyi getirmesidir. Bu özellikler, günümüz otomobillerinde metal matriks kompozitlerin kullanımını arttırmaktadır. Otomotiv endüstrisinde kısa fiber, visker veya partikül takviyeli metal matriks kompozitlerde genelde, uygun özellikleri nedeni ile matriks malzemesi olarak alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Yolcu ve yük taşıtlarında bu kompozitler, öncelikle hafiflikleri sebebiyle şaft olarak kullanım alanı bulmaktadır. Spesifik modüllerinin hem çelikten hem de alüminyumdan önemli miktarda yüksek olabilmesi nedeniyle bu kompozitlerde daha uzun şaft üretmek mümkündür. Toplam araç ağırlığını azaltmak üzere tüm büyük otomobil üreticileri, dökme demir motor bloklarının yerine alüminyum esaslı kompozit motor bloğu teknolojileri geliştirmektedirler. Bu değişimin ağırlık kazancı 15-35 kg kadardır. MMK malzemeden üretilen motor blokları boyutsal kararlılık ve blok rijitliğini geliştirerek motordaki sürtünmeyi azaltıp motorun verimliliğini arttırmaktadır. Silindir bölgesi 200°C'ye kadar aşırı sıcaklık ve yanma yüklenmelerine maruz kaldığından aşınma direnci, yorulma ve sürünme gibi özellikler de önemli olmaktadır. Yapılan testlerde, dökme demirlerle karşılaştırıldığında, % 10-20 hacim oranında Al_2O_3 veya SiC partikül katkılı silindir gömleklerinin çok daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmüştür [19,30].

MMK malzemeler spor endüstrisinde de kullanım alanı bulmuşlardır. MMK malzemeden üretilmiş tenis raketleri, kayaklar, kayak sopaları, golf sopaları, bisiklet parçaları mevcuttur [31].

Partikül takviyeli metal matriks kompozit malzemeler, elektronik ve optik uygulamalarda da kullanılmaktadır. Elektronikte, entegre ve hibrid devre yapımında, özellikle ısıl genleşme katsayının düşük olması nedeni ile bu tür kompozitler kullanılır. Optik sistemlerde de, uzay teleskopları, yansıtıcı ayna malzemeleri ve kızıl ötesi görüntü tarama sistemleri parçaları olarak kullanım alanları vardır [30].

2.5 Alüminyum Esaslı Metal Matriks Kompozit Malzemeler

Alüminyum esaslı metal matriks kompozit (AMMK) malzemeler, genel olarak ağırlık bakımından hafif ve iyi mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. AMMK malzemelerde, matriks malzemesi olarak Al alaşımları, takviye malzemesi olarak ise genellikle SiC, Al_2O_3, B_4C, TiC ve grafit kullanılır. Üretilen kompozit malzemenin

özellikleri; matriks alaşımının türü, takviye malzemesi türü ve oranı, üretim yöntemi gibi faktörlere bağlıdır. Al esaslı kompozit malzemeler yüksek mukavemet, yüksek elastiklik modülü, düşük yoğunluk, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliği, ısıl genleşme katsayısının düşük olması ve iyi aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle oldukça fazla tercih edilirler [32].

2.5.1 Alaşım elementlerinin alüminyuma etkisi

Saf alüminyumun kullanımı oldukça sınırlı olduğu için, mekanik özelliklerinin ve döküm özelliklerinin iyileştirilmesinde çeşitli elementlerle alaşımlandırma yapılmaktadır. Alüminyum alaşımlarında kullanılan başlıca alaşım elementleri bakır, silisyum, mangan, çinko, krom, kalay, magnezyum, demir, nikel, titanyum, zirkonyum, fosfor, sodyum ve lityumdur. Bu elementler tek başına veya birkaçı birden alüminyuma ilave edilebilirler. Alüminyuma belirli oranlarda ilave edilebilen bu elementler alüminyumun yüzey merkezli kübik kristal kafes yapısında yer alarak katı eriyik mukavemetlenmesi ile alüminyumun dayanımını arttırır. Matriks yapı içerisinde alaşım elementi miktarının artması ile mukavemet de artar. Fakat alaşım elementi miktarının artmasıyla malzemenin şekil değiştirme kabiliyeti azalmaktadır. Bunun yanında alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri uygulanan şekillendirme işlemi ile de büyük ölçüde arttırılabilir [33].

Silisyum

Döküm alaşımlarında, en yaygın olarak kullanılan alaşım elementi silisyumdur. Silisyum (Si), alüminyumun akıcılığını arttırarak, kalıbın ince kanallarına kadar kolaylıkla ilerlemesini sağlamaktadır [34]. Özellikle kum ve kokil kalıplara yapılan dökümlerde silisyum en önemli alaşım elementidir. Kum kalıplara yapılan dökümlerde % 5 veya daha fazla Si içeren alüminyum alaşımlarında, modifikasyona gerek duyulurken bu oranın altında modifikasyon işlemine gerek duyulmamaktadır. Silisyumun sağladığı bir diğer avantaj da Si oranı döküm malzemelerde katılaşmaya bağlı olarak oluşan hacimsel küçülmeyi (çekmeyi) de minimuma indirmektedir.

Bakır

Alüminyumla alaşım elementi olarak kullanılan ilk element bakırdır. Bakır (Cu), alaşıma sertlik kazandıran en önemli alaşım elementidir [35,36]. Bakır ilavesi, alaşıma, sağlamlık, sertlik ve daha iyi işlenebilme özelliği kazandırır. Döküm alaşımlarında ise en fazla % 12 oranında kullanılmaktadır. Bu orana kadar

dayanımda meydana gelen artış bu orandan sonra dayanımın azalmasına sebep olur. Yapıda oluşan ikinci faz miktarının artmasıyla gevreklik de artmaktadır. Dövme alaşımlarında ise Cu miktarı % 3-5 arasındadır. Eğer dövme alaşımlarında miktar % 5'in üzerinde olursa mekanik işlemler sırasında yırtılmalara ve kırılmalara sebep olur. Ayrıca alaşımlama işlemleri elektrik iletkenliği ve korozyon direncini de azaltmaktadır [35].

Bakırın alüminyum içindeki çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak artar. Bakırın, alüminyum içerisinde maksimum çözünürlüğü ötektik sıcaklık olan 548° C'de % 5-6'dır. Oda sıcaklığında ise maksimum % 0,1'dir. Bu nedenle Al-Cu alaşımları yaşlandırılabilir bir alaşımdır. Yaşlanma için gerekli zaman, alaşımın bileşimine ve sıcaklığa bağlıdır. Yaşlandırma ile yapıda oluşan çökeltiler boyutuna ve dağılımına bağlı olarak dayanımı arttırır [37].

Magnezyum

Magnezyum alüminyuma yüksek mukavemet, süneklik, korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti sağlar. Al-Mg alaşımları yaşlandırılamamasına rağmen katı eriyik mukavemetlenmesi nedeniyle yüksek mukavemetlidir. Akıcılık problemleri olduğu için döküm alaşımı olarak çok fazla tercih edilmeyen bir alaşım grubudur [37].

Demir

Özellikle kokil kalıba dökümlerde alüminyum alaşımına demir ilavesiyle alaşımın metal kalıba yapışma eğilimi azaltılmış olur. Pres döküm alaşımlarının demir oranı % 1,0-1,3 arasındadır. Buna karşılık kuma dökümde demir oranı daha düşük tutulmaktadır [37].

Manganez

Alaşım içinde dökülebilirliği arttırmak için alaşıma demirle birlikte ilave edilir Aynı zamanda metaller arası bileşiklerin özelliklerini değiştirir. Alaşımın süneklik ve tokluk özelliklerini arttırır ve işlenebilirliği olumlu yönde etkiler [36]. Manganez (Mn) genellikle kum ve metal kalıba döküm uygulamalarında % 1'in altında olmak şartıyla olumlu etkiler sağlamaktadır. Ayrıca düşük miktarlarda (% 1'den az) kimyasal bileşiminde Mn bulunması, belirli miktarda demir ilavesine de imkân sağlamaktadır [37].

Çinko

Çinkonun, alüminyuma ilave edilmesiyle yüksek mukavemete sahip Al-Zn alaşımları elde edilir. Alüminyuma ilave edilen Çinko (Zn) alaşımın kopma mukavemetinin artmasını ve haddelenebilme kabiliyetini arttırır. Al-Zn alaşımlarında Zn, sıcak yırtılmaya sebep olmasına rağmen diğer alaşım elementlerinden olan bakırın ilave edilmesiyle bu olumsuz özelliği giderilmiş olur [37]. Genellikle magnezyumla birlikte ilave edildiğinde ise haddeleme kabiliyetini arttırdığı gibi yüksek çekme ve darbe mukavemeti de sağlamaktadır. Al-Zn alaşımları % 20'ye kadar çinko içerebilirler. Bu alaşımlar genelde uzay ve havacılıkta kullanılmaktadır. [35,36].

Titanyum

Alüminyum alaşımlarına ilave edilen titanyum (Ti) tane küçültme etkisi sağlamaktadır. Mekanik özelliklerin iyileştirilmesini ve artmasını sağlar. Alüminyuma ilave edilme miktarı en fazla % 20'dir. En iyi etkisi bor ile beraber kullanıldığında görülür. Titanyum, alaşımın çekme mukavemetini ve sünekliliği arttırır. Buna karşılık ısıl iletkenliği düşürür [35].

2.5.2 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikroyapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur. Alüminyum alaşımları dövme ve döküm alaşımları olarak iki gruba ayrılır. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon kabiliyeti iyi olup kolayca şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısıl işlem uygulanabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre, alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma şu şekildedir:

1XXX: Saf alüminyum. Genellikle elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır.

2XXX: Al-Cu alaşımları. Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3XXX: Al-Mn alaşımları. Esas alaşım elementi mangandır. Boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.

4XXX: Al-Si alaşımları. Esas alaşım elementi silisyumdur. Termal genleşme katsayısı düşük, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde, otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.

5XXX: Al-Mg alaşımları. Esas alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artar fakat süneklik azalır. Denizel korozyona karşı direnci yüksek olduğundan, bu ortamda çalışacak yapıların imalatında kullanılmaktadır.

6XXX: Al-Mg-Si alaşımları. Esas alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Şekillendirilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımlar özellikle ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılır.

7XXX: Al-Zn alaşımları. Bakır esas alaşım elementi olup, magnezyum, krom ve zirkonyum ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, alüminyum alaşımlarının en yüksek mukavemete sahip olanıdır. Uçak parçaları yapımı ve diğer yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılır.

8XXX: Al-Li alaşımları. Esas alaşım elementi lityum olup, kalay eklentiside yapılabilmektedir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu malzeme, iyi yorulma direnci ve iyi tokluk özelliklerine sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile karşılaştırıldığında üretim maliyetleri yüksektir.

1XXX, 3XXX, 4XXX ve 5XXX serisi dövme alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanamayan alaşımlardır. Bu alaşımlar sadece şekil değiştirme yolu ile sertleştirilebilirler.

2XXX, 6XXX, 7XXX ve 8XXX serisi alaşımlar ise ısıl işlem yolu ile sertleştirilebilmektedirler.

Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ise şu şekildedir:

1XX.X: Saf alüminyum.

2XX.X: Esas alaşım elementi bakırdır.

3XX.X: Esas alaşım elementi silisyumdur. Bakır ve magnezyum gibi başka alaşım

elementleri de bulunabilir. Sanayide kullanılan döküm alaşımlarının % 90'ı 3XX.X serisidir.

4XX.X: Esas alaşım elementi silisyumdur.

5XX.X: Esas alaşım elementi magnezyumdur.

6XX.X: Bu seri numarası kullanılmamaktadır.

7XX.X: Esas alaşım elementi çinkodur.

8XX.X: Esas alaşım elementi kalaydır [38,39].

Alüminyum alaşımlarına yapılan ısıl işlemler değişik şekillerde uygulanabilir ve uygulanan işlem TX sembolleri ile alaşım numarasının yanına yazılır. Bu işlemler şu şekilde ifade edilmektedir:

T1: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

T2: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

T3: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

T4: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve tabii yaşlanmaya bırakılmış.

T5: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmış.

T6: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve suni yaşlandırma yapılmış.

T7: Çözeltiye alma işlemi yapılmış ve aşırı yaşlandırma yapılmış.

T8: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış.

T9: Çözeltiye alma işlemi yapılmış, suni yaşlandırma yapılmış ve soğuk şekillendirilmiş.

T10: Sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş, soğuk sekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmış [39].

2.5.3 AMMK malzemelerde kullanılan takviye elemanları

AMMK malzemelerin üretiminde kullanılan takviye malzemeler; temin edilebilme kolaylığı, matriks malzemesiyle uyumluluk, elastiklik modülü, çekme dayanımı, yoğunluk, ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık, ısıl genleşme katsayısı, boyut, şekil ve kimyasal bileşim gibi faktörler göz önünde tutularak belirlenir. Bu malzemeler arasında; yüksek ergime sıcaklıkları, yüksek elastiklik modülü ve yüksek sertlik

değerlerinden ötürü karbürler, oksitler, nitrürler, silikatlar ve borürler gibi seramik malzemeler ön plana çıkmaktadırlar. Çizelge 2.1'de AMMK malzemelerde kullanılan başlıca takviye malzemelerinin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1: AMMK malzemelerde kullanılan başlıca takviye malzemelerinin özellikleri [40].

Takviye Malzemesi	Yoğunluk ($x\ 10^3 kgm^{-3}$)	Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6}C^{-1}$)	Ergime Sıcaklığı (^oC)	Mukavemet (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
Al_2O_3	3,98	7,92	2100	221 (1090 °C)	379 (1090 °C)
SiC	3,21	5,40	2750	-	324 (1090 °C)
C	2,18	-1,44	4400	-	690
SiO_2	2,66	1,08	1710	-	73
AlN	3,26	4,84	2375	2069 (24 °C)	310 (1090 °C)
B_4C	2,52	6,08	2420	2759 (24 °C)	448 (24 °C)

2.5.4 AMMK malzemelerin uygulama alanları

Günümüzde, AMMK malzemeler birçok endüstriyel uygulama alanında kullanılmaktadırlar. Kullanım alanları incelendiğinde, AMMK malzemelerin en fazla otomotiv sektöründe kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra elektronik, uzay, havacılık ve askeri uygulamalar ile spor malzemeleri sektörlerinde de AMMK malzemeler kullanım alanı bulmaktadır.

AMMK malzemeler, özellikleri açısından büyük kullanım potansiyeline sahip olmalarına rağmen, bu malzemelerin yaygın olarak kullanılabilmesinin önündeki ana engel maliyetleridir. Maliyeti yükselten temel nedenler ise üretim yöntemlerinin pahalılığı ve bu yöntemler üzerinde istenilen tecrübenin henüz kazanılamamış olmasıdır. Otomotiv pazarı, büyük bir pazar olmasının yanısıra yüksek teknoloji kullanan bir pazardır; ancak bu pazarda üretim maliyetlerinin mümkün olduğunca düşük olmasına dikkat edilir. Maliyetlerine rağmen, AMMK kompozit malzemelerin otomotiv sektöründe kullanılmasının sebepleri şunlardır :

- Motor parçalarının ağırlığının azaltılabilmesi, bu sayede de yakıt tasarrufu sağlanması,
- AMMK malzeme kullanımı ile aşınma dayanımının arttırılabilmesi,
- AMMK malzemelerin düşük ısıl genleşme katsayılarına sahip olmaları,

- Özellikle partikül takviyeli AMMK'lerin üretiminde, geleneksel yöntemlere yakın yöntemlerin kullanılabilmesi [40].

Endüstriyel kullanım açısıdan partikül takviyeli AMMK malzemeler, metal matriks kompozit malzemeler içerisinde en fazla kullanım alanına sahiptirler. Genellikle döküm ve toz metalurjisi yöntemleri ile üretilen bu kompozitler özellikle otomobil ve trenlerin fren elemanlarında yaygın kullanılmaktadırlar. Otomotiv sektöründeki diğer kullanım sahaları, valfler, krank mili, dişli parçaları ve süspansiyon elemanlarıdır [32].

Partikül takviyeli AMMK malzemeler havacılıkta da kullanım alanı bulmuşlardır. Uçakların gövde elemanlarının imalatında kullanım alanları gittikçe artmaktadır. Ayrıca bazı helikopterlerin pervanelerinde ve uçuş tertibatlarında bu kompozitler kullanılmaktadır. Seramik visker ve kısa fiber takviyeli AMMK malzemeler, otomotiv uygulamalarında ve askeri uygulamalarda kullanılabilmektedirler. SiC visker takviyeli AMMK malzemeler, gelişmiş askeri tanklarda palet malzemesi olarak kullanılmakta, bu sayede tankın ağırlığı azaltılmaktadır. Kısa fiber takviyeli AMMK malzemeler otomobillerde, piston ve silindir uygulamalarında kullanılabilmektedir. Fiber takviyeli AMMK malzemeler ise yüksek mukavemet ve yüksek elastiklik modülü gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Örnek olarak, karbon fiber takviyeli AMMK malzemeler Hubble uzay teleskobunun anten dalga kılavuzu olarak kullanılmaktadır. Bor fiber takviyeli 6061 alüminyum alaşımı matriks kompozit malzemeler, uzay mekiklerinin ana kargo bölümlerinde destek elemanı olarak kullanılmaktadırlar [32].

3. ANA MATRİKS MALZEMELERİ VE PEKİŞTİRİCİLER

3.1 Alüminyum

Alüminyum yerkabuğunun % 8'ini oluşturur. Üretimi 1965 yılı itibariyle bakırı geçmiş ve günümüzde demirle rekabet eder hale gelmiştir [10]. Alüminyum, yeryüzünde en çok bulunan metalik elementlerden biri olarak 19.yy sonlarından itibaren mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Endüstriyel anlamda kullanımının üç ana nedeni malzeme karakteristikleri, alaşım halindeki kullanımı ve üretiminin getirdiği ekonomik kazançlardır. Ohio'da Charles Hall ve Fransa'da 1886'da Paul Heroult'un geliştirdiği ergimiş kriyolit içinde alüminanın elektrolitik redüksiyon ile alüminyum üretilmesiyle birlikte, o yıllarda ilk defa içten yanmalı motor taşıtlarında alüminyum kullanımı başlamış ve bununla birlikte alüminyum gittikçe yükselen mühendislik değeri ile birlikte önemli bir otomotiv malzemesi olmaya başlamıştır. Ardından Wright kardeşlerin havacılık endüstrisine girişleriyle birlikte yeni bir endüstrinin doğuşu ve alüminyum ile birlikte gelişimi yapısal olarak dayanıklı, mukavemetli havacılık ekipmanları, motorlar, silah sistemleri, yakıt hücreleri ve uydu parçalarının gelişmesine olanak tanımıştır. Ancak alüminyum endüstrisinin büyümesi sadece bu gelişmelerle sınırlı kalmamıştır.

Alüminyumun ilk ticari uygulamaları cam çerçeveleri, servis tepsileri ve pişirme gereçleri olmuştur. Zaman içinde çok farklı kullanım alanlarıyla modern hayatın vazgeçilmezi haline gelmiştir [41].

3.1.1 Alüminyumun özellikleri

Alüminyumun en önemli özelliği çok farklı endüstriyel alanda kullanılabilirliğidir. Yüksek saflıktaki alüminyumdan en karmaşık alaşımlara kadar dağılan geniş bir aralıkta fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirilebilmektedir. Üç yüzden fazla alaşımı bilinmekte ve ilave olarak birçok ilave değişkenlikler uluslararası çalışmalarda ve üretici-tüketici ilişkileri kapsamında geliştirilmektedir. Alüminyum metalini ve alaşımlarını en ekonomik ve çok geniş bir kullanım aralığında çekici kılan özellikler

görünümü, hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel özellikleri, mekanik özellikleri ve korozyon dayanımıdır [41].

Alüminyum yoğunluğu 2,7 gr/cm^3'dür; yani çeliğin (7,83 gr/cm^3), bakırın (8,93 gr/cm^3), veya bronzun (8,53 gr/cm^3) neredeyse üçte biri kadardır. Çeliğin paslanmasına neden olan oksijene karşılık alüminyum dayanım göstermektedir. Korozyona maruz kalan yüzey oksijenle birleşerek bir inç'in sadece birkaç on milyonda biri kalınlığında ince bir alüminyum oksit tabakası oluşturarak oksitlenmeyi engeller. Demirden farklı olarak alüminyum oksit filmi yüzeyden parça şeklinde kopmaz. Bu ince renksiz ve saydam oksit tabakası metale sıkı bir şekilde bağlanır ve çıplak gözle görülemez. Demir ve çelikte görülen renk değişimi ve kabuk şeklinde soyulma alüminyumda gerçekleşmez. Uygun bir şekilde alaşımlandırıldığında alüminyum su, tuz ve diğer çevresel faktörlerin yol açtığı ayrıca diğer geniş dağılımdaki kimyasal ve fiziksel ajanlara karşı dayanım gösterir.

Alüminyum yüzeyler yüksek oranda yansıtıcı olabilir. Radyan enerji, görünür ışık, radyan ısı ve elektromanyetik dalgalar etkin bir şekilde yansıtılır, diğer bir yandan anodize ve koyu anodize edilmiş yüzeyler yansıtıcı veya emici olabilir.

Alüminyum tipik olarak mükemmel elektrik ve termal iletkenlik gösterir, örneğin, yüksek torklu elektrik motorları gibi özel alaşımlar elektrik direncine karşı geliştirilmişlerdir. Alüminyum aynı ağırlık temel alındığında bakırın iki katı kadar daha iyi bir elektrik iletkenliği gösterir ve bu bir seçim nedenidir. Yüksek iletkenlik ve mekanik dayanımın gereklilikleri uzun, yüksek voltajlı, alüminyum çelikle kuvvetlendirilmiş iletim kabloların kullanımı ile sağlanır. Bakırın % 50-60 termal iletkenliğine sahip olan alüminyum alaşımlarının ısı değiştiricilerinde, buharlaştırıcılarda, elektrikli ısıtıcılı uygulamalarda, otomotiv silindir kafası ve radyatörlerde kullanımı avantajlıdır.

Alüminyum ferro manyetik değildir, bu özellik elektrik ve elektronik endüstrisinde önemli bir rol oynar. Isıya ve yanmaya karşı dirençlidir, yanmaz veya patlayıcı maddelerin tutulmasında veya maruz kalınmasında kullanılır. Toksik özelliği olmaması sebebiyle yiyecek ve içeceklerin saklandığı kaplarda kullanılır [41].

3.1.2 Alüminyumun önemi

Endüstride kullanılan malzemelerin üretimi esnasında çeşitli çevresel problemler oluşmaktadır, bu problemler iklimi etkileyen gazların salınımı, zararlı gazlara maruz

kalan canlıların bu etkilerden kurtarılması, geri dönüşüm ile atık miktarlarının azaltılarak su ve toprağın korunumu gibi ekolojik nedenlerdir. Geri dönüştürülebilir olması sebebiyle alüminyum kolaylıkla tekrar ergitilerek kullanılabilir. Ayrıca alüminyumun ana hammaddesi olan boksit madenlerinin tropik ormanlardan eldesinden sonra bozulan ekolojik yapı boksit madenlerinin eldesi sonrasında tekrar orman haline dönüştürülmektedir. Yeryüzünde bulunan toplam boksit cevheri rezervinin yaklaşık 140 milyar ton olduğu tahmin edilmektedir. Yıllık üretim değeri son beş yılda yaklaşık olarak 23 milyon tondur [42] ve geri dönüşebilen miktar ile 4 milyon ton alüminyum kazanılmaktadır. Alümina üretiminde ortaya çıkan kırmızı çamur yeniden değerlendirilerek portland çimentosu ve plastik sektöründe pigment olarak kullanılmaktadır. Alüminyum hafif konstrüksiyon metali olarak otomotiv sektöründe de hafif malzeme seçiminde yüksek potansiyele sahiptir. Sağladığı dayanım, esneklik ve hafiflik özelliklerine ilave olarak yakıt tüketimine olan katkısıyla alüminyum otomotiv sektöründe de gittikçe artan bir kullanım oranına sahiptir [43].

3.1.3 Alüminyum-Silisyum alaşımları

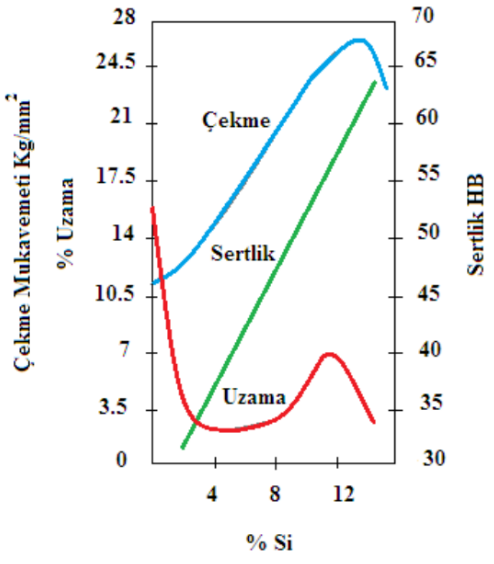
Ana alaşım elementi Si olan Alüminyum döküm alaşımları, üstün döküm özelliklerinden dolayı en önemli ticari döküm alaşımlarıdır. Al-Si alaşımları yüksek akıcılık değerlerine sahiptir. İkili Al-Si alaşımlarına ısıl işlem uygulanabilir olarak düşünülemez. Çünkü; sadece küçük bir miktar silisyum (Max. 1.65 Si), alüminyumda çözünebilir ve çok düşük miktarda sertleşmeye neden olur. Günümüzde Al-Si alaşımları, dayanım/ağırlık oranının yüksek oluşu, yüksek ısıl ve elektriksel özellikleri ve kum kalıba dökümden basınçlı döküme kadar birçok yöntemle dökülebilmelerine olanak sağlayan mükemmel döküm kabiliyetleri nedeniyle otomotiv endüstrisinden havacılık sanayine kadar geniş bir alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Al-Si alaşımlarının, kabaca yumuşak ve sünek alüminyum fazı ile sert ve kırılgan silisyum fazından meydana gelen bir karma malzeme olduğu söylenebilir. Alüminyumun hafifliği, plastik şekil değiştirme kabiliyetinin yüksek oluşu, yüksek elektriksel özellikleri, korozyon dayanımının yüksekliği, manyetik olmayışı ve kaynak kabiliyetinin iyi olması ana tercih sebeplerindendir. Saf alüminyumun bu avantajlarının yanı sıra döküm kabiliyetinin iyi olmayışı, sertlik ve çekme dayanımı

gibi mekanik özelliklerinin düşük oluşu gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Silisyumun alaşım elementi olarak en büyük etkisi, döküm kabiliyetini arttırmasıdır. Silisyumun ilavesi ile alaşımın akıcılığı ve mekanik özellikleri artarken, özgül ağırlık ve ısıl genleşme katsayısı azalmaktadır [44].

Al-Si alaşım grubu yukarıda belirtilen özelliklerinin yanı sıra daha yüksek dayanım ve kırılma tokluğu, sertlik gibi mekanik özellikleri gerektiren değişik alanlarda kullanılmaya çalışılmaktadır. Endüstri tarafından istenen bu mekanik özelliklerdeki artış Al-Si alaşımlarının mikroyapıları ile doğrudan ilgilidir. Mikro yapıda da mekanik özelliklere en büyük etkiyi, yapı içerisindeki ötektik silisyumun boyutu, morfolojisi ve dağılımı yapmaktadır. Mikro yapı içerisindeki silisyumun boyutu, morfolojisi ve dağılımı alaşımın soğuma hızının değiştirilmesi yada, alaşım içerisine silisyumun katılaşma mekanizmasını değiştiren element yada bileşiklerin eklenmesi ile farklılaştırılabilir ve bu farklılaşmanın sonucu olarak, mekanik özelliklerde artış yada azalma gözlenir. Al-Si alaşımları içerisindeki silisyumun dağılımı, morfolojisi ve boyutu üzerinde yapılan değişiklikler Al-Si alaşımlarının modifikasyonu yada sıvı-metal işlemleri olarak tanımlanmaktadır.

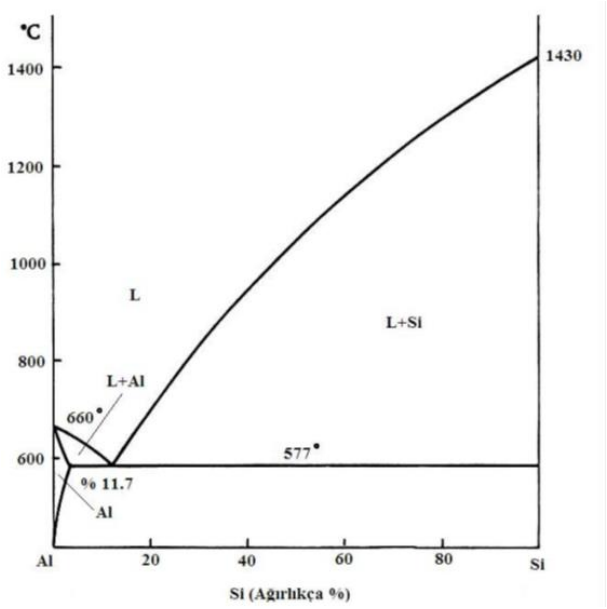
Si miktarı % 7-12 aralığında olan Al-Si alaşımları yüksek mukavemet gerektiren, yüksek sıcaklıkta aşınma direnci istenen uygulama alanlarında kullanılır. Genellikle kokil ve basınçlı dökümle şekillendirilir. Mekanik özellikleri ise alaşımın bileşimine göre Şekil 3.1'de gösterildiği gibi değişmektedir [44].



Şekil 3.1: Al-Si alaşımlarında silisyumun mekanik özelliklere etkisi [44].

3.1.3.1 Al-Si faz diyagramı

Al-Si alaşımı basit bir ötektik sistem olup iki katı eriyik faz olan YMK (Yüzey Merkezli Kübik) alüminyum ve elmas kübik (özel yüzey merkezli kübik) yapıya sahip silisyumdan oluşmaktadır. Şekil 3.2'de Al-Si denge diyagramı gösterilmektedir. Denge koşullarında ötektik sıcaklığına 577±1 °C ve % 11,7 Si ötektik bileşimine sahiptir. Ötektik karışımı oluşturan fazlardan α fazı oda sıcaklığında % 1'den daha az silisyum içeren alüminyum bazlı bir katı eriyiktir. Ötektiği oluşturan diğer faz β ise, hemen hemen arı silisyum olan, çok az alüminyum içeren silisyum bazlı bir katı eriyiktir. Ötektik altı Al-Si alaşımlarının yapısı, genellikle dallantılı bir görünümde olan α birincil fazı ile bu dallantılar arasında kümeleşmiş ötektik karışımdan oluşur. Ötektik üstü Al-Si alaşımlarında ise yapı ötektik karışımı ile kaba çökeltiler görünümündeki β fazından oluşmuştur [44].



Şekil 3.2: Al-Si faz diyagramı.

3.1.3.2 Al-Si alaşımlarında silisyumun özelliklere etkisi

Silisyum bilindiği gibi alüminyum döküm alaşımlarının ana alaşım elementidir. Alüminyum döküm alaşımına silisyum ilavesi ile akıcılık, kaynak kabiliyeti ve mekanik özellikler artar, ayrıca; ısıl işlem ve modifikasyon gibi özel işlemlerin uygulanabilirliğide silisyum ilavesi ile mümkün olur. Döküm alaşımlarında silisyum miktarı maksimum % 22-24'tür. Alaşımlar toz metalurjisi ile üretildiğinde silisyum miktarı % 50'ye çıkmaktadır. Al-Si alaşımlarının bileşimi Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Alüminyum-Silisyum alaşımlarının bileşimi.

Si	% 5-25	Mn, Cr, Co, Mo	% 3' e kadar
Cu	% 0-5	Ni, Be, Zr	% 3' e kadar
Fe	% 3' e kadar	Na, Sr	% 0.02' den az
Mg	% 0-2	P	% 0.01' den az
Zn	% 0-3	Al	Geri kalan Silisyum

Silisyum, alaşımın katılaşma anında oluşan katılaşma çekmesini önemli ölçüde azaltır. Diğer alaşım elementlerinin çekmedeki etkisi çok azdır. Katılaşma esnasında oluşan çekintideki silisyumun etkisi % 6-12 silisyum bileşiminde % 3-4, % 20-24 silisyum bileşiminde % 1-2' dir. Silisyumun özgül ısısı alüminyumdan % 1-2 daha düşüktür. Alaşımın elektrik iletkenliği çoğu zaman, eriyik durumdaki silisyuma bağlıdır. Bakır ve magnezyumun da etkisi vardır. Manganez, krom, titanyum ve zirkonyum iletkenliği azaltır. Silisyum, bakır ve magnezyum manyetik hassasiyetliği biraz azaltır. Fakat; bu özellik çoğu zaman manganez bileşimine bağlıdır. Al-Si alaşımları malzemenin saflığına bağlı olarak çeşitli miktarlarda Fe, Mn, Cu, Zn v.b. kirlilik elementleri içermektedir. Ayrıca; Cu ve Mg gibi metaller alaşım elementi olarak döküm malzemesinin mukavemetini ve sertleşebilirliğini artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Katılaşma işlemi esnasında kirlilikler ve alaşım elementleri metaller arası partiküller meydana getirmektedir [12]. Silisyum ilavesi ile akışkanlık ve korozyon direnci artar. Tane küçültme ve modifikasyon işlemleri ile iyi işlenebilme sağlanabilir. Ayrıca; sıcak yırtılma eğilimini azaltır. Silisyum ve bakır beraberce alaşımlandırma amacı ile kullanılabilir. Bu amaçla geliştirilen %6 Si, %5 Cu alaşımının kaynak kabiliyeti iyidir. % 9 Si, % 4 Cu alaşımı ise, sızdırmazlık isteyen yerlerde tercih edilirler. Al-Si alaşımlarında da Fe ve Mg varsa süneklik düşer. Bu alaşım sisteminde izin verilen empürite element yüzdeleri % 0,5 Zn, % 0,6 Cu, % 1,3 Fe, % 0,3 Mg'dır. Silisyum, alaşım hazırlamada Al-% 13-22 Si ön alaşım şeklinde ilave edilir. Özel bazı piston alaşımları % 25'e varan silisyum içerirler [44].

3.2 Silisyum

Elmas kristal yapısına sahip olan silisyumun, ergime sıcaklığı 1414 ^{0}C dolayındadır. Termal iletkenliği 148 W/mK olan silisyumun yoğunluğu 2,32 g/cm^{3}'tür. Silikon karbon, bor, galyum ve arsenik ile katkılandırılabilir. Bu da transistör, doğrultucu

diyot ve diğer katı hal cihazlarında kullanımına olanak sağlar. Yapısına katıldığı silisyum karbür oluşturduğu en önemli malzemelerdendir. Amorf silikon kahverengi bir renge sahip iken, kristalin silikon grimsi metalik bir parlaklığa sahiptir. Doğada serbest halde bulunmaz. Kuartz ve kum gibi malzemelerde bulunur. Doğada oksit formu mevcuttur. Oda sıcaklığında oksijen, su ve buhar ile tepkimeye girmez. Bunun sebebi koruyucu silikon dioksit filminin varlığıdır. Katı haldeki silisyuma kıyasla ergimiş silikon çok daha reaktiftir. Çoğu metal ile silisit formunu oluşturur. Çoğu silisyum elementi tetrahedral şekilde bağlanma gösterir. İçerisinde bulunduğu alaşım elementlerinin aşınma dayanımlarını yükseltir. Termal genleşme katsayısı alüminyum içerisinde bulunan silisyum oranına bağlıdır. Silisyum oranı arttıkça bu değer düşüş gösterir. Silisyum tek başına dayanım sağlama açısından düşük etkiye sahiptir. Alüminyum alaşımları içerisinde bulunan magnezyum ile bileşiğinde dayanım arttırıcı özelliğe sahip olur [45].

3.3 Bor Karbür

Bor Karbür (B_4C), bor ve karbon elementlerinden oluşan ve kimyasal yöntemlerle üretilen bir bileşiktir. 19. yüzyılın ortalarında elde edilmiş, 1930'lu yıllardan itibaren ise borlu metallerin üretiminde kullanılmaya başlanmıştır [46]. Bor karbür, yüksek ergime sıcaklığına sahip, yüksek sertlik ve aşınma direnci gösteren, düşük yoğunluklu ve kimyasallara karşı korozyon direnci yüksek bir malzemedir. Çizelge 3.2'de bor karbürün genel özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.2: Bor karbür tozun genel özellikleri [47].

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm^3	2.52
Sertlik (100 g. Knopp)	Kgf/mm^2	2900-3580
Kristal Yapı		Rombohedral
Ergime Sıcaklığı	°C	2450
Isıl Genleşme	°C'	$5 X 10^{-6}$
Elektrik iletkenliği	$\Omega^{-1} m^{-1}$	140

Yoğunluğu 2,52 g/cm^3, ergime noktası 2450 °C, kaynama noktası 3500 °C, çekme dayanımı 155 N/mm^2 (980 °C) - 162 N/mm^2 (1425 °C), eğilme mukavemeti 345 N/mm^2 ve basma mukavemeti 2850 N/mm^2 olan bor karbür; yalnızca HF, H_2SO_4,

HNO_3 karışımlarında yavaşta olsa çözünebilmekte ve bazı metaller, metal hidrürler ve metal oksitlerle borürler oluşturmaktadır. 3A ve 6A grubunun bazı metalleri, Lantanitler ve Aktinitler bor ve karbonla güçlü bor karbür fazlar oluştururlar. 4A ve 5A diborürleri bor karbürle reaksiyona girmezler [48].

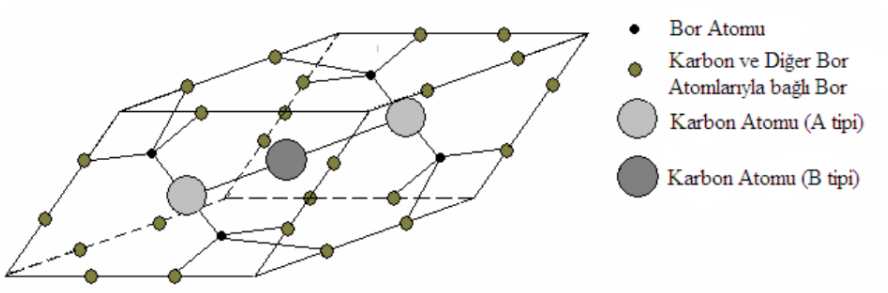
Bor karbür, günümüzde ilgi çeken metal dışı sert malzemelerin (alümina, silisyum karbür, silisyum nitrür, elmas, kübik bor nitrür) arasında önemli bir yere sahiptir. Sahip olduğu yüksek ergime noktası, yüksek sertlik, iyi mekanik özellikler, düşük özgül ağırlık, kimyasal etkenlere karşı gösterdiği yüksek direnç, yüksek nötron absorblama kabiliyeti gibi özellikleriyle ileri teknoloji uygulamalarında sıklıkla tercih edilen bir malzeme olmuştur. Tüm bu avantajlarına rağmen, bor karbür malzemelerinin sahip olduğu düşük kırılma tokluğu bu tür malzemelerin en büyük dezavantajıdır [49].

İçerik bakımından yaklaşık % 80 bor ihtiva etmesi, bileşiğin yüksek ergime noktası ve iyi kimyasal ve fiziksel kararlılığından dolayı nötronların absorbe edilmesinde bor karbür daha etkin ve daha ekonomiktir. Yüksek bor içeriği, bor karbürü diğer bor bileşikleri üretmede önemli bir kaynak kılmaktadır. Elmastan ekonomik olarak daha avantajlı olmasından dolayı aşındırıcı ve parlatıcı olarak da kullanılır. Sertlik ölçümünü en fazla etkileyen parametre parlatılmış yüzey kalitesi olup, yüzeyin mümkün olduğunca düz, pürüzlülüğün ise 0.1 μ'dan daha az olması şartı gereklidir. Bu değişkenin tam olarak kontrol edilememesinin, belirtilen sertlik değerlerinde de farklılıklara yol açması olasıdır. Bor karbür bileşiği içerisinde bor ve karbon yüzdesinin değişimi ile sertliğinde oluşabilecek değişiklikler de tam olarak açıklığa kavuşturulmuş değildir. Yüksek sertliğinden dolayı bor karbürün aşınma direnci de oldukça yüksektir. Saf B_4C kristalleri metalik gri parlak renkte olup, yoğunluğu bileşiğin yapısında bulunan ve bileşimdeki oranı % 8-20 arasında değişebilen karbon miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek sertliği ve ergime noktasının yanı sıra, bor karbürün mekanik özellikleri de oldukça öneme sahiptir. Özellikle mukavemet/yoğunluk oranı göz önüne alındığında B_4C ideal bir malzemedir. Kristal yapıdaki atomların kovalent bağlarla birbirine bağlı olması yüksek mukavemetin bir göstergesidir. Bilinen bazı bor karbür bileşiklerinde B_4C için 2,52 gr/cm^3, $B_{13}C_2$ için 2,488 gr/cm^3 ve $B_{10.5}C$ içinse 2,465 gr/cm^3 yoğunluk değerleri elde edilir [50,52].

Bor karbür oldukça sert ve düşük yoğunluklu bir malzemedir. Ancak; bor karbürün yaygın kullanımı, gevrek kırılmaya karşı hassasiyetinden ve tamamen yoğun, içyapı kusuru içermeyen üniform bir malzeme elde edilmesindeki zorluklardan, üretiminde kullanılan yöntemlerin hem pahalı hem de seri üretime uygun olmamasından ve bu yöntemlerin, karmaşık şekilli parçaların üretimine izin vermemesinden dolayı sınırlanmaktadır [49,53,54].

Bor karbür bileşimlerinin yapısal dağılımı, köşegenlerden birisine paralel olarak uzayan bir küp şeklinde görülür (rombohedron), 3 karbon atomu bu şekilde yerleşmiştir. Köşelerde ise on ikişer adet bor atomu içeren dodekahedronlar bulunur.

İlk bor karbür yapısı 1858 yılında keşfedilmiş olup, daha sonra 1883'te Joly, 1894'te ise Moissan sırasıyla B_3C ve B_6C yapılarını tanımlamışlardır. Bor karbürün stokiyometrik olarak B_4C olarak tanımlanması ise 1934 yılında gerçekleşmiştir. Simge olarak B_4C olarak gösterilmesine rağmen, bor karbürün gerçekte B_4C'den $B_{10,5}C$ ye kadar değişebilen yapıları mevcuttur [55]. Şekil 3.3'te bor karbürün yapısı görülmektedir.



Şekil 3.3: Bor Karbürün yapısı [47].

B_4C olarak tarif edilen yapıda, köşegenin iki tarafında bulunan 2 tip karbon bölgesi vardır ve bunlara A-B-A denir. Her A karbon atomu 1 adet yakın karbon komşuya, diğer taraftan B karbon atomu 2 eş yerleşmiş karbon komşulara sahiptir. B_4C'de bor konsantrasyonu % 78,25'den % 85 bor'a kadar değişir. En sık kullanılan ticari bor karbür ikinci faz olarak grafit içerir ve bu durum, mukavemeti sınırlar. Bir başka mukavemeti sınırlayıcı durum ise; bor karbür içinde bulunan ince, uzun ve geniş formdaki lamel grafittir ve bu da yüksek dayanım matrikslerde düzensizliklere ve sonuç olarak, gevrek yapılı seramiklere yol açar [49].

İleri teknolojik seramik malzemeler içerisinde bor karbür bileşiğinin özel bir yeri vardır. Bor Karbür yüksek sertliği (Mohs skalasına göre 9.5; elmas ve kübik bor nitrürden sonra bilinen en sert malzeme), düşük yoğunluğu, kimyasallara karşı direnci, ısı dayanımı ve yüksek nötron absorblama özellikleri nedeni ile bir çok askeri ve sivil uygulama alanı bulmuştur. Bu özellikler en başta sert karbür endüstrisinde öğütücü ve parlatıcı abrasif toz olarak kullanılması ile kendini göstermiştir. Ayrıca, hafif ve sert olması nedeni ile zırhlı muharebe araç zırhlarının kuvvetlendirilmesinde, askeri amaçlı helikopter ve uçakların mekanik aksamları ile personelin korunması amacına dönük olarak zırhlandırılmasında yaygın uygulama alanları bulmuştur. Bor karbür'ün diğer bazı kullanım alanları aşağıda gösterilmiştir [46,48,56]:

a) Makine ve çalışma aletleri yüzeylerinin işlemesi: Başta kesim plakaları olmak üzere, kesme ekipman bileyicileri, soğuk çekilmiş aletler, akıcı baskı aletleri, demircilik, matkap uçları, kılavuzlar, ok dövme keskisi, valfler, valf yatakları, piston ringleri, silindir düğmeleri, silindir burçlar, silindirik yüzeyler, dişli mekanizmalar, rulman yatakları, salmastra kutuları, püskürtmeli pompalar, sertleştirilmiş oturak yüzeyleri, suni malzeme pres kalıpları, tel hadde lokmaları, ekstrüder memeleri, her türlü eğitim alet ve kesicileri, rendeler, frezeler, krank miller ve diferansiyaller gibi alanlarda yüzey işlenmesinde kullanılır [46,48,56].
b) Seramikler ve sert çalışma malzemelerinin işlenmesi: Oksitli olmayan seramikler (Si_3N_4, SiC), oksitli seramikler (Al_2O_3, ZrO_2), mineraller, kuvars, tabii ve sentetik taşlar, optik camlar vb. işlenmesinde kullanılır.
c) Ateşe dayanıklı uygulamalar: İçinde bağlayıcı olarak karbon bulunan refrakterlerde karbonun oksitlenmesini önlemek için (antioksidant olarak) kullanılır.
d) Nükleer sanayinde nötron absorblayıcı: Bor karbür termik nötronların absorbsiyonunda ve aynı zamanda nükleer kalkan ve kontrol çubukları ve şut daldırma paletlerinde kullanılır.
e) Diğer uygulamalar: Uzay mekiklerinde dış yüzey koruyucu, yarı iletken parçaları, tekstilde iplik yönlendiriciler, filtreler, bujiler, yüzey polisaj pastaları, transformatörlerde silisli sac yerine, mühendislik ve seramikli yapı

parçaları imalatı hammaddesi, metal matriks kompozitlerde kullanılır [46,48,56].

Bor karbür (B_4C), mükemmel aşınma direnci ve sertliği nedeni ile çeşitli nozullarda, elmasa göre daha ekonomik olduğundan aşındırıcı olarak kaba leplemede, düşük yoğunluğu avantajıyla; savunma sanayinde zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Farklı metotlarla üretilmiş bor karbür seramiklerinin bazı özellikleri Çizelge 3.3' de verilmiştir [47,57].

Çizelge 3.3: Bor karbür seramiğin özellikleri [47].

Özellik	Birim	Bor karbür sinterleme metodu		
			Basınçsız sinterlenmiş	
		Sıcak preslenmiş	%1 karbon katkı	%3 karbon katkı
Karbon içeriği	Ağırlık %	21,7	22,5	24,8
Porozite	%	< 0,5	< 2	< 2
Yoğunluğu	gr/cm^3	2,51	2,44	2,46
Tane Büyüklüğü	µm	5	S	7
4 Nokta Eğilme Mukavemeti	MPa.	480	351	353
Young Modülü	GPa.	441	390	372
Poission Oranı		0,17	0,23	0,23
Kırılma Toklugu	MPa. √m	3,6	3,3	3,2

Bor karbürün en yaygın endüstriyel uygulaması aşındırıcı olarak kullanılmasıdır. Boyutları 1µm'den 10 mm'ye kadar değişen bor karbür tozları, semente karbürler gibi sert malzemelerin zımpara ve parlatma işlemlerinde kullanılır. Ayrıca; bor karbür bu işlemler için kullanılan bir başka malzeme olan elmastan daha ekonomiktir [49].

Bor karbürün bir başka uygulama alanı ise, yüksek aşınma direncinden yola çıkılarak kum üfleme nozullarının üretiminde kullanılmasıdır. Su jetiyle yapılan kesme işlemlerinde de bor karbür nozullar kullanılır. Bu işlemler için kullanılacak bor karbür, sıcak presleme ile üretilir. Bor karbürün yaygın bir diğer üretim alanı ise, düşük yoğunluğundan dolayı zırh malzemesi yapımında kullanılmasıdır. Seramik

zırh malzemeler, genellikle savaş uçaklarında ağırlığın azaltılması yönündeki katkılarından dolayı tercih edilmektedir [49].

Bor karbür bunların dışında refrakter endüstrisinde kullanılan Mg-C tuğlalarında antioksidan malzeme, nükleer endüstride nötron absorblayıcı, uzay roketlerinde katı yakıt ve kaynak teknolojisinde elektrot olarak, bilgisayar diskleri, yapay bağlantılar gibi medikal uygulamalarda, bisiklet gövdesi, golf sopası sapı gibi tüketici ürünlerinde ve SiC'ün yoğunlaştırılması sırasında sinterlemeye yardımcı malzeme olarak kullanılmaktadır [53,58].

Alüminyum ve alaşımları, aşınma davranışını ve mekaniksel dayanımı geliştirmek için seramiklerle takviye edilirler. Alüminyumun kolay elde edilebilir olması, düşük yoğunluklu olması ve uygun üretim şartları altında B_4C ile tepkime oluşturması nedeniyle takviye elemanı olarak B_4C tercih edilmektedir. Düşük yoğunluklu Al kompozit üretmek amacıyla, rijitliği yüksek ve sert B_4C ile sünek alüminyum birleştirilir [59].

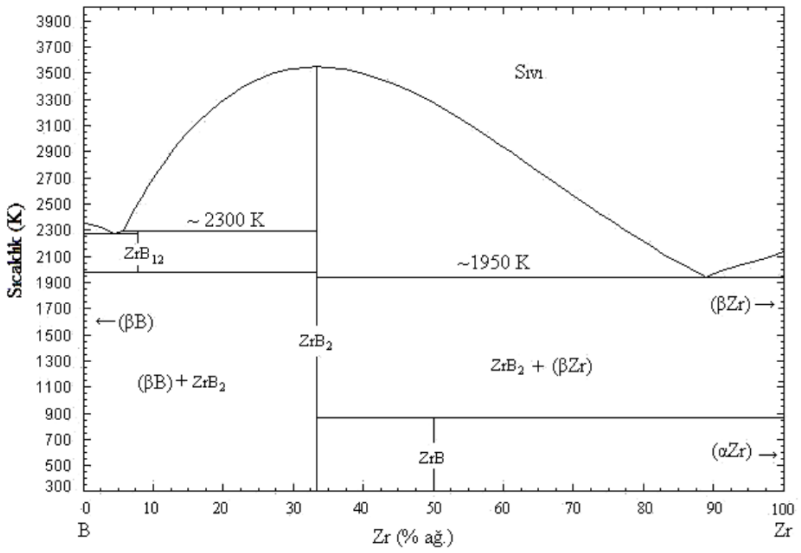
B_4C, elmas ve kübik yapılı bor nitrürden sonra bilinen en sert (9.5+Mohs skalasında) üçüncü malzemedir. Nötron absorbsiyonu, sürünme direnci ve darbe dayanımı isteyen uygulamalar için farklı avantajlara sahip, kovelent bağlı seramik yapıdadır. Ayrıca seramiklerin en hafifidir. Bu yüzden kompozitin toplam ağırlığını arttırmadan mekanik özelliklerini geliştirmede kullanılabilir. B_4C ile çalışılırken dikkat edilmesi gereken dezavantajı, B_4C'ün yüksek sertliğinden dolayı kompozitin ekstrüzyon yapabilme kabiliyetinin limitli olmasıdır. Tamamen yoğun mikro yapıların üretiminde karşılaşılan sorunlar ve gevrek kırılmaya karşı B_4C'ün aşırı hassasiyeti bu takviye malzemesinin sahip olduğu sınırlılıklardır [60].

3.4 Zirkonyum Diborür

Zirkonyum diborür (ZrB_2) yüksek ergime noktası, yüksek elektrik ve ısı iletkenliği, erimiş metal veya olmayan temel cüruflar karşı kimyasal kararlılık, yüksek sertliği, yüksek aşınma direnci ve termal şok direnci gibi özelliklerin mükemmel ve eşsiz kombinasyonu nedeniyle özellikle ilgi çekici bir malzemedir [1]. Bu özellikleri onu korozyon, aşınma ve oksidasyon direnci talep edilen yüksek sıcaklık uygulamaları için çekici bir aday haline getirmektedir. Bileşenleri bu malzemeden yapılmış olan

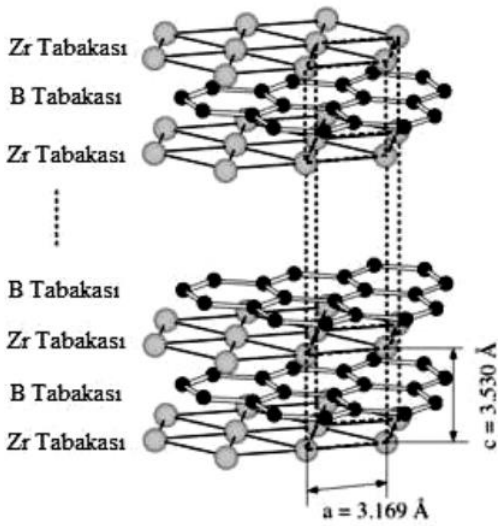
seramikler, döküm refrakterleri, elektrikli cihazlar (yani ısıtıcı, çakmak), nozul veya zırh malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Diğer seramiklerin aksine, elektriksel iletkenliğinin iyi olması nedeni ile elektrikli deşarj işlemesi ile karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan verir [15].

ZrB_2 bir geçiş metali borürü olup, Zr-B sistemine ait (Şekil 3.4) ağırlıkça % 19,2 bor içeren bir zirkonyum borürdür. Zr-B sisteminde ZrB_2 dışında ZrB ve ZrB_{12} gibi iki zirkonyum borür daha mevcuttur Fakat yalnızca ZrB_2 kimyasal ve termal olarak stabildir [61].



Şekil 3.4: Zirkonyum - Bor faz denge diyagramı [61].

Şekil 3.5'de görüldüğü üzere ZrB_2 hegzagonal yapıda kristalleşen, metalik bağlı, refrakter bir seramik bileşiktir.



Şekil 3.5: ZrB2'ün kristal yapısı.

ZrB_2'ün kristalografik ve diğer fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4: ZrB_2'ün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri [61].

Mol Ağırlığı (g/mol)	112,84
Renk	Gri
Teorik Yoğunluk ($kg/m^3.10^{-3}$)	6,10
Ergime Sıcaklığı (°C)	3050
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Latis parametreleri	a=0,3169 (nm)
Termal Genleşme Katsayısı α (10^{-6}/K)	5,9 – 6,5
Termal İletkenlik Katsayısı κ (W/m.K)	23,6 – 24,1
Mikro sertlik (1N) (GPa)	17,9
Young Modülü, E (GPa)	496
Poisson Oranı, υ	0,144
Eğme Mukavemeti, $\sigma_{eğme}$ (MPa)	265
Basma Mukavemeti, σ_{basma} (MPa)	1587
Çekme Mukavemeti, $\sigma_ç$ (MPa)	198
Elektriksel Direnç, $\rho \times 10^8$ (Ω.m)	9,7

Teknik kalite ZrB_2, $ZrSiO_4$ ve B_2O_3'in C kullanılarak redüksiyonu ile üretilmektedir. Daha saf ZrB_2 üretimi, $ZrCl_4$ ve BCl_3'ün klorür banyosunda H veya Al ile redüksiyonu ile gerçekleştirilmektedir. ZrB_2 filmler, $Zr(BH_4)_4$'ün 25 °C'de vakum altında süblimleşmesi ve 250 °C'de yüzeyden buhar geçirilmesi ile üretilmektedir [61].

ZrB_2, ergimiş alüminyuma karşı inert olması ve yüksek elektrik iletkenliği göstermesi nedeniyle alüminyumun elektrokimyasal proses (Hall-Heroult proses) ile üretiminde katot olarak kullanılmaktadır, ayrıca alüminyum metalurjisinde termoçift kılıfı olarak kullanılabilmektedir. Nötron yakalama özelliğinin düşük olması ve korozyona dayanıklılığı nedeniyle nükleer reaktörlerin yapı malzemesi olarak uygulama alanı bulmaktadır. ZrB_2, yüksek ısı kapasitesi ve yüksek termal iletkenlik gibi özelliklere sahip olması nedeniyle hipersonik hava sahası uygulamalarında, uçak ön kenar ve uç kısımlarında yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Zr ve B elementlerinin düşük difüzyon katsayısına sahip olmaları nedeniyle yarı iletkenlerde difüzyon bariyeri olarak uygulama alanı bulmaktadır. Bunların yanında balistik zırh, ergitme potası, kesme takımlarında kaplama malzemesi ve nozul malzemesi olarak da kullanılmaktadır [61].

4. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

4.1 Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi (TM), tozların birtakım işlemlerden geçirilerek yararlı mühendislik parçalarına dönüştürülmesi ile ilgilenmektedir [62]. Parçaların değişik tozlardan elde edildiği bir üretim teknolojisidir. Toz metalurjisi işlemleri toz haldeki metaller, seramikler, parçacık takviyeli kompozitler hatta plastik kalıplama ve metal dövme gibi birçok tekniğin sentezlenmesinden oluşan bir üretim yöntemidir [63]. Çeşitli metal işleme teknolojileri arasında en farklı üretim yöntemi olan toz metalurjisi, ergitme metalurjisi ile karşılaştırmalı olarak açıklanabilmektedir. Ergitme metalurjisinde, bir metal veya alaşım eritilmekte ve bir kalıp içerisine dökülmektedir. Burada esas olan, kalıbın istenilen ürünün şeklinde olması ve bir dökme işlemi uygulanarak külçe seklinde ürünün ortaya çıkarılmasıdır. Külçe, daha sonra haddeleme, dövme, çekme, ekstrüzyon, talaşlı imalat vb. yöntemlerle şekillendirilmektedir. Toz metalurjisi, malzeme ve enerji tasarrufu sağlaması ile geleneksel malzemelerin yerini alacak malzemelerinin üretilmesinde kullanılan bir teknik olması bakımından kütle üretim yöntemleri arasında yer almaktadır [64].

Çok eski çağlardaki bilginler tarafından demirin eritilerek dökülmesi yöntemi gibi uygulanmıştır. Mısırlılar milattan önce 3000'li yıllardan beri toz metalurjisini kullanarak demir aletler yapmışlardır. Ankalar, değerli metal tozlardan mücevher ve sanat eserlerini imal etmişlerdir. İlk modern TM ürünü 1900'lü yılların başlarında geliştirilen ampulün içindeki ince tungsten teldir. Bu süreç, 1930'lu yıllarda karbür kesici takım malzemeleri, 1960-70'li yıllarda otomobil parçaları, 1980'li yıllarda uçak türbin motor parçalarının imalatı ile devam etmiştir [22].

Toz metalurjisinin başarısına maliyet, özellikler ve reaktivite olmak üzere üç anahtar etken katkıda bulunmaktadır. Bunlardan ilki, karmaşık geometrili parçaların ekonomik üretimine dayalı uygulamadır. Otomotiv endüstrisi için parçalar bu sahadaki iyi örneklerdir; yataklar, subap yuvaları, emisyon algılayıcıları, katalitik

konvertörler, darbe emiciler, bujiler, piston kolları, zincir dişlisi ve pek çok motor zamanlama parçaları. Bu alanda daha çok üretilebilirlik, otomasyon ve boyut toleransı düşünceleri hakimdir. Toz metalürjisi ürünlerinin kullanılması için pek çok üstün özellik ve mikroyapısal uygunluk olması ikincisidir. Gözenekli filtreler, oksit dağılımlı güçlendirilmiş türbin alaşımları, sermetler, fonksiyonel tabakalı yapay kemikler, temas alaşımları (bakır-krom) ve tungsten karbürden veya elmas kompozitlerden sert kesici takımlar bunlara örnek olarak verilebilir. Üçüncü olarak da, havacılık ve savunma sanayinde hafif ve dayanıklı malzemelere olan ihtiyaç, TM ile üretilen Metal matriks kompozit (MMK) malzemelere olan ilginin son on yılda katlanarak artmasına sebep olmuştur. Çalışmalar ve elde edilen deneyimler, yüksek sıcaklık dayanımının yapıdaki çökeltiler yerine, ince dağılımlı parçacıklarla sağlandığını göstermiştir. Ancak bu yapıyı geleneksel döküm yöntemiyle elde etmek mümkün olmamaktadır. Takviye parçacığının boyutu, hacimsel oranı, homojen dağılımındaki problemler ile parçacık-matriks kimyasal tepkimeleri, döküm yerine TM teknikleriyle rahatlıkla aşılabilmektedir [65].

Yüksek kaliteli ve karmaşık parçaların ekonomik olarak üretilebilmesi, toz metalurjisini cazip kılmaktadır. TM farklı boyut, şekil ve paketlenme özelliğine sahip metal tozlarını sağlam, hassas ve yüksek performanslı parçalara dönüştürür. Bu işlem; şekillendirme veya presleme ve daha sonra parçacıkların sinterleme yolu ile ısıl bağlanması basamaklarını içerir. TM nispeten düşük enerji tüketimine, yüksek malzeme kullanımına ve düşük maliyete sahip otomatikleşmiş işlemleri verimlice kullanır. Sahip olunan bu özellikler ile TM verimlilik, enerji ve hammadde gibi günümüz kaygılarını ortadan kaldırır. Bunların sonucu olarak, TM konusu sürekli gelişmekte ve geleneksel metal şekillendirme uygulamalarının yerini almaktadır [22].

Tozların istenilen biçime getirilmesi için presleme yapılır. Presleme aynı zamanda tozları kalıpta sıkıştırmanın yanında, ham yoğunluktaki parçanın içerisindeki gözeneklerin azaltılması ve toz temas yüzeyini arttırmak için de yapılır. Bu işlem sinterleme işlemini kolaylaştırır. Presleme işlemi oda sıcaklığında, bazen de daha yüksek sıcaklıklarda yapılır. Fakat oda sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda presleme işlemi, kalıp malzemesinin presleme sıcaklığındaki mukavemet değerleri ile sınırlanmıştır. Sinterleme ile elde edilen parçalara bazen son şekillerini vermek için ilave bir presleme işlem uygulanabilmektedir. Sinterleme işlemi, ergitme olmaksızın kullanılan metal tozunun ergime noktasının altındaki bir sıcaklıkta

yapılmaktadır. Kullanılan toz bir karışım ise, sinterleme işlemi bu tozlardan en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan tozun ergime sıcaklığının altında yapılır.

TM teknolojisini önemli kılan özellikler aşağıda özetlenmistir [63]:

- TM parçaları sonraki talaşlı işlemelere ihtiyacı ortadan kaldırabilecek düzeyde, son şekil veya son şekle yakın olarak seri üretilebilir,
- TM işlemi çok az malzeme ziyan eder (başlangıç tozunun yaklasık %97'si mamule dönüştürülür),
- TM parçaları gözenekli metal parçaları imal etmek için belirli bir gözeneklilik seviyesinde yapılabilir (Örnegin; filtreler, yağ-emdirilen yataklar ve dişliler),
- Diğer yöntemlerle işlenmesi zor bazı metaller toz metalurjisiyle şekillendirilebilir (Örneğin; ampullerdeki tungsten filamentler TM ile üretilir),
- TM ile yapılan belirli alaşım kombinasyonları ve sermetler, başka bir yöntemle imal edilemezler,
- TM, boyut kontrolü bakımından çoğu döküm yönteminden daha üstündür,
- TM imalat yöntemleri ekonomik üretim için otomatize edilebilir.

TM teknolojisinin zayıf yönleri ve sınırlılıkları aşağıda özetlenmiştir [63]:

- Yüksek takım ve ekipman maliyetleri söz konusudur,
- Metal tozları pahalıdır,
- Metal tozlarının depolama ve nakliyle ilgili problemler vardır (örneğin; zamanla bozulma, belirli metallerde yangın hasarı),
- Metal tozlarının presleme sırasında kalıp içinde paralel olarak akmaması nedeniyle parça geometrisinde sınırlamalar söz konusudur,
- Parça boyunca yoğunluktaki değişimler, özellikle karmaşık geometriler için bir sorun olabilmektedir.

4.2 Toz Üretimi

Bir toz, çok ince bölünmüş taneli katı olarak tanımlanabilir. Toz metalurjisi yönteminde, mühendislik tozları adı verilen metaller ve seramikler kullanılmaktadır. Mühendislik tozları çeşitli toz üretim yöntemleriyle farklı geometrik özelliklerde üretilebilmektedir. Geometrik özellikler:

- Parçacık boyutu ve dağılımı,
- Parçacık sekli (Şekil 4.1) ve iç yapısı,
- Yüzey alanı olarak sıralanabilir [62,63].



Şekil 4.1: Toz metalurjisindeki muhtemel parçacık şekilleri [62].

Toz üretim yöntemi üretilen tozun boyutu, şekli, saflığı, mikroyapısı, maliyeti ve diğer özelliklerini belirlemektedir. Bir tozun üretim yönteminin seçilmesi yöntemin anlaşılmasına, ekonomikliğine, elde edilen tozların özelliklerine ve bu özelliklerin kullanım yeri ihtiyaçlarını ne ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır. Toz üretiminde kullanılan ana yöntemler, mekanik öğütme, kimyasal tepkime, elektrolitik biriktirme, sıvı atomizasyonu ve buharı yoğuşturmadır [62].

4.2.1 Mekanik üretim yöntemleri

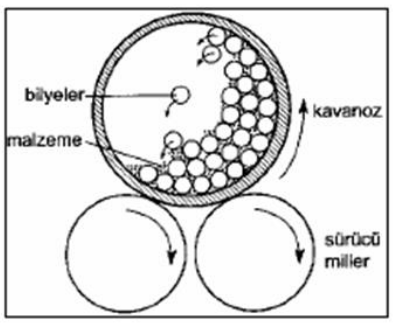
Darbe, aşındırarak öğütme, kesme ve basma olmak üzere dört ana mekanik öğütme yöntemi vardır. Darbe, malzemeye çekiçle vurma gibi çok hızlı ve anlık uygulamaları içerir ve malzeme küçük parçalara ayrılır. Aşındırarak öğütme, aşındırıcıların birbiri üzerinde sürtünme hareketi sayesinde parçacıkların boyutunun küçültülmesidir. Kesme, talaşlı imalatta olduğu gibi kesme işlemi ile malzemenin parçalanmasıdır. Kesme ile oluşturulan tozların büyük olma eğilimi vardır. Son olarak, basma kuvvetleri ile bir malzeme kırılma noktasına kadar deformasyona uğratıldığında toz haline getirilir. Bu yöntemlerde darbe, sıkıştırma ve burma kuvvetleri ile iri ve karmaşık şekilli tozlar üretilir. Bu yöntemlerde, en az maliyetle toz üretimi için, kayma sistemi az olan kimyasal bağları zayıf, karmaşık şekilli yapıya sahip malzemeler ile çok sert ve kırılgan olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır [62].

Bu yöntemlerden bazıları aşağıda detaylandırılmıştır:

Talaşlı imalat: Haddelenmis malzemelerin talaşlı imalatında kesme ile düzensiz şekilli iri tozlar elde edilir. Metal işleme tekniklerinde ortaya çıkan çok miktarda

talaş hurdası metal tozu için büyük bir kaynaktır. Bu hurdalar kimyasal tekniklerle temizlenir ve boyutlarının küçültülmesi için öğütülürler. Bu yöntemin olumsuz tarafı, hava ve işleme sıvılarından kaynaklanan kimyasal kirlilikleri de içeren toz özelliklerinin kontrolünün zayıflığıdır. Talaşlı imalatta üretilen tozların kullanım alanı bazı polimerler ve sert metallerdir [62].

Öğütme: Ögütme, sert bilyeler, çubuklar veya çekiçler kullanılarak yapılan mekanik darbe işlemini kapsar ve gevrek malzemelerden toz üretmede kullanılan klasik bir yöntemdir. Bu yöntemin basit olarak çalışma prensibi; bilyeler ve öğütülecek malzemenin bir kavanoz içerisine konularak döndürülmesidir. Kavanoz döndükçe bilyeler toz malzemeye sürekli olarak çarpar ve daha küçük parçacıklara ayrılır (Şekil 4.2). Öğütme bir çok sünek malzeme için kullanışlı değildir, çünkü bu tür malzemeler kırılarak ufalanma yerine şekil değiştirir veya topaklanır. Öğütmeye yardımcı olmak amacıyla akışkanlar ile oksitlenmeyi azaltan koruyucu ortamlar kullanılır. Öğütme ile elde edilen tozlar sert, düzensiz şekilli ve zayıf akma ve paketlenme özelliğine sahip olduğundan öğütme sonrası tavlama işlemi gerekebilir. Genellikle borürler, karbürler, nitrürler, oksitler ve intermetalikler bu yöntemle üretilir. Öğütme işlemleri birçok şekilde yapılmaktadır. Szegvari tipi dikey atritör, yüksek enerjili Spex tipi atritör, Zos tipi yatay atritör, Planetary Mill tipi atritör ve yeni tasarımlı atritörler [66].



Şekil 4.2: Öğütme yöntemiyle toz üretimi [62].

Aşındırarak öğütme ve mekanik alaşımlama: Mekanik alaşımlama (MA) yüksek enerjili atritör kullanılarak yapılan bir düşük sıcaklık sentezleme yöntemidir. Bu yöntemde iki yada daha fazla elementel toz birbiri içerisinde belli oranda karıştırılarak atritör içerisine konur ve mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulur [22]. Genellikle bu yöntemle kompozit malzeme tozları üretilir. Bu işlemde amaç değirmen içerisinde bilyelerle metal tozlarının ezilerek, kırılarak ve

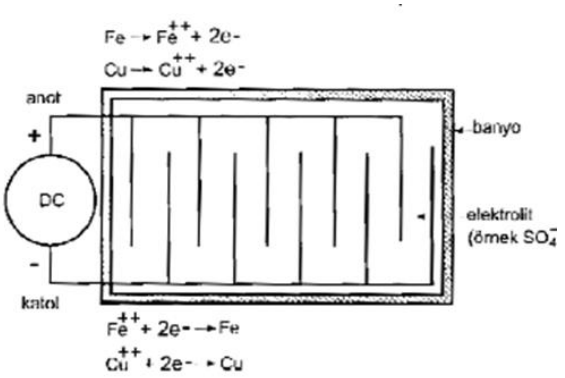
tekrar kaynaklaşarak yapılan bir kompozit toz işlemidir (Şekil 4.3). İşlem sonunda, metal tozlarını birbirine olabildiğince yedirilerek, istenilen oranlarda kompozit toz kıvamına getirilir [65].



Şekil 4.3: Mekanik alaşımlama [62].

4.2.3 Elektrolizle üretim yöntemleri

Elektroliz yönteminin ana üstünlüğü yüksek ürün saflığıdır. Elektroliz süreci, Şekil 4.4'te şematik olarak gösterilen hücreye uygulanan voltaj altında anodun çözünmesi ile başlar. Bakır ve demir için anot ve katot tepkimeleri şekil içerisinde verilmiştir. Elektrolit içerisinden taşınım katot üzerindeki birikintinin saflaştırılmasında kullanılır. Katot üzerindeki gözenekli birikinti sıyrılır, yıkanır, kurutulur ve öğütülerek toz haline getirilir. Daha sonra gerilmeleri azaltmak ve uçucu maddeleri gidermek için tavlama işşlemi uygulanır [62]. Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunlugu gibi şartları uygunca seçerek, birçok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilebilir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda paladyum, krom, demir, çinko, mangan ve gümüş de bu yöntemle üretilebilir [22].



Şekil 4.4: Elektroliz yolu ile üretimin şematik gösterimi.

Normalde elektrolizle üretim sadece metal tozlarının üretiminde kullanılmakta ve alaşım veya bileşiklere uygulanamamaktadır. Kirlilikler tozların oluşmasını ve katot üzerinde birikmesini engellerler ve bunların çok sayıda oluşum kaynakları vardır. Elektrolizle biriktirmeden sonra ürün temizlenmeli ve öğütülmelidir. Bunlar maliyeti ve artık maddeleri önemli ölçüde artırır. Bu nedenler ve diğer çevresel sorunlar elektrolizle toz üretim yöntemlerinin kullanımını sınırlandırmaktadır [62].

4.2.3 Kimyasal üretim yöntemleri

Kimyasal sentezlemenin birçok farklı yöntemi vardır. Tozlar katı, sıvı veya buhar fazı reaksiyonlarıyla üretilir.

Katının gazla bozunması: Metal tozu üretmenin klasik bir şekli oksit indirgemesidir. İşlem manyetik ayrıştırılmış ve ince oksit tozlar olarak öğütülmüş demir oksit örneğinde olduğu gibi saflaştırılmıs bir oksit ile başlar. Oksit, grafit ve kireç taşı gibi indirgeyiciler ile karıştırılır ve ısıtılır. Bu ilavelerden ortaya çıkan karbon monoksit gibi gazları içeren reaksiyonlar ile oksit indirgenir. Çoğunlukla ürün süngerimsidir ve kırılarak veya öğütülerek toz haline getirilmesi gerekir [62]. Burada saflık, malzemenin kalitesini belirler. Oksit ve karbonun maliyetinin düşük olması, gözenekli toz üretim imkanı, oksit ve parçacık boyutunun kontrolü bu yöntemin avantajı olarak bilinirken, indirgeyici gazların maliyetinin yüksek olması, toz saflığının oksit saflığına bağlı olması, alaşım tozlarının üretim imkansızlığı bu yöntemin dezavantajı olarak bilinmektedir [22]. Oksitlerin indirgenmesi sırasındaki davranış hem termodinamik hem de kinetik hususlardan dolayı sıcaklığa bağlıdır. Termodinamik husus, metal oksidin indirgeyici gaza karşı ne kadar kararlı olduğu ile ilgilidir. Gaz ile indirgenme molibden, volfram ve bakır tozlarının üretiminde de uygulanmaktadır. İndirgeme parametrelerinde yapılan değişiklikler sonucu tozların parçacık boyutu ve şekli çeşitlilik gösterir. Bu parametreler; gaz bileşimi, sıcaklık, tepkime kinetiği ve indirgenen madde yatağı kalınlığıdır.

Isıl bozunma: Toz parçacıkları buhar bozunması ve yoğuşturmanın birlikte kullanılması ile üretilebilir. En yaygın olarak demir karbonil ($Fe(CO)_5$) ve nikel karbonil ($Ni(CO)_4$) bu yöntemle elde edilir. İşlem bir metal ile karbon monoksitin tepkimesiyle başlar. Örnek olarak, nikel karbonil üretmek için biçimlendirilebilir. Nikel ile karbon monoksit eşzamanlı ısıtma ve basınç uygulanarak tepkimeye sokulur. Karbonil molekülü 43 °C'ye soğutularak sıvı hale getirilir ve saflaştırmak

için kısmi damıtma kullanılır. Sıvı bir katalizörle birlikte tekrar ısıtıldığında buhar bozunması ile toz elde edilir. Bu yöntemde tepkime şartlarını kontrol ederek toz boyutunu 0,2-20 mm arasında elde etmek mümkündür [62]. Bakır, krom, platin, rodyum, altın ve kobalt gibi diğer metaller karbonil işlemi için uygundur. Ancak yüksek enerji ihtiyacı ve karbonil moleküllerinin sağlığa zararları bu yöntemin kullanım yaygınlığını azaltmaktadır.

Sıvıdan çökeltme: Nitrat, klorür veya sülfat gibi çözünmüş bilesikler kimyasal işleme tabi tutularak çökeltilmis parçacıklar üretilebilir. Kimyasal olarak çökeltilmiş tozlar 1 mm boyutunda ve %99,8 saflıktadır, fakat toz özellikleri işlem değişkenleri sayesinde ayarlanabilir. Küçük parçacık boyutları nedeniyle ürünlerin çoğu topaklanma eğilimi gösterir. Çözeltilerin reaktör içerisinde dolaştırılması ile daha büyük toz boyutları oluşturmak mümkündür. Bu yöntemle çeşitli çökeltme teknikleri kullanılarak kompozit toz oluşturmak mümkündür. Titanyum tetra klorür ($TiCl_4$), toryum oksit (ThO_2), titanyum oksit (TiO_2) ve tungsten karbür (WC) gibi kompozit tozlar üretilebilir ve bunlar dağılımla güçlendirilmiğ alaşımlarda ve aşınmaya dayanıklı kaplamalarda kullanılır [62].

Gazdan çökeltme: Gaza dayalı tepkimeler küçük tozların az kirlilikle üretilmelerinde kullanılır. Vanadyum, niyobyum, volfram, titanyum, gümüş, kobalt, nikel veya zirkonyum gibi metallerin klorürleri, florürleri veya oksitleri gazdan çökeltme işlemi için uygundur. Nano ölçekli tozların homojen çekirdeklenmesi elektron ışını, lazer, plazma veya endüksiyon alanı kullanılarak çesitli buharlardan elde edilir. Bu parçacıklar 10-1000 nanometre boyutundadır. Pahalı bir toz üretim yolu olmasına rağmen parçacık boyutu, saflığı, şekli ve topaklanması buhar tepkimesi koşulları ile ayarlanabilir [62].

4.2.4 Atomizasyon yöntemleri

Su, gaz, savurmalı (santrifüj), vakum ve ultrasonik gaz atomizasyonu gibi farklı yöntemler kullanılarak ergimiş metal alaşımlarından, ergiyiğin sıvı demetini farklı akışkanlar ile ve mekanik kuvvetler kullanılarak sıvı damlacıkları haline getirmek ve daha sonra bunları katılaştırarak toz üretme teknolojisi atomizasyon olarak bilinir. Amaç, ergimiş metali yüksek enerjili gaz veya sıvı çarpmasına maruz bırakarak sıvı metali daha küçük parçalara ayırmaktır. Atomizasyon ünitesindeki nozulun geometrisi, atomize eden akışkanın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi

birçok parametreyi değiştirerek toz boyutu dağılımını kontrol etmek mümkündür. Tanecik şekli ise katılaşma hızı ile belirlenir ve düşük soğutma kapasiteli gazlar için küresel şekilden yüksek soğutma kapasiteli su için karmaşık şekle dönüşür. Genelde bu yöntem, ergitilebilen tüm malzemeler için uygulanabilir ve ticari olarak demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz, alüminyum, kalay, kurşun, çinko ve kadmiyum tozlarının üretilmesinde kullanılır [22].

Gaz atomizasyonu: Gaz atomizasyonu ergiyik metal demetine, yüksek basınçlı gazın belli bir açı ile püskürtülerek hüzmenin dağılımı ile sıvı metal damlacıkları elde edilmesi işlemidir. Genellikle hava, azot, argon ve helyum gazları kullanılır. İki ya da daha fazla ağızlık, sıvı metalin akma ekseni etrafına eşit açıda yerleştirilir ve gaz hüzmesi ile ergiyik metal demeti bir noktada kesişirler. Bu bölgeye atomize bölgesi denir. Bu yöntemle üretilen tozlar ince küresel ve yüzeyde oksit olmayan tozlar üretilir. Kimyasal saflıkları iyidir [22].

Sıvı ve su atomizasyonu: Gaz yerine bir sıvının ergiyik demetini parçalamada kullanılmasından ibarettir. Sıvı olarak su ve yağ kullanılır. 1600 °C'den düşük sıcaklıklarda ergiyen az reaktif malzemeler için suyun kullanımı çok yaygındır. Yüksek basınçlı su jetleri ergiyik demetine yönlendirilerek onun parçalanmasını ve hızlı katılaşmasını sağlar. Su genellikle birkaç jetten yönlendirilir. Bu yöntem gaz atomizasyonuna benzer, ancak parçacıklar daha hızlı soğur ve atomizasyon sıvısı çok daha yüksek verimle hızı küçük tozlara aktarır. Su gaza göre çok az sıkıştırılabilirliğe ve daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan, ergiyik demeti ile su nozulu arasındaki mesafe çok önemli bir etken değildir [22].

Savurmalı (santrifüj) atomizasyon: Savurmalı atomizasyon, ergiyiğin döndürülmesi sonucu oluşan mekanik kuvvet (merkezkaç kuvveti) etkisi ile damlacıkların katılaşması ile parçacıkların oluşturulması esasına dayanır. Pota ile temasın güçlük yarattığı yüksek sıcaklık malzemeleri veya reaktif malzemeler için çok kullanışlı bir yöntemdir [62]. Merkezkaç kuvvetinden dolayı santrifüj atomizasyonu olarak da adlandırılır ve iki çeşit santrifüj atomizasyonu vardır. Bunlardan birinde, bir kap içindeki ergiyik metal, ergiyik metalin damlacıklara ayrılması için, uygun bir hızda düşey eksen etrafında döndürülür veya bir metal demeti dönen bir disk veya koni üzerine akıtılır. Diğerinde ise, bir metal çubuk yüksek hızda döndürülür ve serbest uçta elektron ışını veya plazma arkı vb. ile ergitilir. Bu ikinci tip işlem, döner elektrot atomizasyonu olarak bilinir ve çubuk

düşey veya yatay eksende döndürülebilir [22,63]. Savurmalı atomizasyon ile yüksek paketlenme yoğunluğu ve kolay akış özelliklerine sahip, temiz ve küresel şekilli tozlar oluşturulabilir. Bu yöntemin olumsuz yönleri düşük üretim hızları, yüksek donanım ve işletme maliyeti ile büyük parça boyutudur [62].

Plazma ve diğer atomizasyon yöntemleri: Plazma başka bir atomizasyon tekniği sağlamaktadır. Tel veya iri tozlar plazma üflecine beslenerek burada ergime ve ani ivmelendirmeye tabi tutulur. Sonuç olarak, ergimiş damlacıklar üflecin dışına püskürtülerek parçacık halinde katılaşır. Alaşım üretmek amacıyla kullanılan tozlar karıştırılır, topaklandırılarak kümecikler oluşturulur ve bunlar plazma içerisinde ergitilerek alaşım üretilir.

Ergiyigi enerji aktararak parçalamak için kullanılan diğer atomizasyon teknikleri de vardır. Bunlar arasında titreşen teller, yüksek hızlı haddeler, dönen potalar ve ergiyik patlatmalı atomizasyon üniteleri sayılabilir. Bir telin ucunda ark meydana getirilerek yağ içerisinde kıvılcım erozyonu ile parçacık üretilebilir. Hadde atomizasyon ünitelerinde hızla dönen bir merdane ergiyik demetini pul şeklinde parçalar. Bu yöntemin ana avantajı amorf malzeme üretmek için gerekli yüksek soğuma hızlarını sağlamasıdır. Patlatmalı atomizasyon ise basınç, hız ve hidrojen ayrışması ergiyiğin vakum odasına patlamasına neden olur. Bu teknik süper alaşım tozlarının üretilmesinde kullanılır [62].

4.3 Mekanik Alaşımlama

Oksit dağılımı ile güçlendirilmiş malzemeler gibi parçacık takviyeli kompozitler yüksek sıcaklık sürünme dayanımı nedeniyle uzun zamandır kullanılmaktadır. Bu kompozitlerin üretiminde ana yapının her yerinde sert parçacıkların homojen dağılımını elde etmek zordur. Öğütme teknikleri bu kompozitleri üretmek amacıyla geliştirilmiştir. Hareketli bilyeler arasındaki aşındırma ile alaşımlı kompozit parçacıkları üreten mekanik alaşımlama, bu amaçla başarılı bir tekniktir. İşlem, karıştırmalı bir değirmene konulmuş bilya ve element tozların karışımı ile başlar. Mikroskobik ölçekte tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynak ve kırılma olayları istenilen kompozit tozları üretir. Başlangıçta karışım halinde olan parçacıklar fazların dağılımı ile kaplanmış parçacık haline gelirler. Diğer öğütme tekniklerinden farklı olarak, soğuk kaynak ve kırılma arasındaki denge, parçacık boyutunu oldukça sabit tutar.

Uygun malzeme seçiminin ardından gelen kademe, tozların karıştırılmasıdır. Prosesin bundan sonraki aşamalarında istenilen özellikte parçalar elde edilmesi için tozlar iyi bir şekilde karıştırılıp öğütülmelidir. Öğütme aynı kimyasal bileşime sahip tozların partikül boyutlarının küçültülmesidir. Karıştırma ise farklı kimyasal bileşime sahip tozların karıştırılarak alaşımlanması işlemidir [67].

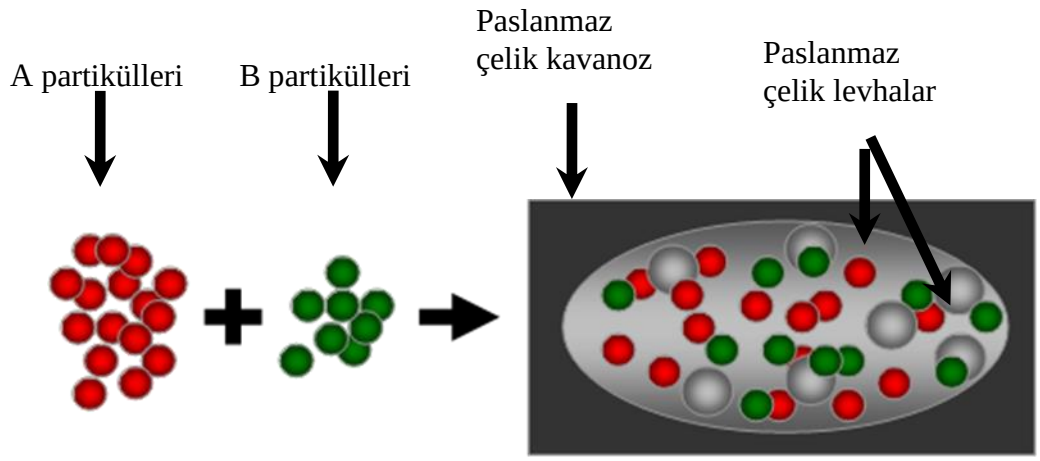
Mekanik alaşımlama öğütme işlemleri arasında en başarılı yöntemlerden birisidir. Bilyalar ile atritor etkisi yaparak alaşımlanmış bir kompozit üretme tekniğidir. İşlem bir miktar bilya ve elementel tozun karıştırıcı içerisinde karıştırılmasıdır. Bu karıştıma esnasında mikroskopik boyutta tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynama ve kırılma işlemleri istenilen kompozit tozunun üretilmesini sağlar. Şekil 4.5'de karıştırıcının şematik bir gösterimi verilmiştir. Bu şekilde altta mikroskopik boyutta meydana gelen homojenizasyon gösterilmektedir. Resimde görüldüğü üzere başlangıç tozları lamine hale gelerek pekiştirici faz ana matriks fazı içerisinde homojen bir şekilde dağılmıştır.



Şekil 4.5: Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi.

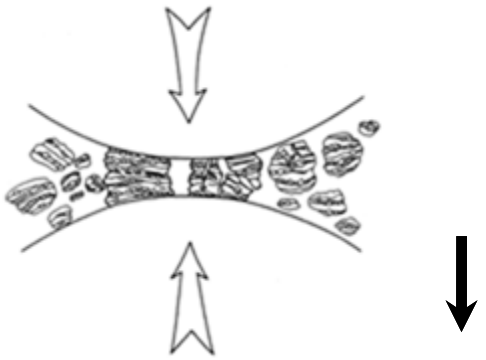
Dönen kollar bilya dolu tankı karıştırmaktadır başlangıç malzemeleri; sırasıyla soğuk kaynak ve kırılma adımlarını izler. Şeklin alt kısmında gösterildiği gibi öğütme sonucunda mikroyapı daha homojen bir hale gelir. Diğer mekanik toz üretim tekniklerinde olduğu gibi mekanik alaşımlamamada da kirlilik sorun olabilir. Bilyalar, karıştırma mili, kolları ve tank, öğütülecek toz ile aynı malzemeden yapılarak kirlilik en aza indirilebilir. Organik bir akışkanın (heptan veya alkol gibi) ortam olarak seçilmesi, mekanik alaşımlamada öğütme ve kaynaklanma arasındaki dengeyi sağlamak için önemlidir.

Diğer alaşımlama tekniklerinde olduğu gibi mekanik alaşımlamada da kirlenme bir sorundur. Bu sorun aynı malzemeden bilyalar karıştırıcı ve tank kullanılarak azaltılabilir. Mekanik alaşımlama esnasında organik bir sıvı ortamı kullanmak öğütme ve kaynama işlemleri arasındaki dengeyi kurmak için önemlidir. Buna ek olarak tozlar yüksek oranda deformasyon sertleşmesine maruz kalmaktadır [62]. Mekanik alaşımlamada kullanılan kavanoz sisteminin şematik gösterimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



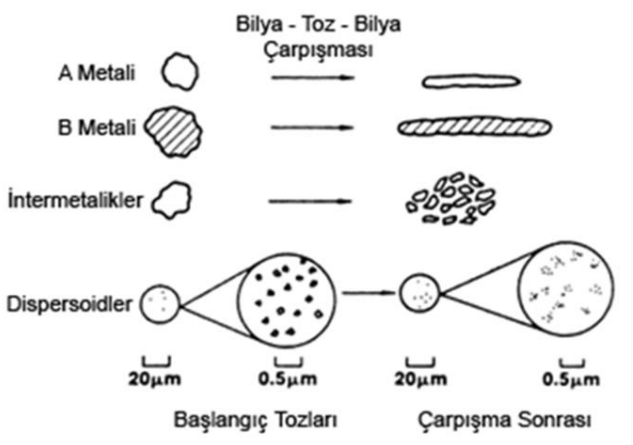
Şekil 4.6: Mekanik alaşımlamada kullanılan kavanoz sistemi.

Mekanik alaşımlama esnasında meydana gelen fiziksel değişimi anlamak amacıyla bu alaşımlama prosesini üç ya da dört aşamada incelemek uygun olacaktır [15]. Başlangıç kademelerinde tozlar daha yumuşaktır ve birbiri ile kaynayarak daha büyük boyutlu parçalar oluşturma eğilimleri daha yüksektir. Bu aşamada başlangıç tozlarına oranla üç kat daha büyük boyutlu parçalar meydana gelebilir. Kompozit partiküllerinin bu aşamada karakteristik olan katmanlı görüntüsü oluşur. Şekil 4.7'de bilyaların tozlar ile çarpışma şekli şematik olarak gösterilmiştir [68].



Şekil 4.7: Bilyaların tozlar ile çarpışmasının şematik gösterimi.

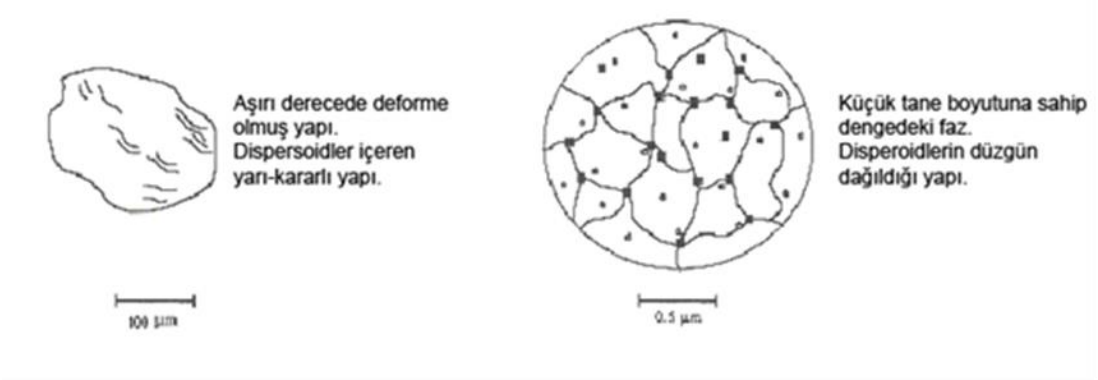
Metalik faz bu çarpışmalar esnasında düzleşip üst üste bindikçe atomik düzeyde temiz yüzeyler birbiri ile temas eder ve birbirine soğuk şekilde kaynar. Aynı aşamada kırılgan fazlar bu kaynayan yüzeyler arasında sıkışarak kaplanır ve yapıya karışır. Şekil 4.8'de başlangıç tozlarının mekanik alaşımlama esnasında uğradıkları deformasyon gösterilmektedir [68].



Şekil 4.8: Mekanik alaşımlama esnasında tozlarda meydana gelen deformasyon.

Orta kademede devamlı olan kırılma ve kaynama aşamalı sonucu tozlar deformasyon sertleşmesine maruz kalmış ve pekiştirici fazlar sürekli bir hal almıştır. Partikül boyutunda meydana gelen azalma mikroyapıdaki karışmayı hızlandırır. Mekanik alaşımlamada bilyalar tarafından absorblanan kinetik enerjinin etkisi ve ısı artışı ile metalik matrikste çözünme meydana gelir. Bu kademede atomik düzeyde difuzyonun artması sonucu yeni fazlar meydana gelebilmektedir [15].

Son kademe düzenli yapı elde edilmiş ve partikül boyutunun yükselmesine sebep olan kaynama seviyesi ile partikül boyutunu düşürücü etkiye sahip kırılma mekanizmaları arasında dengeye ulaşılmıştır. Sonuçta küçük partiküller ile büyük boyutlu partiküller birbiri ile karışarak boyutsal olarak homojenleşmiş bir yapıyı oluşturular [68]. Şekil 4.9'da mekanik alaşımlama prosesinin son kademesinde oluşan yapı gösterilmektedir [15].



Şekil 4.9: Mekanik alaşımlama prosesinin son kademesinde oluşan yapı.

Bu kademeden sonra elde edilen yapı başlangıç bileşimi ile aynıdır. İlk kademelerde oluşan lamelli yapı artık görülmemektedir. Bu aşamadan sonra daha fazla alaşımlamanın dispersoidlerin daha homojen dağılmasına etkisi olmayacaktır [15]. Partikül boyut dağılımı aralığı daralmıştır. Büyük partiküller ortalama boyuta indirgenmiş, küçük boyutlu partiküller de aglomere olarak bu seviyeye yükselmiştir [68].

Mekanik alaşımlama teknik üstünlüklerinden dolayı oldukça verimli bir tekniktir. En önemli avantajlarından birisi yeni alaşımların sentezlenebilmesi veya normal yöntemlerle alaşımlanamayacak elementlerin alaşımlanabilmesidir. Bunun sebebi mekanik alaşımlama tamamıyla katı halde meydana gelen bir işlemdir ve faz diyagramlarında belirtilen sınırlamalar mekanik alaşımlama işleminde geçerli değildir [68].

4.3.1 Mekanik alaşımlama mekanizması

Toz partiküllerinin yüksek enerjili öğütülmesi esnasında sürekli olarak ezilme, soğuk kaynak, kırılma ve yeniden kaynaklanma meydana gelir. İki çelik bilyenin çarpışmasıyla, bilyeler arasında kalan tozlar ezilir. Tipik olarak her çarpışma esnasında yaklaşık 0,2 mg'lık bir yığınla 1000 kadar toz tanesi ezilir. Darbenin etkisiyle toz partiküllerde plastik deformasyon, deformasyon sertleşmesi ve kırılma şeklinde devam eder. Toz taneciklerinin birbirlerine kaynaklanmasıyla yeni yüzeyler oluşur ve bu süreklilik partikül boyutunda bir artışa neden olur. Çünkü öğütmenin başlangıcında tozlar yumuşaktır. Birbirleriyle kaynaklanma ve büyük tanecik oluşturma eğilimi yüksektir. Toz tane boyutları, başlangıç tozlarının yaklaşık üç katı kadar artar. Bu aşamada kompozit tozlar başlangıç bileşiminin değişik kombinasyonlarını içeren karakteristik bir yapıya sahip olur. Devam eden

deformasyonla kolay kırılabilen incelmiş tozlar parçalanır veya bir yorulma bozunmasıyla deformasyon sertleşmesine ve kırılmaya uğrar. Bu aşamada kırılma eğilimi soğuk kaynaktan daha yüksektir. Öğütücü bilyelerinin devam eden darbe etkisiyle toz tane yapısı yavaş yavaş incelir. Buna rağmen parçacıkların boyutu aynı kalmaya devam eder. Sonuçta tabakalar arası boşluk azalır ve parçacık tabakaları artar. Bununla beraber parçacık boyut düşürme verimi oldukça azdır. Geleneksel bilyeli öğütücülerde bu % 0,1 civarındadır. Yüksek enerjili bilyeli öğütme işlemlerinde verim bir şekilde yüksektir ama bu oran hala % 1'in altındadır. Kalan enerji genellikle ısı seklinde kaybolur. Fakat küçük bir miktarı toz parçacıklarının elastik ve plastik deformasyonunda kullanılır [69].

Belirli bir öğütme süresi sonrasında, ortalama parçacık boyutlarını artırmak için, kaynaklanma oranı ve ortalama kompozit parçacık boyutunu düşürme eğilimini meydana getiren kırılma işlemi oranı arasında sürekli bir denge durumu sağlanır. Küçük parçacıklar oldukça hassas ve büyük parçacıkları ortalama boyuta indirgeme eğilimi ile kırılma ve daha büyük parçalara kaynaklanma olmaksızın küçük parçacıklarda deformasyon sağlanır [69].

MA sırasında parçacıklarda oldukça ağır deformasyon oluşur. Bu tane sınırları miktarındaki artış; dislokasyon, boşluklar, dislokasyonların birbirini bloke etmesi gibi birçok kristal etkilerin oluşumuyla görülür. Bu etki matrikste çözünen elementlerin difüze olmasını artırır. Daha ileri inceltilmiş mikroyapı özellikleri, difüzyon mesafesini düşürür. Bunun yanında öğütme sırasındaki sıcaklığın hafifçe yükselmesi difüzyon davranışlarına yardım eder. Bunun sonucunda, bileşimi oluşturan elementler arasında gerçek bir alaşımlama ortaya çıkar. Oda sıcaklığında bu alaşımlama ortaya çıkarken, bazen de alaşımlamanın yüksek sıcaklıklarda elde edilebilmesi için alaşım tozunun tavlanması gerekir.

Herhangi bir sistemde istenen bir yapının oluşturulması için gerekli zaman; başlangıç toz boyutu ve içeriklerinin (karışımın) özelliklerini ve MA işlemi için kullanılan özel ekipmanların ve bu ekipman parametrelerinin bir sonucu olabilmektedir. Fakat çoğu durumlarda içyapının (parçacık boyutu, kristal boyutu, lameler alan) incelme oranı işlem zamanı ile kabaca logaritmiktir ve bundan dolayı toz parçacıklarının başlangıç boyutları önemsizdir. Birkaç dakika içinde lameller genellikle küçük ve kristal bir yapıya dönüşür ve bu boyut olarak 1 nm'dir. Nanokristal malzemelerdeki sentezleme

kolaylığının bir sebebi, nanokristal malzemeleri üretmek için yoğun olarak kullanılan MA'nın niçin kullanıldığıdır [70].

4.3.2 Mekanik alaşımlamanın uygulandığı toz kombinasyonları

MA işlemini metallerin ve alaşımların üç farklı kombinasyonuna tatbik etmek mümkündür. Bunlar; sünek-sünek, sünek-kırılgan, kırılgan-kırılgan karakterli toz sistemleridir. Sünek-sünek kombinasyonda mekanik alaşımlama esnasında istenilen alaşımlamanın gerçekleşmesi için karışımın en az % 15'inin sünek bileşen olması gerektiği belirtilmiştir [70]. İki farklı sünek bileşen içeren bir sistemdeki alaşımlama mekanizmasıyla ilgili olarak yapılan araştırmada, mekanik alaşımlamanın ilk aşamalarında sünek bileşenlerin bilyeler vasıtasıyla bir mikrodövme işlemiyle levha şeklinden üst üstte tabakalaşmış bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir [70]. Bu süre zarfında bir miktar toz bilye yüzeylerine kaynak olmaktadır. Bilyelerin üzerinin bu şekilde kaplanmış olması bilyelerin aşırı ısınmasını önlediğinden bu durum MA işlemi açısından avantajlıdır. Bir sonraki aşamada ise levhalaşan bu parçacıklar birbirleriyle soğuk kaynaklaşır ve işleme giren tozların kompozit lamelli görünüm sergileyen bir yapısı oluşur. Bu aşamada, parçacık boyutunda artış gözlenir. MA işleminin ilerlemesiyle birlikte, kompozit toz parçacıklar sertleşir, sertlikle birlikte kırılganlıkları artar ve bu durum ise parçacıkların eşeksenli boyutlarda kırılmasıyla sonuçlanır. Daha ileri aşamalarda eş eksenli toz parçacıklarının rastgele kaynaklaşmasından dolayı lamel yapı kıvrımlı bir hale dönüşür [70]. Bu aşamada; difüzyon mesafelerinin azalması, kafes hata yoğunlunun artması ve öğütme işlemi esnasında ortaya çıkan ısı sebebiyle alaşımlama gerçekleşmeye başlar. Daha ileri aşamalarda ise atomik seviyedeki gerçek alaşımlama ortaya çıkar ve bu durum katı çözeltilerin, intermetaliklerin ve amorf yapıların oluşması ile sonuçlanır. Bu aşamada katmanlar arası mesafe optik mikroskopla gözlemek mümkün olmayacak kadar incelir [70]. Geleneksel oksit dağlımı ile mukavemetlendirilmiş (ODS) alaşımlar sünek-gevrek karakterli bileşenler grubuna girmektedir. Bu kombinasyonda, sünek bir matriks oksit parçacıklar ile takviye edilmiştir. Öğütmenin ilk aşamalarında bilye-toz-bilye çarpışmalar sebebiyle sünek metal toz parçacıklar yassılaşırken, kırılgan oksit veya intermetalik parçacıklar kırılır veya ufalanır. Kırılmış bu gevrek parçacıklar sünek bileşenlere gömülürler. Sonra bu gevrek bileşenler toz parçacıklar arasındaki kaynaklaşma sebebiyle toz içerisindeki lamel fazlar arasındaki boşluklara yerleşirler. Devam eden öğütmeyle, sünek toz parçacıklar sertleşir, lamelli düz yapı

kıvrılarak helisleşir ve iyice incelir. Her bir toz parçacığının bileşimi başlangıç toz karışımının bileşimine yaklaşır. Öğütme devam ettikçe, lamelli yapı daha da incelir ve lameller arası mesafeler azalır. Gevrek parçacıklar ise bu şekilde matriks içerinde homojen olarak dağılır. MA işlemi sırasında sünek-gevrek bileşenlerin alaşımlanmasının gerçekleşmesi için, gevrek parçacıkların kırılması gerektiği gibi aynı zamanda sünek matriks içerisinde yeterli katı çözünürlüğe sahip olmasına da ihtiyaç vardır [71]. Gevrek-gevrek bileşenli alaşımlama sisteminde başlangıçta alaşımlamanın mümkün olamayacağı, düşünülebilir. Nedeni de; sünek bir bileşenin olamaması kaynaklaşmanın oluşmasını engeller ve kaynaklaşmanın olmaması durumunda alaşımlamanın gerçekleşmesi beklenemez. Ancak Si-Ge ve Mn-Bi gibi sistemlerde bu işlemin gerçekleştiği belirtilmiştir [70]. Gevrek intermetaliklerin öğütülmesi işleminde de bu yönteme başvurulmuş ve amorf fazların elde edildiği tespit edilmiştir.

4.3.3 Mekanik alaşımlamanın avantajları

Mekanik alaşımlama yöntemi, deneysel ve üretim süreçleri olarak tüm ikili ve çoklu sistemlere kolaylıkla uyguluna bilmektedir. Bu yüzden MA tekniği üretim ve ticari anlamda çeşitli avantajlar sunmaktadır [70]. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Mekanik alaşımlama işlemi, gelişmiş malzemelerin tasarlanmasını sağlayan yeni işleme tekniklerinden bir tanesidir.
- MA işlemi, bir katı hal işlemi olmasından dolayı normal ergitme teknikleriyle üretilmesi zor ve veya imkansız olan elementlerin (WC-Co gibi) üretilebilmesi.
- Birbiri içinde sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementlerin alaşımlanması.
- ODS malzemeler, türbin paletlerini üretmek için geliştirilen malzemelerdir. Bu malzemelerin üretimi, MA ile yeni malzeme üretiminde kullanılan özel bir metottur.
- Oldukça farklı ergime sıcaklığına sahip malzemelerden intermetaliklerin üretilebilmesi.
- MA temelde katı mal zemelerin bilyeli bir değirmende asal bir ortamda işlendiği bir toz metalurjisi tekniğidir. İşlem içerisinde sıvılar bir kontrol eleman veya reaktant olarak bulunabilirler.

- MA işlemi bir katı hal difüzyon işlemi olmasından dolayı alaşımlar sıvı halde bulunmayan karışımlardan yapılabilirler.
- Mekanik alaşımlama da dayanım için en önemli rolü, matriks içerisine homojen olarak dağılmış oksit parçacıkları üstlenmektedir. Bu parçacıklar; dislokasyon hareketleri için önemli bir bariyer teşkil etmektedir. Yeterli dayanım elde edebilmek için oksit parçacıklarının çok küçük (5-50 nm) ve birbirine oldukça yakın (100-150 nm) dağılmış olması gerekir. MA ile bunu sağlamak mümkündür.
- Matriks içerisine homojen olarak dağılmış oksit parçacıklar, toparlanmayı ve yeniden kristalleşmeyi engeller veya yavaşlatır, böylece bu malzemelerin yüksek sıcaklıkta kararlı bir yapıda olmalarını sağlar.
- MA işleminden sonraki termo mekanik işlemler neticesinde oldukça iri uzun ve birbirine geçmiş taneler elde etmek mümkündür. İri tane yapısı, ikinci yeniden kristalleştirme işleminden sonra ortaya çıkmakta ve malzemenin yüksek sıcaklıkta tane sınırı kaymasını engellemektedir.
- Mekanik alaşımlama ile elde edilen tozların yapısı tamamen homojen olarak elde edilebilir, böylece segregasyon problemi ortadan kaldırılmış olur.
- Dış etkilere karşı dayanaklı malzeme üretmek mümkündür.
- Fabrikasyonu kolaydır.
- Endüstriyel uygulamalar için karmaşık şekilli ve hassas toleranslar dahilinde malzeme üretimi mümkündür. 0,1mm et kalınlığında saç levha ve 0,4 mm kalınlığında boru malzeme üretilebilmektedir.
- Nano kristalli malzeme üretimine elverişlidir.
- Bir seferde oldukça fazla miktarda toz üretmek ve alaşımlamak mümkündür.
- Performans/birim fiyat dikkate alındığında ucuz malzeme üretimini mümkün kılmaktadır [70].

4.3.4 Üretim Ekipmanları

Farklı çeşitlerde yüksek enerjili bilyalı öğütücüler mekanik alaşımlama işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunlar spex öğütücüler, gezegen tipi öğütücüler ve çeşitli atritörlerdir. Hepsinin farklı kapasiteleri, öğütme verimleri ya da ısıtma soğutma amaçlı düzenlemeleri vardır [68]. Spex öğütücüler laboratuar tipi olarak en genel kullanılan öğütücü tüpleridir. Yaklaşık olarak 10 - 20 g toz öğütebilme kapasitesine sahiptirler. Bu tip öğütücüler malzemenin ve bilyaların içine konacağı kavanozdan,

kilit mekanizması ve dakikada 1200 devir ile sarsıntı üreten karıştırma cihazından meydana gelmektedir. Ayrıca kullanılabilinecek sertleştirilmiş çelik, alümina, tungten karbür, zirkonya, paslanmaz çelik, silikon nitrat, agat, plastik gibi farklı tip kavanozlar mevcuttur. Şekil 4.10'da bu tip öğütücülere bir örnek görülmektedir.



Şekil 4.10: Mekanik alaşımlamada kullanılan yüksek enerjili bilyalı öğütücü.

Bunun dışında kullanılan bir diğer öğütücü cihaz gezegen tipi değirmendir. Bu tip öğütücülerde birkaç yüz gram toz öğütülebilmektedir. Ancak bu tip öğütücüler spex tipi yüksek enerjili bilyalı öğütücülerle karşılaştırıldığında düşük enerjili öğütücü olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.11'de gezegen tipi öğütücü gösterilmektedir [68].



Şekil 4.11: Gezegen tipi öğütücü.

Bir diğer öğütücü tüpü atrütörlerdir. Bu tüp öğütücülerde oldukça yüksek miktarlarda toz öğütülebilmektedir (0,5 - 40 kg). Dikey bir şaftın ve karıştırıcıların sistemde bulunan tankın içinde 250 devir/dakika hızda dönmesi ile öğütme işlemi gerçekleşir [68]. Şekil 4.12'de atritör tipi öğütücülere bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Atritör tipi öğütücü.

Öğütücülerin endüstriyel tipte olanları yukarıda bahsedilen öğütücülere oranla çok daha büyük hacimlere sahiptir. Mekanik alaşımlama için endüstriyel bir üretim 1250 kg kapasiteli bilyalı öğütücülerle yapılmaktadır. Artan enerji ile öğütme süresi azalmaktadır. Buna göre spex tipi bir öğütücüde birkaç dakika sürecek bir öğütme işlemi atritör tipi bir öğütücüde saatler sürebilirken endüstri tipi bir öğütüüde bu süre günler seviyesindedir. Öğütücünün cinsine göre mekanik alaşımlama prosesini etkileyen çeşitli parametreler vardır. Bunlar öğütücü haznesinin malzemesi ve öğütme ortamının cinsi, bilya-toz oranı, öğütme atmosferi, öğütme süresi ve kullanılan bağlayıcı cinsidir [68].

Kullanılan öğütücü kabın malzemesinin önemi büyüktür. Bunun sebebi öğütme esnasında kabın iç duvarlarında az miktarda d olsa aşınma meydana gelebilmektedir. Bu aşınma sonucunda kopan parçalar üretilmekte olan tozu kirletmekte ve kimyasal bileşimini değiştirebilmektedir. Eğer kullanılan öğütücü ile öğütülen malzeme çok farklıysa üretilen tozlar içerisinde bu kap malzemesi çözünebilir. Eğer aynı tip malzemeler seçilirse bu çözünme meydana gelse bile sistemi çok fazla etkilemeyecektir. Bu sebeple üretilecek malzemeye uygun bir öğütme sistemi seçilmelidir. Buna ek olarak öğütme işleminde seçilen malzeme öğütmenin gerçekleşebilmesi için gerekli etkiyi gösterecek kadar da yoğun bir malzeme olmalıdır [68].

Bir diğer önemli paramatere bilya - toz oranıdır. Bu oran 1:1'den 22:1'e kadar değişen oranlarda kullanılabilmektedir. Genel olarak spex tipi düşük malzeme kapasiteli bir öğütücüde kullanılan oran 10:1'dir. Bilya toz oranı istenilen sürede istenilen düzeyde bir öğütmenin meydana gelebilmesinin sağlanması açısından önemli bir parametredir [68].

Öğütme atmosferi de öğütme prosesi için önemli bir parametredir. Öğütme atmosferinin en önemli etkisi kirlenmedir. Bu sebeple tozlar genellikle vakum ya da inert gazlar olan argon veya helyum atmosferinde yapılmaktadır. Yüksek saflıkta argon oksidasyonu ve kirlenmeyi önlemeye yönelik en genel kullanılan gazdır. Öğütme kabında bulunan oksijen malzemede öğütme esnasında oksit ya da nitrür oluşumuna sebep olabilir. Bu sebeple tozların öğütücüye konulması ve öğütücüden alınması koruyucu bir gaz atmosferinde yapılmalıdır [68].

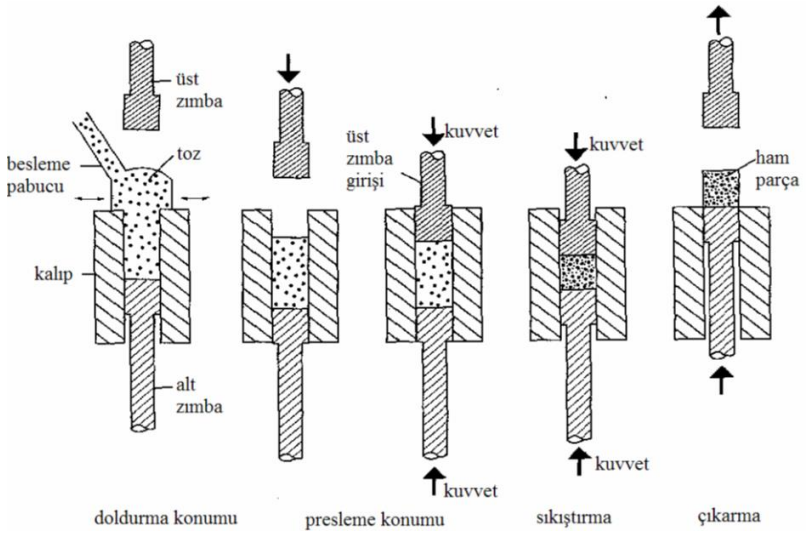
Öğütme süresi en önemli parametredir. En genel olarak iç yapıda meydana gelen düzen (partikül boyutu, kristal boyutu gibi) mekanik alaşımlama süresine bağlıdır ve başlangıç tozlarının boyutu önemini kaybetmektedir. Normalde tozların kırılma ve kaynama sonucunda kararlı fazın oluşturması için yeterli miktarda süre öğütme işlemi yapılır. Ancak bu süre kullanılan öğütücü cinsine, bilya - toz oranına, öğütme verimine ve öğütme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bu süre tüm bu parametreler göz önüne alınarak belirlenmelidir. Buna ek olarak uzun süren mekanik alaşımlama süreleri sonunda kirlenme seviyesi artabilir ve istenmeyen fazlar sistemde oluşabilir. Bu nedenle üretilmek istenen toz gerektiği kadar bir sürede öğütülmelidir [68].

Bağlayıcı benzeri kontrol ajanlarının kullanımı mekanik alaşımlamada bir diğer parametredir. Genel olarak sünek malzemeler oluşan yüksek miktardaki plastik deformasyonun etkisi ile birbirine soğuk kaynarlar. Ancak uygun alaşımlama soğuk kaynama ve kırılma arasındaki denge sağlandığında gerçekleşir. Bu nedenle proses kontrol ajanlarının ilavesi ile soğuk kaynama miktarı azaltılmaktadır. Bunlar katılar, sıvılar ya da gazlar olabilir. Genellikle yüzey aktif organik bileşikler olup malzeme yüzeyini kaplayarak toz partikülleri arasındaki soğuk kaynamayı azaltmakta ayırca aglomerasyonu da engellemektedir [68].

4.4 Tozların Sıkıştırılması

Tozların en yaygın sekillendirme ve yoğunluk kazandırılma şekli, istenilen parça geometrisine göre yapılmış olan kalıp içerisinde basınç uygulamaktır. Tozlar basınç uygulandığında; önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak her bir parçacık 4-6 komsuşu ile temas edecek şekilde kalıp içinde yerleşir. Basınç uygulamaya devam ettikçe temas eden parçacık sayısı (koordinasyon sayısı) artar ve parçacıklar sertliklerine oranla şekil değistirerek bağ oluşturur. Sonuç olarak çoğu zaman tek

yönde bir kalıp içerisinde sıkıştırılan toz taşınabilecek mukavemeti olan bir kütleye dönüştürülmüş olur. Presleme sırasında kalıpta olusan ardışık hareketler Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Kalıpta sıkıştırma çevriminde, alt zımba doldurma konumunda iken kalıp boşluğuna tozlar doldurulur. Besleme pabucunun geri çekilmesinden sonra ölçülü toz miktarı presleme konumuna çekilir. Üst zımba kalıba girer, alt ve üst zımbalar merkeze doğru ilerletilir. Sıkıştırmadan sonra, üst zımba geri çekilir ve alt zımba çevrimin tekrarından önce parçayı çıkartır [62]. Sıkıştırılmış toza ham parça adı verilmektedir. Presleme sonrası yoğunluk ham yoğunluk, presleme sonrası mukavemet ise ham mukavemet olarak adlandırılmaktadır. Preslemeden sonra ham parça kalıbın içinde mekanik olarak kilitlenmiş durumdadır. Parçayı kalıptan çıkartacak kuvvete çıkartma kuvveti denir. Sıkıştırma basıncı arttıkça parçanın kalıptan çıkartılması güçleşir ve kalıp aşınmasını azaltmak için yağlayıcı kullanılmalıdır. Burada yağlayıcının, hem çıkartma kuvvetinin azaltılması hem de kalıp aşınmalarının azaltılması bakımından önemi büyüktür [62].



Şekil 4.13: Tozların sıkıştırılmasında işlem sırası [62].

Kalıpla sıkıştırmada en önemli zorluklardan birisi kalıp yüzeyinde oluşan sürtünmedir. Kalıbın iç yüzeyinde oluşan sürtünme, diğer bütün kuvvetlerden büyüktür. Bu kuvvet kalıbın merkezine doğru azalır. Bu sırada basınçtan dolayı toz parçacıkların yer değiştirmesi esnasında toz parçacıkları, üzerindeki basıncın tesiri ile direncin en az olduğu yöne dolayısıyla daha az yoğun bölgelere kaçma eğilimi gösterir. Böylece kısmen yanlara doğru, fakat daha çok kalıp merkezine doğru bir toz akışının olduğu anlaşılmaktadır [22]. Bu sürtünme, ham parçanın kolay çıkartılmasını engellediği gibi aynı zamanda yoğunluk farklılıklarının oluşmasına

sebep olur. Kalıp yüzeyi sürtünmesine baglı olarak oluşan değişken ham yoğunluk, parçanın sinterleme sırasında çarpılmasına neden olur. Dolayısıyla kalıp yüzeyi sürtünmeleri sinterlenmiş toleransları kısıtlamaktadır.

Preslenmiş parçanın tüm yüksekliği değerlendirilirse, daima basıncın büyüdüğü yönde akıp giden bir yoğunluk düşmesi tespit edilebilir. Tek yönlü preslemelerde parçanın zımbaya en uzak bölgesinde, çift yönlü preslemelerde parçanın orta bölgesinde kötü yoğunluk dağılımı görülür. Preslenmiş bir parçanın yoğunluğundaki istenmeyen bu farklar parça boyu ile doğrudan alakalıdır [22]. Buna ek olarak, basınç kaldırıldığı zaman preslenmiş parça genleşir ve bu olay geri yaylanma olarak bilinmektedir. Parçanın genleşmesi, çıkartma işleminden sonra kalıbın içine tekrar girmemesinden anlaşılmaktadır. Geri yaylanma sıkıştırma basıncının karesiyle orantılı olup tipik olarak % 0,2 - 0,4 arasındadır. Sinterlemeden sonra beklenilen ölçülerin elde edilebilmesi için, bu boyutsal değişim kalıp tasarımında göz önüne alınmalıdır [62]. Bu anlamda, sıkıştırma mekanizmasının iyi bilinmesi kalıp tasarımındaki parametre ve kriterleri belirleyici yönde bir etkiye sahiptir [22].

Presleme sırasında, görünür yoğunluğun ham yoğunluğa dönüşmesi sıkıştırılabilirlik olarak tanımlanmaktadır. Parçacık boyutu sıkıştırılabilirliğin önemli bir faktörüdür. Küçük parçacıkların görünür yoğunluğu düşüktür, genellikle serttirler ve sıkıştırma sırasında hızlı pekleşmeye maruz kalırlar. Bu sebeplerden dolayı preslenmeleri zordur. Aynı zamanda, küçük tozlar ve sünger tozlar kalıptan çıkartma sırasında daha fazla geri esneme yapacağından çatlak oluşma ihtimali yüksektir. Kalıpta presleme ile yüksek ham yoğunluğa sıkıştırılabilecek şekilde tasarlanmış tozlar genellikle yumuşak ve büyüktür. Yüksek sertlik tüm sıkıştırma basınçlarında ham yoğunluğu düşürmektedir. Kuvvetli ve sert olan alaşımlı tozlar, paslanmaz çelikler, manyetik alaşımlar, takım çelikleri ve kompozitlerin preslenmesi için yüksek basınçlar gereklidir [62].

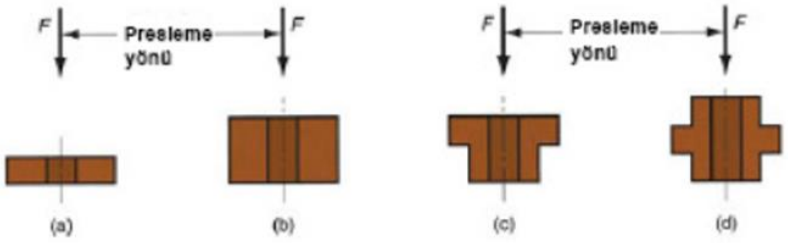
Ayrıca, tozlar aynı şekil ve boyutta olmadığından sıkıştırma öncesi, tozların homojen dağılımlarını elde etmek amacıyla yağlayıcılarla birlikte belli bir süre karıştırılması toz taneleri arasındaki sürtünmeleri azaltmak suretiyle tozların akışını kolaylaştırmakta ve meydana gelecek enerji kayıplarını azaltmaktır [22]. Yağlayıcı ve toz optimum bir sürede karıştırılmalıdır. Fazla karıştırma, düşük ergime derecesine sahip yağlayıcının ısınarak yapışkan bir hal almasına sebep olabileceği gibi, az karıştırma ise yağlayıcıdan beklenen özelliği karışıma yansıtmaz. Bazı

yağlayıcılar yapıştırıcı görevi görüp mukavemet artışına sebep oldugu gibi bazıları ise sinterleme esnasında yanarak gözenek artışına sebep olur ve buna bağlı olarak sinterleme ile artması gereken yoğunluk düşebilmektedir [22]. Düşük sıkıştırma basınçlarında yağlayıcı sürtünmeyi azaltır ve yoğunlaşmayı iyileştirir. Buna karşılık, yağ parçacıkları da hacim işgal ettiklerinden, yüksek basınçlarda yoğunlaşmayı düşürmektedir. Yağlayıcı, parçacıklar arasında iyi bağ oluşmasını engelliyorsa böyle genleşmeler çatlak oluşumuna neden olur. Pratikte özellikle düşük miktarlarda kullanıldığı zaman yüksek vizkoziteli yağlayıcılar tercih edilir [62].

4.4.1 Sıkıştırma yöntemleri

TM ile üretilen makine parçalarının şekil ve boyu üzerindeki kısıtlamalar sıkıştırma işlemleri ile ilgilidir. Metal tozlarını preslemek için birçok uygun yöntem vardır. Fakat bunlardan çok azı homojen dağılım sağlayabilir. Özellikle karmaşık parçalarda bu daha da zordur [22].

Presleme zorluğunu belirlemenin yollarından biri parçanın sahip olduğu kademe sayısını bilmektir. Kademe sayısı arttıkça kalıbın karmaşıklığı da artar [62]. Metal Tozları Endüstrileri Federasyonu (MPIF), toz metalurjisi parça tasarımı için geleneksel preslemedeki zorluk seviyesine göre dört sınıf tanımlamaktadır. Bu sınıflandırma, geleneksel TM yöntemiyle ulaşılabilecek şekil sınırlamalarının bazılarını gösterdiğinden faydalıdır (Şekil 4.14).



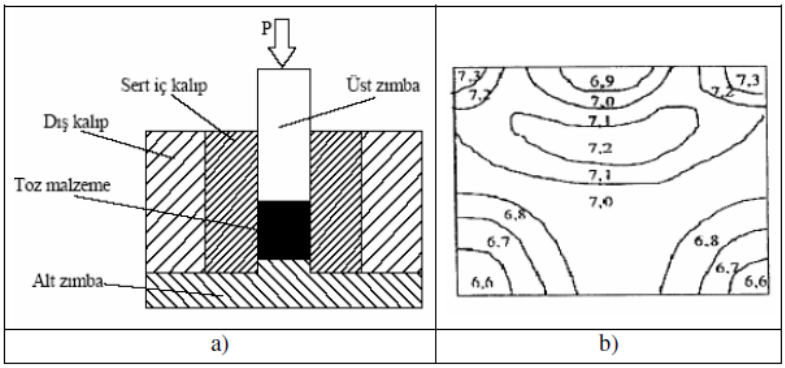
Sekil 4.14: TM parçaların dört sınıfı (yandan görünüşleriyle; enine kesitleri daireseldir) [63].

Şekil 4.14'de şematik olarak verilen parçalarda; (a) 1. sınıf parçalar basit, tek kademeli ve boy-çap oranı düşük olup bunlar tek hareketli preslerde sıkıştırılır. (b) 2. sınıf parçalar yine tek kademelidirler, ancak yüksek boy-çap oranına sahip olduklarından üst ve alt taraftan çift hareketli sıkıştırılırlar. (c) 3. sınıf parçalar iki kademelidir ve basınç üst ve alttan birlikte uygulanır. Son olarak, (d) 4.sınıf parçalar

çok zor preslenebilen şekilli parçalardır. Bunlar çok kademeli parçalar olup, basınç üst ve alt hareketli zımbalar ile uygulanır [62].

4.4.1.1 Tek hareketli sıkıştırma

Tozlara uygulanan basınç tek bir zımbadan uygulanırsa parça yoğunluk açısından daha az homojendir ve bu işleme tek hareketli sıkıştırma adı verilmektedir [62]. Tek hareketli sıkıştırmada, dikey doğrultuda deformasyonun başlamasıyla, tozlar arası ve toz-kalıp çeperi arasında oluşan sürtünme düzensiz bir basınç dağılımına sebep olmaktadır. Bu nedenle uygulanan basınç kalıp içindeki tozlara düzenli olarak iletilememektedir. Dolayısıyla iş parçasındaki yoğunluk homojen bir dağılım sergilememektedir (Şekil 4.15).



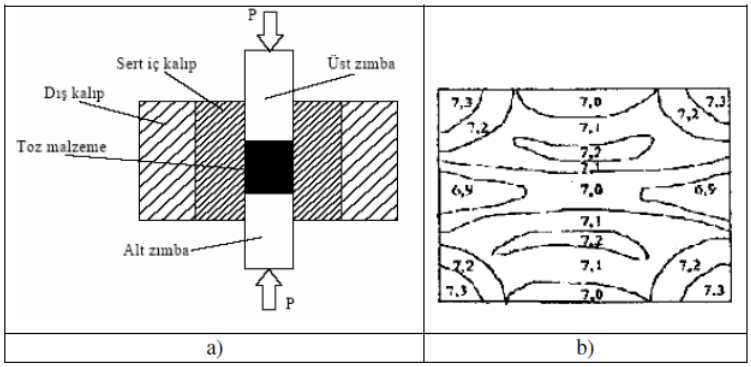
Şekil 4.15: Tek hareketli sıkıştırma. a) Kalıbın şematik gösterimi, b) Yoğunluk dağılımı [6].

Yoğunluk, hareketli zımbaya yakın bölgelerde daha yüksek olmakta ve sabit zımbaya doğru giderek azalmaktadır. Yoğunluktaki bu azalma iş parçasının boy/çap oranına bağlıdır [22]. Kalıp duvarının tozlardan çizilmemesi ve aşınmaması için çok sert olması gerekir. Bundan dolayı genellikle sert metal kalıplar kullanılmaktadır. Diğer önemli faktör ise, yükseklik ve çap arasındaki ilişkidir. Tek hareketli sıkıştırmada, başlangıçta kalıba doldurulan toz kütlesindeki yüksekliğin çapa oranı (Y/Ç), presleme sonrası yoğunluk dağılımını direk etkilediğinden önemlidir. Bundan dolayı bu oranın (Y/Ç) 4 olması önerilmektedir [22].

4.4.1.2 Çift hareketli sıkıştırma

Basıncın alt ve üst zımbaların her ikisinden de yapıldığı işleme çift hareketli presleme denilmektedir. Bu preslemede toz, birbirine zıt yönlü olarak üst ve alt zımba tarafından aynı anda sıkıştırılmaktadır. Her yönden eşit veya farklı miktarda

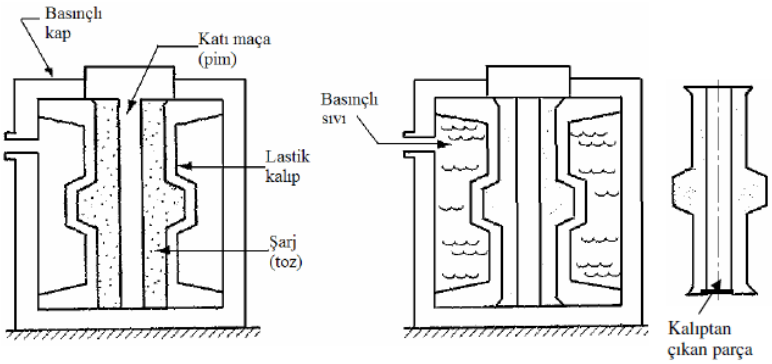
hareket veya basınç uygulanır. Çift hareketli sıkıştırma ile kalıp içerisinde boydan boya dengeli bir sıkıştırma temin edilir [22]. Bu yöntemde sıkıştırılan parçadaki yoğunluk dağılımı, tek hareketli sıkıştırma ile elde edilen parçaların yoğunluk dağılımından daha homojendir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16: Çift hareketli sıkıştırma. a) Kalıbın şematik gösterimi, b) Yoğunluk dağılımı [22].

4.4.1.3 Soğuk izotatik sıkıştırma

Soğuk izostatik sıkıştırma, kademeli ve karmaşık şekilli parçalar veya boy/çap oranının büyük olduğu parçalar için uygulanan hidrostatik bir sıkıştırma işlemidir. Burada, toz elastik bir kalıp içinde sızdırmaz hale getirilir. Esnek kalıptaki hava sıkıştırma sırasında çıkacağından önceden boşaltılır. Daha sonra toz-kalıp birleşimi, yağ veya su gibi bir sıvı banyosundan oluşan bir basınç kabına daldırılır. Akışkana yüksek basınç uygulanarak, kalıp hidrostatik basınç etkisinde bırakılır (Şekil 4.17). Basınç kabından çıkarıldıktan sonra, parçanın üzerindeki esnek kalıp alınır ve genellikle bir daha kullanılmaz [22].



Şekil 4.17: Soğuk izostatik sıkıştırma [63].

Soğuk izostatik presleme ıslak ve kuru kalıplama olarak iki şekilde yapılabilir. Islak kalıplamada, doldurulup sızdırmazlığı sağlanmış esnek kalıp bir sıvı haznesine konur

ve dışarıdan bir hidrolik sistemle basınç uygulanır. Sıkıştırılma yapıldıktan sonra esnek kalıp hazneden dışarı alınır ve sıkıştırılmış maça çubuğundan ve esnek kalıptan çıkartılır. Kuru kalıplama yöntemi ise seri üretimlerde kullanılır. Esnek kalıp basınç haznesi içine monte edilir. Esnek kalıp şekil değiştirir fakat hazneden dışarı çıkarılmaz. İki uçtaki tapalar vasıtasıyla toz doldurulur ve parça esnek kalıptan çıkartılır. İzostatik presleme; büyük, uzun, ince veya kalıpta sıkıştırma yöntemiyle homojen olarak yapılmayacak parçaların üretiminde kullanılır. Kalıp yüzeyi sürtünmesi olmadığı için kalıpta sıkıştırma yöntemine göre daha fazla yoğunluk sağlar [62].

4.5 Sinterleme

Sinterleme, metal tozlar arasında yayınım ve benzeri atom hareketleri ile bağ oluşturarak mukavemeti artıran bir ısıl işlemdir. Sinterleme sırasında parçadaki geometrik değişimler atomların hareketini sağlayan ısıtmadan kaynaklanır. Yüksek sıcaklıklarda, çok sayıda atom komşuları ile bağlarını koparacak ve yeni yerlere gidecek düzeyde enerjiye sahip olacaktır. Atomların hareket edebilmesi için gerekli olan bu enerjiye aktivasyon enerjisi denir. Aktivasyon enerjisi malzemeye ve atomlar arası bağ kuvvetine bağlıdır. Bu nedenle sinterleme sıcaklıkları malzemelerin ergime sıcaklıkları ile ölçeklendirilir [62].

Sinterleme sıcaklığı ergime noktasına yaklaştıkça, hareket eden atomların sayısı arttığından sinterleme hızı artar. Sinterleme süresi 10 dakikadan birkaç saate kadar çıkabilmektedir [64]. Sinterleme sıcaklığı, tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının 2/3'ü veya 4/5'i kadar alınır. Çok bileşimli sistemlerde ise ergime derecesi düşük olan metalin ergime sıcaklığının altında tespit edilir [62].

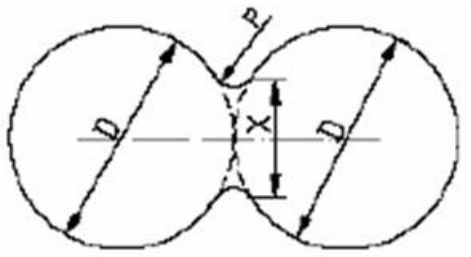
Sinterleme toz metalurjisinin en karmaşık konusu olmasının yanı sıra ham parçayı performansı yüksek bir ürüne dönüştürmesi yönüyle toz metalurjisinin en önemli tekniğidir. Sinterleme sırasında polimer yakılması, parçacıklar arası bağlanma, boyut değişimi ve mikroyapının önemli miktarda irileşmesi gibi birçok olay gerçekleşir. Sinterleme öncesi bağlayıcı veya yağlayıcı olarak kullanılan polimerlerin uzaklaştırılması (ham parçanın polimerin kararlılığını kaybedip buharlaşarak, bileşenlerine ayrıştığı sıcaklıklara ısıtılması sırasında gerçekleşir) sinterlenmiş parçanın yoğunluğunu doğrudan etkiler. Sinterleme sonrası ham parçada, yoğunluk,

mukavemet, sertlik elektrik ve ısıl iletkenlik, elastik modülü gibi özellik değişimleri meydana gelir [72].

Sinterleme işlemleri katı-hal sinterleme ve sıvı fazlı sinterleme olmak üzere iki farklı yöntemle yapılabilmektedir. Sinterlenen parçanın istenilen özelliklere sahip olmasının yanında parçanın istenilen boyutlarda olması da bir zorunluluktur. Katı hal sinterleme teorik açıdan en iyi anlaşılmasına rağmen sinterlenmiş ürünlerin %70'i sıvı fazlı sinterleme ile üretilmektedir. Bu durum, kompozit özelliklerin ve hızlı sinterlemenin birlikte yansımasıdır. En çarpıcı yanı da sıvı fazlı sinterlenmiş parçaların değeri toplam sinter ürünlerinin değerinin %90'ını oluşturmasıdır [62].

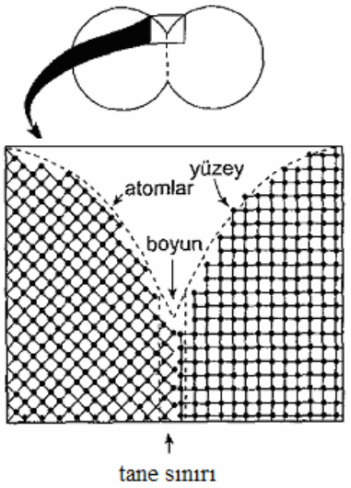
4.5.1 Katı hal sinterleme teorisi

Sinterleme sırasında atom hareketleri görülmez, ancak hacim değişimleri meydana geldiğinden işlem genel de bu değişimler ile izlenir. Sinterlemenin temel ölçülerinden biri olan boyun büyümesi bunlardan bir tanesidir. Şekil 4.18'de iki küresel parçacığın sinterleme profili verilmiş olup burada boyun büyüklük oranı "X/D", boyun çapının parçacık çapına oranıdır. Sinterleme işlemi sırasında, temas eden parçacıklar arasındaki bağlar kuvvetlenir ve kaynaklanmalar oluşur.



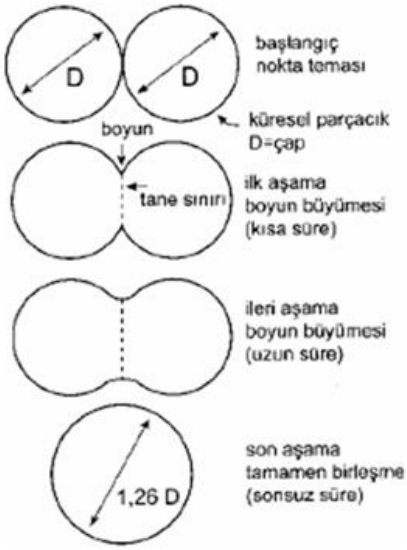
Şekil 4.18: İki küresel parçacığın sinterleme profili [72].

Şekil 4.19'da boyun bölgesi atom düzeyinde gösterilmiş olup burada yüzeyin bozulmuş atom bağı ile tanımlandığı ve tane sınırının da kusurlu olduğu görülmektedir. Atomlar kristal kafesindeki yerlerindedir, ancak bağlanma bölgesindeki kafes uyumsuzluğu tane sınırını oluşturur. Boyun bölgesi atom bağlarının önemli ölçüde kusurlu olduğu, yüzey ve hacim taşınım işlemleri ile büyüyen bölgeyi temsil eder.



Şekil 4.19: Parçacıklar arasındaki sinter bağının atomik düzeyde gösterimi [62].

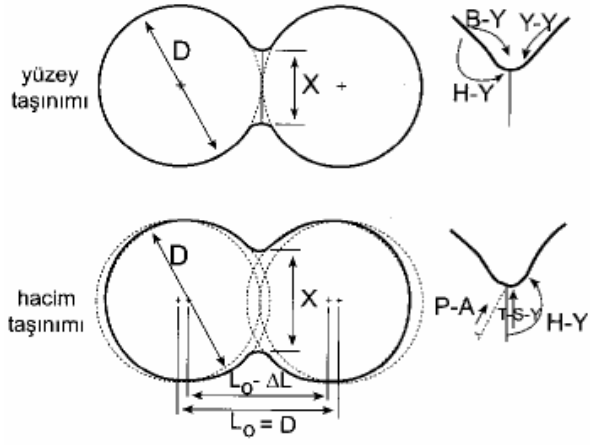
Sinterleme işlemi başlangıç, ilk aşama, ara aşama ve son aşama olmak üzere dört zamanda tamamlanır. Şekil 4.20'de gösterildiği gibi birbirleriyle temas halinde olan küresel iki parçacık ele alınacak olursa, ham parça içinde sıkıştırmanın etkisiyle her bir parçacık üzerinde bu tür birçok temas noktası meydana gelir.



Şekil 4.20: Sinterleme aşamalarının şematik gösterimi [62].

Sinterlemenin ilk aşaması her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi ile tanımlanır. Fakat boyunlar birbirinden bağımsız olarak büyür. Burada boyun büyüklüğü oranı X/D, 0,3'ten azdır ve sinterleme çekmesi L/Lo genellikle % 3'ün altındadır. Bu noktada teorik yoğunluğun % 92'sine kadar ulaşmak mümkündür. Boyun zamanla dış bükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir iç bükeyliği temsil eder. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Sinterlemenin ara aşamasında gözenekler yuvarlaklaşır, fakat gözenekler etrafındaki kavis kütle

transferleri için itici güç oluşturmaya devam ederek iç bükey bölgeleri doldurur. Her ne kadar gözenekler yuvarlaklaşıp düzgün hale gelse de hala dışa açıktırlar. Her temas noktasında bir tane sınırı büyür ve katı - buhar ara yüzeyinin yerini alır. Sinterlemenin ilerlemesiyle taneler büyür ve gözenekler küçülür. Sinterlemenin son aşamasında gözenekler kapalı ve küreseldir. İki parçacığın tamamen birleşerek çapı başlangıç çapının 1,26 katı olan tek küresel parçacıklar meydana gelir. Preslenmiş ham parça içinde her parçacığın birçok komşusu olduğundan her parçacığın birkaç değişik noktasında bu tür bağ oluşur. Tam yoğunluğa yaklaşılırken t tane sınırı hareketini zorlaştıran gözenek sayısı azaldığından tane büyümesi hızlanır. Buna ilaveten içinde hapsolmuş gaz varsa gözenekler tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle, pek çok sinterlenmiş malzemede erişilebilecek bir üst yoğunluk sınırı vardır ve bu değer % 100 teorik yoğunluğun altındadır. Sinterleme işlemi vakumda yapıldığı takdirde, gözeneklerde gaz kalmadığından tam yoğunluğa erişilebilir [62]. Sinterlemenin oluşabilmesi için atomların yeterli yüzey yayınımına sahip olması gerekir. Atomik yayınma sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, sinterleme önemli derecede sıcaklığa bağlıdır [22]. Birbirleriyle temas halindeki tozlar, sıcaklığın etkisiyle atomik yayınmaya ve dolayısıyla kütlesel olarak taşınmaya başlar. Kütle taşınım mekanizmaları, itici güçlere karşılık olarak kütle akışının nasıl olduğunu belirler. Hacim ve yüzey taşınımı olmak üzere iki türlü kütle akışı vardır (Şekil 4.21).



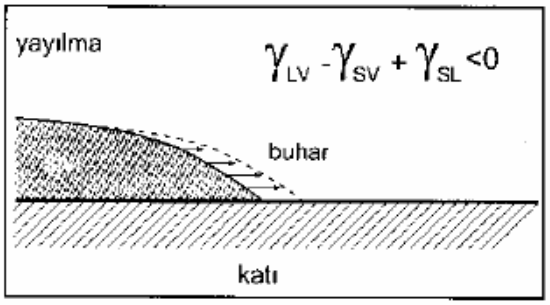
Şekil 4.21: İki tip sinterleme mekanizması (Yüzey taşınım mekanizması: B-Y=buharlaşma-yoğuşma, Y-Y=yüzey yayınımı, H-Y=hacim yayınımı; Hacim yayınım mekanizması: P-A=plastik akış, T-S-Y=tane sınırı yayınımı, H-Y= hacim yayınımı).

İkisi arasındaki fark atomların boyun bölgesini nereden doldurmaya başlaması ile ilgilidir. Yüzey taşınımında atomlar boyun bölgesi yakınındaki gözenek yüzeylerinden başlayarak doldurur. Hacim taşınımı ise tane sınırlarındaki atomları kullanarak bunları boyun bölgesinde yeniden konumlar. Yüzey taşınımı çekme veya yoğunluk artışı olmayan boyun büyümesi içerir. Yüzey taşınım kontrollü sinterlemede, yüzey yayınımı (difüzyonu) ve buharlaşma - yoğuşma en önemli katkı yapan iki olaydır. Birçok malzemenin düşük sıcaklıkta yapılan sinterlemesinde yüzey yayınımı baskındır. Buharlaşma - yoğuşma, kurşun içeren düşük kararlı malzemelerin sinterlenmesi dışında çok önemli değildir. Buna karşılık, hacim taşınım kontrollü sinterleme çekmeye neden olmaktadır. Kütle, tane sınırından bazen de tane içinden gelir ve boyun yanındaki gözeneğin yüzeyinde toplanır. Hacim taşınım mekanizmaları; hacim yayınımı, tane sınırı difüzyonu, plastik ve viskoz akışı kapsar. Özellikle, preslenmiş tozlarda plastik akış ısıtma sırasında son derece önemlidir. Ancak toz tepe sıcaklığına ulaştığında plastik akış önemini kaybeder. Bunun tersine, cam ve plastikler gibi amorf malzemeler viskoz akış ile sinterlenir. Metallerde viskoz akış tane sınırında sıvı fazların olması durumunda mümkündür. Kristalli malzemelerin yoğunlasmaşında tane sınırı yayınımı oldukça önemlidir ve pek çok metalin yoğunlaşmasında ana yayınım mekanizmasıdır [62]. Her iki taşınım mekanizmasında da blok parça yüzey alanı, boyun büyümesiyle azalmasına rağmen, sinterleme sırasında esas değişiklik yoğunlukta veya çekmede meydana gelir. Genellikle hacim taşınım mekanizması son sinterleme bölgesinde aktif olup çekme ve yoğunlaşma bu mekanizmada gerçekleşir. Bu mekanizmalar malzemeye, tane boyutuna, sinterleme devresine, sıcaklığa ve diğer bazı işlem parametrelerine bağlıdır [62].

4.5.2 Sıvı hal sinterleme teorisi

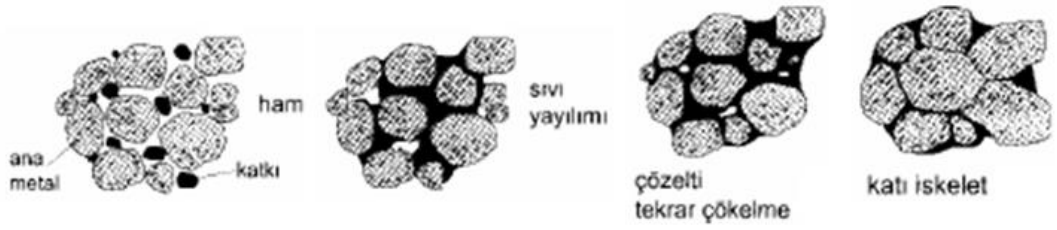
Sinterleme sırasında sıvı faz oluşumu sinterleme hızını büyük ölçüde artırır. Esas olarak sıvı faz taneleri birbirine bağlayan ve içinde hızlı yayınımın olduğu lehimi oluşturur. Sıvı faz sinterleme için genel gereksinim ıslatmadır. Şekil 4.22'de gösterildiği gibi sıvı faz katı tanelerin üzerine yayılmalıdır. Islatan bir sıvı, küçük temas açısına (θ) sahiptir. Temas açısı yüzey enerjisinin dengesi ile tanımlanır. Burada γ_{SV} katı - buhar yüzey enerjisi, γ_{SL} katı - sıvı yüzey enerjisi, γ_{LV} ise sıvı - buhar yüzey enerjisidir. Islatan bir sıvı filmi yoğunlaşmaya yardımcı olan ve kılcal kuvvet olarak tanımlanan yüzey gerilmesi sağlar. Genellikle ıslatma katının sıvı

içinde çözündüğü durumlarda gerçekleşir. Başlangıçta ısıtma sırasında taneler katı hal sinterlemesi ile birbirine bağlanır.



Şekil 4.22: Sıvı fazlı sinterlemede katı tanelerin sıvı ile ıslatılması [62].

Sıvı fazlı sinterlemedeki yoğunlaşma asamaları Sekil 4.23'de gösterilmiştir. İlk sıvı oluştuğunda, tanelerin yeniden düzenlenmesi ile hızlı bir yoğunluk artışı olur. Oluşan sıvı katıyı ıslatarak oluşmuş olan katı bağlarını çözer ve yeniden düzenlenmeyi sağlar. Bundan sonra, çözelti tekrar çökelme olarak bilinen işlemde, sıvı katı atomların taşıyıcısı olur. Bu aşamada daha küçük tane kütleleri sıvı içinde çözünür, sıvı içinden yayınır ve daha sonra büyük tanelerin üzerine çökelir. Katı tane çözünürlüğü tane boyutu ile ters orantılıdır. Dolayısıyla, öncelikle küçük taneler sıvı faz içinde çözünür. Zamanla tane sayısı azalır ve tane boyutu artar. Son olarak temas eden taneler arasında kararlı boyunlar oluşur ve son yoğunlaşma katı iskeletin sinterlenmesiyle tamamlanır.



Sekil 4.23: Sıvı faz sinterlemenin kavramsal aşamaları [62].

4.5.3 Sinterleme atmosferleri ve etkileri

Sinterleme atmosferlerinin en önemli görevi yüksek sıcaklıktaki kimyasal tepkimeleri kontrol etmektir. Sinterleme için gerekli bir atmosfer prensip olarak parçaların ve fırının oksitlenmesini önlemek, yüzey oksitlerini indirgemek, fırında buharlaşan yağlayıcı gazlarını dışarı atmak ve demir karbon alaşımlarında olduğu

gibi blok parçaların bileşimini kontrol etmek için kullanılır. Genel olarak sinterleme atmosferi olarak hava, azot, argon, oksijen, hidrojen ve çeşitli gaz karışımları kullanılır. Önemli olan atmosferdeki safsızlık derecesidir ve sinterleme sırasında kimyasal tepkimeleri kontrolü için çok önemlidir. Sıklıkla kullanılan atmosfer koşulları şunladır [62]:

- Oksitleyici (karbon dioksit, su veya oksijen),
- Nötr (argon, helyum veya vakum),
- İndirgeyici (hidrojen veya karbonmonoksit),
- Hidritleyici (hidrojen veya amonyak),
- Hidrit giderici (vakum veya argon),
- Nitrürleyici (azot veya amonyak),
- Karbürleyici (metan veya propan),
- Karbon giderici (karbon dioksit, su veya oksijen).

Her malzemenin sinterlenmesinde kullanılacak süper bir gaz yoktur. Bu nedenle, atmosfer seçimi basit gaz sistemlerinden karmaşık gaz sistemlerine kadar çok değişiklikler gösterir. Atmosferin seçimi, sinterlenecek malzemeye göre tespit edilir. En iyi şartları sağlayacak atmosfer seçilirken ekonomiklik ve güvenirlik gibi diğer faktörlerde hesaba katılır.

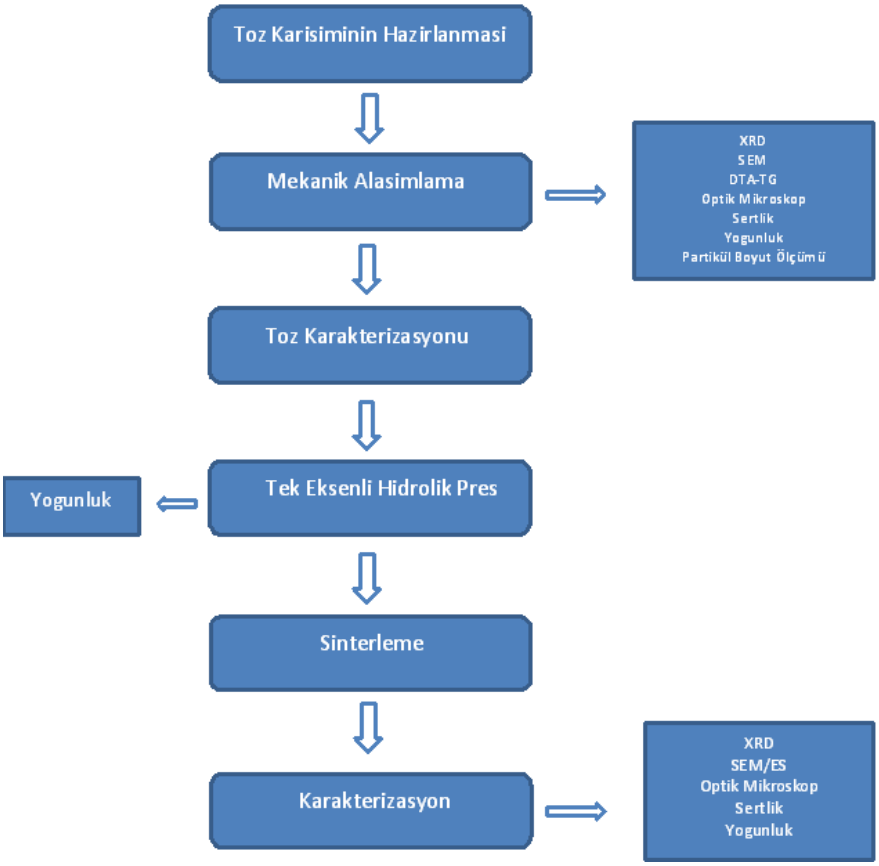
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Sunulan tez çalışmasında mekanik alaşımlama (MA) teknikleri kullanılarak alüminyum (Al) ve silisyum (Si) ana matriks içerisine bor karbür (B_4C) ve zirkonyum diborür (ZrB_2) takviye fazları eklenerek MA süresinin oluşturulan kompozit yapısına olan etkisi incelenmiştir.

Çeşitli sürelerde MA'lanmış toz numuneler, partikül boyut dağılımı ve mikroyapısal karakterizasyon çalışmalarının ardından preslenmiştir. MA yöntemiyle üretilmiş olan kompozit tozların karakterizasyon çalışmaları, X-ışınları difraktometresi (XRD), optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları ve termal analiz deneylerinde kullanılan diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve termogravimetrik analiz (TG) ile tamamlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan kompozisyonlar literatür çalışması sonucunda belirlenmiş olup, buna göre Al ve Si karışımından oluşacak matriks bileşimi ağırlıkça %93 Al, %7 Si olarak belirlenmiş ve tüm çalışma süresince bu matriks bileşimi sabit tutulmuştur. Pekiştirici miktarlarının ise ağ.%5, ağ.%10 ve ağ.%15 oranında B_4C ile ise ağ.%5, ağ.%10 ve ağ.%15 oranında ZrB_2 olmasına karar verilmiştir.

Üretilen kompozitlerin mekanik alaşımlama, pekiştirme, gazaltı sinterleme ve karakterizasyon süreçlerine yönelik akım şeması Şekil 5.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Deneysel Süreçlerin Akım Şeması.

5.1 Malzeme Seçimi

5.1.1 Alüminyum (Al)

Tez çalışmasında oluşturulacak kompozisyonda en yüksek miktarda kullanılan Al tozu Alfa Aesar firmasından temin edilmiştir. %99,5 saflık düzeyindeki tozların ortalama partikül boyutu 10 µm dolayındadır. Bu parçacık boyutu oluşturulacak kompozit tozunun kullanımında herhangi bir olumsuz etki yaratmayacağından Al tozuna ön işlem yapılma gereği görülmemiştir.

5.1.2 Silisyum (Si)

Kullanılan Si tozlarının partikül boyutları 130 µm civarındadır. Bu büyüklükte tozların kompozit mikroyapısında aglomerasyon oluşumuna ve silisyum tozları çevresinde malzemelerin toplanmasına sebep olup yapının homojen olarak karışmasına imkan vermeyecektir. Bu nedenle granül halindeki Si tozları, 120 dakika

süreyle Şekil 5.2'de görülen Spex^{TM} Dual Mixer-Mill 8000D yüksek enerjili öğütücü ile öğütülmüştür. Öğütme sonucunda Si tozlarının ortalama partikül boyutu 5 µm' ye kadar küçülmüştür.



Şekil 5.2: SPEX^{TM} yüksek enerjili öğütücü.

5.1.3 Bor Karbür (B_4C)

Kullanılan B_4C tozları Alfa Aaser firmasından temin edilmiş olup %99,5 saflığa sahip bu tozların ortalama partikül boyutu 1-7 µm arasındadır. Bu parçacık boyutu oluşturulacak kompozit tozunun kullanımında herhangi bir olumsuz etki yaratmayacağı düşüncesiyle Al tozuna ön işlem yapılma gereği görülmemiştir. Sunulan tez çalışmasından pekiştirici takviye malzemesi olarak B_4C tozları ağ.%5, ağ.%10 ve ağ.%15 oranlarında kullanılmıştır.

5.1.4 Zirkonyum diborür (ZrB_2)

Kullanılan ZrB_2 tozları yine Alfa Easer firmasından temin elmiş olup yaklaşık olarak -325 mesh (44µm) ortalama partikül boyutuna sahiptirler. Bu boyut yapıda pekiştirici olarak kullanılacak olan ZrB_2 için biraz fazladır çünkü genel olarak pekiştirici partikül boyutunun matriks malzemesinin partikül boyutundan daha düşük olması tercih edilmektedir.

5.2 Mekanik Alaşımlama Süreçleri

Bu tez çalışmasında üretilen Al-ağ. %7 Si ana matris kompozisyonuna sahip toz harmanı Şekil 5.2'de gösterilen Spex^{TM} Dual Mixer-Mill 8000D yüksek enerjili öğütücü kullanılarak 1200 devir/hızda çeşitli sürelerde mekanik olarak alaşımlanmışlardır. Al-7Si ana matriksi MA ile 60, 120, 240, 480, 960 dakika

öğütülmüş numuneler üretilmiştir. Öğütücü ortam olarak paslanmaz çelik öğütücü kap ile ve çelik bilya (¼ inç) kullanılmıştır. Mekanik alaşımlama deneyleri sırasında kullanılacak bilya/toz oranı 8'e 1 olarak seçilmiştir. MA esnasında tozların hava ile teması sonucunda oluşabilecek oksitlenmeyi önlemek amacıyla öğütme işlemine başlamadan önce tozlar Şekil 5.3'de görülen Plaslabs™ marka kapalı ortam kutusuna (glve box) alınmıştır. Mekanik pompa yardımıyla kapalı ortam kutusundaki hava vakumlandıktan sonra yüksek safiyette argon (Ar) gazı geçirilmiştir. Tozlar öğütme kavanozlarına bu ortam altında yerleştirilmişlerdir ve kavanozlar kapalı ortam kutusunda kapatılmış ve hava ile tozların teması engellenmiştir. Mekanik alaşımlama işlemleri bittikten sonra, tozlar yine aynı şartlar altında açılarak diğer deneyler için gerekli miktarlarda çıkarılmıştır.



Şekil 5.3: Kapalı ortam kutusu.

5.3 Toz Karakterizasyon Deneyleri

5.3.1 Partikül Boyutu Ölçümü

Başlangıç tozlarının ve mekanik alaşımlanmış kompozit tozlarının partikül boyut dağılım ölçümleri Şekil 5.4'de görülen Nano-Flex™ marka Partikül Boyut Ölçüm Cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Partikül boyut ölçümleri saf su ortamında yapılmıştır. Ölçüm esnasında kullanılan saf su Elga™ marka saf su cihazından sağlanmıştır (Şekil 5.5). Ölçüme başlamadan önce tozlar sodyum hekzametafosfat ($Na_6P_6O_{18}$) ile hazırlanmış çözelti içinde 5 dakika boyunca Şekil 5.6'da görülen

Bandelin™ marka electronic UW 2200 homojenizatör ile karıştırılarak ölçüm sisteminde aglomerasyonların dağıtılması amaçlanmıştır.



Şekil 5.4: Nano-Flex™ Partikül Boyut Ölçüm Cihazı.



Şekil 5.5: ELGA™ Saf su cihazı.



Şekil 5.6: Bandelin™ electronic UW 2200 homojenizatör.

5.3.2 X-Işını Difraksiyon Analizleri

Bu tez çalışmasında mekanik alaşımlanmış Al-7Si esaslı kompozit tozların faz analizleri Şekil 5.7'de görülen BRUKER™ D8 Advance X Işınları difraktometresi

40 kV ve 40 mA şartlarında CuKα radyasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yapılan X-ışını analizleri sonuçlarından TOPAS™ yazılımı ile öğütülmüş tozlar için kristalin boyutları ile öğütme sırasında yapıda oluşan kalıntı gerilmeleri hesaplanmıştır. Buna ek olarak sinter sonrası numuneler BRUKER™ D8-Advance X Işınları difraktometresi 40 kV ve 40 mA şartlarında CuKα radyasyonu kullanılarak karakterizasyon çalışması yapılmıştır.



Şekil 5.7: BRUKER™ D8 Advance X Işınları difraktometresi.

5.3.3 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları Şekil 5.8'de görülen JEOL™ JCM-6000 Benchtop SEM Taramalı Elektron Mikroskobu ile 20 KV uyarma voltajı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8: JEOL™ JCM-6000 Benchtop SEM Taramalı Elektron Mikroskobu.

5.3.4 Metalografik Numune Hazırlama

Mikroyapı ve faz karakterizasyonları optik mikroskop (OM), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-ışınları difraktometresi (XRD) destekli analizler ile gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş numuneler öncelikle Şekil 5.9a'da görülen Struers™ Labopress-1 bakalite alma cihazı yardımıyla metalografik işlemler için soğuk bakalite alınmışlar ve Şekil 5.10'da görülen Struers™ Tegrapol-15 otomatik parlatma cihazı kullanımı ile mikroyapısal gözlemler için parlatılmışlardır.



Şekil 5.9: Struers™ Labopress-1 bakalite alma cihazı.



Şekil 5.10: Struers™ Tegrapol-15 otomatik parlatma cihazı.

5.3.5 Optik Mikroskop Çalışmaları

Parlatılmış numuneler Şekil 5.11'de görülen Zeiss™ Stereo Mikroskop ile AxioVision görüntü analiz yazılımı yardımıyla incelenmişlerdir.



Şekil 5.11 : Zeiss™ Stereo Mikroskop.

5.3.6 Presleme

Mekanik alaşımlanmış tozlar 400 MPa basınç altında yaklaşık 12 mm çapında, kalıp duvarları çinko stearat ile yağlanmış rijit kalıplar içerisinde, 10 tonluk MSE™ marka tek eksenli hidrolik el presi kullanımı ile soğuk preslenmişlerdir. Şekil 5.12'de çalışmalarda kullanılan hidrolik pres görülmektedir.



Şekil 5.12: Tek eksenli hidrolik el presi.

5.3.7 Yoğunluk Ölçümleri

Preslenmiş tozların yaş yoğunlukları ile sinter yoğunlukları Şekil 5.13' de görülen Micromeritics™ marka AccuPyc II 1340 Gaz Piknometresi yardımıyla ölçülmüştür.

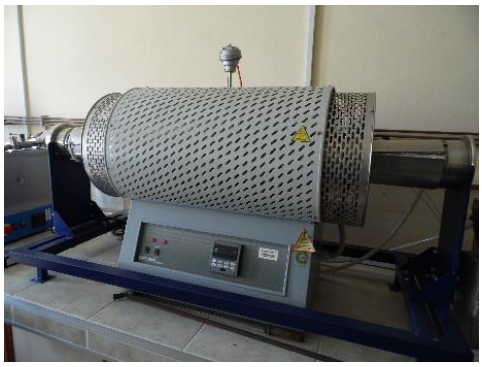


Şekil 5.13: Micromeritics™AccuPyc II 1340 Gaz Piknometresi.

5.4 Sinterleme Çalışmaları

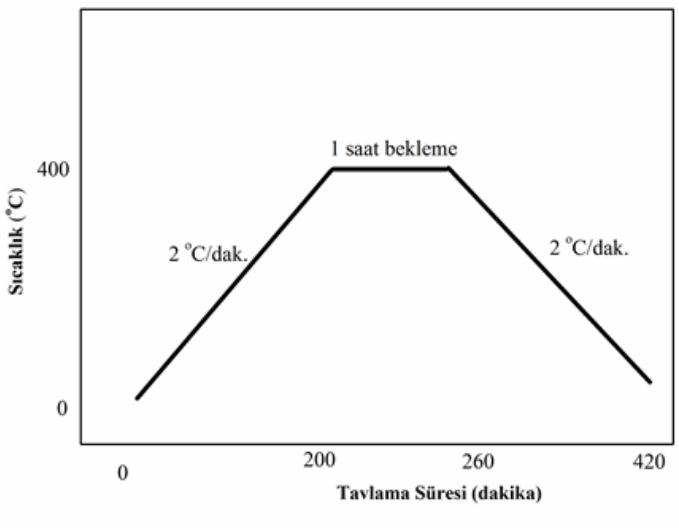
5.4.1 Bağlayıcı Giderme

Numunelerin mekanik alaşımlama esnasında kavanoz çeperlerine sıvanmaması ve presleme esnasında kolaylık sağlaması amacıyla öğütme işlemi öncesinde yapıya bağlayıcı olarak stearik asit ($CH_3(CH_2)_{16}COOH$) ilave edilmiştir. Yapıda bulunan bu stearik asit sinterleme esnasında malzeme içerisinde sıkışıp gözenek oluşumuna sebep olabileceği ya da daha sinterleme esnasında uçarak fırına zarar verebileceği için presleme öncesi öğütülmüş numunelere bağlayıcı giderme işlemi uygulanmıştır. Stearik asit 380 ºC'de buharlaştığı için, yapılan denemelerde 400 ºC sıcaklıkta 1 saatlik bir beklemenin numunelerde bulunan stearik asitin uçurulması için yeterli olduğu belirlenmiştir. Bağlayıcı giderme ısıl işlemi sayesinde hem numune içerisinde yaklaşık %3 oranında bulunan stearik asit sistemden uzaklaştırılmış hem de tozların tavlama işlemi yapılmıştır. Bağlayıcı giderme amaçlı kullanılan Protherm™ marka tüp fırın Şekil 5.14'de görülmektedir.



Şekil 5.14: PROTHERM™ Bağlayıcı giderme fırını.

Bu çalışmadaki bağlayıcı giderme işleminde uygulanan ısıtma rejimi Şekil 5.15'deki gibidir.



Şekil 5.15: Numunelere uygulanan bağlayıcı giderme ve tavlama fırın rejimi.

5.4.2 Sinterleme Süreçleri

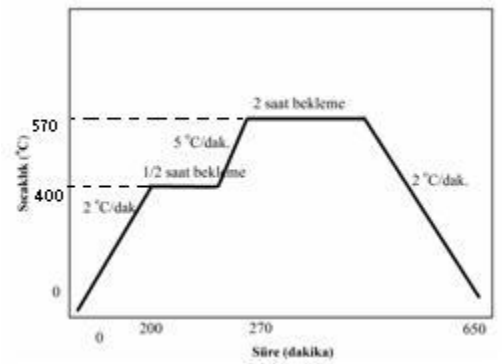
Preslenmiş ham numunelerin sinterleme işlemleri Şekil 5.16'da gösterilmiş olup vakum, hidrojen (H2), azot (N_2) ve argon (Ar) gazları altında çalışan 1800 M Vac Graphite Linn™ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen mekanik alaşımlanmış kompozitler için uygun sinterleme sıcaklığı olarak 570 °C belirlenmiştir. Sinterleme vakum ve argon koruyucu gaz atmosferinde yapılmıştır.



Şekil 5.16: LINN^{TM} Kontrollü atmosfer sinter fırını.

Sinterleme rejimine karar verilmesi aşamasında yapılan literatür araştırmalarında genel olarak 560-580 °C sıcaklığın alüminyum alaşımları için standart olarak uygulanan bir sinterleme sıcaklığı olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, sinterleme sırasında numunelerin mümkün olduğunca yüksek bir yoğunluğa ulaşabilmesi için difüzyonun gerçekleşmesini sağlamak amacıyla 570 °C'de 120 dakika beklenmiştir.

Numunelere uygulanan sinterleme rejimi Şekil 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.17: Numunelere uygulanan sinterleme rejimi.

Numunelere uygulanan siterleme rejimi incelendiğinde başlangıçta fırın 2 °C/dakika ısıtma hızında 400 °C'ye ulaşana kadar fırın vakuma alınmıştır. Bu sıcaklıkta 30 dakika bekletildikten sonra argon koruyucu gazı sisteme verilerek yine 5 °C/dakika ısıtma hızı ile 570 °C'ye çıkılmış, bu sıcaklıkta yeterli miktarda difüzyonun meydana gelebilmesine olanak sağlamak amacıyla argon gazı altında 2 saatlik bir bekleme süresi uygulanmıştır. Ardından fırın yine argon gazı altında oda sıcaklığına kadar 2 °C/dakika'lık soğutma hızında soğutularak sinterleme işlemi tamamlanmıştır.

5.4.3 Yoğunluk Ölçümleri

Numunelerin sinter sonrası yoğunluk ölçümleri Şekil 5.18'de görülen PRECISA^{TM} marka hassas terazinin yoğunluk ölçüm ekipmanları kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.18: PRECISA^{TM} Arşimet terazisi.

5.4.4 XRD Çalışmaları

Numunelere sinter sonrası oluşabilecek fazların tesbiti ve belirlenmesi amacıyla Şekil 5.7'de görülen BRUKER™ D8 Advance marka XRD cihazı X-ışınları cihazı kullanılmıştır.

5.4.5 SEM Çalışmaları

Sinter sonrası yapının incelenmesi amacıyla taramalı elektron mikrsokobu çalışmaları Şekil 5.8'de görülen JEOL™ JCM-6000 Benchtop marka SEM Taramalı Elektron Mikroskobu ile yapılmştır.

5.4.6 Metalografik Numune Hazırlama

Sinterlenmiş numuneler öncelikle Şekil 5.9'da görülen Struers™ Labopress-1 bakalite alma cihazı ile Struers™ Multifast siyah reçine yardımıyla bakalite alınmışlar ve Şekil 5.10'da görülen Struers™ Tegrapol-15 otomatik parlatma cihazı kullanılarak parlatılmıştır.

5.4.7 Optik Mikroskop Çalışmaları

Parlatılmış olan sinterlenmiş numuneler Şekil 5.11'de görülen Zeiss™ Stereo mikroskop altında incelenmişlerdir.

5.4.8 Mikrosertlik Ölçümleri

Sinterlenmiş numunelerin mikrosertlik ölçümleri, Şekil 5.19'da görülen Shimadzu™ Mikrosertlik test cihazında Vickers uç kullanımı ile 100 g'lık yük altında 15 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. En az 15 başarılı sertlik ölçümünün ortalaması ve standart sapması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.19: Shimadzu™ Mikrosertlik test cihazı.

5.4.9 Aşınma Testleri

Sinterlenmiş olan numunelerin aşınma testleri tüm MA süreleri için yapılmıştır. Testlerde topla aşındırma yöntemi uygulanmıştır. Bu test Şekil 5.20'de görülen Tribotester^{TM} aşınma cihazında 6 mm çaplı ve korundum esaslı olan Al_2O_3 aşındırma bilyaları kullanılarak yapılmıştır. Uygulanan yük 3N ve aşındırma uzunluğu 5mm ve toplamda 25 m'dir. Toplamda 2500 salınım gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonunda oluşan aşınma izinin eni ve derinliği ölçülmüş daha sonra aşınmış olan yüzeyler optik mikroskop ve SEM altında incelenmiştir.



Şekil 5.20: Tribotester^{TM} Aşınma cihazı.

6. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

6.1 Başlangıç Tozlarının Karakterizasyonu

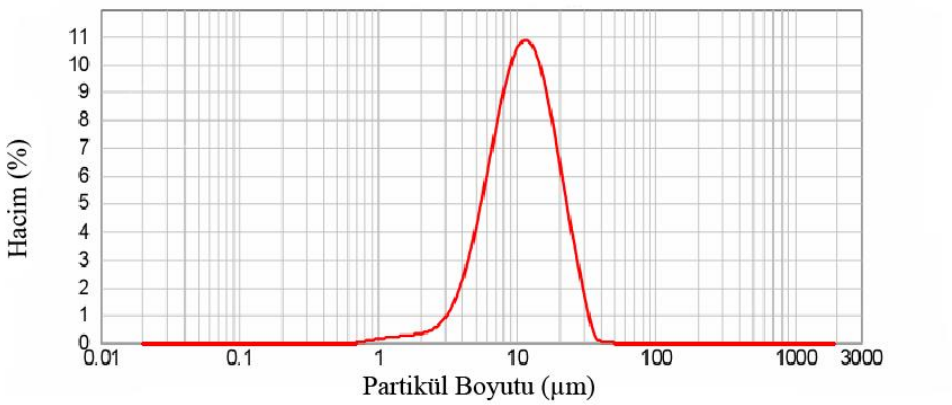
Sunulan tez çalışmasının deneysel süreçlerinde %99,5 saflıkta alüminyum (Al) tozları ve %99,5 saflıkta silisyum (Si) tozları ana matriks malzemeleri olarak kullanışmıştır. Pekiştirici olarak %99,5 saflıkta bor karbür (B_4C) ve %99 saflıkta zirkonyum diborür (ZrB_2) tozları kullanılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan toz malzemelerin partikül boyut ölçümleri saf su ortamında gerçekleştirilmiştir. Tozlarda meydana gelen aglomerasyonları engellemek amacıyla tozlar 20 dakika ultrasonik banyoda bekletilmiş ve bundan sonra partikül boyut ölçümleri yapılmıştır. Yapılan partikül boyut ölçümleri sonucu elde edilen Al, Si, B_4C, ZrB_2 tozlarına ait partikül boyutları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

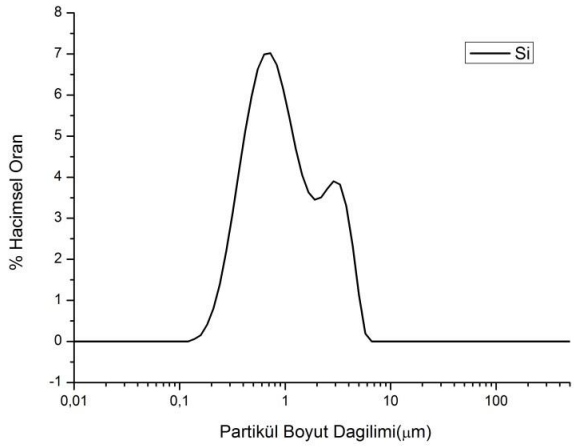
Çizelge 6.1: Başlangıç tozlarına ait partikül boyut değerleri.

Toz Cinsi	**Partikül Boyutu (µm)**
Al	12
Si	5
B_4C	6
ZrB_2	44µm

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de ise Al ve Si ana matriks tozlarının partikül boyut dağılımları görülmektedir.



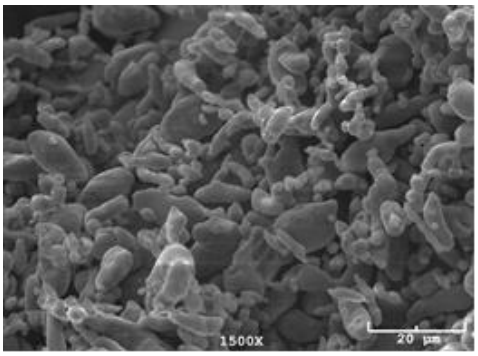
Şekil 6.1: Al tozuna ait partikül boyut dağılım grafiği.



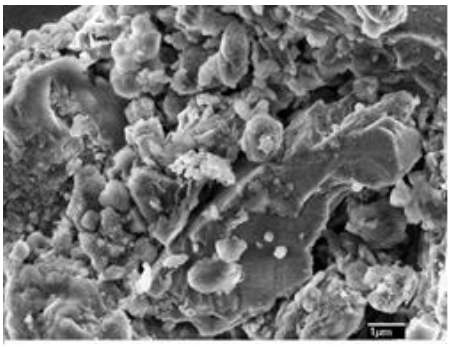
Şekil 6.2: Si tozuna ait partikül boyut dağılım grafiği.

Partikül boyut dağılım grafikleri incelendiğinde Şekil 6.1'de görülen alüminyuma ait partikül boyut dağılımının oldukça düzgün ve tek dağılıma sahip olduğu, diğer bir deyişle alüminyum partikül boyutu dar bir alanda dağılım göstermektedir ve içerisinde çok büyük partiküller bulunmamaktadır. Şekil 6.2'de görülen silisyumun dağılım grafiği incelendiğinde 1 µm civarında ana piki vermiştir. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde bu boyutta partiküllere rastlanmıştır.

Partikül boyut ölçümünün yanısıra, tozların tane boyutunun ve şeklinin incelenmesine yönelik olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları yapılmış ve mikroyapı görüntüleri 20 kV ve farklı büyütme aralığında (x1500–x10000) fotoğraflanmıştır. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de ana matriks kompozisyonunda kullanılan başlangıç tozlarına ait elektron mikroskobu resimleri gösterilmektedir.



Şekil 6.3: Al(x1500) tozunun taramalı elektron mikroskobu resmi.



Şekil 6.4: Si(x10000) tozunun taramalı elektron mikrokobu resmi.

6.2 Mekanik Alaşımlanmış Tozların Karakterizasyonu

Sunulan tez çalışmasında çok sayıda farklı numune bulunmasından dolayı tozlara ait üretim farklılıklarını ve bileşimlerini ayırt edebilmek amacıyla farklı bu numuneler kullanılarak kodlanmıştır. Ana matriks kompozisyonunu oluşturan tozlara ait kodlama Çizelge 6.2'de gösterilmiştir. Oluşturulan kompozisyonlarda alüminyum ve silisyumdan oluşan matriks fazın bileşimi sabit tutulmuş ve matriks faz ağ. %93 Al ve ağ.%7 olarak kullanılmıştır.

Çizelge 6.2: Ana matriks alaşım fazı ve MA süreleri.

Numune Adı	Kompozisyon Bilgisi	M.A. Süresi (saat)
Al7Si	[%93 Al - % 7 Si] (ağ.)	0
		1
		2
		4
		8
		16

Ayrıca ana matriks alaşımına daha sonra pekiştirici olarak bor karbür (B_4C) ve zirkonyum diborür (ZrB_2) ilavesi yapılmıştır. Bu ilaveler ağ.%5, ağ.%10 ve ağ.%15 B_4C ve ağ.%5, ağ.%10 ve ağ.%15 ZrB_2 olarak gerçekleşmiş ve bu şekilde oluşturulan kompozit tozlar 1,2,4,8 saat alaşımlanmıştır.

Al7Si matriks alaşımına B_4C ilavesi sonucu oluşan çeşitli kompozit tozlara ait kodlamalar Çizelge 6.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.3: Al7Si alaşımına çeşitli miktarlarda B_4C ilavesi sonucu oluşturulan kompozit tozlar ve MA süreleri.

Al7Si-5 B_4C	[%93 Al - %7 Si] - %5 B_4C (ağ.)	0
		1
		2
		4
		8
Al7Si-10 B_4C	[%93 Al - %7 Si] - %10 B_4C (ağ.)	0
		1
		2
		4
		8
Al7Si-15 B_4C	[%93 Al - %7 Si] - %15 B_4C (ağ.)	0
		1
		2
		4
		8

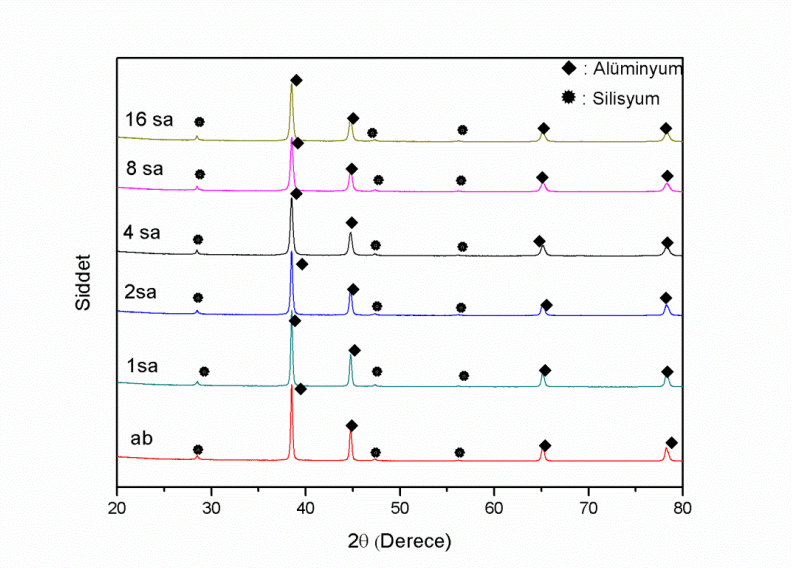
Al7Si matriks alaşımına B_4C ilavesi sonucu oluşan çeşitli kompozit tozlara ait kodlamalar Çizelge 6.4'de gösterilmektedir.

Çizelge 6.4: Al7Si alaşımına çeşitli miktarlarda ZrB_2 ilavesi sonucu oluşturulan kompozit tozlar ve MA süreleri.

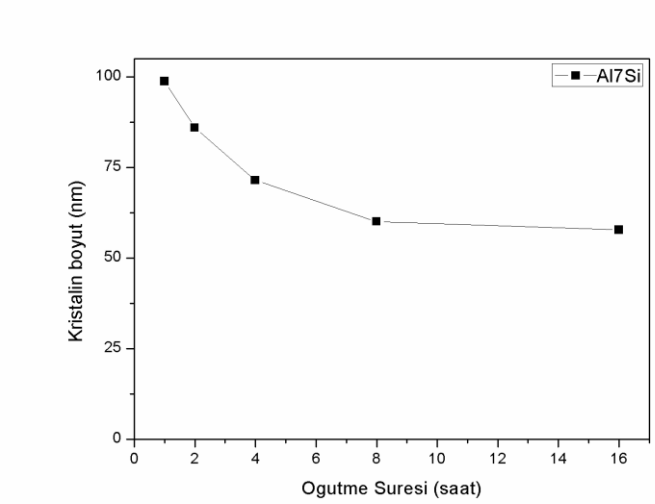
Al7Si-5 ZrB_2	[%93 Al - %7 Si] - %5 ZrB_2 (ağ.)	0
		1
		2
		4
		8
Al7Si-10 ZrB_2	[%93 Al - %7 Si] - %10 ZrB_2 (ağ.)	0
		1
		2
		4
		8
Al7Si-15 ZrB_2	[%93 Al - %7 Si] - %15 ZrB_2 (ağ.)	0
		1
		2
		4
		8

6.2.1 Faz Analizleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu

Mekanik alaşımlanmış numunelerde mevcut fazların karakterize edilmesi amacıyla X-ışınları difraktometre (XRD) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.5a-b' de çeşitli sürelerde MA'lanmış (0, 1, 2,4, 8 ve 16 saat) Al7Si matriks alaşımlarının XRD paternleri ve alüminyum kristalit boyut değişimleri sunulmuştur. Şekil 6.5a-b'de de görüldüğü üzere Al7Si ana matris alaşım numunelerinde mekanik alaşımlama süresinin artması ile kristal boyutunun azalması ve latis gerilmelerinin artmasına bağlı olarak pik yüksekliklerinde azalma meydana geldiği ve piklerin genişlediği gözlemlenmiştir.

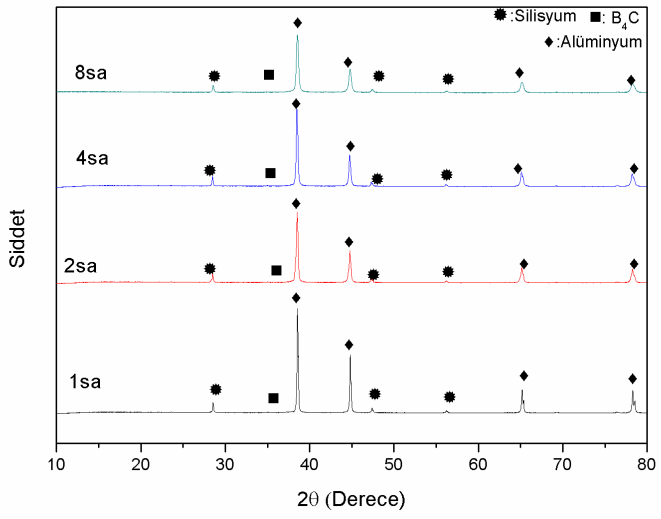


Şekil 6.5a: Çeşitli sürelerde (0, 1, 2, 4, 8, ve 16 sa) MA'lanmış Al7Si matriks toz alaşımının XRD grafikleri.



Şekil 6.5b: MA'lanmış Al7Si ana matris sisteminde öğütme süresine göre Al'un kristalin boyutunun değişimi.

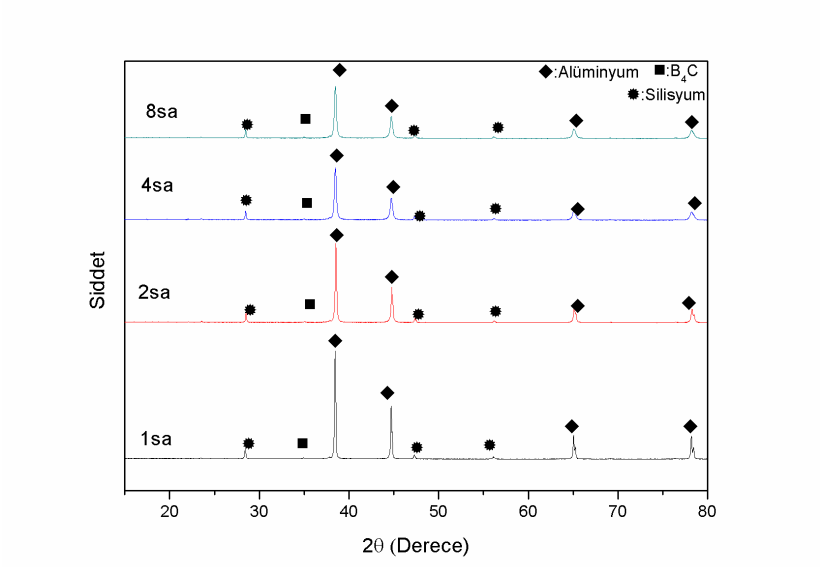
Al7Si sistemine çeşitli oranlarda ilave edilen B_4C pekiştiricinin sisteme etkisini incelemek amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 6.6'da Al7Si matriks alaşımının içerisine ağırlıkça %5 oranında bor karbürün (B_4C) pekiştirici faz olarak ilave edilmesi ile elde edilen kompozit tozların tavlama öncesi XRD paternleri sunulmuştur. Şekilde 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlanmış (MA) Al7Si-5B4C tozlarının tavlama öncesi XRD paternlerine bakıldığında mekanik alaşımlama süresinin artmasına bağlı olarak kafes gerilmeleri artmış ve pik yüksekliklerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca pik genişliklerinde artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak genişleme gözlenmektedir. Bunun sebebinin mekanik alaşımlama süreçlerinde meydana gelen yüksek plastik deformasyon olduğu düşünülmektedir. Malzemeler arasında tepkime meydana gelmediği, yeni bir pik oluşmaması ve sadece alüminyum (Al), silisyum (Si) ve bor karbür (B_4C) piklerinin görülmesi ile açıklanabilir.



Şekil 6.6: Çeşitli sürelerde (1, 2, 4 ve 8 sa) MA'lanmış Al7Si-5B4C tozlarının XRD grafikleri.

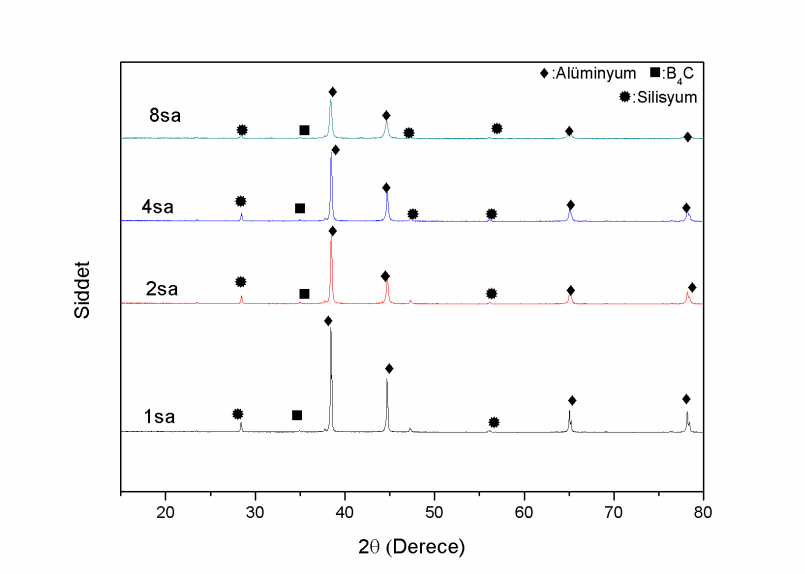
Şekil 6.7'de Al7Si metal matriks içerisine ağırlıkça %10 oranında bor karbürün (B_4C) pekiştirici faz olarak ilave edilmesi ile elde edilen kompozit tozların tavlama öncesi XRD paternleri sunulmuştur. Şekilde 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlanmış (MA) Al7Si-10B4C tozlarının tavlama öncesi XRD paternlerine bakıldığında mekanik alaşımlama süresinin artmasına bağlı olarak kafes gerilmeleri artmış ve pik yüksekliklerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca pik genişliklerinde artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak genişleme gözlenmektedir. Bunun

sebebinin mekanik alaşımlama süreçlerinde meydana gelen yüksek plastik deformasyon olduğu düşünülmektedir. Malzemeler arasında tepkime meydana gelmediği, yeni bir pik oluşmaması ve sadece alüminyum (Al), silisyum (Si) ve bor karbür (B_4C) piklerinin görülmesi ile açıklanabilir.



Şekil 6.7: Çeşitli sürelerde (1, 2, 4 ve 8 sa) MA'lanmış Al7Si-10B4C tozlarının XRD grafikleri.

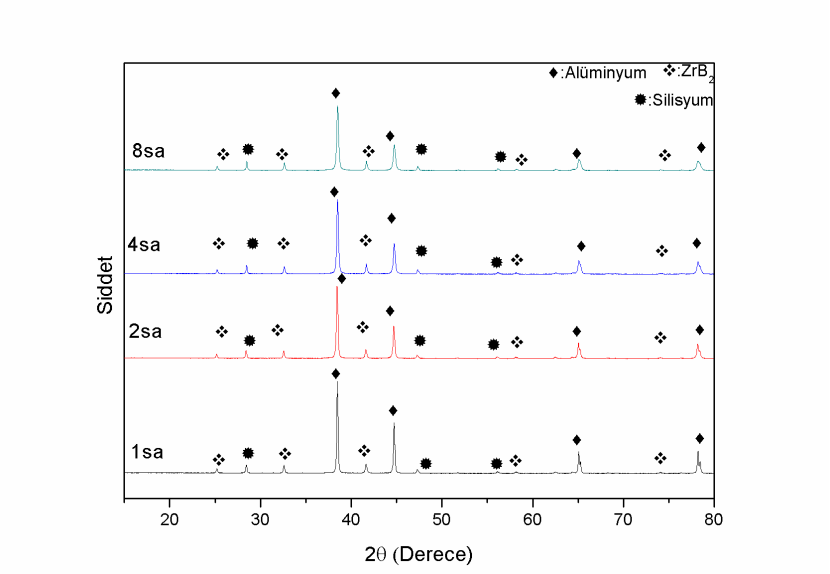
Şekil 6.8'de Al7Si metal matriks içerisine ağırlıkça %15 oranında bor karbürün (B_4C) pekiştirici faz olarak ilave edilmesi ile elde edilen kompozit tozların tavlama öncesi XRD paternleri sunulmuştur. Şekilde 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlanmış (MA) Al7Si-15B_4C tozlarının tavlama öncesi XRD paternlerine bakıldığında mekanik alaşımlama süresinin artmasına bağlı olarak kafes gerilmeleri artmış meydana gelen yeniden kristallenme sonucu pik yüksekliklerinde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca pik genişliklerinde artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak genişleme gözlenmektedir. Bunun sebebinin mekanik alaşımlama süreçlerinde meydana gelen yüksek plastik deformasyon olduğu düşünülmektedir. Malzemeler arasında tepkime meydana gelmediği, yeni bir pik oluşmaması ve sadece alüminyum (Al), silisyum (Si) ve bor karbür (B_4C) piklerinin görülmesi ile açıklanabilir.



Şekil 6.8: Çeşitli sürelerde (1, 2, 4 ve 8 sa) MA'lanmış Al7Si-15B4C tozlarının XRD grafikleri.

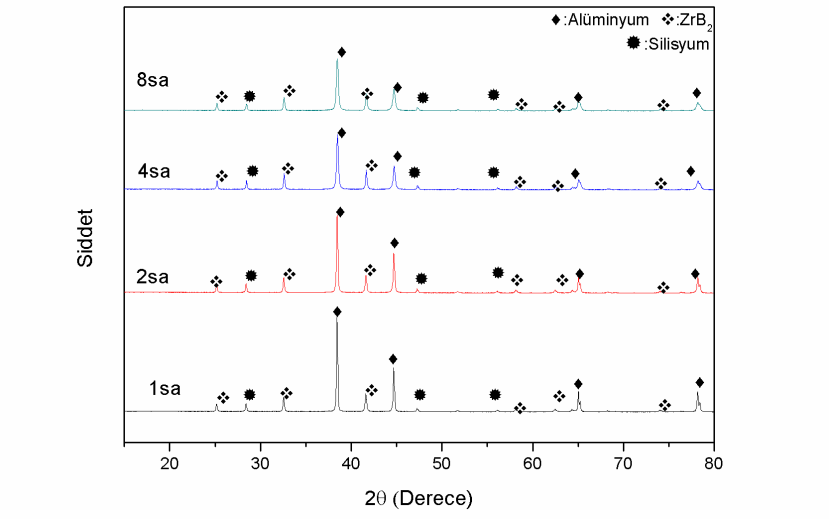
Yapılan deneysel çalışma setlerinden bir diğeri de Al7Si metal matriks içerisine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında zirkonyum diborürün (ZrB_2) pekiştirici faz olarak ilave edilmesidir.

Şekil 6.9'da Al7Si metal matriks içerisine ağırlıkça %5 oranında zirkonyum diborürün (ZrB_2) pekiştirici faz olarak ilave edilmesi ile elde edilen kompozit tozların tavlama öncesi XRD paternleri sunulmuştur.1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan toz malzemelerin tavlama öncesi XRD paternleri ve bu sistemlerde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Şekilde B_4C pekiştiricisine benzer olarak mekanik alaşımlama süresinin artması ile kristal boyutunun azaldığı ve kafes gerilmelerinin artmasına bağlı olarak pik yüksekliklerinde azaldığı ve piklerin genişlediği gözlemlenmiştir. Yine bunun sebebinin mekanik alaşımlama esnasında oluşan tekrar kristallenme ve yüksek plastik deformasyon olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak artan ZrB_2 miktarı ile ZrB_2'e ait olan pikler belirginleşmiştir.



Şekil 6.9: Çeşitli sürelerde (1, 2, 4 ve 8 sa) MA'lanmış Al7Si-5ZrB2 tozlarının XRD grafikleri.

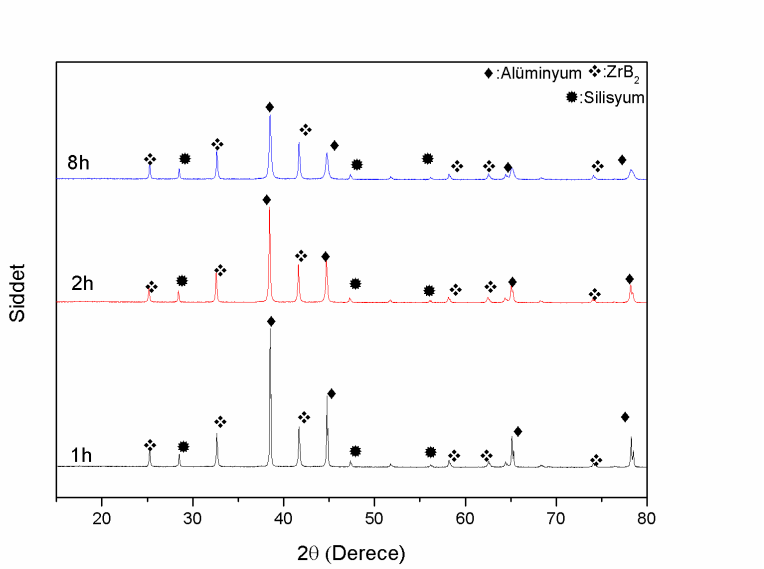
Şekil 6.10'da Al7Si metal matriks içerisine ağırlıkça %10 oranında zirkonyum diborürün (ZrB_2) pekiştirici faz olarak ilave edilmesi ile elde edilen kompozit tozların tavlama öncesi XRD paternleri sunulmuştur.1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan toz malzemelerin tavlama öncesi XRD paternleri ve bu sistemlerde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 6.10: Çeşitli sürelerde (1, 2, 4 ve 8 sa) MA'lanmış Al7Si-10ZrB2 tozlarının XRD grafikleri.

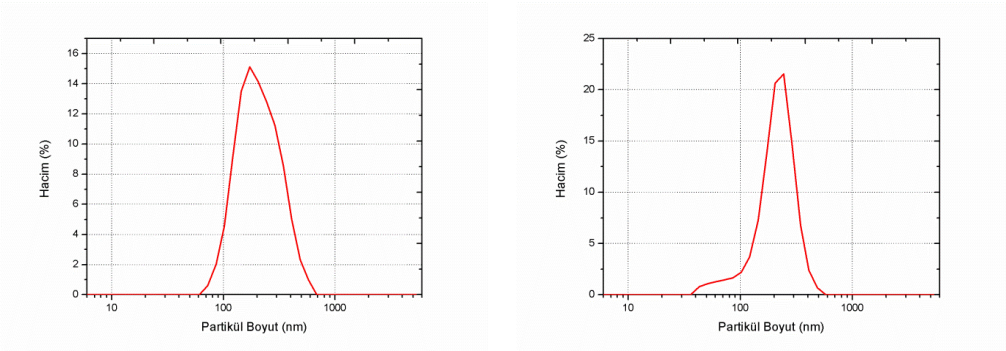
Şekil 6.11'de Al7Si metal matriks içerisine ağırlıkça %15 oranında zirkonyum diborürün (ZrB2) pekiştirici faz olarak ilave edilmesi ile elde edilen toz

malzemelerin tavlama öncesi XRD paternleri sunulmuştur.1 saat, 2 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan toz malzemelerin tavlama öncesi XRD paternleri ve bu sistemlerde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.

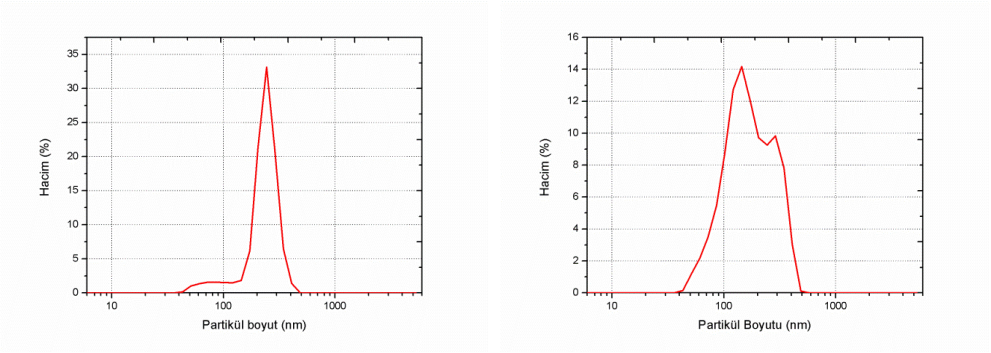


Şekil 6.11: Çeşitli sürelerde (1, 2 ve 8 sa) MA'lanmış Al7Si-15ZrB2 tozlarının XRD grafikleri.

Mekanik alaşımlanmış tozlar suda çözünmediği için partikül boyut ölçümleri saf su ortamında yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda farklı MA süreleri için elde edilen partikül boyut dağılım grafikleri Şekil 6.6'da verilmiştir.



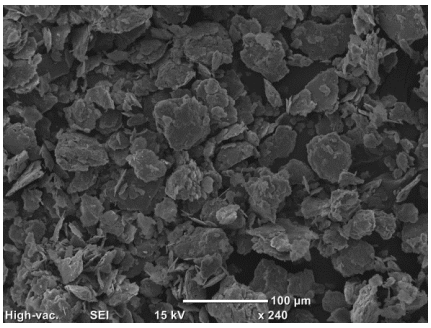
(a) (b)



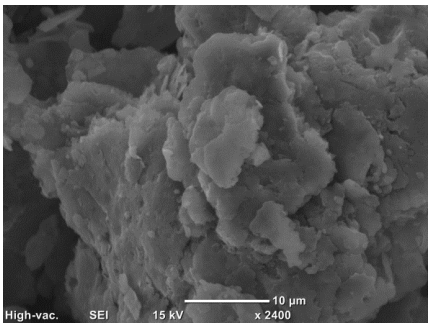
(c) (d)

Şekil 6.12: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si tozlarının partikül boyut dağılım grafikleri (a) 2 sa MA, (b) 4 sa MA, (c) 8 sa MA, (d) 16 sa MA.

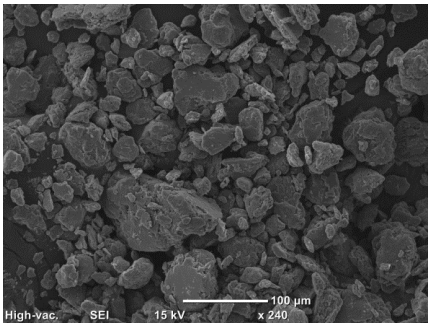
Partikül boyut analiz çalışmaları sıvı ortam koşullarında ve tozlarda meydana aglomerasyonu önlemek amacıyla deney öncesi 20 dakika ultrasonik banyoda bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Partikül boyut analizi sonuçlarına göre başlangıçtaki Al tozunun ortalama partikül boyutu 12 μm olarak bulunmuştu. Mekanik alaşımlama sonrası yapılan ölçümlerde ise ortalama olarak her numune için yaklaşık ortalama partikül boyutu 100-150 nm civarı bulunmuştur. Bunun yanında grafikler incelendiğinde partikül boyut dağılımının düzgün bir şekilde dağılım gösterdiği grafiklerden görülmektedir. Partikül boyut analizlerinin yanında mekanik alaşımlanmış kompozitlere yapılan SEM çalışmalarına ait fotoğraflar aşağıda verilmiştir. SEM çalışmalarında Al7Si ana matris sistemine ait 1, 2, 4, 8 ve 16 saat MA'lanmış numuneler çeşitli büyütmelerde incelenmiştir. Bu numunelere ait SEM görüntüleri Şekil 6.13' de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere mekanik alaşımlama süresinin artması ile partikül boyutunun azaldığı görülmektedir. İlk 2 saatte mekanik alaşımlama sürelerinde partiküller yassı bir şekil alırken aynı zamanda birbiri içinde aglomera olmuş, mekanik alaşımlama süresinin artması ile partiküller yavaş yavaş büyük aglomera yapılar kırılarak daha küçük parçalara dönüşmüş, 16 saat sonunda birbiri içine geçmiş ve üstü üste yerleştirilmiş tabakalı büyük bir yapı haline gelmiştir. Burada dikkat çeken nokta Al matris içinde ikincil matris fazı olan Si gayet homojen şekilde dağılmıştır. Ancak yapının genel olarak aglomere tozlardan oluştuğu görülmüştür.


100 µm
High-vac. SEI 15 kV x 240

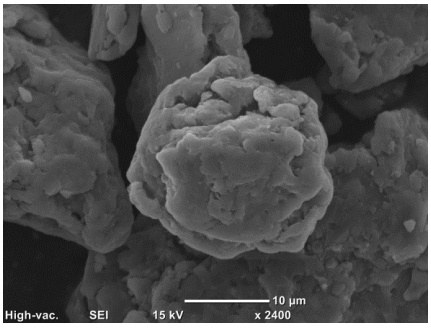
(a)


10 µm
High-vac. SEI 15 kV x 2400

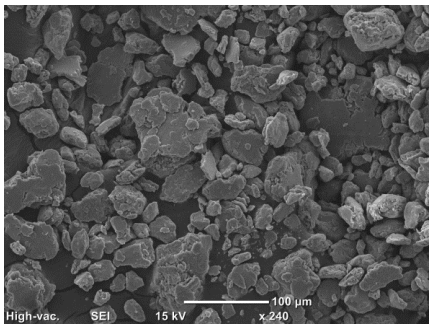
(b)


100 µm
High-vac. SEI 15 kV x 240

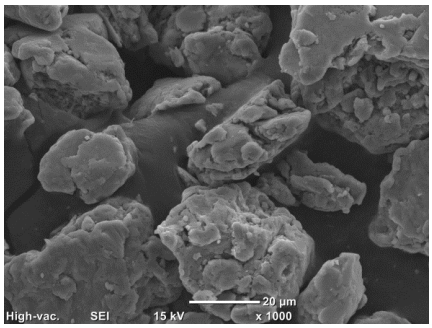
(b)


10 µm
High-vac. SEI 15 kV x 2400

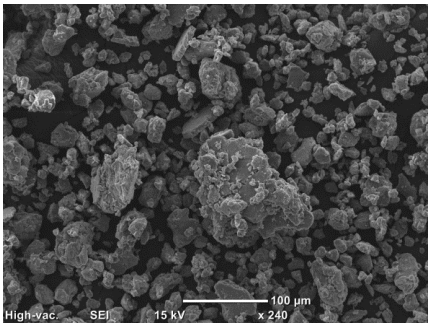
(d)


100 µm
High-vac. SEI 15 kV x 240

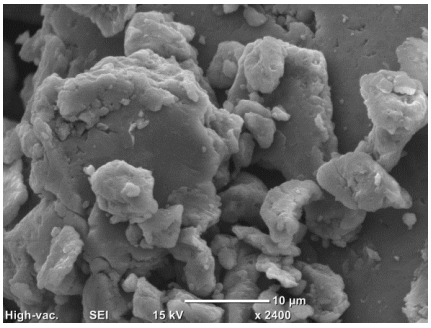
(e)


20 µm
High-vac. SEI 15 kV x 1000

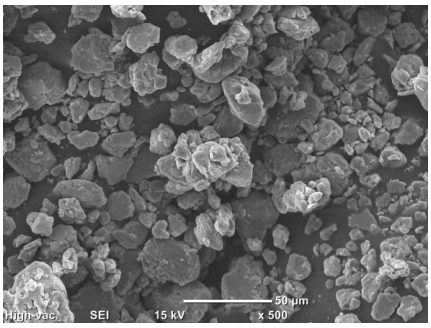
(f)


100 µm
High-vac. SEI 15 kV x 240

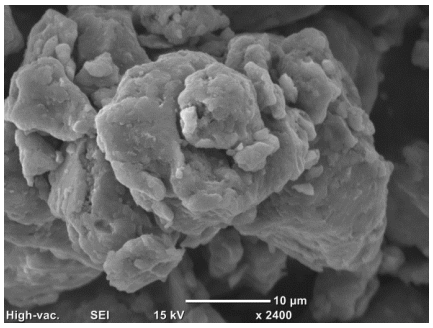
(g)


10 µm
High-vac. SEI 15 kV x 2400

(h)



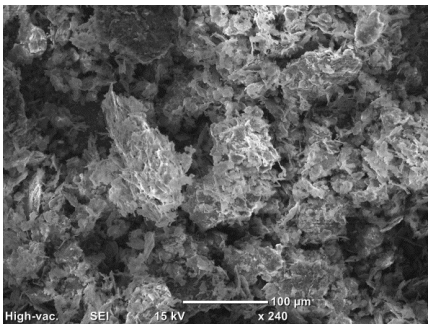
(ı)



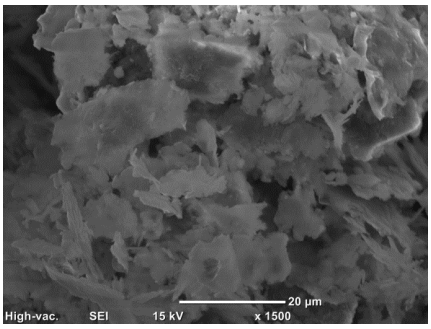
(i)

Şekil 6.13: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si tozlarının SEM fotoğrafları **(a)** 1 sa (240X) **(b)** 2 sa (2400X) **(c)** 2 sa (240X) **(d)** 2 sa (2400X) **(e)** 4 sa (240X) **(f)** 4 sa (1000X) **(g)** 8sa (240X) **(h)** 8 sa (2400X) **(ı)** 16 sa (500X) **(i)** 16 sa (2400X).

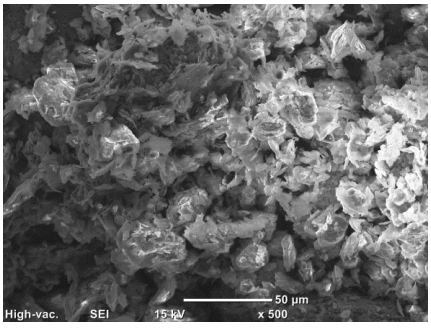
Al7Si matriks malzemenin yanı sıra ağırlıkça %5, %10 ve %15 bor karbür (B_4C) ile takviyelendirilmiş sistemin SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 6.14' de 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-5B4C toz malzeme sistemlerinin çeşitli büyütmelerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeleri yapılmıştır.



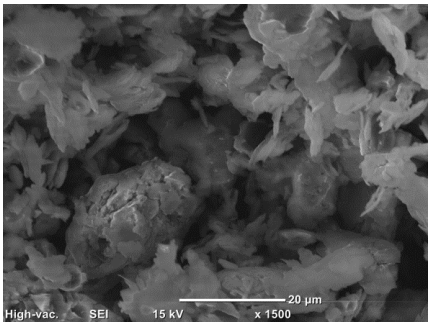
(a)



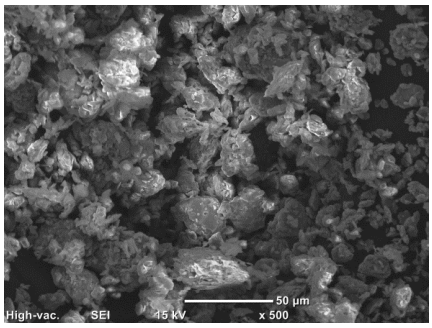
(b)



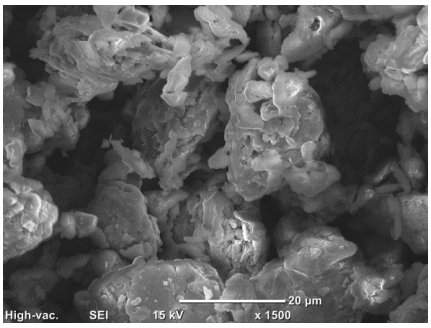
(c)



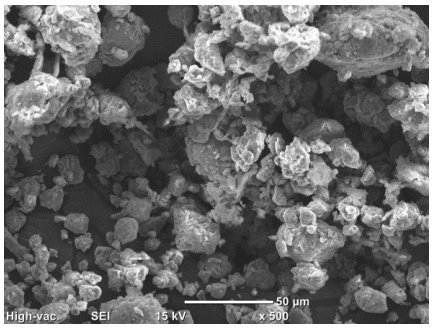
(d)



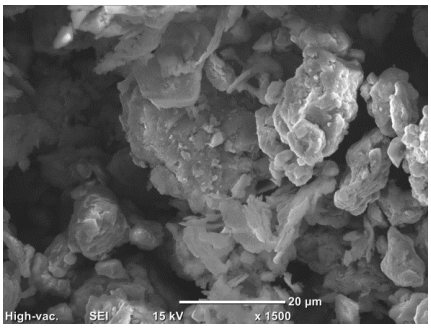
(e)



(f)



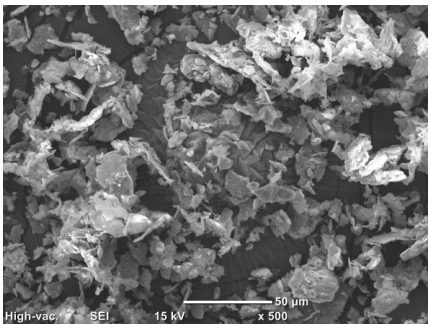
(g)



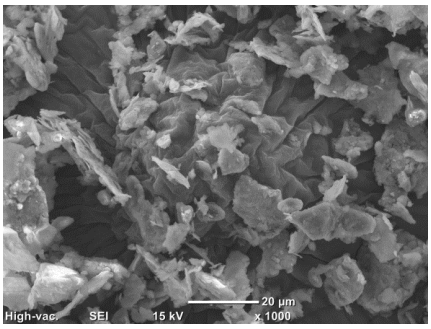
(h)

Şekil 6.14: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-5B4C tozlarının SEM fotoğrafları **(a)** 1 sa (240X) **(b)** 1 sa (1500X) **(c)** 2 sa (500X) **(d)** 2 sa (1500X) **(e)** 4 sa (500X) **(f)** 4 sa (1500X) **(g)** 8sa (500X) **(h)** 8 sa (1500X).

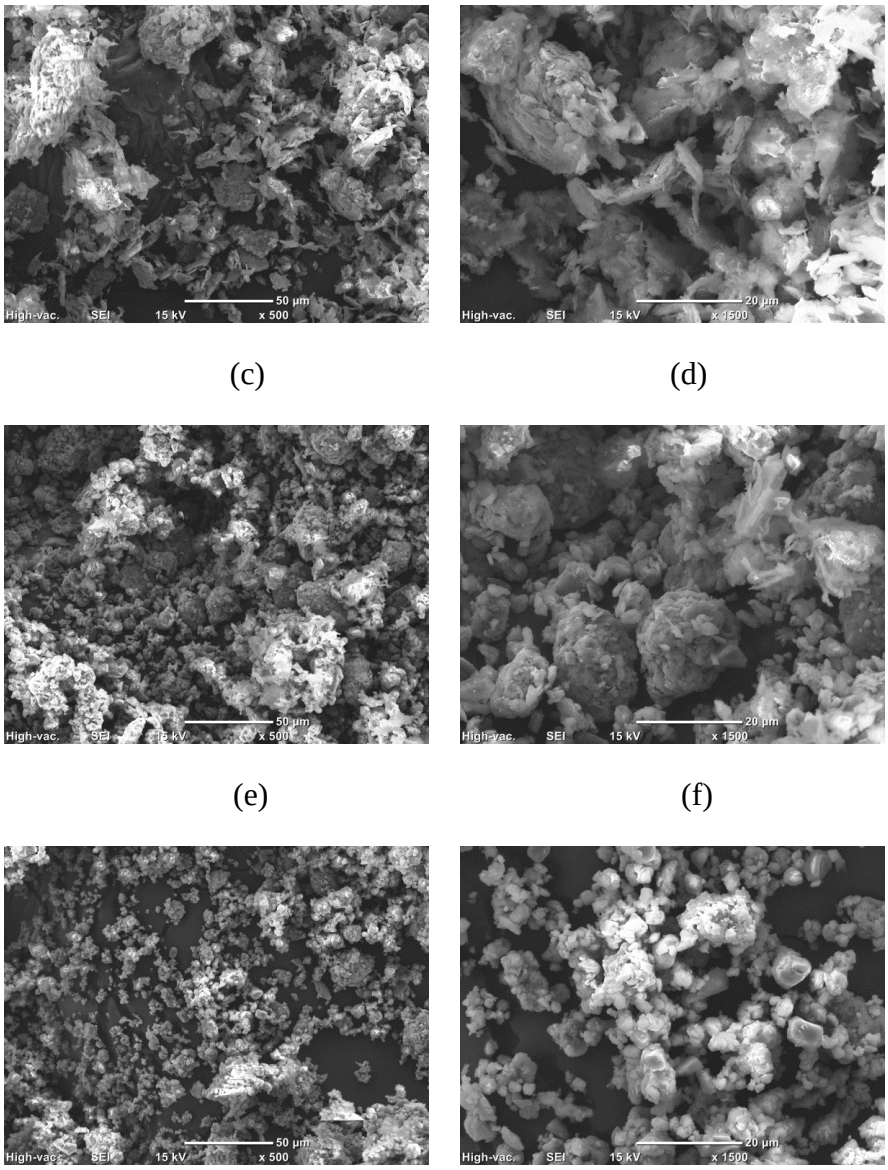
Şekil 6.15' de 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-10B4C toz malzeme sistemlerinin çeşitli büyütmelerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeleri yapılmıştır.



(a)

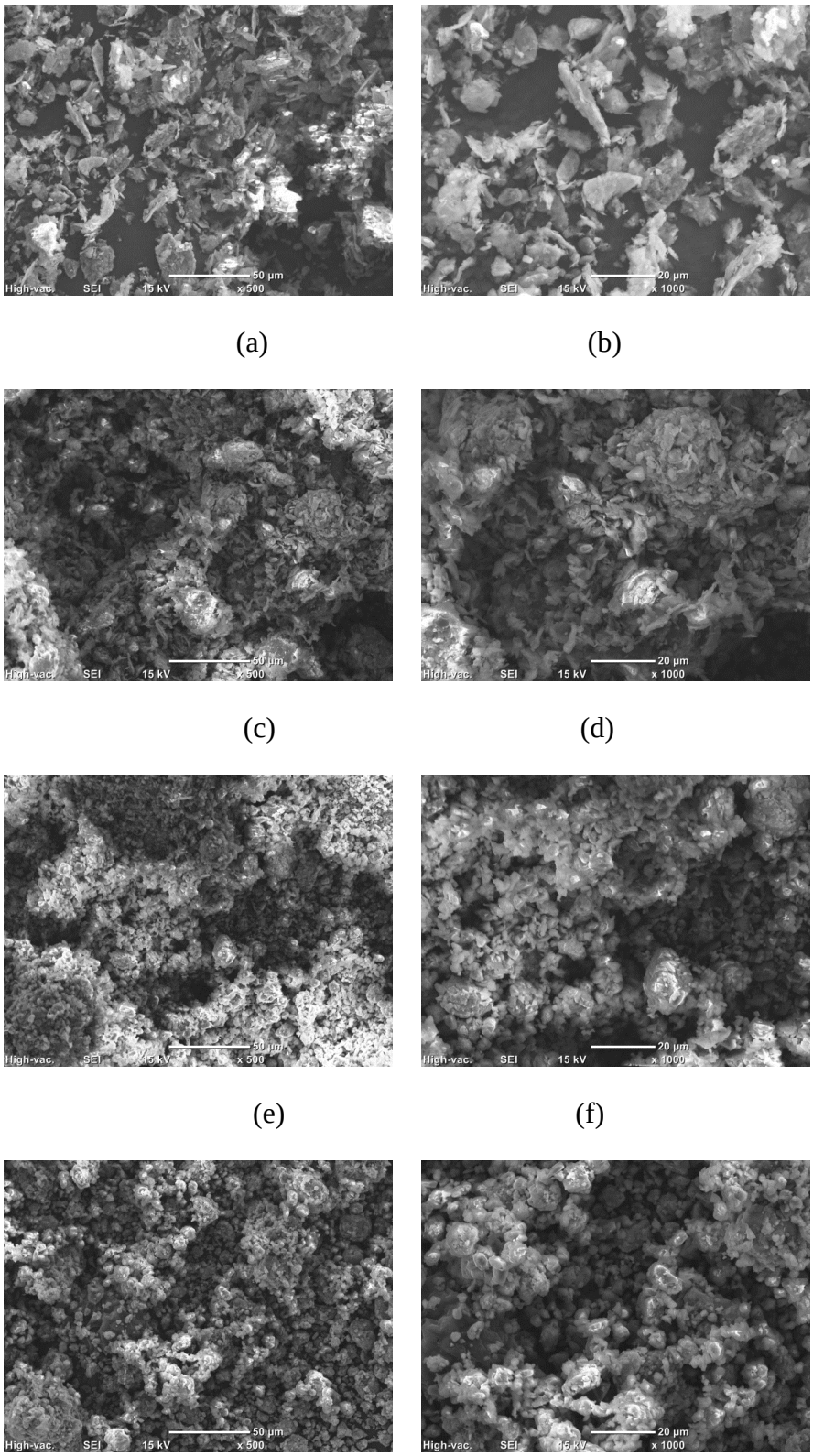


(b)



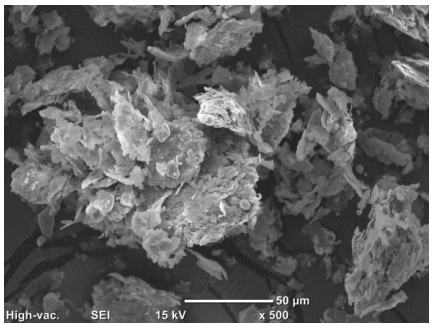
Şekil 6.15: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-10B4C tozlarının SEM fotoğrafları **(a)** 1 sa (500X) **(b)** 1 sa (1000X) **(c)** 2 sa (500X) **(d)** 2 sa (1500X) **(e)** 4 sa (500X) **(f)** 4 sa (1500X) **(g)** 8sa (500X) **(h)** 8 sa (1500X).

Şekil 6.16' da 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-15B4C toz malzeme sistemlerinin çeşitli büyütmelerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeleri yapılmıştır.

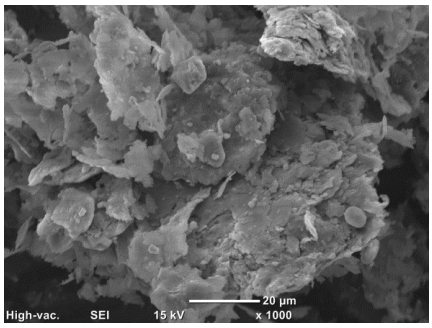


Şekil 6.16: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-15B4C tozlarının SEM fotoğrafları **(a)** 1 sa (500X) **(b)** 1 sa (1000X) **(c)** 2 sa (500X) **(d)** 2 sa (1500X) **(e)** 4 sa (500X) **(f)** 4 sa (1500X) **(g)** 8sa (500X) **(h)** 8 sa (1500X).

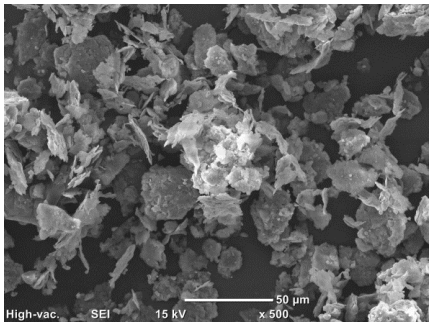
Ayrı bir deney setinde incelenmiş olan Al7Si ana matriksine ağırlıkça %5, %10 ve %15 zirkonyum diborür (ZrB_2) ile takviyelendirilmiş sistemin de SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 6.17' de 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-5ZrB_2 toz malzeme sistemlerinin çeşitli büyütmelerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeleri yapılmıştır.



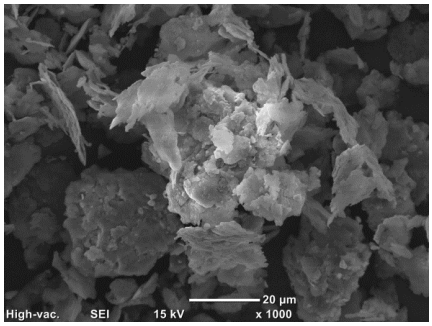
(a)



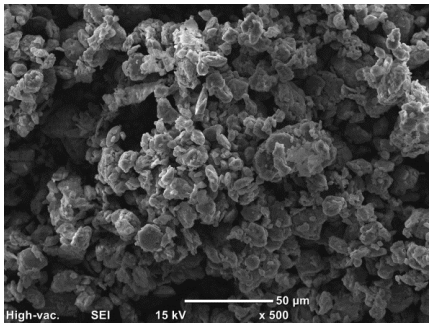
(b)



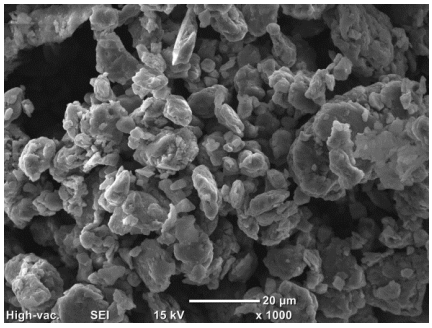
(c)



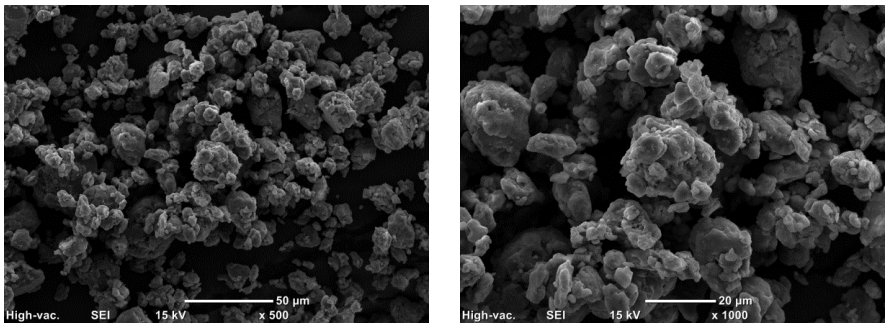
(d)



(e)



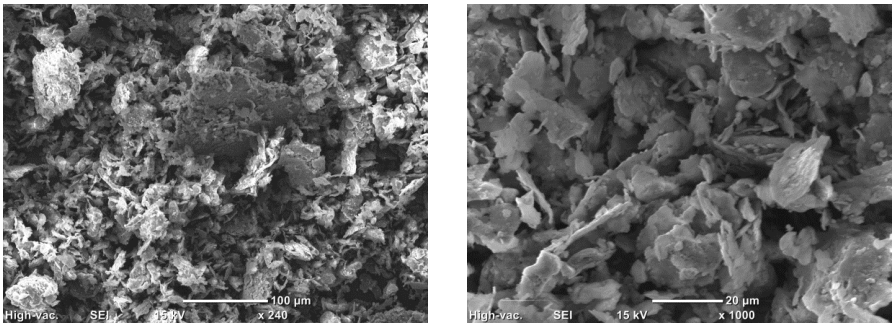
(f)



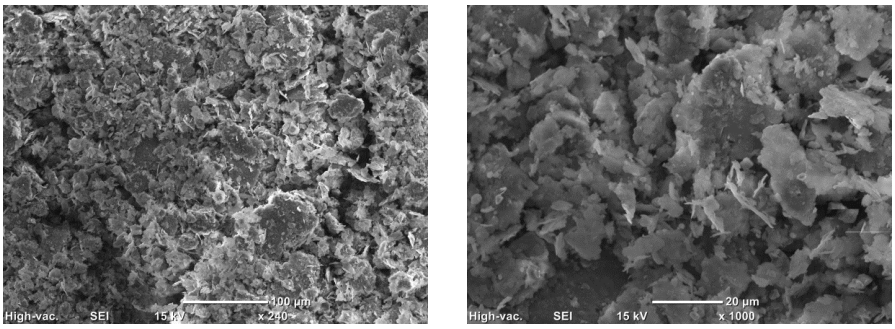
(g) (h)

Şekil 6.17: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-5ZrB2 tozlarının SEM fotoğrafları **(a)** 1 sa (500X) **(b)** 1 sa (1000X) **(c)** 2 sa (500X) **(d)** 2 sa (1000X) **(e)** 4 sa (500X) **(f)** 4 sa (1000X) **(g)** 8sa (500X) **(h)** 8 sa (1000X).

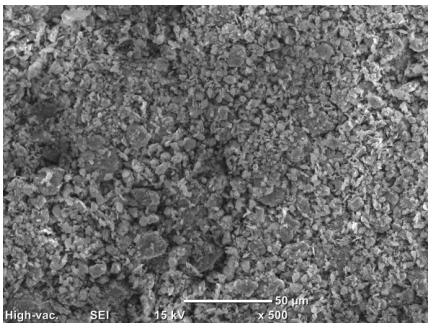
Şekil 6.18' de 1 saat, 2 saat, 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-10ZrB_2 toz malzeme sistemlerinin çeşitli büyütmelerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeleri yapılmıştır.



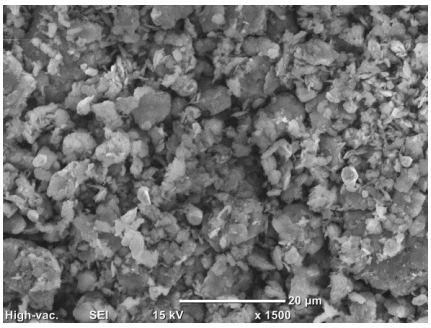
(a) (b)



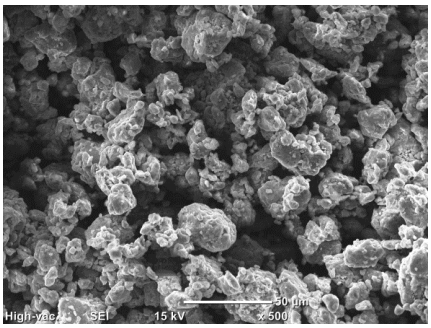
(c) (d)



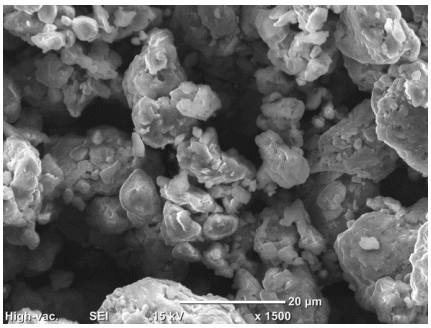
(e)



(f)



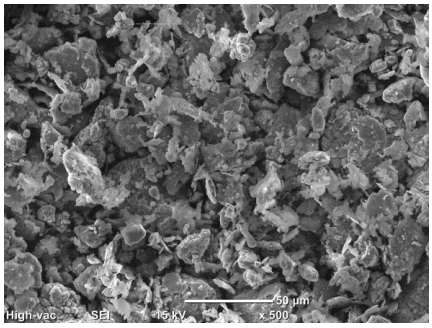
(g)



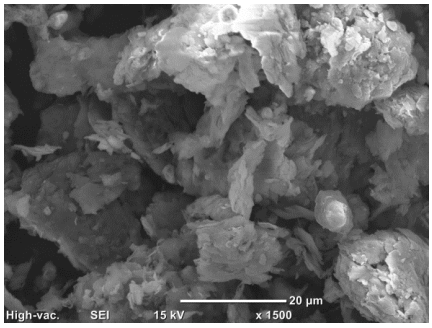
(h)

Şekil 6.18: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-10ZrB2 tozlarının SEM fotoğrafları **(a)** 1 sa (240X) **(b)** 1 sa (1000X) **(c)** 2 sa (240X) **(d)** 2 sa (1000X) **(e)** 4 sa (500X) **(f)** 4 sa (1500X) **(g)** 8sa (500X) **(h)** 8 sa (1500X).

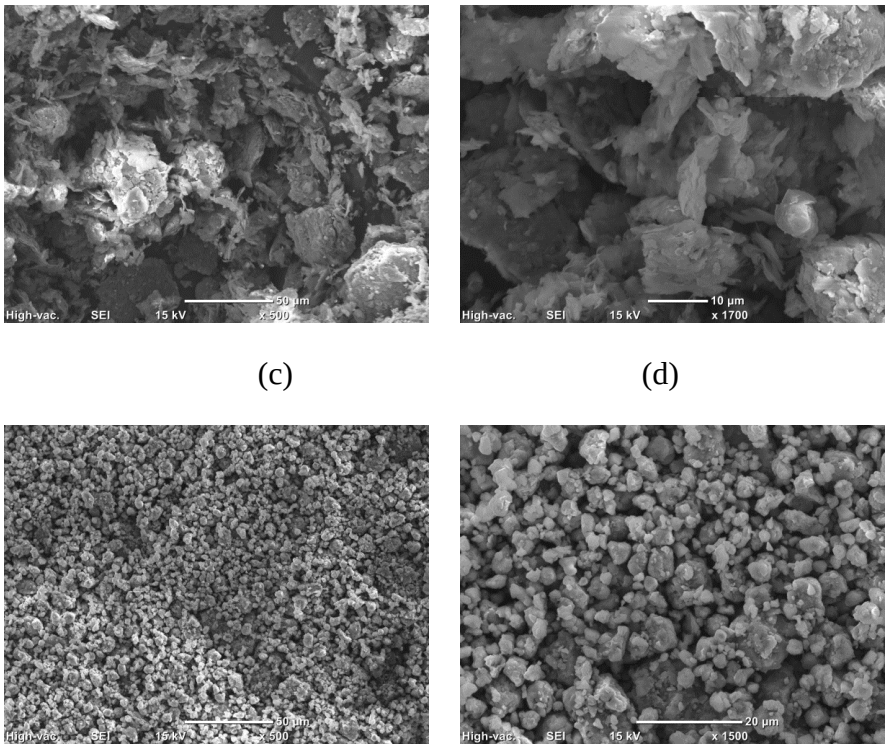
Şekil 6.19' da 1 saat, 2 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-15ZRB2 toz malzeme sistemlerinin çeşitli büyütmelerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeleri yapılmıştır.



(a)



(b)



(c) (d)

(e) (f)

Şekil 6.19: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-15ZrB2 tozlarının SEM fotoğrafları **(a)** 1 sa (500X) **(b)** 1 sa (1500X) **(c)** 2 sa (500X) **(d)** 2 sa (1700X) **(e)** 8 sa (500X) **(f)** 8 sa (1500X).

6.3 Sinterlenmiş Numunelerin Karakterizasyonu

6.3.1 Yoğunluk Ölçümleri

Sinterlenmiş numunelerin yoğunluk değerleri Çizelge 6.5, 6.6 ve 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.5: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si numunelerinin yoğunluk değerleri.

Malzeme	Teorik yoğunluk (gr/cm^3)	Sinter Yoğunluğu (gr/cm3)	Relatif Yoğunluk (%)
Al7Si başlangıç	2.67	2.5580	95.81
Al7Si-1sa	2.67	2.6680	99.93
Al7Si-2sa	2.67	2.5810	96.67
Al7Si-4sa	2.67	2.5100	94.01
Al7Si-8sa	2.67	2.6160	97.98
Al7Si-16sa	2.67	2.5580	95.81

Çizelge 6.6: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-xB_4C numunelerinin yoğunluk değerleri.

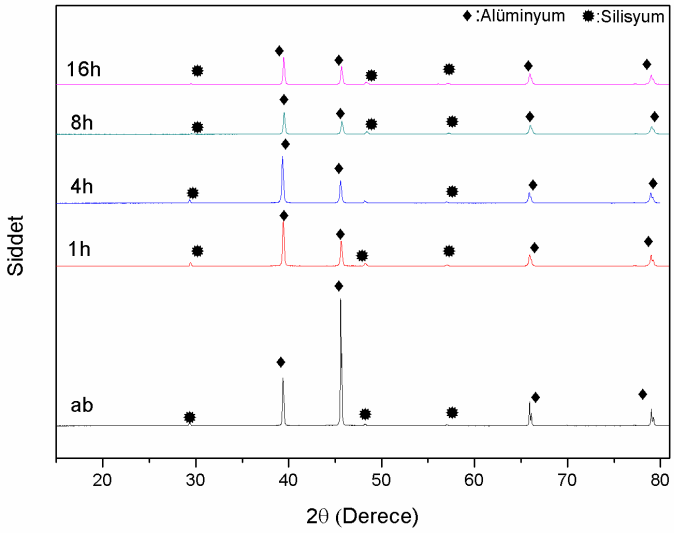
Malzeme	Teorik yoğunluk (gr/cm^3)	Sinter Yoğunluğu (gr/cm3)	Relatif Yoğunluk (%)
Al7Si-5B_4C-1sa	2.6623	2.6600	99.91
Al7Si-5B_4C-2sa	2.6623	2.5600	96.16
Al7Si-5B_4C-4sa	2.6623	2.4590	92.36
Al7Si-5B_4C-8sa	2.6623	2.3600	88.65
Al7Si-10B_4C-1sa	2.6544	2.6460	99.68
Al7Si-10B_4C-2sa	2.6544	2.4690	93.02
Al7Si-10B_4C-4sa	2.6544	2.3990	90.38
Al7Si-10B_4C-8sa	2.6544	2.2340	84.16
Al7Si-15B_4C-1sa	2.6466	2.6180	98.92
Al7Si-15B_4C-2sa	2.6466	2.4370	92.08
Al7Si-15B_4C-4sa	2.6466	2.3920	90.38
Al7Si-15B_4C-8sa	2.6466	2.4060	90.91

Çizelge 6.7: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-xZrB2 numunelerinin yoğunluk değerleri.

Malzeme	Teorik yoğunluk (gr/cm^3)	Sinter Yoğunluğu (gr/cm3)	Relatif Yoğunluk (%)
Al7Si-5ZrB2-1sa	2.7463	2.7410	95.00
Al7Si-5ZrB2-2sa	2.7463	2.7320	94.35
Al7Si-5ZrB2-4sa	2.7463	2.6080	91.14
Al7Si-5ZrB2-8sa	2.7463	2.5010	82.73
Al7Si-10ZrB2-1sa	2.8289	2.7770	98.17
Al7Si-10ZrB2-2sa	2.8289	2.8100	99.33
Al7Si-10ZrB2-4sa	2.8289	2.6230	92.72
Al7Si-10ZrB2-8sa	2.8289	2.6410	93.36
Al7Si-15ZrB2-1sa	2.9155	2.9060	99.67
Al7Si-15ZrB2-2sa	2.9155	2.8750	98.61
Al7Si-15ZrB2-4sa	2.9155	2.7750	95.18
Al7Si-15ZrB2-sa	2.9155	2.6130	89.62

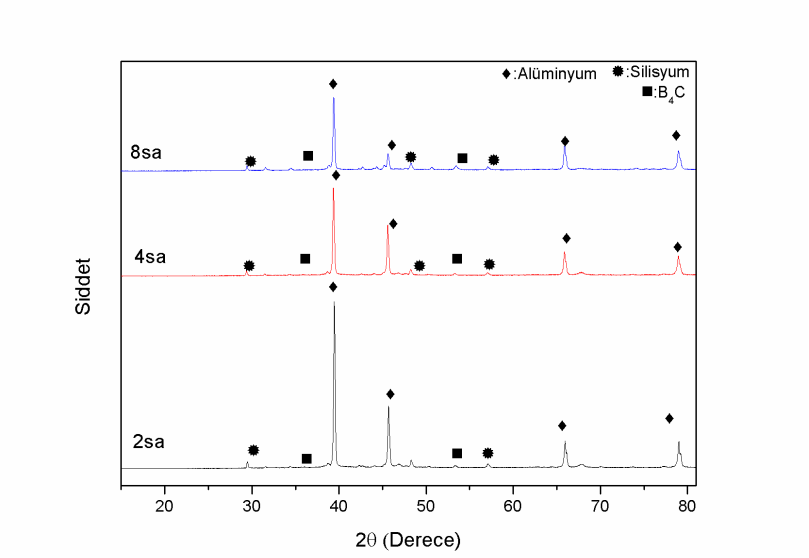
6.3.2 Faz Analizleri ve Mikroyapı Karakterizasyounları

Sinterlenmiş numunelerde faz karakterizasyonu X ışınları difraktometresi ile yapılmıştır. Sinterlenmiş Al7Si numunelerine ait XRD grafikleri Şekil 6.20'de verilmiştir. Sinterlenmiş numunelere yapılan X-ışınları analizi sonrası elde edilen difraksiyon paternlerinde tozlarda elde edilen paternlere benzer olarak pik yükseklikleri azalmakta ve pik genişlikleri artmaktadır. Sistemlerde alüminyum ve silisyuma ait olan pikler rahatlıkla belirlenebilmektedir.

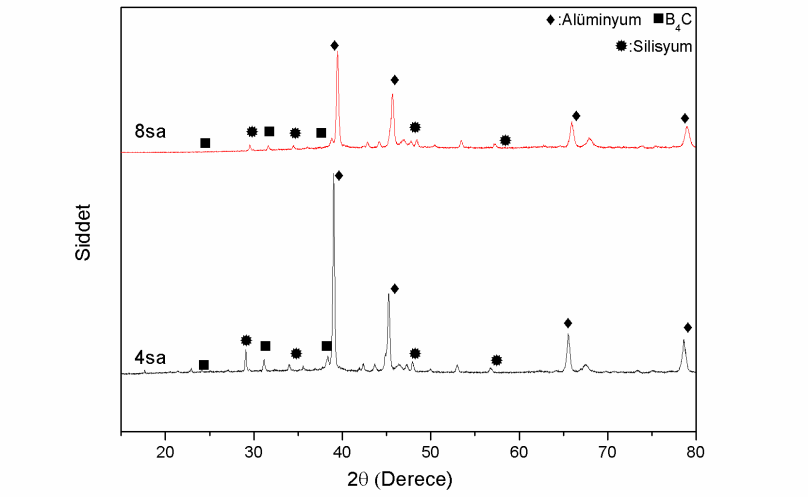


Şekil 6.20: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si tozlarının sinter sonrası XRD paterni.

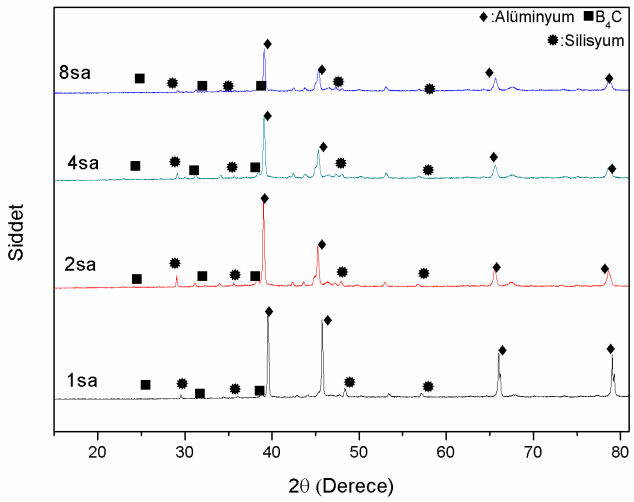
Sinterlenmiş Al7Si (5,10,15) B_4C numunelerine ait XRD grafikleri şekil 6.21, 6.22 ve 6.23'de verilmiştir. Sinterlenmiş numunelere yapılan X-ışınları analizi sonrası elde edilen difraksiyon paternlerinde tozlarda elde edilen paternlere benzer olarak pik yükseklikleri azalmakta ve pik genişlikleri artmaktadır. B_4C pekiştirici ilaveli bu sistemlerde alüminyum, silisyum ve bor karbüre ait olan pikler rahatlıkla belirlenebilmektedir.



Şekil 6.21: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-5B4C tozlarının sinter sonrası XRD paterni.



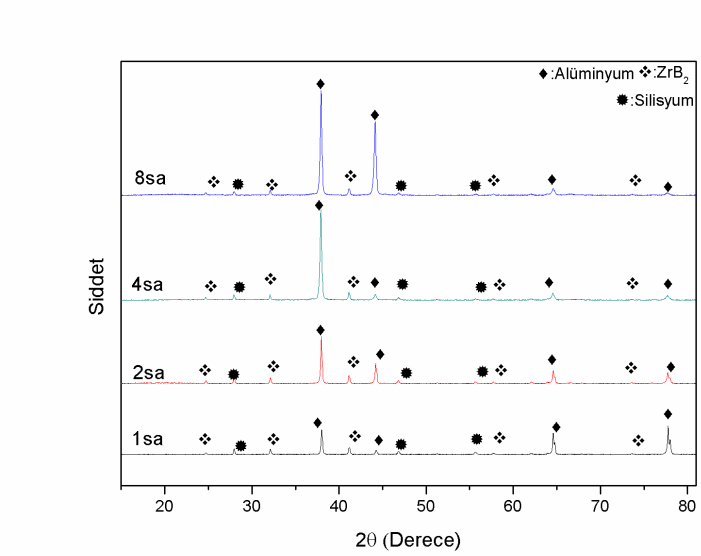
Şekil 6.22: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-10B4C tozlarının sinter sonrası XRD paterni.



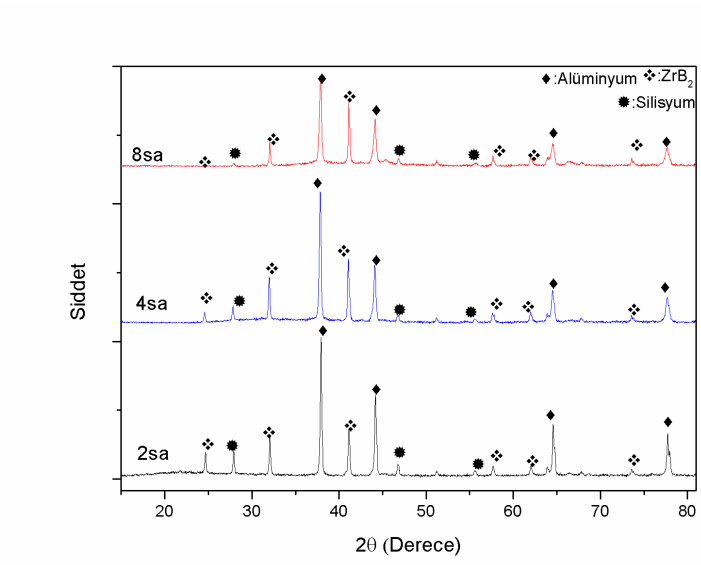
Şekil 6.23: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-15B4C tozlarının sinter sonrası XRD paterni.

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde artan mekanik alaşımlama süresine bağlı olarak Al7Si-15B4C sisteminde pik şiddetlerinde düşüş gözlenmiştir. Ancak alüminyum, silisyum ve bor karbür arasında bir tepkime meydana gelmemiştir. Yeni bir faz oluşum gözlenmemiştir. XRD paternlerinde görülen pikler sadece alüminyum, silisyum ve bor karbüre aittir. Al7Si-xB4C (x = ağırlıkça %5, %10, %15) sistemlerinin sinterleme sonrası XRD paternlerine bakıldığında artan bor karbür miktarına bağlı olarak bor karbür piklerinde belirginleşme gözlenmiştir. En belirgin bor karbür pikleri 4 saat ve 8 saat mekanik alaşımlama yapılan Al7Si-10B4C sisteminde gözlenmektedir.

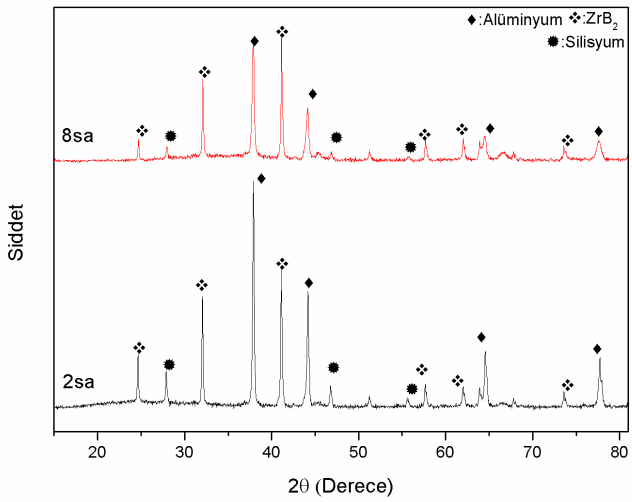
Sinterlenmiş Al7Si (5,10 ve 15) ZrB_2 numunelerine ait XRD grafikleri Şekil 6.24 ve 6.25 ve 6.26'da verilmiştir. Sinterlenmiş numunelere yapılan X-ışınları analizi sonrası elde edilen difraksiyon paternlerinde tozlarda elde edilen paternlere benzer olarak pik yükseklikleri azalmakta ve pik genişlikleri artmaktadır. ZrB_2 pekiştirici ilaveli bu sistemlerde alüminyum, silisyum ve zirkonyum diborüre ait olan pikler rahatlıkla belirlenebilmektedir.



Şekil 6.24: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-5ZRB2 tozlarının sinter sonrası XRD paterni.

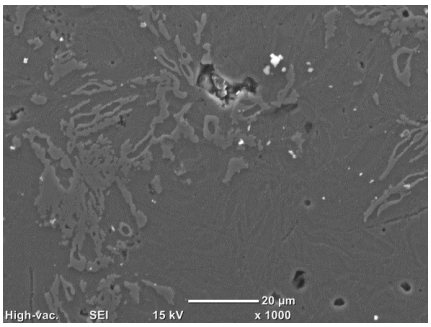


Şekil 6.25: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al-7Si-10ZRB2 tozlarının sinter sonrası XRD paterni.

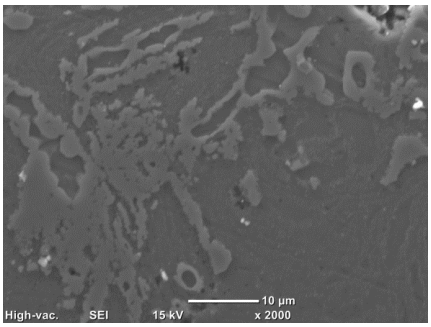


Şekil 6.26: Çeşitli sürelerde MA'lanmış Al7Si-15ZRB2 tozlarının sinter sonrası XRD paterni.

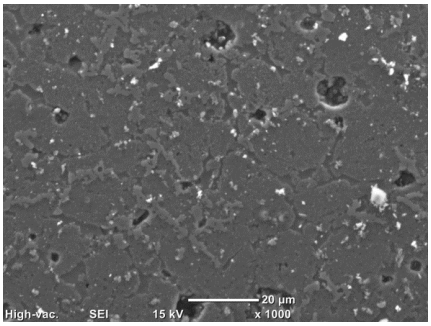
Şekil 6.27'de 1 saat, 2 saat, 4 saat, 8 saat ve 16 saat mekanik alaşımlanmış Al7Si numunelerine ait sinterleme sonrası taramalı elektron mikroskobu resimleri görülmektedir. Sinterlenmiş Al7Si numunelerinnin aşağıda verilen SEM fotoğraflarında açık renkli olan bölgelerde küresel yapılar Al-Si-O'den oluşmaktadır. Koyu renkli olan bölgelerde ise sadece Al ve Si görülmektedir. Koyu renkli olan bölümlerde ise Al ve Si'nin homojen bir şekilde karıştığı görülmektedir.



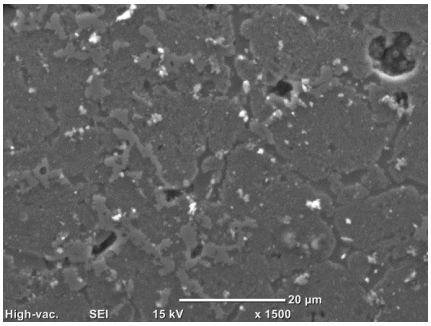
(a)



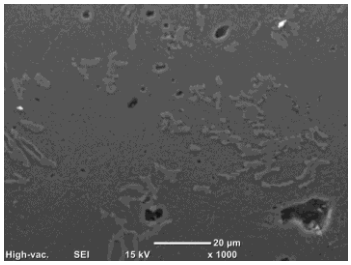
(b)



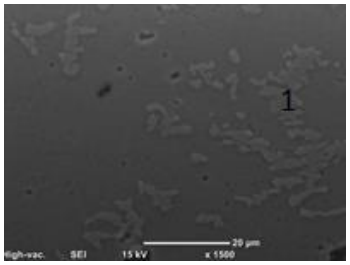
(c)



(d)

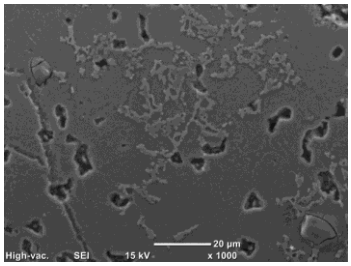


(e)

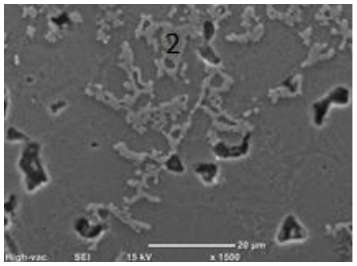


(f)

1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
Al:	38,33
Si:	61,67

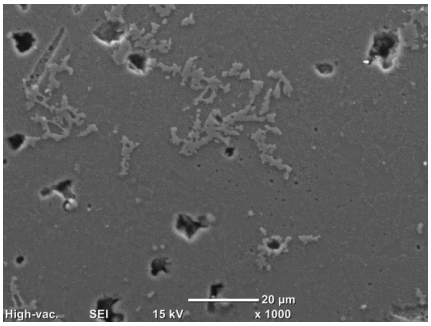


(g)

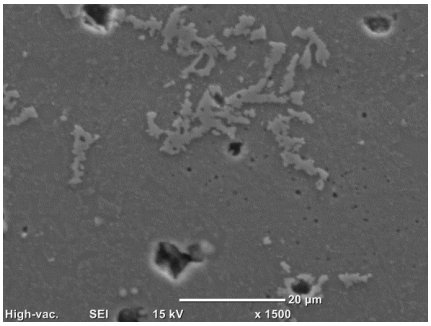


(h)

1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
Al:	31,31
Si:	68,69



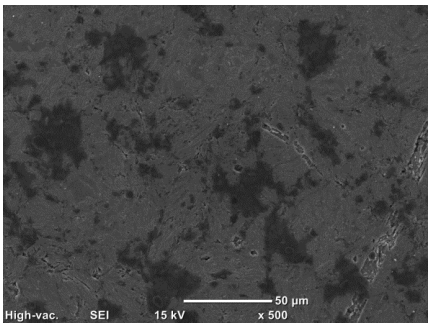
(ı)



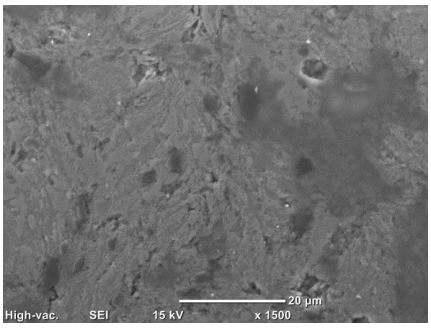
(i)

Şekil **6.27:** Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si numunelerin SEM fotoğrafları **(a)** 1 saat (1000X) **(b)** 1 saat (2000x) **(c)** 2 saat (1000X) **(d)** 2 saat (1500X) **(e)** 4 saat (1000X) **(f)** 4 saat (1500X) **(g)** 8 saat (1000X) **(h)** 8 saat (1500X) **(ı)** 16 saat (1000X) **(i)** 16 saat (1500X).

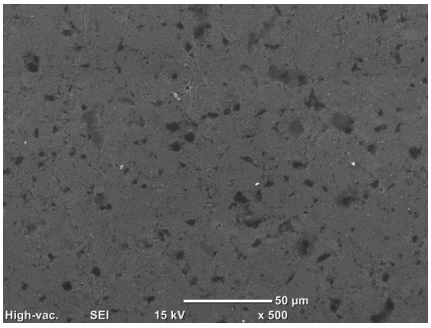
Şekil 6.28, 6.29, 6.30'da sinterlenmiş Al7Si (5,10,15) B_4C numunelerine ait sinterleme sonrası taramalı elektron mikroskobu resimleri görülmektedir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde yapının homojen dağıldığı görülmektedir. Takviye malzemesi olan bor karbürün de yapıda homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir.



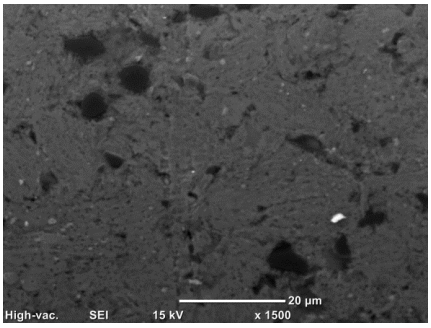
(a)



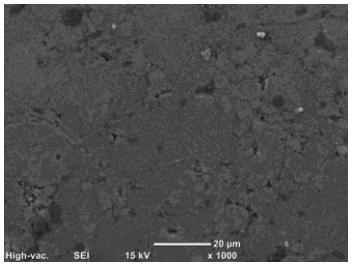
(b)



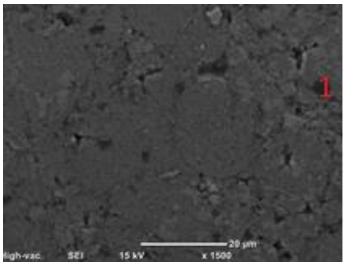
(c)



(d)



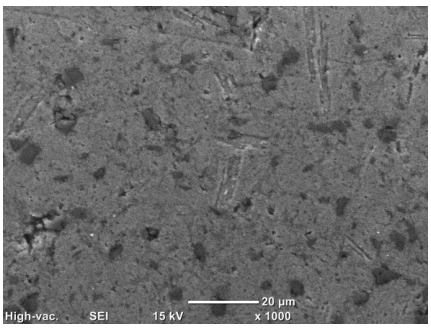
(d)



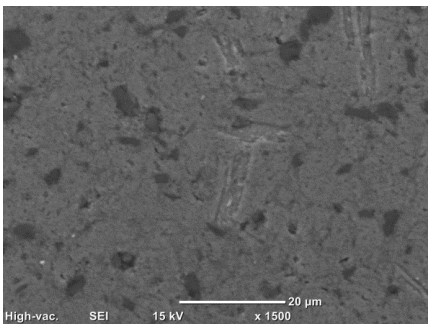
(f)

1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
B:	48,71
C:	46,17
Al:	4,99
Si:	0,13

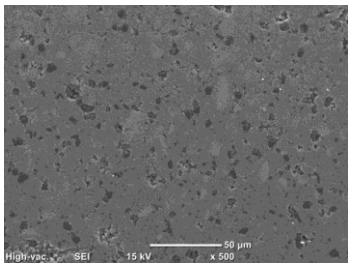
Şekil 6.28: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5B4C numunelerin SEM fotoğrafları **(a)** 2 saat (500X) **(b)** 2 saat (1500x) **(c)** 4 saat (500X) **(d)** 4 saat (1500X) **(e)**8 saat (1000X) **(f)** 8 saat (1500X).

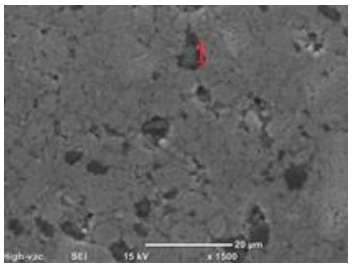


(a)



(b)

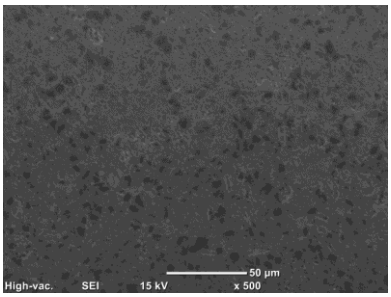


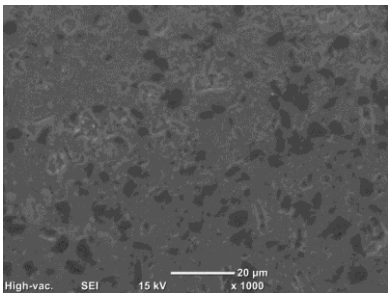


1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
B:	33,41
C:	23,07
Al:	40,80
Si:	2,72

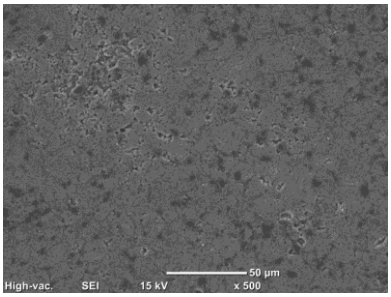
(c) (d)

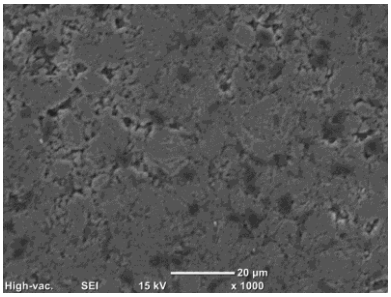
Şekil 6.29: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10B4C numunelerin SEM fotoğrafları **(a)** 2 saat (500X) **(b)** 2 saat (1500x) **(c)**8 saat (1000X) **(d)** 8 saat (1500X).



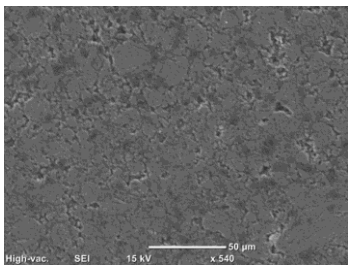


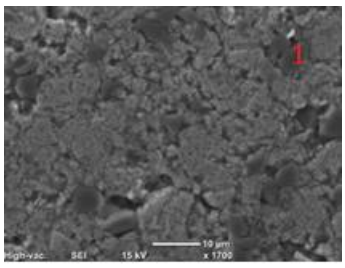
(a) (b)





(c) (d)



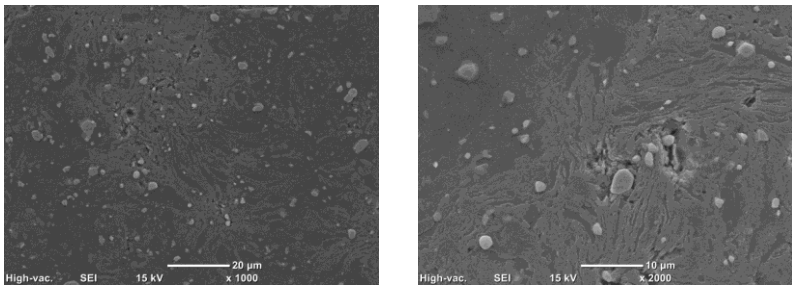


1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
B:	45,08
C:	42,91
Al:	10,06
Si:	1,88

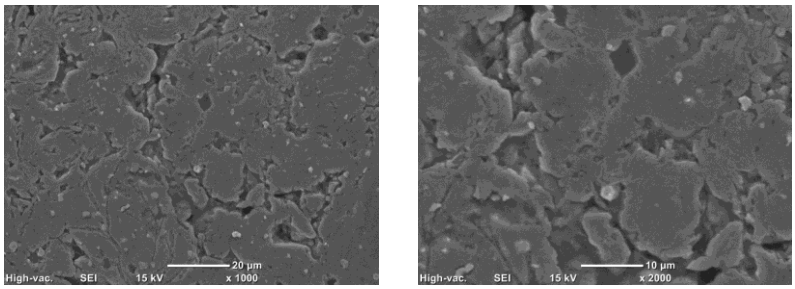
(e) (f)

Şekil 6.30: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15B4C numunelerin SEM fotoğrafları **(a)** 1 saat (500X) **(b)** 1 saat (1000x) **(c)** 2 saat (540X) **(d)** 2 saat (1500X) **(e)** 8 saat (1000X) **(f)** 8 saat (1700X).

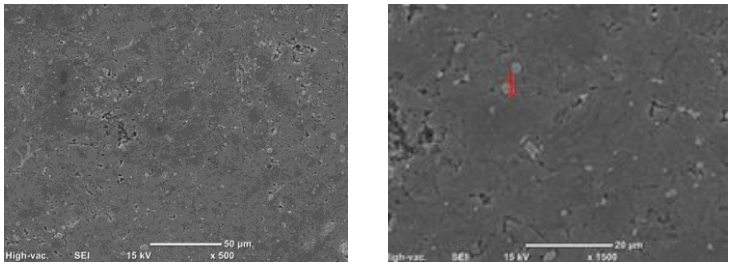
Şekil 6.31, 6.32 ve 6.33'de sinterlenmiş Al7Si (5,10,15) ZrB_2 numunelerine ait sinterleme sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM) resimleri görülmektedir. Al7Si (5, 10, 15) ZrB_2 numunelerinin aşağıdaki verilen SEM fotoğraflarında beyaz renkli olan büyük bölgelerin yapılan EDS analizleri sonucunda ZrB_2 fazı olduğu, yapıda dağınık halde bazı bölgelerde görülen beyazla gri renk arasında değişen küresel yapıların yine diğer yukarıdaki yapılardaki gibi Al-Si-O içeren yapı, koyu renkli olan bölgelerin ise sadece Al ve Si olduğu görülmektedir. Koyu renkli olan bölümlerde ise Al ve Si'nin homojen bir şekilde karıştığı görülmektedir.



(a) (b)



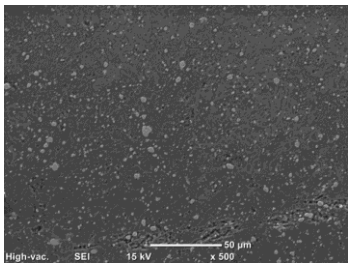
(c) (d)

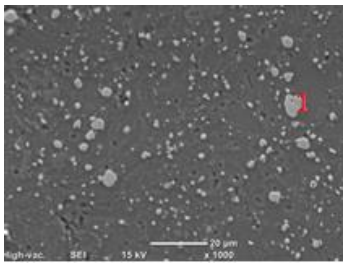


1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
B:	22,82
Zr:	64,39
Al:	11,91
Si:	0,88

(e) (f)

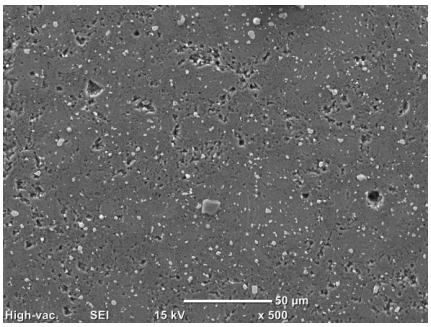
Şekil 6.31: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5ZrB2 numunelerin SEM fotoğrafları **(a)** 2 saat (1000X) **(b)** 2 saat (2000x) **(c)** 4 saat (1000X) **(d)** 4 saat (2000X) **(e)** 8 saat (500X) **(f)** 8 saat (1500X).

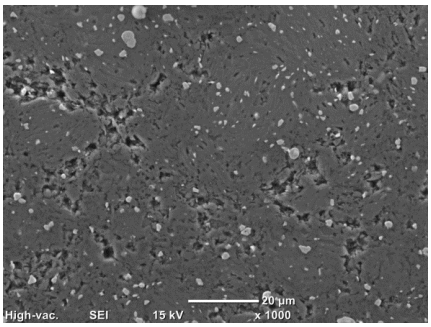




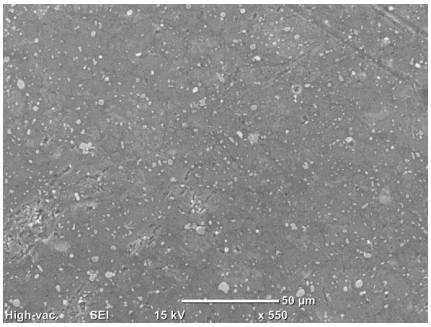
1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
B:	6,53
Zr:	91,39
Al:	2,04
Si:	0,04

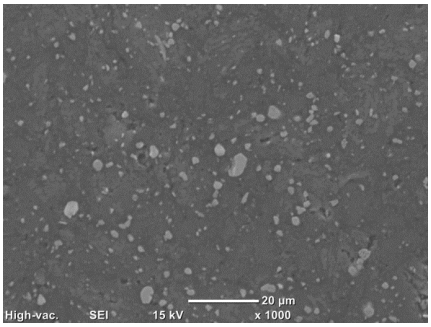
(a) (b)





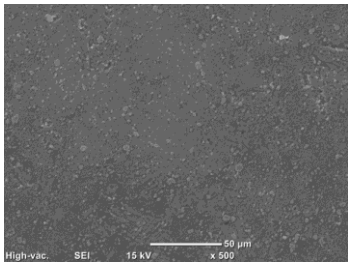
(a) (d)

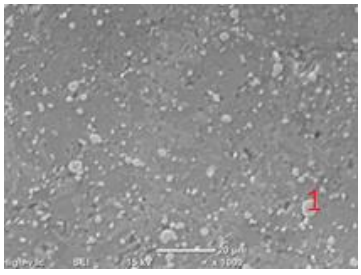




(e) (f)

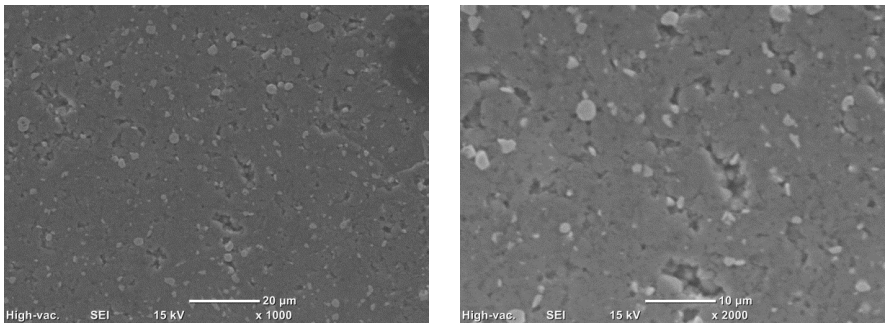
6.32: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10ZrB2 numunelerin SEM fotoğrafları **(a)** 2 saat (500X) **(b)** 2 saat (1000x) **(c)** 4 saat (500X) **(d)** 4 saat (1000X) **(e)** 8 saat (550X) **(f)** 8 saat (1500X).





1 nolu bölge (% Ağırlıkça)	
B:	6,75
Zr:	83,82
Al:	8,44
Si:	0,99

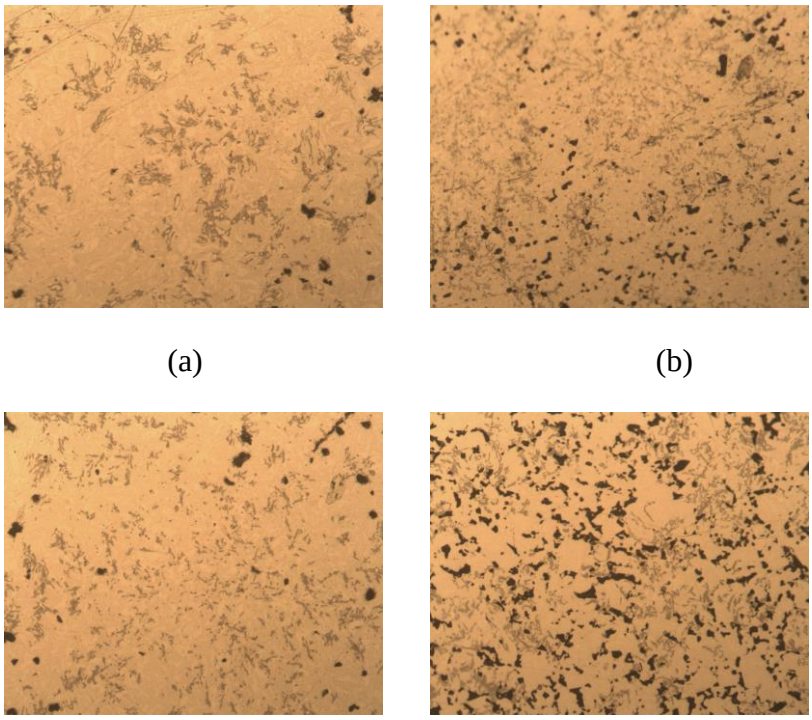
(a) (b)



(c) (d)

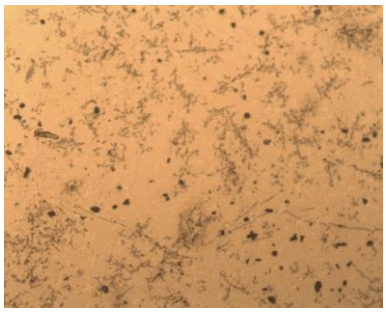
Şekil 6.33: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15ZrB2 numunelerin SEM fotoğrafları **(a)** 2 saat (500X) **(b)** 2 saat (1000x) **(c)** 8 saat (1000X) **(d)** 8 saat (2000X).

Şekil 6.34 a, b, c, d, e, f'de ise Al7Si metal matriksin çeşitli sürelerde mekanik alaşımlama (MA) sonrasında sinterlenmesi ile oluşan yapılarının optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. 1 saat (MA) yapılan Al7Si bileşiminde başlangıç aşamasında dendrit oluşumu görülmektedir. 2 saat mekanik alaşımlama (MA) dendritik yapıların oluştuğu ve bunu takiben 4 saat mekanik alaşımlama (MA) sonucunda yapının homojen hale geldiği saptanmıştır. 8 saat mekanik alaşımlama (MA) sonrasında dendritik yapı tam olarak görülmektedir. 16 saat sonunda örülen yapının dağıldığı ve tekrar yapının homojen hale geldiği söylenebilir.



(a) (b)

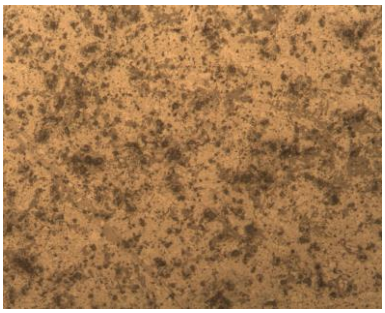
(c) (d)



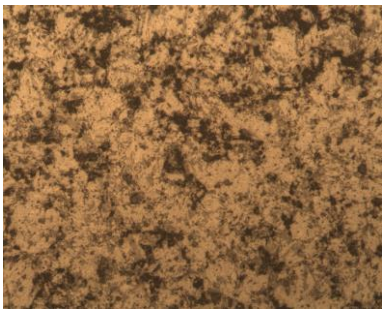
(e)

Şekil 6.34: Al7Si siteminin **(a)** 1 saat (200X) **(b)** 2 saat (200X) **(c)** 4 saat (200X) **(d)** 8 saat (200X) **(e)** 16 saat (200X) sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.

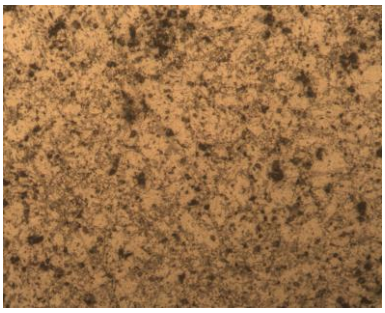
Şekil 6.34 a, b, c ve d'de çeşitli sürelerde mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-5B4C sistemine ait optik mikroskop (OM) görüntüleri verilmiştir.



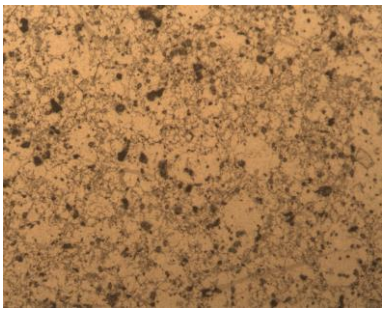
(a)



(b)



(c)

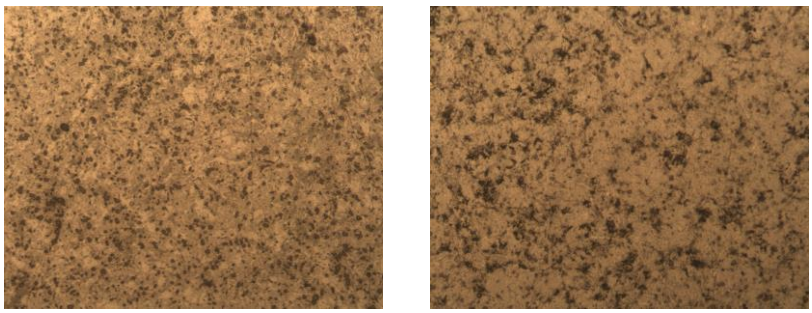


(d)

Şekil 6.35: Al7Si-5B4Csisteminin **(a)** 1 saat (200X) **(b)** 2 saat (200X) **(c)** 4 saat (200X) **(d)** 8 saat (200X) sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.

1 saat mekanik alaşımlama sonrasında homojen bir yapı elde edilemezken, ilerleyen mekanik alaşımlama süresi ile birlikte homojen yapıya ulaşılmıştır.

Şekil 6.36 a, b, c ve d'de çeşitli sürelerde mekanik alaşımlama (MA) yapılan Al7Si-10B4C sistemine ait optik mikroskop (OM) görüntüleri verilmiştir.



(a) (b)

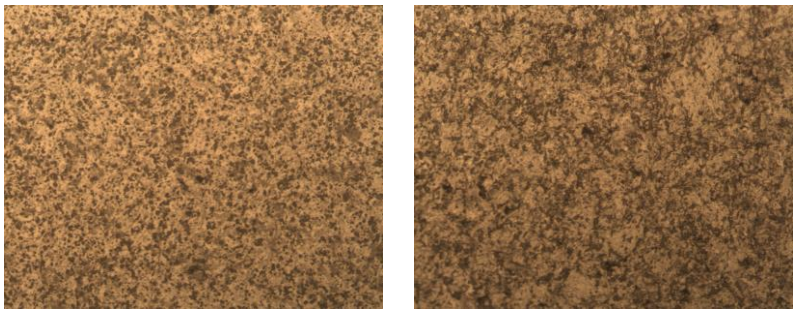


(c) (d)

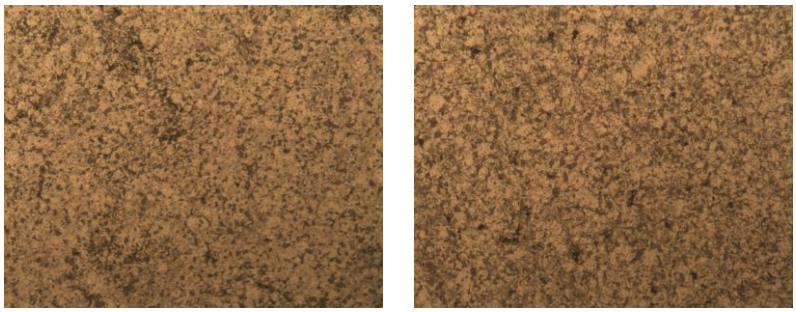
Şekil 6.36: Al7Si-10B4Csisteminin **(a)** 1 saat (200X) **(b)** 2 saat (200X) **(c)** 4 saat (200X) **(d)** 8 saat (200X) sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.

1 saat MA sonrasında homojen yapı görülmemektedir. Artan MA süresi ile yapı homojen hale gelmekte ve 8 saat MA sonrasında taneler görülmektedir.

Şekil 6.37 a, b, c ve d'de çeşitli sürelerde MA yapılan Al7Si-15B4C sistemine ait OM görüntüleri verilmiştir. Artan MA süresi ile birlikte tanelerin belirginliği daha fazla ortaya çıkmıştır. Yapıda homojenlik 4 saat MA sonrasında elde edilmektedir.



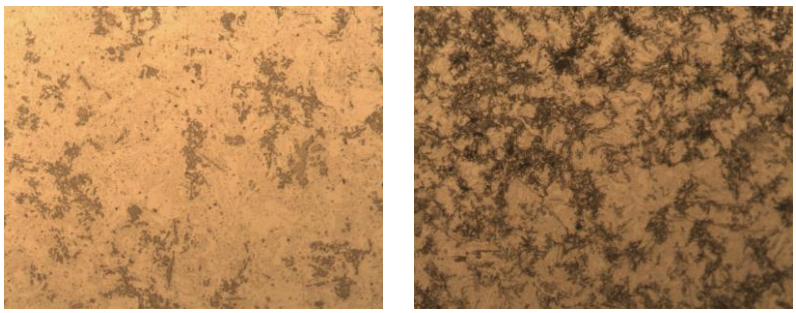
(a) (b)



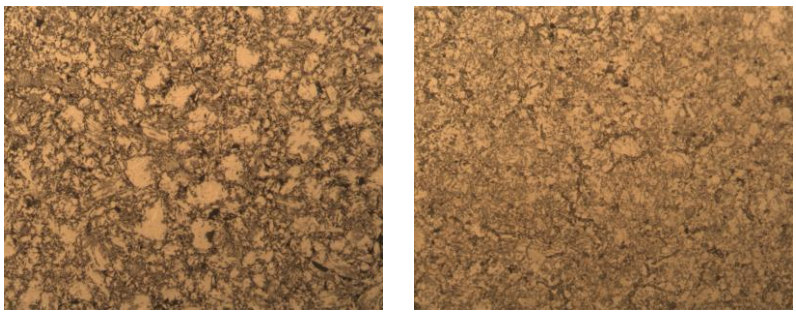
(c) (d)

Şekil 6.37: Al7Si-15B4Csisteminin **(a)** 1 saat (200X) **(b)** 2 saat (200X) **(c)** 4 saat (200X) **(d)** 8 saat (200X) sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.

Şekil 6.38 a, b, c ve d'de çeşitli sürelerde MA yapılan Al7Si-5ZrB2 sistemine ait optik mikroskop (OM) görüntüleri verilmiştir.



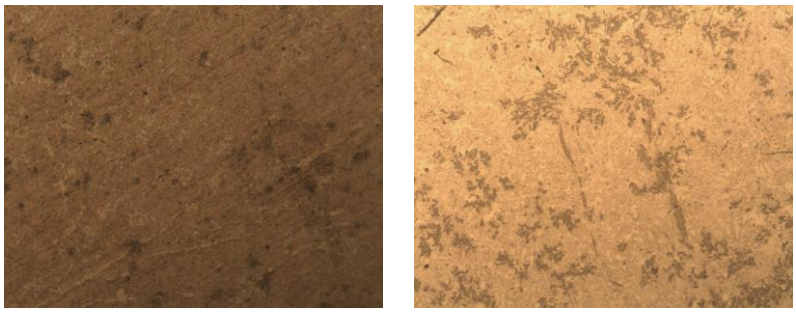
(a) (b)



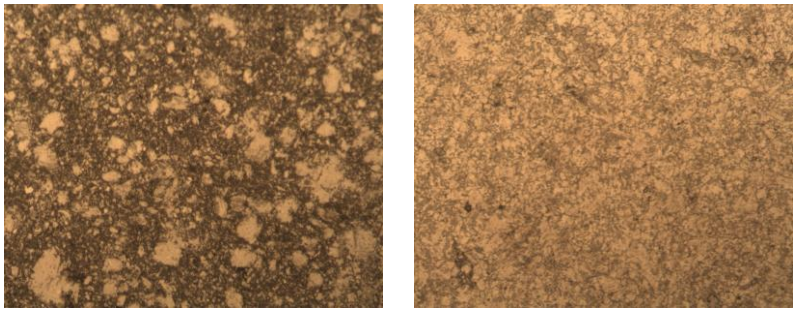
(d) (d)

Şekil 6.38: Al7Si-5ZrB sisteminin (a) 1 saat (200X) (b) 2 saat (200X) (c) 4 saat (200X) (d) 8 saat (200X) sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.

Şekil 6.39 a, b, c ve d'de çeşitli sürelerde MA yapılan Al7Si-10ZrB2 sistemine ait optik mikroskop (OM) görüntüleri verilmiştir.



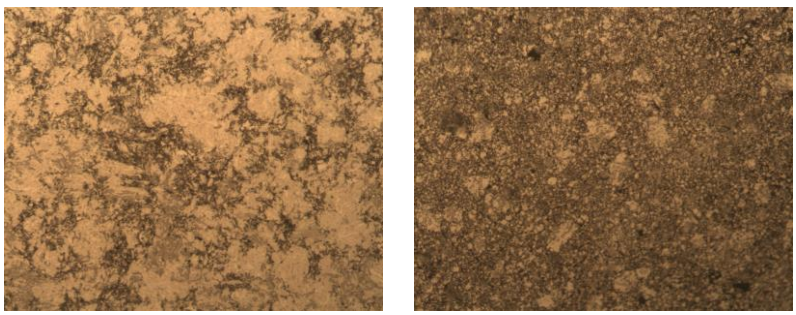
(a) (b)



(c) (d)

Şekil 6.39: Al7Si-10ZrB sisteminin (a) 1 saat (200X) (b) 2 saat (200X) (c) 4 saat (200X) (d) 8 saat (200X) sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.

Şekil 6.40 a, b'de çeşitli sürelerde MA yapılan Al7Si-15ZrB2 sistemine ait optik mikroskop (OM) görüntüleri verilmiştir.



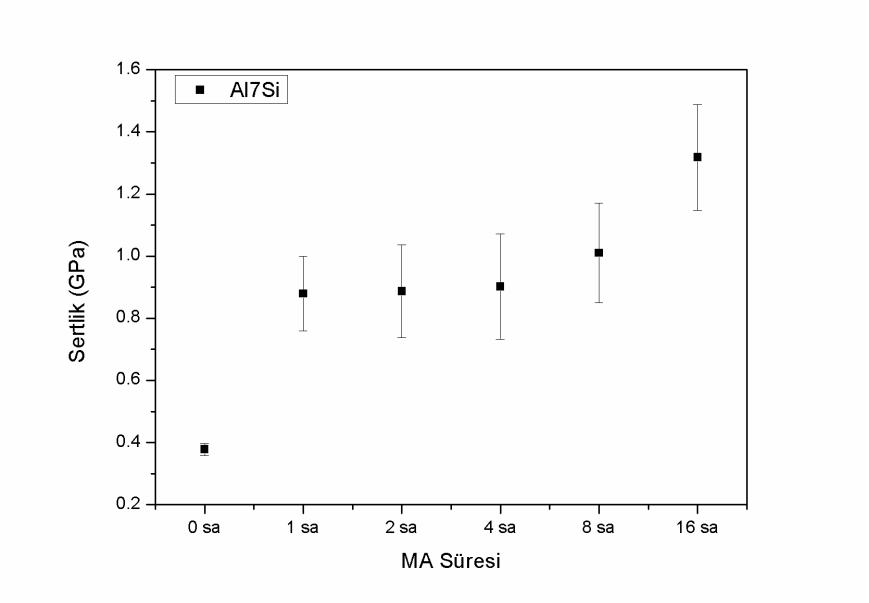
(a) (b)

Şekil 6.40: Al7Si-10ZrB sisteminin (a) 2 saat (200X) (b) 8 saat (200X) sinterleme sonrası optik mikroskop (OM) görüntüleri.

Çizelge 6.8 ve Şekil 6.41'de Al7Si matriks fazı için artan mekanik alaşımlama süresinin sertliğe etkisi görülmektedir.

Çizelge 6.8: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si numunelerinin sertlik değerleri.

Malzeme	Sertlik Değeri (GPa)	Standart Sapması
Al7Sİ (ab)	0.378	±0.3
Al7Sİ (1sa)	0.879	±1.2
Al7Sİ (2sa)	0.887	±1.5
Al7Sİ (4sa)	0.902	±1.7
Al7Sİ (8sa)	1.010	±1.6
Al7Sİ (16sa)	1.318	±1.7



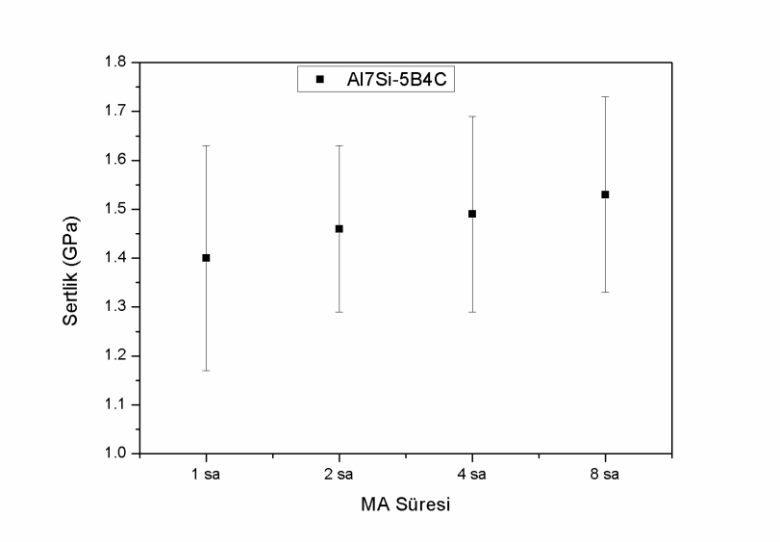
Şekil 6.41: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si numunelerinin sertlik değişimi.

Çizelge 6.9 ve Şekil 6.42, 6.43 ve 6.44'de Al7Si (5, 10, 15) B_4C kompozisyonunda da artan mekanik alaşımlama süresi ve pekiştirici miktarının sertliğe etkisi görülmektedir. Çizelgeden ve şekillerden MA süresi ve pekiştirici faz olan B_4C arttıkça kompozit malzemenin sertliğinin önemli oranda arttığı görülmüştür.

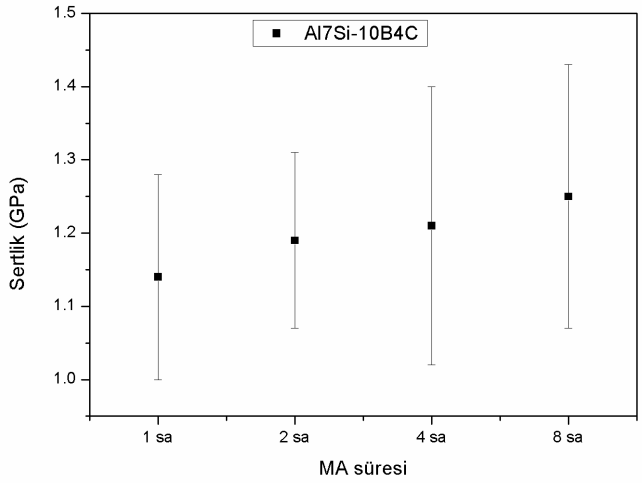
Çizelge 6.9: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-xB_4C numunelerinin sertlik değerleri.

Malzeme	Sertlik Değeri (GPa)	Standart Sapması
Al7Sİ- 5B_4C (1sa)	1.397	±1.3
Al7Sİ- 5B_4C (2sa)	1.459	±1.1
Al7Sİ- 5B_4C (4sa)	1.486	±1.8

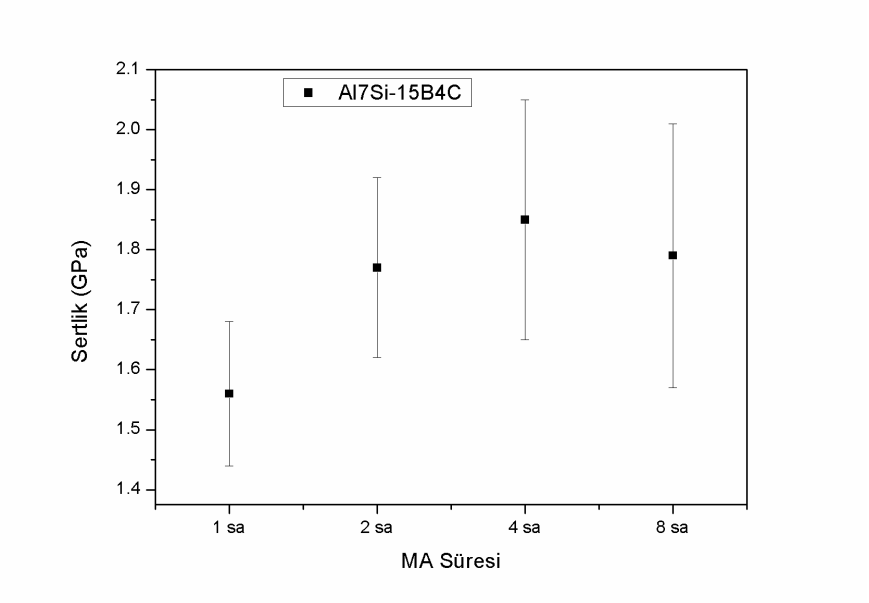
Al7Si- $5B_4C$ (8sa)	1.535	±1.6
Al7Si- $10B_4C$ (1sa)	1.140	±1.7
Al7Si- $10B_4C$ (2sa)	1.194	±1.7
Al7Si- $10B_4C$ (4sa)	1.206	±2.0
Al7Si- $10B_4C$ (8sa)	1.221	±1.6
Al7Si- $15B_4C$ (1sa)	1.406	±1.5
Al7Si- $15B_4C$ (2sa)	1.770	±1.4
Al7Si- $15B_4C$ (4sa)	1.780	±2.0
Al7Si- $15B_4C$ (8sa)	1.794	±2.2



Şekil 6.42: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-$5B_4C$ numunelerinin sertlik değişimi.



Şekil 6.43: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-$10B_4C$ numunelerinin sertlik değişimi.

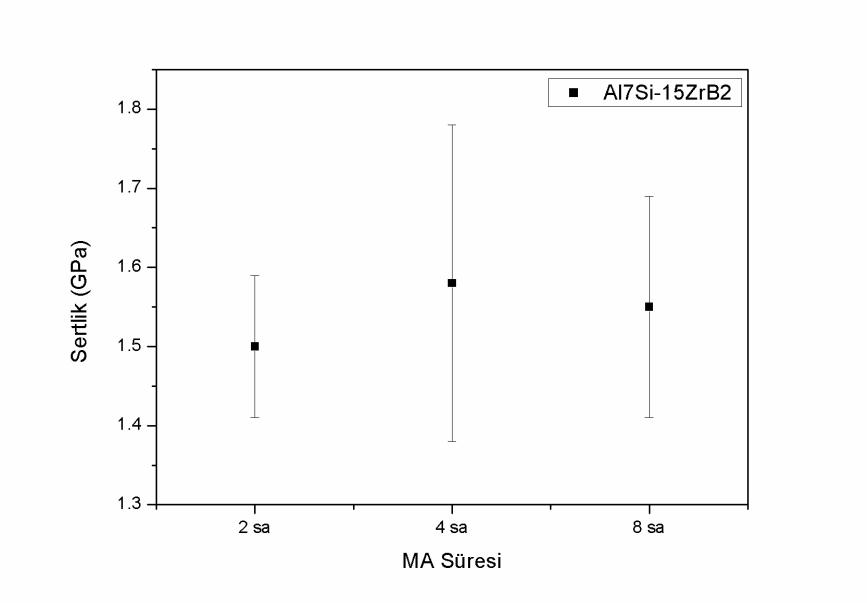


Şekil 6.44: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15B_4C numunelerinin sertlik değişimi

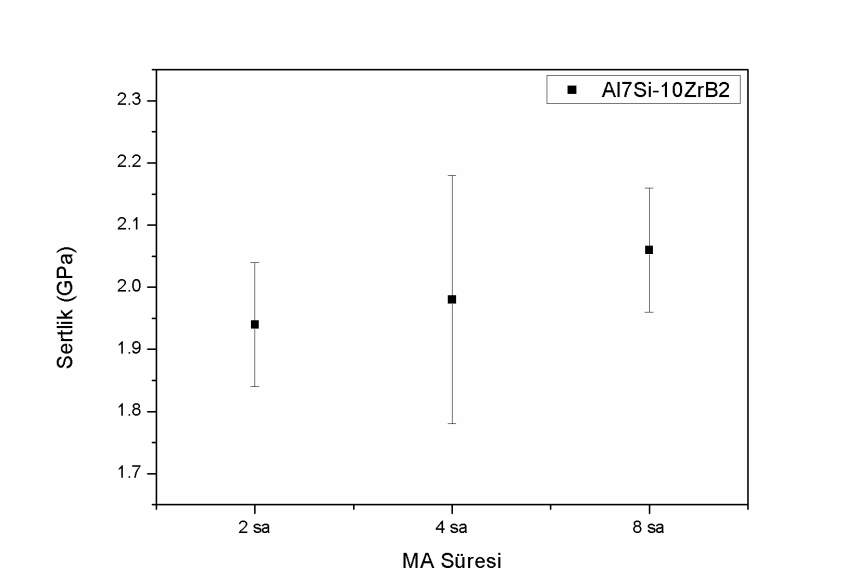
Çizelge 6.10 ve Şekil 6.45, 6.47 ve 6.47'de Al7Si (5, 10, 15) ZrB_2 kompozisyonunda da artan mekanik alaşımlama süresi ve pekiştirici miktarının sertliğe etkisi görülmektedir. Çizelgeden ve şekillerden MA süresi ve pekiştirici faz olan ZrB_2 arttıkça kompozit malzemenin sertliğinin önemli oranda arttığı görülmüştür.

Çizelge 6.10: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-7Si-x ZrB_2 numunelerinin sertlik değerleri.

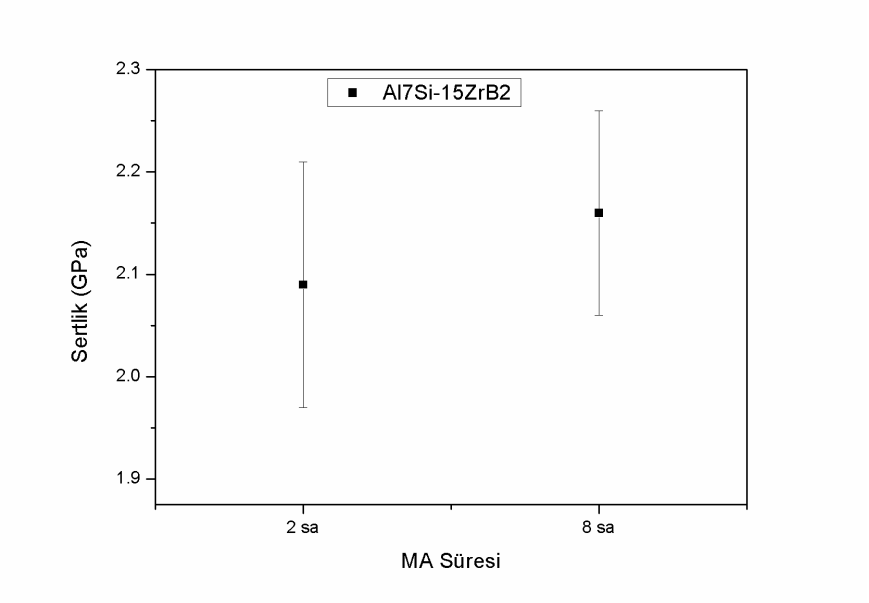
Malzeme	**Sertlik Değeri $HV_{0,05}$ (N/mm^2)**	**Standart Sapması**
Al7Si- 5ZrB_2 (2sa)	1.500	±1.9
Al7Si- 5ZrB_2 (4sa)	1.543	±1.9
Al7Si- 5ZrB_2 (8sa)	1.553	±1.4
Al7Si-10ZrB_2 (2sa)	1.939	±1.0
Al7Si-10ZrB_2 (4sa)	1.980	±1.8
Al7Si-10ZrB_2 (8sa)	1.963	±1.2
Al7Si-15ZrB_2 (2sa)	2.090	±2.1
Al7Si-15ZrB_2 (8sa)	2.165	±1.0



Şekil 6.45: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-5ZrB2 numunelerinin sertlik değişimi.

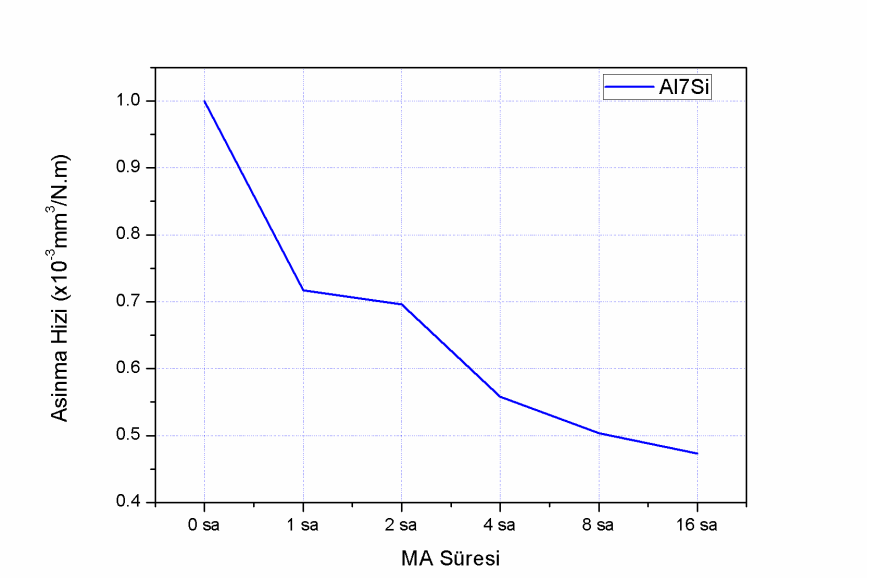


Şekil 6.46: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-10ZrB2 numunelerinin sertlik değişimi.



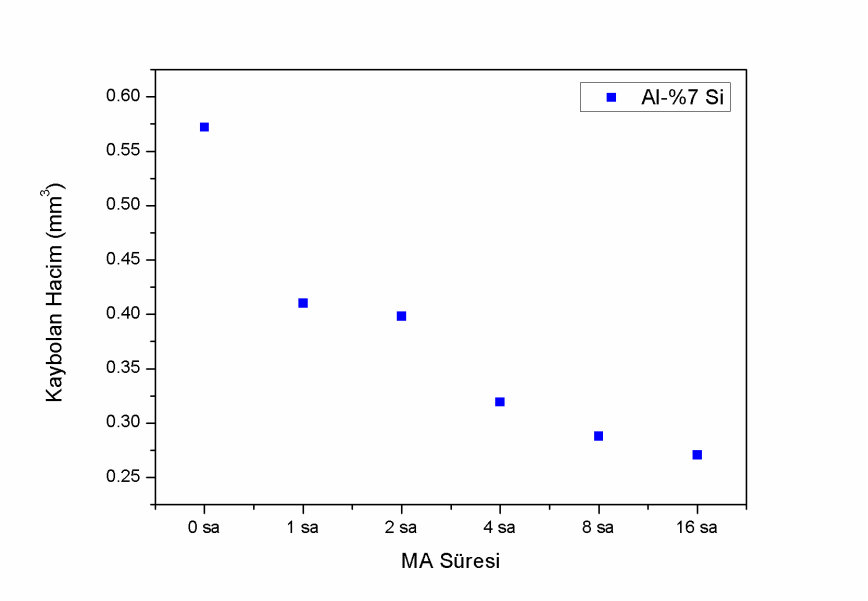
Şekil 6.47: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-15ZrB_2 numunelerinin sertlik değişimi.

Şekil 6.48 ve 6.49'da Al7Si numunelerine ait aşınma deneyi sonuçları görülmektedir. Şekil 6.48'de görüldüğü üzere aşınma hızının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile aşınma hızının oldukça azaldığı görülmektedir.



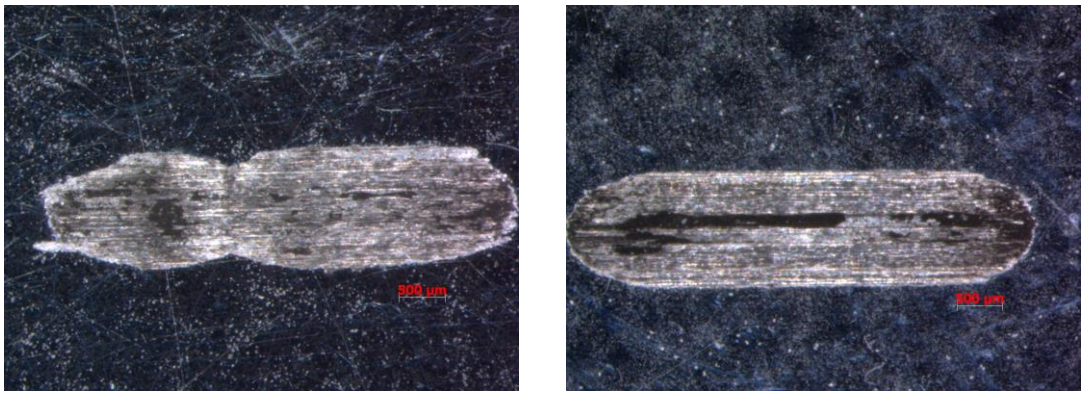
Şekil 6.48: Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-%7 Si numunelerinin aşınma hızı grafiği.

Şekil 6.49'de aşınma sırasında kaybolan malzeme miktarının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile kaybolan malzeme miktarının oldukça azaldığı görülmektedir.

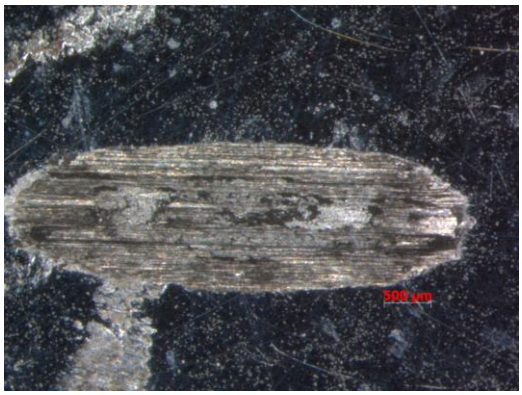


Şekil 6.49 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al-%7 Si numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.

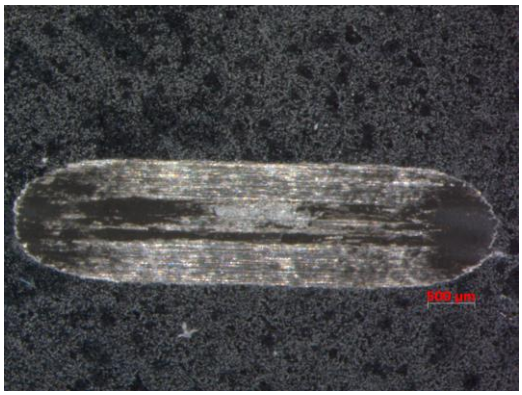
Şekil 6.50' de farklı sürelerde MA'lanmış Al7Si sistemine ait aşınma testi sonucunda oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri verilmiştir. İzler incelendiğinde çıkan aşınma testi sonuçlarına paralel olarak artan MA süresine bağlı olarak aşınma izlerinin boyutlarının ve şeklinin değiştiği görülmektetir. Artan MA süresi ile aşınma izi derinliği ve genişliği azalmaktadır.



(a) (b)



(c)



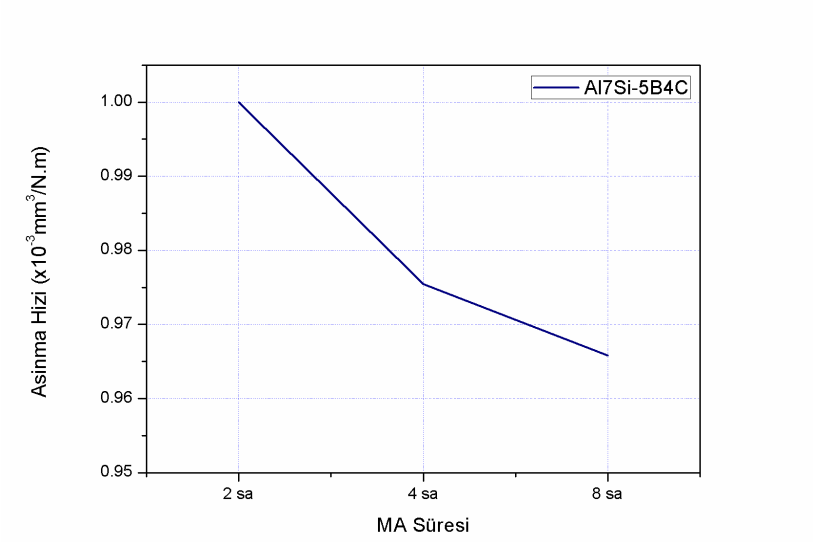
(d)



(e)

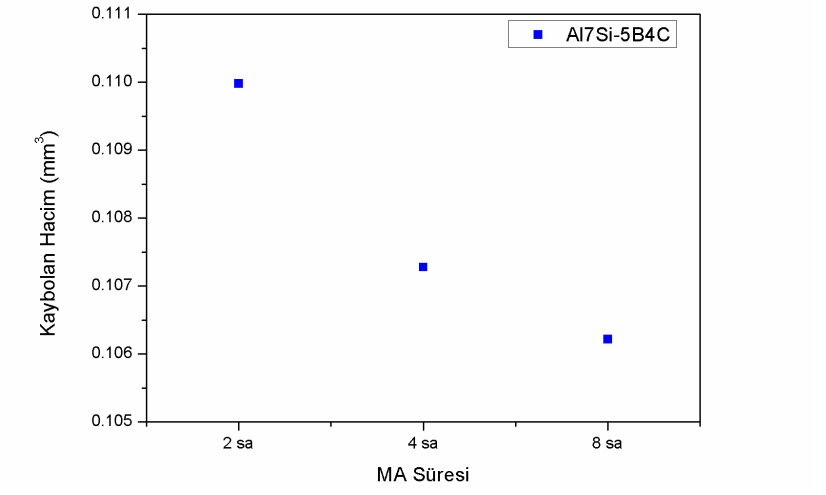
Şekil 6.50 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si numunenin aşınma sonrasındaki aşınma yüzeylerinin SEM fotoğrafları, 500X **(a)** 1 saat **(b)** 2 saat (**c)** 4 saat **(d)** 8 saat **(e)** 16 saat.

Şekil 6.51ve 6.52'de Al7Si-%5 B_4C numunelerine ait aşınma deneyi sonuçları görülmektedir. Şekil 6.51'de görüldüğü üzere aşınma hızının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile aşınma hızının oldukça azaldığı görülmektedir.



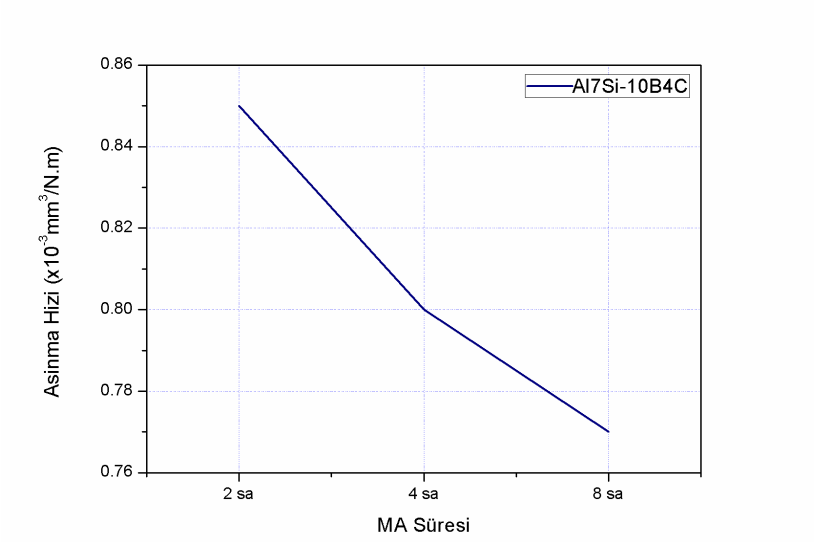
Şekil 6.51 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%5 B_4C numunelerinin aşınma hızı grafiği.

Şekil 6.52'de aşınma sırasında kaybolan malzeme miktarının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile kaybolan malzeme miktarının oldukça azaldığı görülmektedir.



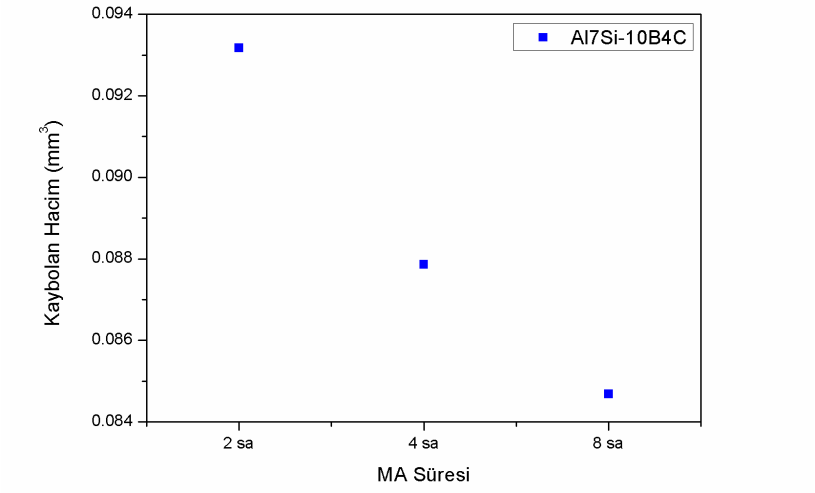
Şekil 6.52 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%5 B_4C numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.

Şekil 6.53 ve 6.54'de Al7Si-%10 B_4C numunelerine ait aşınma deneyi sonuçları görülmektedir. Şekil 6.53'de görüldüğü üzere aşınma hızının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile aşınma hızının oldukça azaldığı görülmektedir.



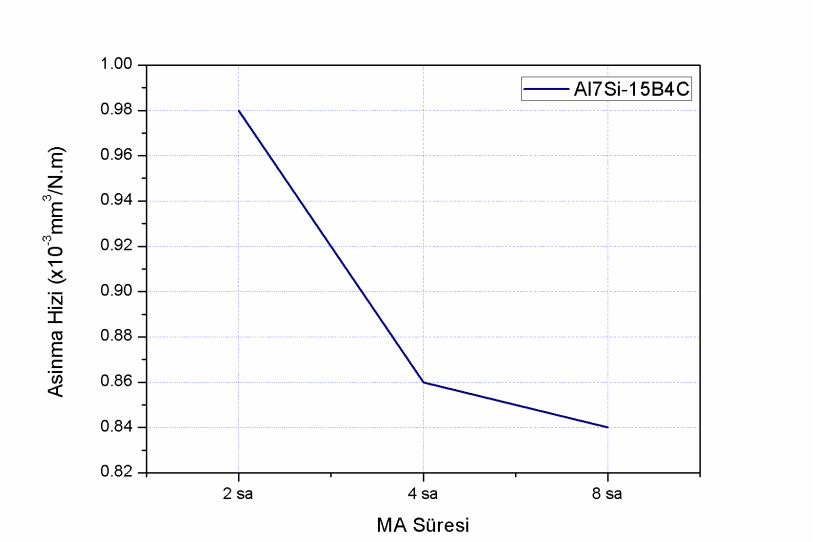
Şekil 6.53 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%10 B_4C numunelerinin aşınma hızı grafiği.

Şekil 6.54'de aşınma sırasında kaybolan malzeme miktarının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile kaybolan malzeme miktarının oldukça azaldığı görülmektedir.



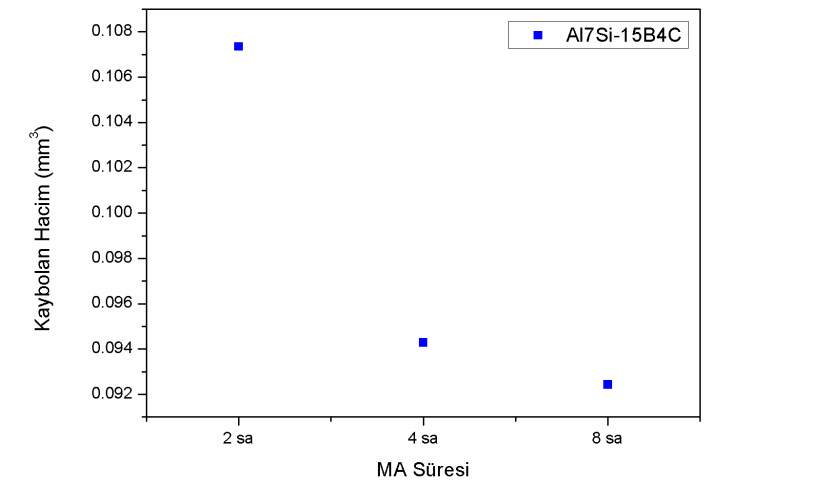
Şekil 6.54 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%10 B_4C numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.

Şekil 6.55 ve 6.56'da Al7Si-%15 B_4C numunelerine ait aşınma deneyi sonuçları görülmektedir. Şekil 6.55'de görüldüğü üzere aşınma hızının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile aşınma hızının oldukça azaldığı görülmektedir.



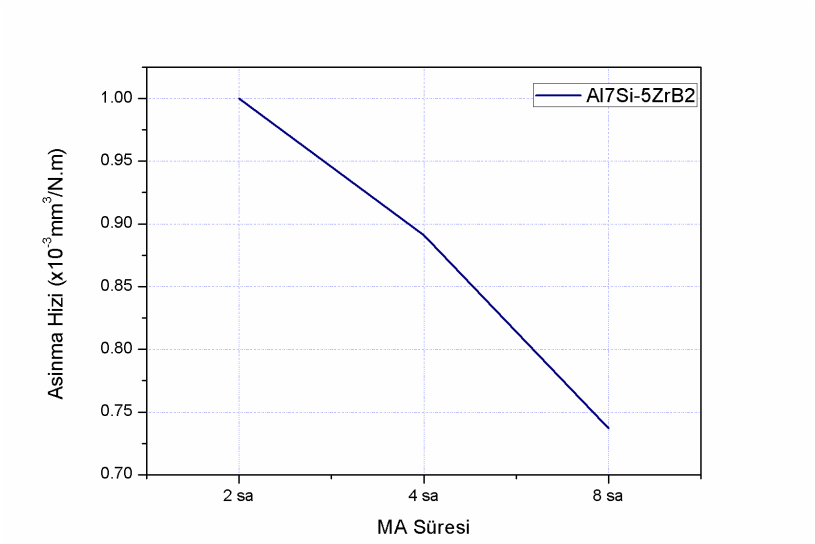
Şekil 6.55 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%15 B4C numunelerinin aşınma hızı grafiği.

Şekil 6.56'da aşınma sırasında kaybolan malzeme miktarının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile kaybolan malzeme miktarının oldukça azaldığı görülmektedir.



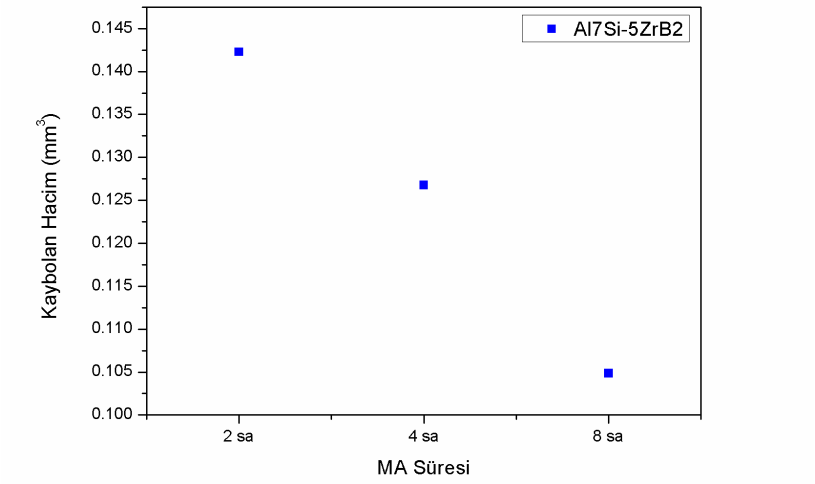
Şekil 6.56 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%15 B_4C numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.

Şekil 6.57 ve 6.58'de Al7Si-%5 ZrB_2 numunelerine ait aşınma deneyi sonuçları görülmektedir. Şekil 6.57'de görüldüğü üzere aşınma hızının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile aşınma hızının oldukça azaldığı görülmektedir.



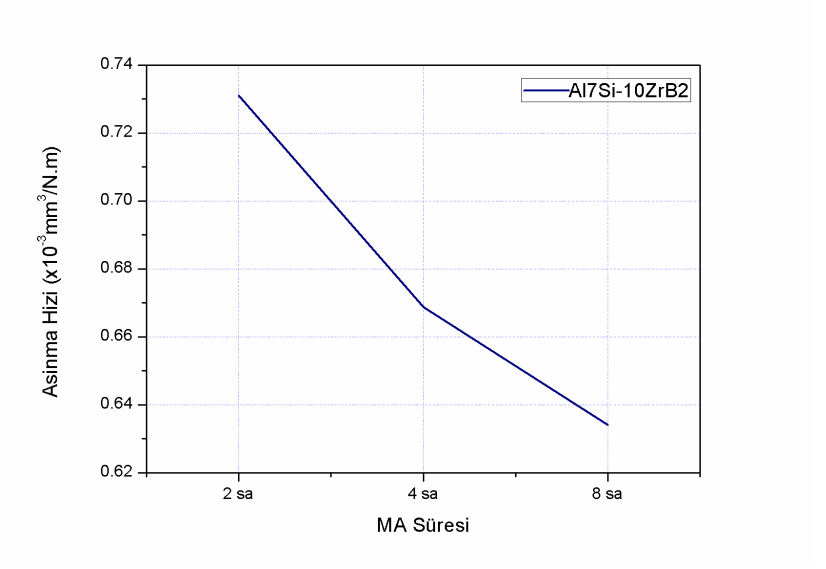
Şekil 6.57 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%5 ZrB_2 numunelerinin aşınma hızı grafiği.

Şekil 6.58'de aşınma sırasında kaybolan malzeme miktarının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile kaybolan malzeme miktarının oldukça azaldığı görülmektedir.



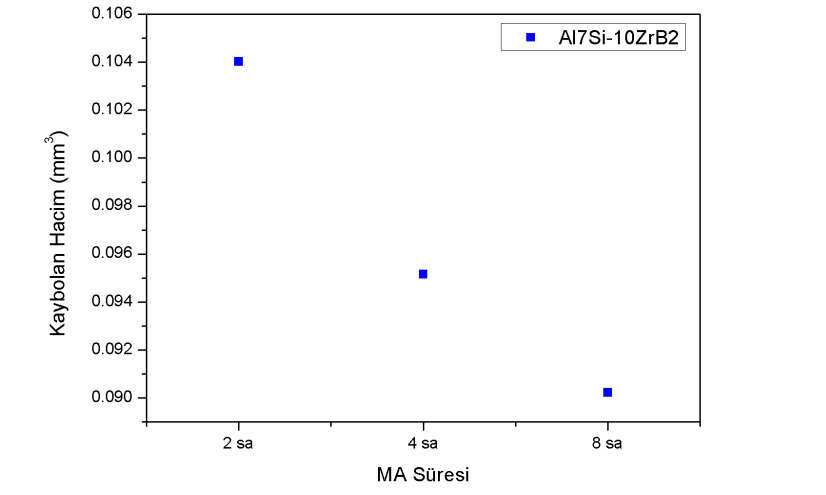
Şekil 6.58 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%5 ZrB_2 numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.

Şekil 6.59 ve 6.60'de Al7Si-%10 ZrB_2 numunelerine ait aşınma deneyi sonuçları görülmektedir. Şekil 6.59'da görüldüğü üzere aşınma hızının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile aşınma hızının oldukça azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.59 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%10 ZrB_2 numunelerinin aşınma hızı grafiği.

Şekil 6.60'da aşınma sırasında kaybolan malzeme miktarının artan MA süresiyle değişimi görülmektedir. Artan MA süresi ile kaybolan malzeme miktarının oldukça azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.60 : Çeşitli sürelerde MA'lanmış ve sinterlenmiş Al7Si-%10 ZrB_2 numunelerinin aşınma sonrasında kaybolan hacim değerleri.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

1. Mekanik alaşımlama ve yüksek enerjili öğütme işlemleri ile elementel ticari Al, Si, B_4C ve ZrB_2 tozları kullanılarak hazırlanmış Al7Si esaslı ve B_4C ve ZrB_2 katkılı metal matriks kompozit malzemeler toz metalurjisi yöntemiyle başarıyla üretilmiştir.
2. Tozlara uygulanan partikül boyut analizlerine göre mekanik alaşımlama başlangıcında tozların partikül boyut dağılımları başlangıç tozlarına yakın değerlerde iken yükek mekanik alaşımlama sürelerinde ortalama boyut beklentilerin tam tersi yönde 2-3 kat artmıştır.
3. Takviyelendirilmemiş toz metal matriks (Al7Si) mikrosertlik değerleri takviyelendirilmiş sistemlere oranla oldukça düşüktür. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile toz sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Yine aynı şekilde toz sistemlerinde takviye miktarının artmasına bağlı olarak Al7Si-xB_4C ve Al7Si-xZrB_2 sistemlerinin mikrosertlik değerlerinde artış tespit edilmiştir.
4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) resimlerinin incelenmesi sonucunda mekanik alaşımlama süresindeki artışa paralel olarak toz parçacık boyutlarında azalma ve şekil değişikliği gözlenmiştir.
5. Sinterlenmiş numunelerin mekanik alaşımlama sonrası X-ışınları difraksiyon paternleri incelendiğinde artan mekanik alaşımlama süresi ile birlikte, tüm difraksiyon paternlerindeki pikler genişlemiş ve pik yükseklikleri azalmıştır. Artan pekiştici fazlar olan B_4C ve ZrB_2 miktarına bağlı olarak sistemde bu fazlara ait olan pikler belirginleşmiştir.
6. Sinterleme sonrası kompozit malzeme sistemlerinin faz analizleri yapıldığında, toz malzeme sistemlerinde alınan sonuçlarla aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Alüminyum, silisyum ve silisyum karbür arasında bir tepkime gerçekleşmediği ve yeni bir faz ortaya çıkmadığı düşünülmektedir. Aynı şekilde XRD analiz sonuçlarına bakıldığında alüminyum, silisyum ve bor

karbür malzemeleri arasında da bir tepkime gerçekleşmediği ve yeni bir faz oluşumu görülmediği söylenebilir.

7. Sinterlenmiş numunelere yapılan SEM çalışmalarında numunelerde genel olarak üç farklı bölge gözlemlenmiştir. Bunlar daha açık renkte küresel olarak görülmekte olan Al, Si ve O'den oluşan yapı ve pekiştirici fazın bulunduğu bölgeler ve buna ek olarak resimlerde koyu renkte görülen Al'un bulunduğu bölgelerdir.
8. Sinterleme sonrası çeşitli sürelerde mekanik alaşımlama yapılan Al7Si matriks malzeme optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde dendtritik yapı oluşumu görülmüş, mekanik alaşımlama süresinin artışı ile bu yapılar görülmemeye başlanmıştır.
9. Sinterleme sonrasında sistemlerin yoğunluk değerleri ölçüldüğünde mekanik alaşımlama süresinin artmasına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.
10. Yapılan aşınma test sonuçlarına göre mekanik alaşımlama süresinin artmasına bağlı olarak aşınma oranlarında azalma meydana gelmiştir.
11. Bu çalışma sonucunda toz metalurjisi yöntemi ile katı hal sinterlemesi ile Al7Si metal matris kompozitleri B_{4C} ve ZrB_2 sert seramik pekiştiricileri ilave edilerek veya edilmeden üretilebilmiştir.

Mevcut MA sistemlerinde çok az miktarda olan toz öğütme işleminin çok daha fazla tozu kısa sürede öğütebilecek sistemlerde deneme yapılarak optimizasyon işlemleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1**]Chan, R.W., Haasen, P. ve Kramer, E.J**.(1993).Structure and properties of composites,*Materials Science and Technology*,**13**,1-339.

[2]**Jacobs, A.J. ve Kilduff, T.F.**(2005).Engineering Materials Technology: Structure,Processing, Properties and Selection,5. Edition,Prentice-Hall Inc.,USA.

[3]**İnem, B.**(1993)**.***The development of the structures and properties of magnesium matrix silicon carbide reinforced composites*, (doktora tezi), School of Materials, University of Leeds, England, Leeds.

[4]**Ibrahim, I.A., Mohamed, F.A. ve Lavernia, E.J.**(1991).Particulate Reinforced Metal Matrix Composites-a review,*Journal of Materials Science*,***26***,1137-1156.

[5]**Askeland, D.R.**(1998).The Science and Engineering of Materials,Nelson Thornes Ltd.,United Kingdom.

[6]**Callister, W.D-Jr.**(2000).Materials Science and Engineering: An Introduction,Wiley,New York.

[7]**Chen, I.W.**(2000).Low Temperature Processing and Kinetics of Ceramics and Ceramic Matrix Composites with Large Interfacial Areas Department of Energy, Basic Energy Sciences,Final Technical Report, Philadelphia,USA.

[8]**Clyne, T.W.**(2001).Metal Matrix Composites:Matrices and Processing,in Encyclopaedia of Materials: Science and Technology,Ed. Mortensen, A.,Elsevier.

[9]**Demirkesen, E.**(2003).Kompozit Malzemeler Ders Notları,İstanbul Teknik Üniversitesi.

[10]**Totten, G.E., Xie, L., ve Funatani, K.**(2004).Handbook of Mechanical Alloy Design,Marcel Dekker Inc., New York.

[11]**Ersoy H.Y.**(2001).Kompozit Malzeme,Literatür Yayınları,İstanbul.

[12]**Şahin, Y.**(2000).Kompozit Malzemelere Giriş,Gazi Üniversitesi,Gazi Kitapevi,Ankara.

[13]**Schwartz, M.M.**(1996).Composites Materials:Volume I, Prentice Hall PTR,Upper Saddle River, New Jersey, 10-42.

[14]**Atik, E., Ünlü, S.B., Sen, O. Ve Çavdar, U.**(2006).Partikül Takviyeli AlSi12CuNiMg Kompozitinin AŞınma Dayanımı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,C.B.Ü Fen Bilimleri Dergisi, 2,75-87.

[15]**Gökçe H.**(2013).Mekanik Alaşımlama Süreçleri ile Alüminyum Esaslı Toz ve Sinter Malzemelerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları,Yüksek Lisans Tezi,İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[16]**Sınmazçelik, T.**(2003).Kompozit Malzemeler Ders Notları,Kocaeli Üniversitesi,Kocaeli.

[17]**Smith, W.F.**(2001).Malzeme Bilimi ve Mühendisliği,Literatür Yayıncılık,İstanbul

[18]**Tanoğlu, M.,Seyhan, A.T. veÜnaler, E.**(2004).Çok Fonksiyonlu/Çok Tabakalı Kompozit Hafif Zırh Malzemelerinin Proses Ve Karakterizasyonu,Savtek 2004,Savunma Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı.

[19]**Cöcen, Ü. ve Önel, K.**(1996).Metal Matrisli Kompozitler:Özellikleri ve Uygulamaları,Metalurji Dergisi ,20,104:18-31.

[20]**Kainer, K.U.**(2006).Metal Matrix Composites-Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering,WILEY Publishing,Weinheim.

[21]**Beffort, O.**(2002).Metal Matrix Composites:Properties, Applications and Machining,EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Research.

[22]**Günay, M.**(2009).Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-Si/SiCp Kompozitlerin Mekanik İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması,Doktora Tezi,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara.

[23]**Eliasson, J. Ve Sandstrom, R.**(1995).Applications of Alüminum Matrix Composites,Metal Matrix Composites Part I:Applications and Processing,Hobbs The Printers Ltd,U.K,58-94.

[24]**Acılar, M**.(2002).Al/ SiC Kompozitlerin Vakum İnfilitrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması,Doktora Tezi,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara.

[25]**Lindroos, V.K. ve Talvite, M.J.**(1995).Recent advances in metal matrix composites,*Journal of Materials Processing Technology*,***53,*** 273-284.

[26]**Bahçeci, E.**(2006).Al Matrisli α-Si3N4 Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi Ve İşlenebilirliğinin Karakterizasyonu,Yüksek Lisans Tezi,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara.

[27]**Barea, R., Belmonte, M., Osendi, M.I. ve Miranzo, P.**(2003).Thermal conductivity of Al_2O_3/SiC platelet composites,*Journal of the European Ceramic Society*,***23***,1773-1778.

[28]**Belmonte, M. Ve Miranzo, P.**(1997).Al_2O_3/SiC Platelet Composites: Effect of Sintering Conditions,*Journal of the European Ceramic Society*,***17***,1253-1258.

[29]**Akdoğan, A.**(2005).Makine Malzemelerinde Korozyon ve Yüzeysel Koruma,Yüksek Lisans Ders Notu,Yıldız Teknik Ü.,İstanbul.

[30]ASM International Handbook Committee,(2002).Composites,ASM Handbook Vol.21.

[31]**Aran, A.**(1997).Metal Matrisli Kompozit Malzemeler Alanında Yeni Gelismeler,MAMKON 97,*1.Makine Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı*,368-372.

[32]**Bedir, F. Ve Ögel, B.**(2004).SiCp Katkılı Al Kompozitlerin Sertlik, Mikroyapı Özellikleri ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi,11.Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi Bildiriler Kitabı.

[33]**Güleryüz, K.**(2011).Deformasyon Yaşlanmasının AA7075 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Ve Aşınma Davranışına Etkisi,Yüksek Lisans Tezi,Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Karabük.

[34]**Kocabıçak, G.**(1996).Malzeme Seçiminde Bilgi Tabanlı Sistemler Ve Alüminyum Döküm Alaşımlarına Uygulanması,Yüksek Lisans Tezi,Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Sakarya.

[35]**Sun Y.**(1998).Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları,Yüksek Lisans Tezi,İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[36]**Büyükdoğan, S**.(2011).Yaşlandırılan Al-Mg-Si Alaşımının Aşınma Savranışlarının İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi,Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Karabük.

[37]**Yıldırım, M.**(2012).Al-Si-Mg Alaşımlarında Mg Oranının Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi,Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Karabük.

[38]**Güleç, S. ve Aran, A**.(1995).Malzeme Bilgisi-Cilt II,İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi.

[39]**Can, A.Ç**.(2006).Makine Tasarımcıları İçin Malzeme Bilgisi,Birsen Yayınevi,İstanbul.

[40]**Toptan, F**.(2006).Alüminyum Matrisli B_4C Takviyeli Kompozitlerin Döküm Yöntemi İle Üretimi,Yüksek Lisans Tezi,Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[41]**Davis, J. R.**(1996).ASM Speciality Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys,ASM International,Materials Park,Ohio,USA.

[42]**Url-1** < http://www.world-aluminium.org/> alındığı tarih 12.03.2014.

[43]**Zeytin, H. K.**(2000).Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği,TMAM,OSD,Kocaeli,Türkiye.

[44]**Çolak, N. Y.**(2011).B_4C Takviyeli Al-Si Alaşımlarının Yarı katı-Sıvı Aralığında Şekilldendirilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi,Yüksek Lisans Tezi,Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Elazığ.

[45]**Dutdibi C.**(2011).Mekanik Alaşımlama ve Sinterleme Süreçleriyle Al12Si-xSiC ve Al12Si-xB4C (X = ağırlıkça %5, %10 ve %15) Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları,Yüksek Lisans Tezi,İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[46]**Altun, F.**(2005).Bor, BOREN Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü,Ankara,7-8,12,14,23,37-39.

[47]**Url-2**, < http://www.concentric.net/> alındığı tarih 12.03.2014.

[48]TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 2003, Bor rapor, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi, 134: 11-14, 17-19, Ankara.

[49]**Thevenot, F.**(1990).Boron carbide-A comprehensive review,*Journal of European Ceramic Society*,205-225.

[50]**Mori, T.**(2007). Handbook on the physics and chemistry of rare earths,Chapter 238,Higher Borides,**38**, 105-173.

[51]**Raman, V., Bhatia, G., Mishra, A., Sengupta, P.R. ve Rashmi, M.S**.(2005).Development of carbon–ceramic composites,*Materials Science and Engineering:* **A,412,**1-2, 5,31-36.

[52]**Sarıkaya, Ö.**(2003).Al-12Si Malzeme üzerine plazma püskürtme tekniği ile Al-Si+B_4C kaplama, Doktora Tezi,Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Sakarya.

[53]**Mary T.S.**(1994).Boron carbide,*Minerals Review*,**6**,113-115.

[54]**Pyzik, A.J. ve Aksay, I.A.**(1987).Multipurpose boron carbide-alüminum composite and its manufacture via the control of the microstructure,United States Patent,No:4702770.

[55]**Büyükuncu, G.**(2000).Bor karbür/silisyum karbür kompozitlerinin üretimi,Yüksek Lisans Tezi,İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[56]ETİ Holding A.Ş. Genel Müdürlüğü Planlama ve Bilgi İşlem Dairesi Başkanlığı,2003, Bor karbür ön fizibilite etüdü, ETİ Holding A.Ş., 4, 5, 7, 9, 10, Ankara.

[57]**Url-3 <** http://www.feldinternational.com/>

[58]**Url-4 <** http://sites.securemgr.com>

[59]**Yetgin, S.H., Köken, A., Aydın, M. ve Ünal, R.**(2005).Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilmiş Al-B_4C MMK'lerde Karıştırıcı Tipi ve Takviye Oranının Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi,4. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı,Sakarya,622-631.

[60]**Lee, B.-S. ve Kang, S.**(2001).Low-temperature Processing of B_4C-Al Composites Via Infiltration Technique,Materials Chemistry and Physics,67:249-255.

[61]**Akkaş, B.**(2010).Kendiliğinden İlerleyen Yüksek Sıcaklık Sentezi Yöntemi ile Zirkonyum Diborür Üretimi,İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul.

[62]**German, R.M.**(2007).Powder Metallurgy & Particulate Materials Processing,MPIF,New Jersey,4-272.

[63]**Groover, M.P.**(1996).Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems,Prentice-Hall Inc.,New Jersey,USA,251-639.

[64]**Eksi, A.K. ve Yüzbasıoglu, A.H.**(2005).Sintering Of Cold Isostatically Pressed Metalic Powders,4th International Powder Metallurgy Conference,Sakarya,406-414.

[65]**Türker, M., Özdemir, T.A., Ögel, B. ve Yavuz, A.**(1999).Al-SiC tozlarının mekanik alaşımlama değirmeninde öğütme zamanının kompozit toz yapısına etkisinin araştırılması,2. Ulusal Toz Metalujisi Konferansı,Ankara,425-431.

[66]**Sarıtas, S.**(1994).Toz Metalurjisi-Bilesik Gereçler-Seramikler,Makina Mühendisligi El Kitabı,Makina Mühendisler Odası Yayınları,1: 64-115.

[67]**Newkirk, J.W. ve Kosher, R.A.**(2004).Designing with Powder Metallurgy Alloys,Handbook of Mechanical Alloy Design,Eds. Totten, G.E., Xie, L. and Funatani, K.M., Dekker,New York.

[68]**Suryanarayana, C., Ivanov, E. ve Boldyrev, V.V.**(2001).The Science and Technology of Mechanical Alloying,*Materials Science and Engineering A*,**304-306,**151-158.

[69]**Suryanarayana, C.**(2001).Mechanichal alloying and milling,*Progress in Materials Science*,**46**,1-184.

[70]**Yılmaz,T.A.**(2013).AA 2014/Al_2O_3 metal matrisli kompozitin mekanik alaşımlama yöntemi ile üretimi ve yaşlandırılabilme özelliklerinin araştırılması,Yüksek Lisans Tezi,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Ankara.

[71]**Suryanarayana, C.**(2004).Mechanical alloying and milling,Marcel Dekker, New York, 1-466.

[72]**Carter, B.C. ve Norton, M.G.**(2007).Ceramic Materials Science and Engineering, Springer, New York, 427-461.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Berna KAYA

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 17.11.1983

E-Posta: bernakaya83@gmail.com

Lisans: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fizik Bölümü (2002-2007)

Mesleki Deneyim:

10/2010 – 04/2012	SİNTER METAL A.Ş. – Kalite Kontrol Müdürü
10/2008 – 10/2010	SİNTER METAL A.Ş. – Üretim Mühendisi
06/2007 – 09/2008	SEVİYE DERGİSİ DERSHANESİ – Fizik Öğretmeni