

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANO B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM
MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ**

**Tezi Hazırlayan
Hakan UMUR**

**Tezi Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Haziran 2017
NEVŞEHİR**

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANO B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM
MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ**

**Tezi Hazırlayan
Hakan UMUR**

**Tezi Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

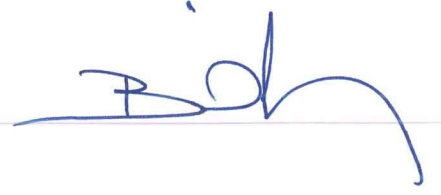
**Haziran 2017
NEVŞEHİR**

KABUL VE ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Bülent KURT danışmanlığında Hakan UMUR tarafından hazırlanan “**Nano B₄C Partikül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

Başkan : Doç. Dr. Bilal DEMİREL



Üye : Prof. Dr. Bülent KURT



Üye : Yrd. Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun **3.15/2017...** tarih ve **...20-150**..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.19 / 03 / 2017



Enstitü Müdürü
Doç. Dr. Bayram DEVİREN
Enstitü Müd. Yrd.

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hakan UMUR



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam esnasında yardımlarını esirgemeyen başta danışman hocam Prof. Dr. Bülent KURT ve Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniwersitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Öğretim üyelerine ve Lisans Üstü alışma yapan arkadaşlarıma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yapmış olduğum bu tez çalışmasına maddi destek sunan Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniwersitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimine sonsuz teőekkürlerimi sunarım.



NANO B₄C PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hakan UMUR

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2017

ÖZET

Bu çalışma başlangıç itibariyle ortalama 20µm B₄C partiküllerinin planetary tipi öğütücü ile nano boyutlu partiküllere indirilmesiyle başlamıştır. Daha sonra öğütülen bu nano boyutlu toz partikülleri toz Etial 141 alaşımıyla aynı öğütücü tipiyle toz metalürjisinin üretim yöntemlerinden biri olan mekanik alaşımlama yöntemiyle öğütülmüştür. Bu öğütme esnasında alüminyum alaşımının içerisine %3, %5, %10, %15, %20 oranlarında B₄C nano partikülleri ilave edilmiştir. Bu işlem her ilavede 3 saat boyunca gerçekleştirilmiştir. Mekanik alaşımlama işleminde Etial 141 alaşımıyla bağ oluşturan nano B₄C partikülleri 540°C altında sıcaklıkla sıcak presle sıkıştırıldıktan sonra nano B₄C katkılı kompozit malzeme numuneleri üretilmiştir. Sıcak preste 350 MPa yük uygulanmıştır. Üretimden sonra kompozit malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri optik mikroskop, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve XRD(X Işınları Kırınımı) cihazlarıyla incelenmiştir. Yapılan incelemede nano partiküllerin alüminyum alaşımı tozların içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin sertliklerine sertlik ölçme cihazında bakılmıştır. Tozların sertlikleri artan takviye malzemesiyle artmıştır. Malzemelerin mikro yapı özelliklerinin incelenmesi SEM cihazıyla, mekanik özelliklerini belirlemek için ise çekme ve sertlik deneyleri yapılmıştır. Netice itibariyle üretilen kompozit malzemelerinin çekme ve sertlik değerleri ilave edilen takviye malzemesinin miktarıyla değişmiştir.

Anahtar kelimeler: Nano, B₄C, Alüminyum Matris, kompozit.

Tez Danışman: Prof. Dr. Bülent KURT

Sayfa Adedi: 66

NANO B4C PARTICLE-REINFORCED ALUMINUM MATRIX COMPOSITE PRODUCTION

(M. Sc. Thesis)

Hakan UMUR

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNİVERSİTY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2017

ABSTRACT

This work was initiated at the start by lowering to nano-sized particles from the average 20 μ m B4C particles by a planetary type mill. These nano-sized powder particles, which are then milled, are milled by the mechanical alloying method, which is one of the methods of manufacturing powder metallurgy with the same mill type of powdered Etial 141 alloy. During this grinding, 3%, 5%, 10%, 15%, 20% B4C nanoparticles were added into the aluminum alloy. This process was carried out for 3 hours for each addition. In the mechanical alloying process, the nano B4C particles forming the bond with the alloy of Etial 141 were compacted by hot pressing under a temperature of 540 °C and then samples of nano B4C doped composite material were produced. 350 MPa load applied in hot press. Physical and chemical properties of composite materials after production were investigated with optical microscope, SEM (Scanning Electron Microscope) and XRD (X-Ray Diffraction) devices. It was observed that the nanoparticles were homogeneously dispersed in the aluminum alloy powders. The hardness of the produced composite materials was examined in the hardness measuring device. The hardness of the powders is increased by the reinforcing material. The microstructural properties of the materials were examined by SEM device and the tensile and hardness tests were carried out to determine the mechanical properties. As a result, the tensile and stiffness values of the composite materials produced are varied by the amount of reinforcement material added.

Keywords: Nano, B₄C, Aluminum Matris, Composite.

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Bülent KURT

Page Number: 66

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI.....	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar LİSTESİ	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. Kompozit Malzemeler	3
2.1.1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları	3
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.2.1. Matris malzemesinin türüne göre kompozit malzemeler	4
2.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler.....	4
2.2.1.2. Metal matrisli kompozitler	5
2.2.1.3. Seramik matrisli kompozitler	5
2.2.2. Takviye malzemelerinin şekline göre kompozit malzemeler.....	5
2.2.2.1. Partikül (Parçacık) takviyeli kompozitler	6
2.2.2.2. Fiber elyaf takviyeli kompozitler	6
2.2.2.3. Tabaka yapılı kompozitler.....	6
2.2.2.4. Dolgu yapılı kompozitler	6

2.4. Matris Malzemeleri	6
2.4.1. Alüminyum ve alaşımları	7
2.4.2. Magnezyum ve alaşımları	7
2.4.4. Bakır ve alaşımları	8
2.5. Takviye Malzemeleri.....	8
2.5.1. Alümina	8
2.5.2. Silisyumkarbür	9
2.5.3. Borkarbür	9
2.6. Nano Kompozitler ve Nano Malzemeler	10
2.6.1. Nano parçacıklar	11
2.6.2. Nano kompozitlerin özellikleri.....	11
2.6.3. Nano kompozitlerin uygulamaları.....	12
2.6.4. Sertlik ve mukavemet.....	12
2.6.5. Sinterlenebilirlik	13
2.6.6. Yoğunluk	14
2.7. Metal Matrisli Nano Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	14
2.8. Toz Metalürjisi	18
2.8.1. Toz metalürjisinin avantaj ve dezavantajları.....	19
2.8.2. Metal tozların üretimi	20
2.8.2.1. Atomizasyon yöntemi	21
2.8.2.2. Kimyasal yöntemler	25
2.8.2.3. Elektrolitik ayrıştırma yöntemleri	27
2.8.2.4. Mekanik yöntemler	28
2.8.3. Tozların preslenmesi	29
2.9. Mekanik Alaşımlama	31

2.9.1. Sünek – sünek sistem	34
2.9.2. Sünek – gevrek sistem.....	35
2.9.3. Gevrek – gevrek sistem.....	36
2.9.4. Kullanılan öğütücü türleri	37
2.9.4.1. Spex tipi öğütücü.....	37
2.9.4.2. Planetary tipi öğütücü.....	38
2.9.4.3. Attritör tipi öğütücü.....	39
2.9.5. Öğütme tipi.....	40
2.9.6. Öğütme hızının etkisi	40
2.9.7. Bilye/toz ağırlık oranı.....	41
BÖLÜM 3	42
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
3.1. Giriş	42
3.2. Kompozit Üretimi İçin Kullanılan Malzemeler	42
3.3. Nano B ₄ C Üretimi	44
3.4. Mekanik Alaşımlama İşlemi	45
3.5. Sıcak Presleme Yöntemiyle Kompozit Üretimi	45
3.6 Optik Mikroyapı ve SEM Analizi	47
3.7. X- Işınları Analizi (XRD)	48
3.8. Mikrosertlik Ölçümü	49
3.9. Metalografi Çalışmaları.....	49
BÖLÜM 4	51
DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	51
4.1. Giriş	51
4.2. Üretilen Kompozit Malzemelerin Optik Mikro Yapı Görüntülerinin İncelenmesi..	51

4.3. Üretilen Kompozit Malzemelerin Sem Mikro Yapı Görüntülerinin İncelenmesi....	54
4.4. Üretilen Kompozit Malzemelerin EDX Analizi.....	57
4.5. Üretilen Kompozit Malzemelerin Mikrosertlik Analizi.....	59
4.6. Üretilen Nano ve Mikron B ₄ C Kompozit Malzemelerin Mikroyapı Karşılaştırması	160
4.7. XRD Analiz Sonuçları	62
KAYNAKLAR.....	64



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Etial 141' kimyasal kompozisyonu (% ağırlık) [34].	43
Tablo 3.2. B4C Tozlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri [35].	44
Tablo 3.3 Etial 141'in fiziksel ve mekanik özellikleri [36].	44
Tablo 4.1. Üretilen Kompozit Numunelerin Mikrosertlik Analiz Sonuçları	59



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kil tanecikleri takviye edilmiş polimerik kompozit yapı [8].	4
Şekil 2.3. Si nano parçacıklar [19].	11
Şekil 2.4. Sinterleme sırasında meydana gelen olayların şematik gösterimi[22].	14
Şekil 2.5. Sprey proliz damlacık-partikül dönüşüm mekanizması[23].	15
Şekil 2.5. Sıvı matrisin gözenekli bir yapıda şematik olarak yükselmesi [24].	16
Şekil 2.6. CVD reaktörünün şematik gösterimi [20].	16
Şekil 2.7. Sol-Jel teknoloji ve bu teknolojiyle üretilen malzemeler [20].	17
Şekil 2.8. Sol-Jel yöntemi ile parçacık üretim aşamaları [20].	18
Şekil 2.9. Toz metalürjisinde parça üretim akışı	19
Şekil 2.10. Al ve B4C tozları ve bilyeler [3].	20
Şekil 2.11. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi [27].	21
Şekil 2.12. Atomizasyon sırasında damlacıkların sıvı demetinin parçalanmasındaki değişimi [27].	22
Şekil 2.13. Küresel şekilli gaz atomize kalay tozlarının genel yüzey görüntüleri [28].	22
Şekil 2.14. Parçacık boyut dağılımının dönme hızı ile değişimi [27].	24
Şekil 2.15. Döner elektrot ile savurmalı atomizasyonun şematik gösterimi [27].	24
Şekil 2.16. Kimyasal yöntemlerle demir tozu üretimi [29].	26
Şekil 2.17. Metalik toz üretiminde oksit partikülünde gerçekleşen tepkime gösterimi [29].	27
Şekil 2.18. Elektroliz ile toz üretim şeması [26].	28
Şekil 2.19. Toz sıkıştırma kademeleri [21].	29

Şekil 2.20. Çeşitli metallerin basınç ile yoğunluğunun değişimi [21].	30
Şekil 2.21. Toz presleme kalıbı.....	31
Şekil 2.22. Mekanik alaşımlamada Bilye-Toz-Bilye çarpışması [27].	32
Şekil 2.23. Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi [27].	33
Şekil 2.24. Zamanın partikül boyutuna etkisini gösteren bir grafik [31].	34
Şekil 2.25. Zamanın partikül boyutuna etkisini gösteren bir grafik [31].	35
Şekil 2.26. Gevrek-sünek sistemde zamana bağlı olarak tane boyutunun değişimi	35
Şekil 2.27. Zamana bağlı olarak mekanik alaşımlamada tane boyutunun değişimi [33].	36
Şekil 2.28. α -TiAl alaşımı içerisinde düzgün bir şekilde dağılmış olan Er_2O_3 partiküllerinin SEM’de çekilmiş görüntüsü [31].	37
Şekil 2.29. SPEX öğütücü tipi [31].	38
Şekil 2.30. Planetary tip öğütücü	39
Şekil 2.31. Attritor tipi öğütücü [31].	40
Şekil 3.1. Matris malzemesi olarak kullanılan Etial 141 alüminyum alaşımı tozu	43
Şekil 3.2. Takviye malzemesi olarak kullanılan nano boyutlu B4C tozu makro fotoğrafı	43
Şekil 3.4. Mekanik alaşımlama ve toz öğütme prosesinde kullanılan öğütücü	45
Şekil 3.5. Öğütücü hazneleri	45
Şekil 3.6. Soğuk presleme cihazı ve kullanılan kalıp şekli	46
Şekil 3.7. Sıcak Presleme Cihazı	46

Şekil 3.8. Sıcak preslemeden sonra oluşan (1) %3, (2) %5, (3) %10, (4) %15, (5) %20 oranlarında nano B ₄ C tozu takviyeli ve ortalama 20 µm boyutunda B ₄ C tozu (6) %3, (7) %10 oranlarında ilave edilmiş kompozit numuneler.....	47
Şekil 3.9. Nikon MA 100 Ters Metal Mikroskobu	47
Şekil 3.11. X-ışını cihazı	48
Şekil 3.12. Future Tech FM-700 sertlik ölçme cihazı.....	49
Şekil 3.13. Zımparalama ve parlatma cihazı	50
Şekil 3.14. Metkon ECOPRESS 50 bakalite alma cihazı	50
Şekil 4.1. %3 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafı	52
Şekil 4.2. %5 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafı	52
Şekil 4.3. %10 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafı	53
Şekil 4.4. %15 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafı	53
Şekil 4.5. %20 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafı	54
Şekil 4.6. %3 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafı	55
Şekil 4.7. %5 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafı	55
Şekil 4.8. %10 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafı	56
Şekil 4.10. %20 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafı	57
Şekil 4.11. %15 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozitten alınan EDX Analiz Sonuçları ...	59
Şekil 4.12. % 3 Nano (a) ve % 3 Mikron Boyutlu B ₄ C Takviye Edilen Numunelerin Optik Fotoğrafları	60
Şekil 4.13. % 3 Nano (a) ve % 3 Mikron (b) Boyutlu B ₄ C Takviye Edilen Numunelerin SEM Fotoğrafları	60

Şekil 4.14. % 10 Nano (a) ve % 3 Mikron (b) Boyutlu B ₄ C Takviye Edilen Numunelerin Optik Fotoğrafları	61
Şekil 4.15. % 10 Nano (a) ve % 3 Mikron (b) Boyutlu B ₄ C Takviye Edilen Numunelerin SEM Fotoğrafları	61
Şekil 4.16. Mikron Boyutlu B ₄ C Partikülünün XRD analiz Grafiği	62
Şekil 4.17. % 10 Nano B ₄ C Takviyeli Al Kompozit Numunenin XRD analiz Grafiği .	63



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

μm	:Mikrometre
B ₄ C	:Bor karbür
Al	:Alüminyum
Al ₂ O ₃	:Alümina
SiC	:Silisyum karbür
TiC	:Titanyum karbür
Ti	:Titanyum
Mg	:Magnezyum
Ni	:Nikel
Zn	:Çinko
Cr	:Krom
Bi	:Bizmut
Mn	:Mangan
Ge	:Germanyum
Er ₂ O ₃	:Erbiyumoksit
α_2 -TiAl	:
N	:Tahrik Milinin Dönme Hızı
T	:Öğütme Zamanı
E	:Elastik Modül
C	:Karbon
Pb	:Kurşun
Fe	:Demir
Sn	:Kalay

Ag	:Gümüş
Si	:Silisyum
TiO ₂	:Titanyum dioksit
H ₂ SO ₄	:Sülfürik asit
HNO ₃	:Nitrik asit
HF	:Hidroflorik asit
Fe ₃ O ₄	:Manyetit
Mo	:Molibden
Ga	:Galyum
ρ	:Yoğunluk
CO	:Karbonmonoksit
CO ₂	:Karbondioksit
FeO	:Demiroksit
MA	:Mekanik Alaşımlama
SEM	:Taramalı Elektron Mikroskobu
nm	:Nanometre
AMC	:Alüminyum Matrisli Kompozit
Nm	:Newtonmetre
CVD	:Kimyasal Buhar Biriktirme
TM	:Toz Metalurjisi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanoğlu eskiden beri kendini geliştiren olağanüstü teknolojik ilerlemelerde bulunmuştur. 1800'lü yıllardan itibaren başlayan sanayi devrimi teknolojik gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. 1950'li yıllarda kuantum fizik yasalarının oluşturulmasıyla da malzemelerin atom boyutunda çalışmasını sağlamıştır. Bu aşamalardan sonra artık makro boyutta çalışılan malzeme yapıları, mikro boyutta ve daha sonra da nano boyuta indirgiemiştir. Malzemeler üzerinde çalışmaların nano boyuta indirgenmesinden sonra malzemeler üzerinde olağanüstü mekanik ve fiziksel olarak gelişmeler kaydedilmiştir. Bu gidişat öyle bir hal almıştır ki artık uluslararası gelişmişliğin bir göstergesi haline gelmiştir. İşte yeni devrim ve gelecek yüzyılın teknolojisi olarak adlandırılan bu gelişmeler dönemi: nano bilim ve nano teknoloji dönemidir.

Bu amaçla günümüzde kullanılan üretim teknikleri moleküler anlamda çok kaba tekniklerdir. Döküm, taşlama, tornalama vs. gibi işlemler atomların büyük kitleler halinde hareket etmeleriyle oluşur. Maddenin yapı taşları olan atomlar istenildiği gibi dizilebilir. Üstelik de maliyeti oldukça ucuza mal edilebilir. Bu gelişmeler ile özellikle bilgisayar sektöründe daha temiz, daha mukavim, daha hassas ve daha hafif cihazların üretilmesi sağlanacaktır.

Nano teknolojiyle nano ölçekli yapıların analizi yapılabilecektir. Nanometre boyuttaki yapıların fiziksel özellikleri anlaşılabilecektir. Alışılmışın dışında malzemelerin üstün özellikleri hem mekanik hem de fiziksel olarak ortaya çıkacaktır. Daha dayanıklı, daha hafif ve daha hızlı yapıların elde edilmesi mümkün olabilecektir. Daha az malzeme kullanımı ve daha az enerji sarfiyatı yapılacaktır. İşte bu özellikler malzemenin nano boyuttaki yapılarla bir araya gelmesiyle mümkün olacaktır. Aynı malzemeyle daha fazla iletkenlik, daha mukavim yapılar, mekanik özellikler itibariyle daha fazla aşınmaya karşı direnç, darbelere karşı daha mukavim yapılar elde edilecektir. Uçakların türbinlerinde ısınmaya karşı korunaklı yapıların geliştirilmesiyle havacılık alanında da inanılmaz sonuçlar elde edilebilecektir. Ayrıca tıp sektöründe de ilaçların nano boyuttaki yapılarla imal edilmesi sonucu dokulara nüfuziyetin arttırılması

sağlanabilecektir. Bu yüzden insan yaşamındaki nano boyuttan üretilen yapıların önemi oldukça yüksektir [1].

Kompozit malzemeler şu anda mühendislik malzemeleri olarak çok geniş olarak kullanılmaktadırlar. Kompozit malzemelerin kullanımı günden güne artmaktadır. Bu malzemelerdeki hafiflik, mükemmel mekanik özellikler ve termal özellikler bu malzemelerin kullanımını cazip hale getirmektedir. Matris malzemesi olarak genellikle alüminyum kullanılır. Düşük yoğunlukta ve dayanıklı olması istenen bir kompozit malzeme olduğu zaman alüminyum en çok seçilen matris malzemesidir. B₄C'nin takviye malzemesi olarak alüminyumla kullanılması bu malzemenin kullanımını arttırmıştır. Bu malzemeler şu anda otomotiv, nükleer ve askeri alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. B₄C partiküllerinin alüminyum matris içerisine belirli oranlarda katılmasıyla oluşan kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde muazzam değişiklikler elde edilmektedir [2].

Bodokuri ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada Al içerisine belirli oranda katılan SiC ve B₄C partikülleri Al nin mekanik özelliklerinde önemli derecede artışa sebep olmuştur. Bu çalışmada toz metalurjisi tekniği kullanılarak dökümde oluşan segregasyon probleminden de kurtulmuş olmaktadır. Bu çalışmada %5 SiC, %5 B₄C ve %90 Al kullanılmıştır. Netice itibariyle B₄C partiküllerinin azalmasıyla sertlikte azalma meydana gelmiştir [3].

Moradi ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada Al-B₄C köpük üretimi yapılmıştır. Bu üretim beş farklı B₄C'nin yüzdeleri oranlarıyla yapılmıştır. Bu oranlar % 0,5-%1-%1,5-%2-%2,5 nano B₄C ilavesiyle gerçekleştirilmiştir. Yöntem olarak toz metalurjisi ve boşluk tutma yöntemi kullanılmıştır. Boşluk tutma malzemesi olarak karbamid kullanılmıştır. Mekanik özellikler takviye malzemesi yüzdesinden ve porozite boyutundan etkilenmiştir. %2 nano B₄C ilavesiyle malzemenin sıkıştırma mukavemeti artmıştır. Ayrıca takviye malzemesinin artmasıyla birlikte Al-B₄C köpüğünün gerilim yoğunluğu azalmaktadır. %2 B₄C ilavesiyle malzemenin absorbe etme ve maksimum akma dayanımları sırasıyla 11,47 MJ/m³ ve 23,9 MPa değerlerine ulaşmıştır [4].

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Yapısal malzemeler basit bir şekilde ayıracak olursak metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler diye 4 ana kısma ayırabiliriz. Kompozitler iki ve ya daha fazla farklı malzeme çeşidinin makro ölçekli boyutlarda çeşitli diğer metallerin, polimerlerin ve seramiklerin kombine edilmesiyle oluşturulur [5]. Bu tasarım kompozitin farklı bileşenlerinden her birinin istenilen en iyi özelliklerini sisteme dahil edecek şekilde gerçekleştirilmelidir. Böylece elde edilen malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır. Örneğin mukavemet, elektrik ve ısı iletkenlik, yorulma ömrü, aşınma direnci, korozyon direnci, yüksek sıcaklık, mekanik özellikleri kompozit malzeme sistemleri kullanılarak geliştirilebilecek ve üst seviyelere çıkarılabilecek özelliklerdir. Bir başka deyişle kompozit malzemeler istenilen özelliklerde malzeme elde etmek için uygun tekniklerin kullanımıyla farklı tür malzemeleri oluşturmaktır [6].

2.1.1. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları

Kompozit malzemelerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu, hafif yapılarda büyük avantaj sağlar. Buna ek olarak fiber takviyeli kompozitlerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik yalıtımları diğer mukayese edilen malzemelerden üstün özellikleridir. Kompozit malzemelerin çekme ve eğme dayanımları birçok metal malzemelerden daha dayanıklıdır. Ayrıca yönlendirilmelerinden dolayı kompozit malzemelere istenilen yönde mukavemet kazandırılabilir. Kompozit malzemeler ile birçok kompleks yapıların yerine tek olarak kullanılabilir. Bu da maliyet olarak diğer malzemelerden daha üstün bir özellik sağlamış olur. Kompozit malzemeler uygun seçim yapıldığında elektrik iletkenliği, titreşim sönümleme kabiliyeti, ısı yalıtım gibi özellikler sağlanabilir.

Kompozit malzemelerin dezavantajları ise bazı imal edilecek kompozitlerin hammaddelerinin pahalı olması, uçaklarda kullanılan kumaşın m² başına 50\$'dır. Lamine edilmiş kompozitlerin mukavemetleri her zaman aynı değildir. Kalınlık yönünde düşük dayanım, katlar arasında düşük kesme dayanım özelliği

göstermektedirler. Malzemenin kalitesi üretim yönteminin ne kadar mükemmel yapıldığına bağlı olup standart bir durum yoktur [7].

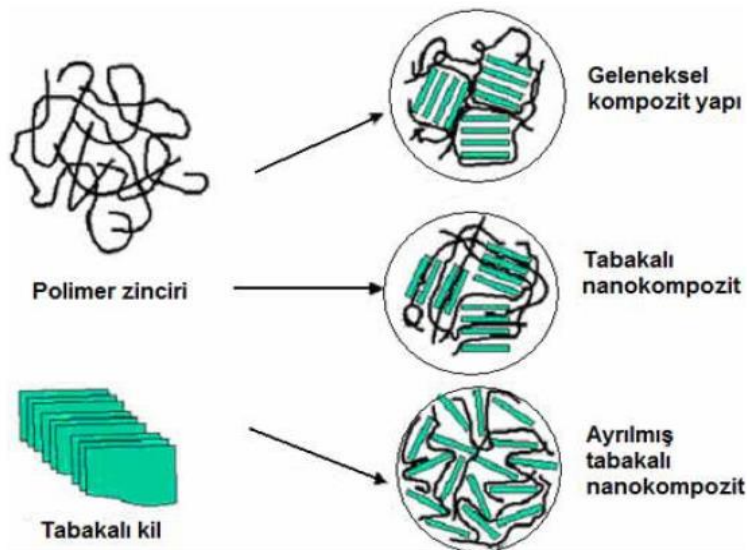
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri matris malzemesinin türüne göre ve takviye malzemelerin şekline göre sınıflandırmak mümkündür [8].

2.2.1. Matris malzemesinin türüne göre kompozit malzemeler

2.2.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Diğer matrislerinde kullanılmasına rağmen kullanılan matrislerin %90 polimer matrisli kompozit malzemelerdir. Polimerler genellikle fiberler ve taneciklerle takviye edilmektedir. Günümüzde polimer matrisli kompozitler artık nano boyuttaki partiküller ile de takviye edilmeye başlanmıştır. Bu şekilde olan kompozitlere de polimerik nano kompozitler adı verilmektedir. Özellikle poliolefinler (PE, PP) gibi apolar polimerlerin üretilmesinde büyük zorluklarla karşılaşmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeleri üretmek için bazı yöntemler vardır. Ayrıca bunlar üzerindeki çalışmalar hala devam etmektedir. Bu üretim yöntemlerinden bazıları eriyik harmanlama, yerinde polimerizasyon, ve diğer tekniklerdir. Birçok araştırmacı tarafından harmanlama, ekstrüzyon ve basınçlı kalıplama yöntemleri ortak olarak kullanımı tercih edilmektedir. İstenilen özelliklerde polimer matrisli kompozit üretmenin başlıca yolu nano partiküllerin matris içerisinde homojen olarak dağılımını sağlamaktır [8].



Şekil 2.1. Kil tanecikleri takviye edilmiş polimerik kompozit yapı [8].

2.2.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler yapılarında bir metalin olduğunu ima ederler. Bu matrislere örnek olarak alüminyum, titanyum ve magnezyum verilebilir. Metaller temel olarak dizayn ihtiyaçlarını karşılamak için gereken özelliklerin artırılması ve ya azaltılması için kullanılır. Örneğin eklenen silisyum karbür fiberler ile elastisite modülü ve metallerin dayanımı artırılabilir ve metallerin termal genleşme katsayısı, termal ve elektrik iletkenliği azaltılabilir. Metal matrisli kompozitler temel olarak çelik ve alüminyum gibi monolitik metallere avantaj sağlamak için kullanılır. Bu avantajlar alüminyum ve titanyum gibi düşük yoğunluklu metalleri takviye ederek daha yüksek özgül mukavemet ve modülü sağlar. Grafit gibi düşük genleşme katsayısına sahip fiberler takviye edilerek yüksek sıcaklıklardaki dayanımı da artırılabilir [9].

2.2.1.3. Seramik matrisli kompozitler

Seramikler, metal ve metal olmayan bileşiklerden meydana gelen inorganik bileşiklerdir. Doğada bazı etkiler sonucu kendiliğinden oluşan kaolen, kil vb. malzemelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Seramikler farklı olarak silikatlar, alüminatlar ile birlikte metal oksitlerden meydana gelir. Yaygın bir şekilde iyonik ve ya iyonik-kovalent bağ yapılarına sahip oldukları için oldukça dayanıklıdır. Seramik malzemeler sanayide endüstriyel tuğla olarak kullanılabilirler. Bunun yanı sıra beton ve elektronik malzemeler içerisinde yeni tür malzemelerde de kullanımı çok yaygındır. Son seramik grubu ince seramik olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte, rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtıcılık özelliği de gösterirler [10].

2.2.2. Takviye malzemelerinin şekline göre kompozit malzemeler

Kısa karbon fiber takviyeli malzemeler düşük ağırlık, yüksek özgül mukavemet ve sertlikten dolayı metal matrisli kompozitlerde, havacılıkta, otomotiv sanayinde, uçak endüstrisinde ve ulusal savunma sanayii vb. alanlarda geniş bir şekilde kullanılır. Bu malzemeler takviye malzemelerinden sadece bir tanesidir. Bu mekanik özelliklerin tam anlamıyla nihai seviyelere ulaşması için oryantasyonu çok iyi olmalıdır. Bunun yanında bu özellikler fiber hacim oranına bağlıdır [11].

2.2.2.1. Partikül (Parçacık) takviyeli kompozitler

Partikül boyutlu kompozitler matris içerisine seramikler ve alaşımlar gibi yayılmış parçacıklardan oluşur. Onlar genellikle rastgele dağıldıklarından dolayı izotropiktir. Partikül boyutlu kompozit malzemeler yüksek dayanım, yüksek sıcaklıklarda çalışma ve oksitlenmeye karşı direnç v.b. özelliklere sahiptirler. Örneğin, kauçuk içerisinde alüminyum partikülleri, alüminyum matrisi içerisindeki silisyum karbür partikülleri örnek olarak verilebilir [9].

2.2.2.2. Fiber elyaf takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler kısa(süreksiz) ya da uzun(sürekli) takviye malzemeleridir. Fiberler genellikle anizotropik karbon ve amidlerdir. Matris malzemelerinden örnek olarak reçinelerden epoksi, metallere alüminyum ve seramiklerden kalsiyum-alümina silikat olarak verilebilir. temel olarak sürekli fiberler tek yönlü ve ya örgülü fiber tabakalardan meydana gelir. Tabakalar çok yönlü tabaka oluşturmak için çeşitli açılardan birbirinin üzerine yığılmışlardır [9].

2.2.2.3. Tabaka yapılı kompozitler

Tipik pul partiküllü malzemeler cam, mika, alüminyum ve gümüştür. Bu tür kompozit malzemeler yüksek dayanım ve düşük maliyet sağlarlar ve bununla birlikte pullar yönlendirilemez ve sınırlı sayıda malzeme kullanılabilir [9].

2.2.2.4. Dolgu yapılı kompozitler

Bu tür kompozit malzemeler, 3 boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu bir dolgu malzemesiyle doldurulması ile elde edilen malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet ve şebeke yapısına sahiptir. Düzgün petekler ve gözenekli yapılar arasında metalik, organik ve ya seramik esaslı dolgu malzemeleri yer alabilir [8].

2.4. Matris Malzemeleri

Matrisin temel olarak yaptığı yani kompozit malzeme içerisindeki işlevi maruz kalınan yükü bağlayıcılar vasıtasıyla eşit bir şekilde dağılımını sağlamaktır. Yükün malzeme içerisindeki transferi matris ve bağlayıcılar arasındaki ara yüzey bağının ne başarılı olduğuna bağlıdır. Çeşitli uygulama alanlarında matris seçimini belirlemede dikkat

edilmesi gereken unsurlar; yoğunluk, çekme dayanımı, yüksek sıcaklık özelliği ve süneklik gibi faktörler yanında üretim metodu ve bunlar arasındaki uyumda bağlıdır. Genel olarak matris malzemeleri Al, Ti, Mg, Ni, Pb, Fe, Sn, Zn, Ag, ve Si malzemeleridir. Ama genelde düşük yoğunluğa sahip Al, Mg, Ti gibi matrislerle ne başarılı sonuçlar elde edilir [6].

2.4.1. Alüminyum ve alaşımları

Alüminyum ve alaşımları tarafından eşsiz özellik kombinasyonları sağlanır. Onlar çok yönlü ve mühendisler için geniş yelpazede kullanım için çok cezbedicidir. Yumuşak ve sünek folyo sarmalardan en zor mühendislik uygulamalarında bile tercih edilir. Alüminyumun yoğunluğu 2.7 g/cm^3 yani ortalama bir çeliğin üçte biri kadardır. Alüminyum alaşımları alaşım türüne göre çeliklerden daha mukavim olabilir ve bu da alüminyum alaşımlarının uzay araçlarında, her türlü toprak türünde ve su araçlarında kullanımına olanak sağlar. Alüminyum çeliğin paslanmasına neden olan ileri oksidasyon türüne karşı da iyi direnç gösterir. Alüminyum oksidasyona maruz kaldığında oluşturduğu ince oksit tabakası sayesinde paslanmaya, korozyona karşı direnç sağlar. O demirin aksine herhangi bir etkiye maruz kaldığında sürekli olarak kendisini yeniler. Bunun sonucunda alüminyum su, tuz ve diğer çevresel faktörlere karşı direnç gösterebilir. Alüminyum tipik olarak mükemmel elektrik iletkenliği ve ısı iletkenliği vardır, ama spesifik alüminyum alaşımların elektrik direnci yüksek olabilir [12].

2.4.2. Magnezyum ve alaşımları

Magnezyum bütün mühendislik metallerinin yoğunluk itibarıyla en düşük yoğunluğa sahiptir ve yoğunluğu 1.7 g/cm^3 tür. Alüminyumdan %35 ve çelikten de yaklaşık olarak dörtte bir kadar yoğunluğu daha düşüktür. Magnezyum sekizinci en yaygın elementtir. Magnezyum ya silisyum ile metalotermik indirgenmesi ya da deniz suyundan magnezyum kloritini elektrolizle eritilerek elde edilir. Deniz suyunun her metreküpünde 1,3 kg yani %0,3 magnezyum içerir. Alüminyumdan daha iyi bir süneklige, daha iyi gürültü ve titreşim sönümlenme özelliğine ve mükemmel döküm kabiliyetine sahiptir. Magnezyum alüminyum, manganez, nadir toprak elementleri, toryum, çinko, zirkonyum ile alaşım oluşturarak dayanımını artırır ve bu da mühendislik uygulamalarında magnezyumu cazip kılar [13].

2.4.4. Bakır ve alaşımları

Bakır 29 atom numarası ile elementlerin periyodik tabloda 1B alt grubunun bir üyesidir. Diğer soy metaller altın ve gümüş bu grubun diğer üyeleridir. Bakırın tanımında olması gereken oran %99,3 ve ya daha fazla olmalıdır. İşlenmiş metallerde ise bu oran %99,3 den daha azdır fakat %96 dan daha az bir değer göstermesi halinde bakır alaşımı olarak tanımlanmaz. Dökme bakır alaşımlarında ise bu oranı %94 civarında olması gerekir ek olarak spesifik özellikler için ise gümüş ilavesi yapılabilmesi muhtemeldir. Bakırın mühendislik tasarımlarında en cezbedici tarafı termal iletkenlik ve elektriksel iletkenliktir. Bakırın elektriksel iletkenliğine ve termal ısı iletkenliğine etki eden en güçlü unsurlar ise, serbest elektronlar, kafes yapısı ve alaşım elementleridir. Bu etkiler konsantrasyonuna ve eklenen elementlere göre değişir. Alaşım elementleri sık sık pozitif olarak korozyona etki yapar. Gümüş, kurşun, çinko, kadmiyum %10'un altında küçük etkiye sahiptirler. Diğer elementlerden fosfor, silisyum, arsenik, kalay bütün konsantrasyonlarda çok büyük etkilere sahiptirler. Etkinin büyüklüğü alaşım elementinin durumuna, yani katı çözültide bulunup bulunmadığına veya oksit veya metaller arası bileşik gibi kombine biçimde mevcut olup olmadığına bağlıdır [14].

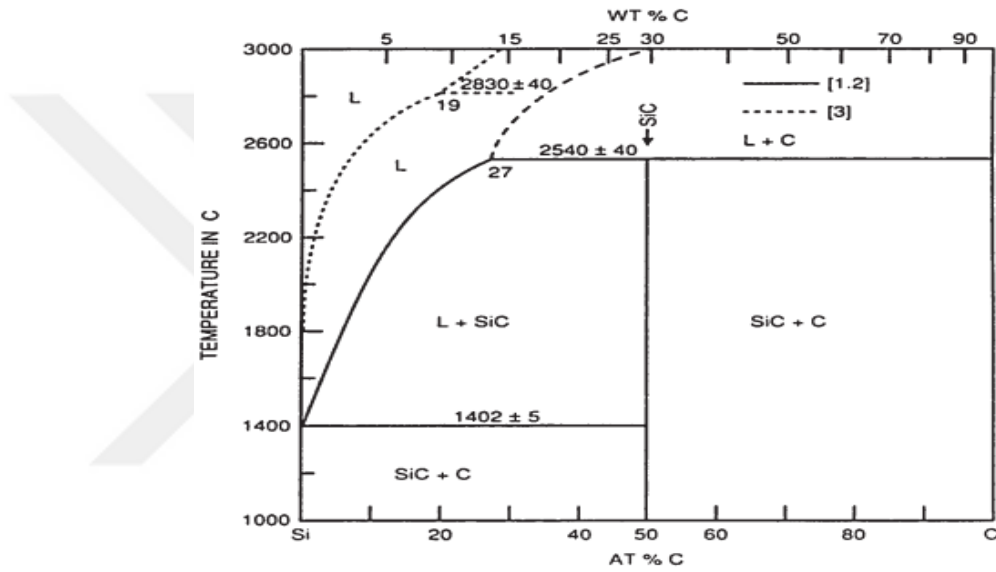
2.5. Takviye Malzemeleri

2.5.1. Alümina

Kimyasal ve termal kararlılık, iyi dayanım ile birlikte termal izolasyonu mühendislik uygulamaları için çok uygundur. Piyasada isim olarak kullanımı alümina veya alüminyum oksit şeklindedir. Çoğunlukla paratikte refrakter malzemesi olarak kullanılır. Günümüzdeki çalışmalarda alüminanın yapısal mühendislikteki seviyesi sınırlıdır. Oda sıcaklığında pratikte sızdırmazlık en azında %6 seviyesinde olması gerekmektedir. Alümina birkaç allotropik forma sahiptir. Burada sadece genel tipi veya α -alümina düşünülür. Alümina stokiometreden çok fazla sapmaz ama yüksek sıcaklıklardaki safsızlıklar difüzyon oranını büyük ölçüde etkiler. Alümina destekli yüksek mukavim alaşımlar elde edilebilir ama yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar. Saf alüminanın erime sıcaklığı 2040° C dir ama saf olamayan alümina alaşımları bu derece sıcaklıklar altında eriyebilir. Mühendislik kullanımlarında alümina tozları 1300° C den daha yüksek sıcaklıklarda sinterlenerek kullanılır [15].

2.5.2. Silisyumkarbür

Silisyum karbür 1980 yılında Thomas Edison' un asistanı Edward G. Acheson tarafından bir deneysel çalışma esnasında kazayla keşfedilmiştir. Bugün silisyum karbür hala katı hal reaksiyonuyla üretiliyor ve yüksek sıcaklıklardaki elektrik ark fırınlarında kullanılıyor. Silisyum karbür silisyum ve karbondan meydana gelmesi silisyumun erime sıcaklığının yukarısında reaksiyona girerek oluşur. Silisyum karbürün karbon ile oluşturduğu diyagram aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.2. Si-C faz diyagramı [16].

1402 °C de %75 karbon oranında ötektik noktada SiC ve karbon mevcuttur. SiC genel olarak toz olarak, aşındırıcı, fiber ve kaplama malzemesi olarak kullanılırlar. Üretiminde saflik oranı metod seçiminde önemli bir faktördür [16].

2.5.3. Borkarbür

Borkarbürün yoğunluğu 2.51g/cm³'tür. Sertlik itibariyle üçüncü sırada yer alır. En sert malzemeleri sıralayacak olursak elmas, kübik boron bitrit ve borkarbür olarak sıralayabiliriz. B₄C'nin erime noktası 2450 °C'dir. Bunun yanısıra bu elementin kimyasal tepkimelere karşı da kararlılığı çok iyidir. Ayrıca nükleer alanda kullanılacak özelliklerinden biride çok iyi nötron absorbe etme özelliğinin olmasıdır. Bu özelliği sayesinde borkarbür nükleer alanda da kullanılmaktadır. 1e.V enerjiye maruz kalan iki maddeden kadmiyumun nötron absorplama değeri 20 barn, borkarbürün ise 100 barn

olarak ölçülmüştür [4]. Borkarbür kullanım alanları metalürji alanında oldukça fazladır. Borkarbür yüksek mekanik özellikleriyle dikkat çeken bir bileşiktir. Örneğin, iyi aşınma direnci, yüksek erime noktası, yüksek sertlik ve yüksek darbe dayanımı, mütüşem kimyal bozulmalara karşı dayanım ve yüksek nötron emme özelliği borkarbürün cezbedici özelliklerindendir. Hafif zırh kaplama, püskürtme uçları, mekanik baskı yüzleri, öğütücü araçları, kesici aletler ve nötron emme malzemeleri olarak seramik formda kullanımı oldukça geniştir. Borkarbür yapılı seramikler zor bir şekilde sinterlenebilir ve bununla alakalı olarak çok daha kırılğan olurlar ve eğme dayanımları (200-300 MPa), kırılma tokluğu ($2 - 3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) gibi düşük değerlerdedir [17].

2.6. Nano Kompozitler ve Nano Malzemeler

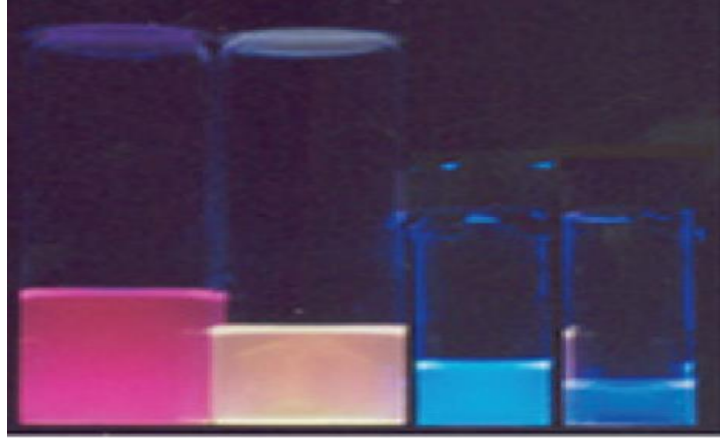
Nano kompozitleri tanımlayacak olursak, benzer olmayan bileşenlerden yapılmış ve nanometre ölçeğinde karıştırılmış, bir boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve amorf malzemeler gibi çok çeşitli sistemleri kapsayacak şekilde genişledi. Malzemenin boyutu nano kompozitlerin özelliklerinde önemli bir rol oynar. Malzemenin geliştirilmesinde ve yeni özellikler ilave etmede nano yapıların kontrolü önemlidir. Bu yüzden yirmi birinci yüzyılın teknolojik gelişmelerinde yarı iletkenlerde, inorganik bileşenlerde ve bunun yanısıra enerji depolama, organik malzemeler ve biyo teknolojide terfi etmesi bekleniyor. Nano teknoloji terimi bileşenler içerisinde en azından birinin 100nm den daha küçük olan kompozit yapılara denir. Nano teknoloji kimya, fizik, malzeme bilimi ve biyolojide elektronik araçların, biyomedikal ürünlerin, yüksek performanslı malzemelerin, tüketici ürünlerinin üretiminin geliştirilmesini, daha kolay üretilmesini sağlamak için, yeni özellikler eklemek için kullanılır. Nano teknolojinin ticarileşmesinin teknolojik gelişmelerde arttırması, toplumsal yararlılığa arttırması, yaşam kalitesini geliştirmesi dünya çapında bekleniyor.

Nano kompozitler malzemelerin makro yapıdaki özelliklerini geliştirmek için nano boyutta çalışılan malzemelerdir. Nano kompozitler kil, polimer, karbon gibi malzemelerin nano partikül blok oluşturmasıdır. Nano kompozitlerin çalışma alanı organik ve inorganik malzemelerde gittikçe artmaktadır. Nano kompozit malzemelerin özellikleri onların sadece bireysel temellerine bağlı değil aynı zamanda onların morfoloji ve arayüzey karakteristiklerine bağlıdır. Nano kompozitlein neredeyse bütün

tipleri diğerkompozit malzemelere nazaran hepsi daha gelişmiş ve yeni özellikler sağlıyor [18].

2.6.1. Nano parçacıklar

Nano kristaller, nano teller, nano parçacıklar, nano tüpler, nano ince filmler ve nano çubuklar gibi nano boyutlu yapılara son zamanlarda yoğunlaşmanın temel sebebi olağanüstü ve öok farklı özelliklerin keşfedilmesidir. Boyutları aralık olarak 1 – 100nm aralığında olan tozlar ve ya parçacıklar nano yapılar olarak adlandırılmaktadır. Bu parçacıklar diğermakro yapıdaki parçalara göre daha farklı özellikler sergilemektedir. Ateş [18], “Nano parçacıkların özelliklerinin çekiciliğinin öne çıkan nedenleri ise; kuantum boyut etkileri, elektronik yapısının boyut bağımlılığı, yüzey atomlarının benzersiz karakterleri ve yüksek yüzey/hacim oranı olarak söylenebilir.” Nano parçacıkların sentezi yüksek aktiviteli katalizörler, optik uygulamalar için özel malzemeler ile aşınmaya dayanıklı katkılar, süper iletkenler, yüzey aktif maddeler, ilaç taşıyıcılar ve özel teşhis aletleri gibi birçok alanda kullanılan teknolojik aletlerin keşfinin yolunu açmıştır. Nano yapıli cihazların yapımı için artık ilk aşama nano partiküllerin kimyasal ve ya diğeryöntemlerle üretilmesinden geçmektedir. Nano parçacıklar geniş kimyasal bileşim aralığı ve yapıda üretimi gerçekleştirilebilir [18].



Şekil 2.3. Si nano parçacıklar [19].

2.6.2. Nano kompozitlerin özellikleri

Nano malzemeler benzer malzemelerin büyük ebatlılarına göre farklı özellikler sergilenmektedir. Yeryüzünde foto kimyasal ürünler, volkanik ürünler ve egzoz dumanları gibi doğal yollarla mevcut olan nano malzemeler ve ya nano parçacıklar

vardır. Nano teknoloji daha mukavim, daha kullanışlı, daha uzun ömürlü, daha ekonomik, daha hafif ve daha küçük boyutlu araçlar geliştirmektedir. Minyatürleşme olarak adlandırılan bu girişim cihazların daha küçük boyutlarda ve aynı özellikleri seğilemesini sağlamaktadır. Bu gerçekleşen durum da daha az miktarda nakliye ücretleri, daha az yer kaplama gibi avantajları da yanında getirmektedir. Malzemelerin mekanik olarak nano boyuta geçerken elektriksel ve termal özelliklerinde de değişimler gözlemlenebilir [20].

2.6.3. Nano kompozitlerin uygulamaları

Nano kompozitlerin ticari uygulamaları hızlı bir oranda büyüyor. Önümüzdeki beş yıl içinde aşağıdaki alanlarda önemli miktarlarda varlığını hissettireceği ve 600.000 tonu aşacağı tahmin ediliyor.

- İlaç dağıtım sistemleri
- Anti – korozyon bariyer sistemleri
- Ultraviyole ışını koruma jeli
- Yağlayıcılar ve çizilmeye karşı boyayıcılar
- Yangın geciktirici malzemeler
- Çizilmeye ve aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler
- Üstün mukavemetli lifler ve filmler

Nano kompozitlerde mekanik özelliklerdeki olağanüstü değişiklikler onlara rağbetin artmasına sebep oldu. Özellikle bu yoğunlaşma otomotiv ve diğer endüstriyel uygulamalarda arttı. Bu uygulamaların, çeşitli araç tipleri, kapı kolları, motor kapakları ve emme manifoldu ve zamanlama kayışı kapakları üzerindeki ayna gövdeleri olarak kullanımı oldukça fazladır. Şu anda üzerinde durulan daha genel uygulamalar arasında, elektrikli süpürgeler, elektrikli alet gövdeleri, biçme başlıkları ve cep telefonları, çağrı cihazları vb. taşınabilir elektronik cihazlar için kapaklar, çarklar ve bıçaklar gibi kullanımları bulunmaktadır [17].

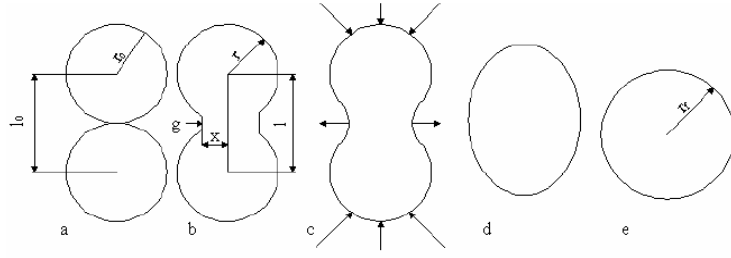
2.6.4. Sertlik ve mukavemet

Alüminyum matrisli kompozitlerde genel olarak takviye malzemesi SiC, B₄C, Al₂O₃, grafit vs. kullanılır. %20 oranında SiC partikülleri katılan bir alüminyum matrisli kompozit malzemenin elastik modülü 68 MPa'a ulaşmıştır. %25 oranında SiC

partikülleri ilave edilen bir AMC'nin sertliği 45BHN ve darbe dayanımı 36Nm değerlerindedir. Farklı takviye malzemesi olarak kullanılan B₄C'nin ilavesinde de çeşitli oranlarda farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. %5 ve %10 oranlarında B₄C partiküllerinin ilavesiyle sırasıyla 78 ve 82BHN sertlik değerleri elde edilmiştir. Borkarbür ve Al tozlarının birbirinin içerisinde 8 ve 16 saat biyeli değirmende öğütülmesiyle zamana bağlı olarak değişik sonuçlar elde edilmiştir. 8 saat öğütülen tozlar 16 saat öğütülen tozlara göre daha büyüktür. Öğütmenin devam etmesiyle Al partiküllerinde kırılmalar meydana gelmektedir ve yeni yüzeyler oluşmaktadır. Bu yeni oluşan yüzeylerle B₄C partikülleri birleşmektedir. 5 saat öğütme ile 15 dakika öğütme arasında karıştırılan tozlara baktığımızda az karışımda homojen olmayan bir görüntü meydana gelmektedir. 16 saatlik alaşımlama işleminde takviye ve matris elementlerinin dağılımının daha uniform olduğu görülmektedir. 8 saatten 16 saate kademeli olarak artan öğütmeyle birlikte sertlik değerlerinin artış miktarı azalmaktadır. Bu da tane sınırlarından kaynaklanmaktadır. Çünkü tane sınırlarında serbest enerji fazladır. Serbest enerjideki fazlalık aglomerasyona sebep olmaktadır. Bu yüzden aglomerasyonun azalması için alaşımlamada tane boyutlarının yeteri kadar büyük olması gerekmektedir. Tane büyük olursa tane sınırı da az olur [21].

2.6.5. Sinterlenebilirlik

Seramik ve metal toz parçalar sertleştirilmek üzere tabii tutuldukları ısıtma işlemidir. Sinterleme işlemi toz metalürjisinin en önemli safhalarından bir tanesidir. Bu işlemde presle ön sıkıştırmadan geçen toz taneciklerinin belli bir sıcaklık ve sürede birbirine bağlanma ve koherent bir küleye dönüşme işlemidir. Ön şekillendirme yapılan yapıya iki farklı yapı olarak bakılabilir yani yapı içerisindeki gözenekler ayrı bir oluşum, preslemenin yani sıkıştırmanın yapılmasından sonra birbirine temas eden toz taneciklerinin yapısı ayrı bir oluşum olarak nitelendirilebilir. Bu her iki yapının da kendi bünyesinde farklı morfolojisi, boyut dağılımı, şekil ve miktarları vardır. Sinterleme; ısı işlem sırasında toz taneciklerinin temas ederek yüzey alanlarının değişmesi ve bu yüzey alanlarının değişmesine de bağlı olarak gözeneklerdeki boyut değişimi olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.4. Sinterleme sırasında meydana gelen olayların şematik gösterimi[22].

Sinterleme eğer malzemenin erime noktasını altında bir sıcaklıkta yapılırsa buna ‘katı faz sinterlemesi’ adı verilir [22].

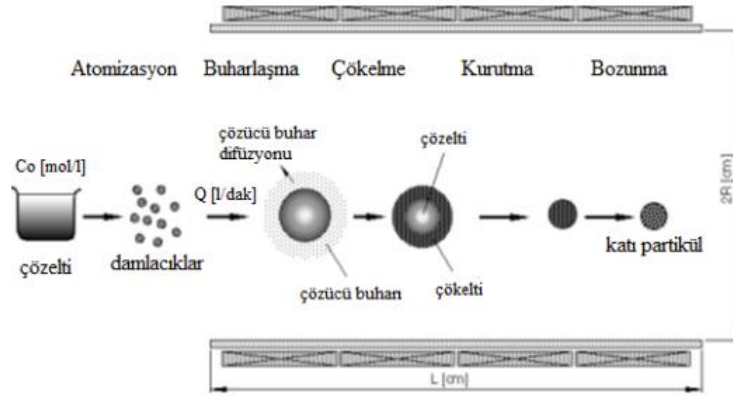
2.6.6. Yoğunluk

Alüminyum matris malzemesine takviye elemanı olarak B_4C partikülleri ilavesiyle kompozit malzemenin genel yoğunluğunda bir azalma gözlemlenmektedir. %10’luk B_4C partikül ilavesi %5’lik B_4C ilavesiyle kıyaslandığında %10’luk B_4C ilave edilen kompozit malzemenin yoğunluğu daha fazladır. Hiç takviye elemanı katılmayan Al ise B_4C katılan diğer kompozit malzemelerden daha fazla yoğunluğa sahiptir. Malzemelerin yoğunluklarını ele aldığımızda alüminyumun yoğunluğu 2.70 g/cm^3 ’tür. B_4C ’nin ise yoğunluğu 2.52 g/cm^3 ’tür. Şu iki malzemedan üretilen bir kompozit malzemenin yoğunluğu daha düşüktür. Bunun sebebi de B_4C miktarı arttıkça malzemedan meydana gelen porozite miktarı da artmaktadır. Dolayısıyla bu da kompozit malzemenin yoğunluğunda bir azalmaya sebep olmaktadır. B_4C partiküllerinin %25 katılımıyla kompozit malzemenin yoğunluğu $1,8 \text{ g/cm}^3$ olmaktadır [21].

2.7. Metal Matrisli Nano Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

MMNK’lerin üretim yöntemlerinden en yaygın olanları sprey pirolizi, sıvı metal infiltrasyonu, hızlı katılaşma, buhar teknikleri (CVD), elektrodepozisyon ve kimyasal metodlardır. Kimyasal metodlardan sol-jel yöntemi en bilinen yöntemlerden biridir.

Sprey piroliz yönteminde başlangıç malzemesini reaktöre buhar fazında iletmek yerine nebulizör kullanarak damlacıkları doğrudan sisteme püskürtülerek partiküller elde edilir. Bu yöntemin diğer bir adı da aerosol bozunma sentezi (aerosol decomposition synthesis) olarak da kullanılır. Bu sistemde damlacıktan partiküle dönüşüm gerçekleşir. Sistemdeki pekime genelde damlannın içerisindeki çözeltide gerçekleşir ve çözücünün buharlaşmasıyla sistem döngüsü devam eder.

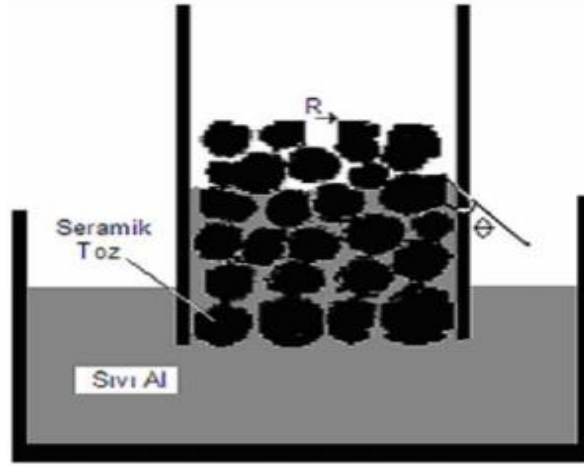


Şekil 2.5. Sprey piroliz damlacık-partikül dönüşüm mekanizması [23].

Atmosfer altında gerçekleşen piroliz geleneksel piroliz yöntemi (CSP) olarak literatürde geçer. Metaller, nano fazlı malzemelerin partikülleri, metal oksitler, oksit olmayan seramikler ve süper iletkenleri üretmek için kullanılır.

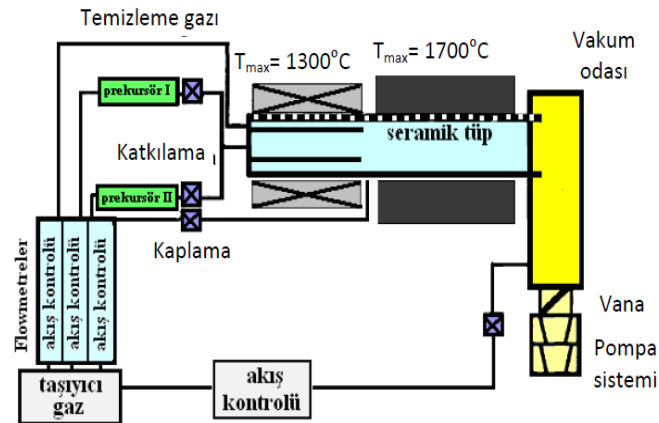
Bu proste damlacık oluşumu için atomize edilmiş başlangıç malzemesi normal atmosfer koşullarında taşıyıcı gazın vasıtasıyla ısıtılmış odanın içine iletilir. Böylece damlacık içersindeki çözücü buharlaşır ve kalan çözünen beklenen çökmeyi harekete geçirir. Damlacığın ilk boyutuna ve çözünen yani başlangıç malzemesinin yapısına göre partikül boyutları değişir [23].

Sıvı metal infiltrasyonu ise sıvı matrisin gözenekli bir yapı içersine basınç veya vakum yardımı ile elde edilir. Bunun yanında gözenekli yapı içersine giren sıvı damlacıklarının infiltrasyonu dışarıdan herhangi bir etki olmaksızın gerçekleşir. Metal oksit gibi seramiklerin ıslatma açısı 90° den küçük olduğu için dış basınca ihtiyaç vardır [24].



Şekil 2.5. Sıvı matrisin gözenekli bir yapıda şematik olarak yükselmesi [24].

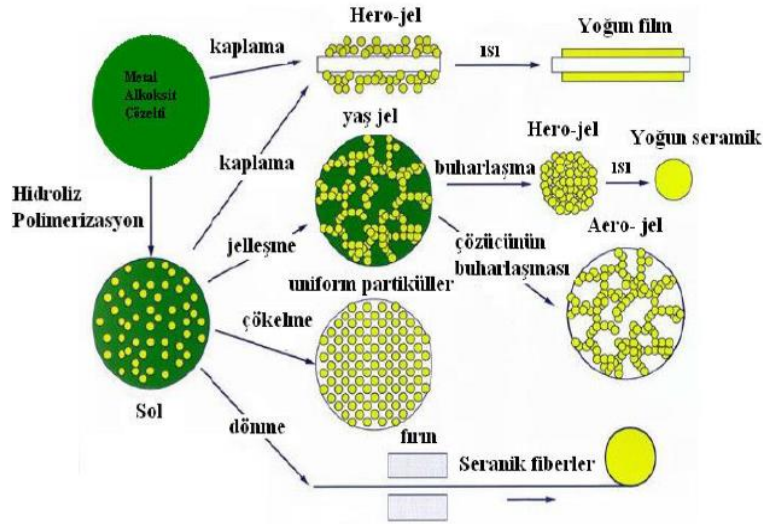
Nano parçacık üretiminde kimyasal sentezleme büyük derecede önem arz etmektedir. Bunu sağlayan en büyük etken ise bu yöntemin hemen hemen her malzemeye uygulanabilir olmasıdır. İşlem sırasında bazı parametreler işleyişi etkilemektedir. Elde edilen parçacıkların boyutu bu parametrelere bağlıdır. Taşıyıcı gazın akış hızı bu parametrelerden bir tanesidir. Bu faktör ayrıca elde edilen parçacıkların şekline de etki etmektedir. Bir diğer faktör de başlangıç malzemesinin ayrışma sıcaklığıdır. CVD (Chemical Vapour Deposition) yöntemiyle nano parçacıklar haricinde katkılanmış ve kaplanmış malzemeler de elde edilebilir. Bu işlemde gaz fazında olan malzeme bir katalizör ve ya plaka üzerinde nano malzemeye dönüştürülür [20].



Şekil 2.6. CVD reaktörünün şematik gösterimi [20].

Elektrodepozisyon yöntemi çok pahalı bir yöntem olmakla birlikte uygulama itibariyle de çok yavaş bir yöntemdir. Bu yöntemi pratik olarak da her malzemeye uygulamak mümkün değildir ve uygulanacak malzemenin bükülebilir tel şekline gelmesi gereklidir. Metalik teller oluşturabilen bu plazma yöntemi yüksek akım altında uygulanır.

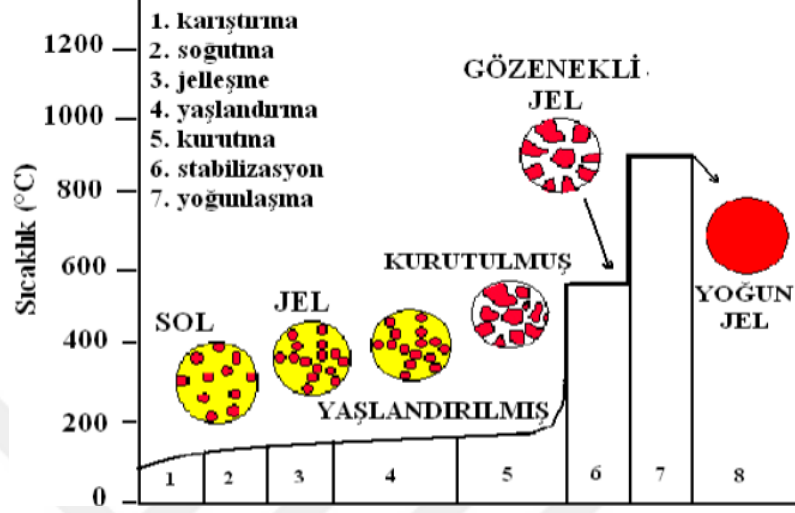
Sol-Jel yöntemi metal alkoksit ve inorganik tuz gibi başlangıç çözeltilerinin hidroliz ve yoğunlaşma reaksiyonlarının meydana gelmesiyle oluşan bir yöntemdir. Bu yöntem oldukça pahalı yöntem olmasına karşın kullanım itibariyle yüksek oranda tercih edilmektedir. Bu yöntemin tercih edilmesindeki etken ise avantajlı yönlerinin olmasıdır. Bu avantajlar ise kimyasal ve minerallerden istenilen boyutta alınan malzemelerin kontrollü bir şekilde, moleküler göstergede homojen olarak, geliştirilmiş süreç içerisinde aşamalı olarak, geliştirilmiş süreç adımlarıyla elde edilmesi şeklinde sıralanabilir. Sistemin pahalı ve uğraştırıcı olmasının yanında, giren üründen elde edilen ürünün çok az olması bir diğer dezavantajlarından bir tanesidir. Bu yöntemle nano parçacıkların üretilmesinin yanında, yoğun malzemelerin, fiber üretiminde, ince film kaplamalarında tercih edilmektedir. Sol-Jel yönteminin şematik gösterimi şekil 2.7 de verilmiştir [20].



Şekil 2.7. Sol-Jel teknoloji ve bu teknolojiyle üretilen malzemeler [20].

Şekilde görülen sol askıda olan ve birkaç yüz nanometre boyutunda olan katı parçacıklardan oluşur. Daha sonra bu katı sollar makro boyuttaki çözücü içerisine daldırılarak yeni faz (Jel) olarak yoğunlaşır. Oluşan bu yoğun jel 20 °C-100 °C arasında

kurularak hero-jel yapıları meydana gelir. Sol-Jel tekniği kullanılarak üretilen parçacık üretim aşamaları aşağıdaki Şekil 2.8.' de verilmiştir [20].

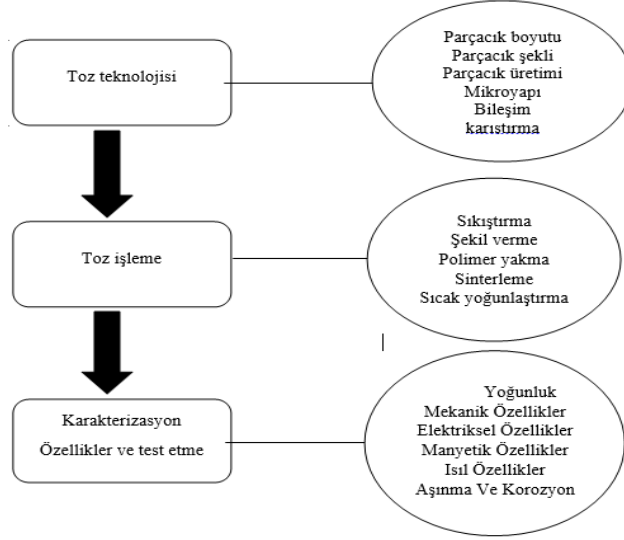


Şekil 2.8. Sol-Jel yöntemi ile parçacık üretim aşamaları [20].

2.8. Toz Metalürjisi

Ülkemizde (TM) 1960'lı yılların sonlarına doğru kurulmaya başlanmıştır. 1970'li yıllarda kurulan tesis yapısı atölye büyüklüğündedir ve 10'u geçmiştir. Yine o yıllarda atölye büyüklüğünde olan tesisler fabrika boyutuna ulaşmıştır. 2000'li yıllar itibariyle üretimlerinin %60'mı yurt dışına ihraç eder olmuşlardır. Bu yıllarda yine fabrikalaşma sürecinin en hızlı olduğu yıllardır.

(TM)'de kullanılan tozların birçoğunun boyutu 0,1 ila 200 μm seviyesindedir. Seramik tozların boyutu bu değerden genellikle küçükken, plastiklerin toz boyutu ise daha büyüktür. Genel olarak mühendislik uygulamalarında alışla gelmiş olan özelliklere ulaşmak için toz metalürjisinde kullanılan tozlar, fazların miktarı, boyut ve yerleri seçilmiş karışımlardır. Genellikle üretilen malzemeler farklı toz parçacıklarından elde edilmiştir. Parça üretimi sırasında tozlar bağlanarak bir katı oluşturur ve başlangıçtaki özelliklerini kaybederek farklı özellikler sergilerler. Bütün tozlar gazlar gibi sıkıştırma özelliği sergiler ama sıkıştırma esnasında katılar gibi davranır. Sıkıştırma arttıkça tozların mukavemeti artar ve sıkıştırmayı arttırmak için daha fazla basınca ihtiyaç vardır.



Şekil 2.9. Toz metalürjisinde parça üretim akış [25].

Sinterleme öncesi parçaya ham ve ya yeşil adı verilir. Toz metalürjisi, tozların gerekli işlemlerden geçirilerek mühendislik uygulamaları için faydalı malzeme olmasına yardımcı olur. Sıkıştırma ve sinterlemeden sonra artık dikkat mikro yapıya verilir. Toz metalürjisinin avantajlarından biri de faz kontrolünün olmasıdır. Diğer şekillendirme uygulamaları mikro yapıyı kontrollü olarak elde etme hususunda (TM) ile yarışamazlar. Toz tipi ve üretimi ile ilgili yapılacak uygulamalar, sıkıştırma ve sinterleme işlemlerinin daha elverişli olmasına etki yapar. Yoğunlaştırma ise malzemenin mikro yapı özelliklerini ve ürünün çalışma performansını etkiler [25].

2.8.1. Toz metalürjisinin avantaj ve dezavantajları

TM'si üretimi zor olan ve maliyeti yüksek karmaşık parçaların üretimi için elverişli bir yöntemdir. Yüksek mukavemet ve düşük toleransıyla diğer üretim yöntemlerine kıyasla oldukça avantajlıdır.

Avantajları;

- İstenilen özelliğe göre malzemenin içeriği ayarlanabilir.
- Boyutlar kontrollü bir şekilde elde edilebilir.
- Yüksek sıcaklıklara dayanabilen refrakter malzemelerin üretimi için uygundur.
- Yüzey kalitesi oldukça iyidir.

Dezavantajları;

- Toz fiyatı oldukça yüksektir.
- Mukavemet ve süneklik gibi dövülmüş metallerde yüksek değerlerde olan özellikler TM'de düşüktür [26].

2.8.2. Metal tozların üretimi

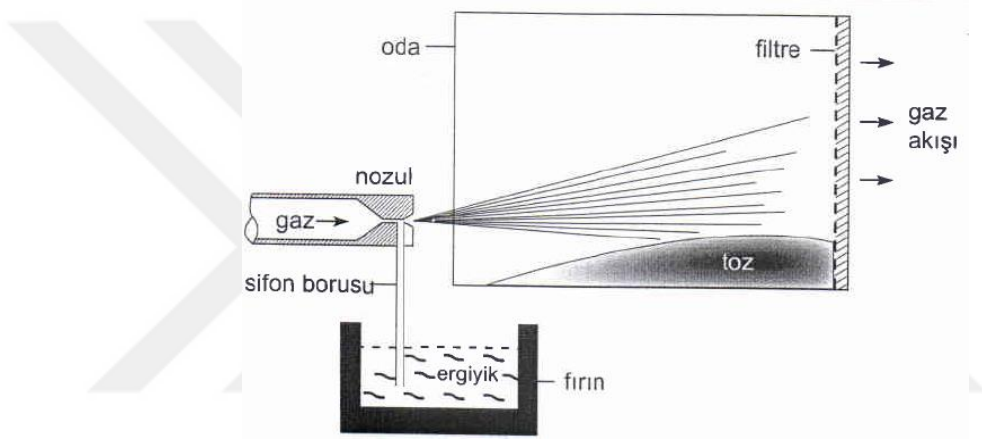
Toz üretim yöntemi olarak üretilen tozun boyutu, şekli, saflığı, mikro yapısı, maliyeti ve diğer özelliklerini ortaya çıkarır. Bir tozun hangi yöntemle üretildiğini bilmek o tozun başlangıç itibarıyla boyutunun hangi boyutta olduğunu tahmin için bize bilgi verir. Hemen hemen her malzeme toz haline getirilebilir ama getirirken malzemenin istenilen mekanik özelliklerin sağlanması noktasında ne gibi bir özellik sergileyeceği ve maliyet olarak da nasıl bir değerde üretileceği tozu üretirken dikkat edilmesi gereken faktörlerdir. Toz üretiminde kullanılan yöntemler mekanik yöntemler, kimyasal tepkime, elektrolitik biriktirme, sıvı atomizasyonu ve sıvı buhar yoğunlaştırmasıdır. Toz üretiminde kullanılan yöntemlerin maalesef hiçbiri verim olarak gerekeni verememektedir. Yeni yüzey alanı oluşturma eğilimine girdiğimiz zaman harcanan enerji bir yüzey alan enerjisinin yaklaşık olarak otuz katı daha büyük oluyor. Bir toz üretim yönteminin diğer yöntemlere göre üretilecek toz için seçilmesi üretilen tozun özelliklerine ve bu özelliklerin üretilecek olan malzeme için uygunluğuna bakılır [27].



Şekil 2.10. Al ve B4C tozları ve bilyeler [3].

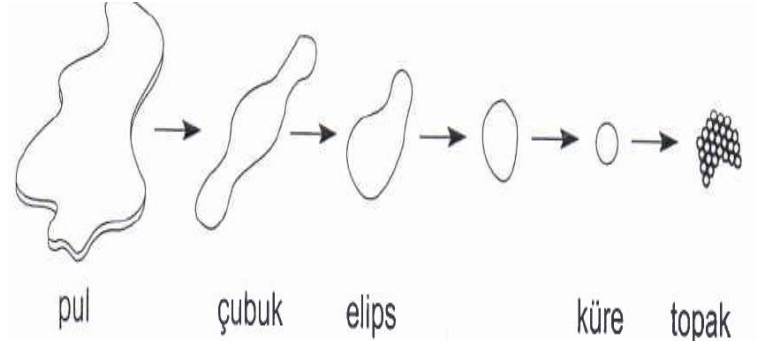
2.8.2.1. Atomizasyon yöntemi

Atomizasyon ergimiş sıvıya ve ya ergimiş sıvının damlacık formuna dayanır. Damlacıklar da donarak parçacık oluştururlar. Ticari atomizasyon üniteleri üretimde 400kg/dak ya ulaşabiliyorlar. Bu yöntem malzeme olarak metaller, alaşımlar, intermetalik malzemeler, polimerler ve seramiklerde kullanılmaktadırlar. Yöntemin farklı malzemelere uygulanması ve üretimin kontrollü bir şekilde olabilmesi bu üretim şeklini cazip kılmıştır.



Şekil 2.11. Yatay gaz atomizasyonunun şematik gösterimi [27].

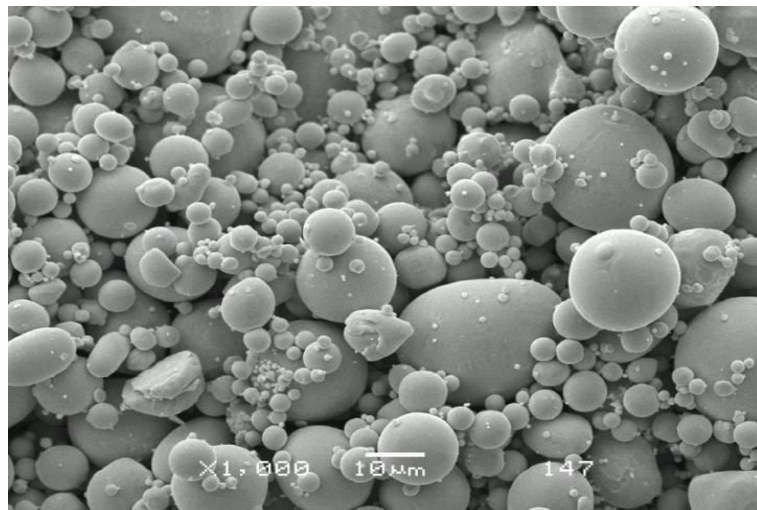
Hava, azot, argon ve helyumun parçalayıcı gaz olarak kullanıldığı atomizasyon yöntemi gaz atomizasyonudur. Sıvı malzeme nozuldaki basınçlı gazın genişlemesi sayesinde hızlı bir şekilde parçalanır. Bu yöntemde oluşan parçacık şekli küreseldir ve genellikle 10µm boyutu üzerinde sınırlıdır. Bu yöntemde birçok değişken vardır ve bu parametrelerin değiştirilmesiyle parçacık boyutlarında değişiklikler olur. Bunlar nozul geometrisi, sıvı metalin sıcaklığı, basınç değeri, gaz debisi ve gaz sıcaklığı olarak belirtilebilir. Partikül olarak gaz atomizasyonunun üretim hızı 100 kg/dakikaya ulaşabilir. Gaz atomize tozları iyi akış ve paketlenme özelliğine sahiptir.



Şekil 2.12. Atomizasyon sırasında damlacıkların sıvı demetinin parçalanmasındaki değişimi [27].

Gaz atomizasyonunda sıvı metale ne kadar çok enerji aktarımı sağlanabilirse oluşan parçacıklarda o denli küçük olur.

Gaz yerine bir sıvının ergiyik demetini parçalaması da yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. Sıvılar yağ ve su içerir. 1600 °C' den daha düşük sıcaklıklarda ergiyen metaller için kullanımı oldukça iyi sonuçlar verir. Yüksek basınçlı su jetlerinin ergiyik demetine çarpmasıyla parçacık oluşumu ve bu parçacıkların soğuyarak katılması sağlanır. Bu yöntemin gaz atomizasyonuna göre avantajı ise parçacıkların daha hızlı bir şekilde soğumasıdır. Bu işlemler sırasında ergiyik sudaki oksijenle tepkimeye girme olasılığı vardır ama bu olasılık da oksijenin yağla tepkimeye girmesiyle ortadan kalkmaktadır. 1.7 MPa su basıncıyla ergiyik metalden 117 µm boyutunda parçacıklar elde edilmiştir. Basıncın 8 kat daha artırılmasına rağmen aynı oranlarda tozların küçülmesi meydana gelmemiştir.



Şekil 2.13. Küresel şekilli gaz atomize kalay tozlarının genel yüzey görüntüleri [28].

Ortalama toz boyutu atomizasyon işlemindeki değişkenlerle alakalıdır. İşlem parametreleri arasındaki bağlantıda Weber sayısı da vardır ve bu sayı Reynold sayısı gibi boyutsuzdur. Weber sayısında gaz hızı V , gaz yoğunluğu ρ_G , ergiyik yüzey enerjisi γ_M ve ergiyik çubuk çapı d_L ' dir.

$$W_e = \frac{\rho_G V^2 d_L}{2\gamma_M} \quad (2.1)$$

Bağıntı toz boyutu D 'yi ise aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır:

$$D = K d \left[1 + \frac{M_M}{M_G} \right] \frac{\eta_M}{\eta_G W_e} \quad (2.2)$$

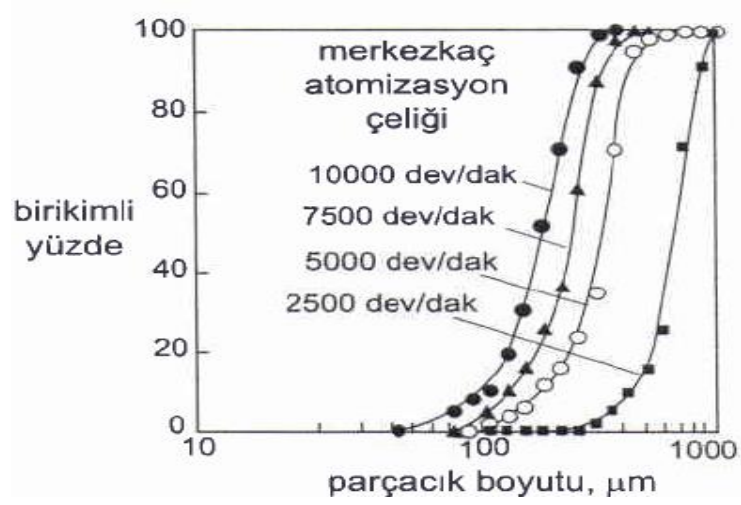
Burada K deneye bağlı bir sabit, M_M ergiyik demetinin kütleli debisi, M_G gazın kütleli debisi, η_M ergiyiğin viskozitesi, η_G ise gazın viskozitesidir. Bu hesaplama bal mumundan çeliğe kadar birçok yelpazede hesaplama imkânı sunmaktadır. Gaz atomizasyonunda Weber sayısı çoğunlukla 1000 'in altında gerçekleştirilir[25].

Savurmalı atomizasyon tekniği ise, bir pota içerisinde dönen ergiyiğin merkezkaç kuvvetiyle pota çeperlerine damlacıklar halinde çarpması ve bu damlacıkların zamanla soğumasıyla toz parçacıklarının oluştuğu bir yöntemdir. Bu yöntem ile küresel formda parçacıklar oluşur.

Bu sistemde işlem parametreleri aşağıdaki gibidir:

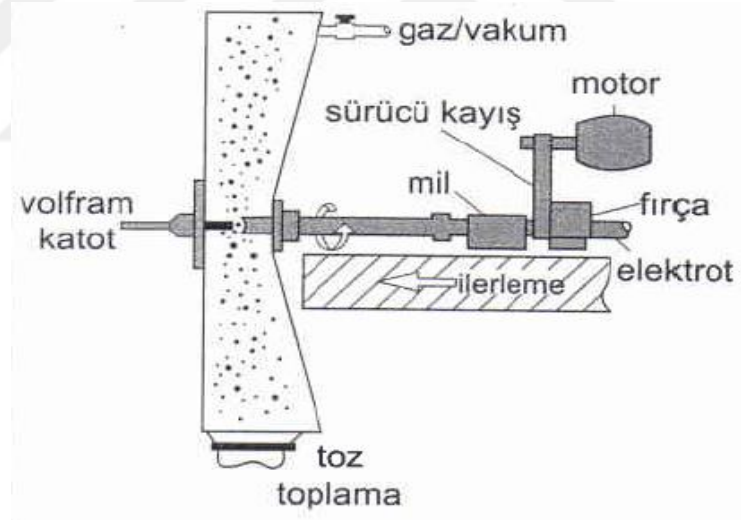
$$D_{50} = \frac{A}{\omega} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_M R}} \quad (2.3)$$

Burada A işlem sabiti, ω açısal hız, γ ergiyik yüzey enerjisi, ρ_M ergiyik yoğunluğu ve R elektrot yarıçapıdır. Şekil 2.14.'de dört farklı elektrot dönme hızında üretilmiş çelik tozların birikimli parçacık boyut dağılımı grafiği gösterilmektedir. Parametrelerin yüksek tutulmasıyla elde edilen toz parçacıklarının da küçük boyutlarda olması muhtemeldir.



Şekil 2.14. Parçacık boyut dağılımının dönme hızı ile değişimi [27].

Yüksek dönme hızı, büyük dönme çapı küçük parçacıklarının oluşmasında izlenecek yoldur. Uçuş sırasında çubuklar damlacık formuna dönüşür ve sonunda küre şeklinde parçacıklar oluştururlar.



Şekil 2.15. Döner elektrot ile savurmalı atomizasyonun şematik gösterimi [27].

Gaz yerine ergiyik demetinin parçalanmasında bir sıvının kullanılması oldukça yaygındır. Sıvılar, yağ ve su içerir. 1600 °C'den az sıcaklıklarda eriyen malzemeler için suyun kullanımı yaygındır. Bu yöntemde damlacıkların hızlı katılaşması daha verimli bir şekilde gerçekleşir ve bu yöntemle üretilen tozların soğuması birkaç tane su jetinin yüksek basınçlı sıvılarıyla gerçekleşir. Bu yöntem gaz atomizasyonuna benzetilir ancak bu yöntemde soğuma daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu yöntemle üretilmesi gerçekleştirilen tozların şekli hızlı soğuma nedeni ile düzensiz ve yüzey itibarıyla de

pürüzlüdür. Üretim esnasında yan ürün olarak hidrojen oluşması muhtemeldir. Bu durumu ortadan kaldırmak için sentetik yağlar kullanılır ama bu şekilde ise tozların üretimi daha pahalı olur. Bu yöntemde eğer ergiyik malzeme ergime noktasının daha üzerine ısıtılırsa tozların şekil itibarıyla ve yüzeysel olarak daha düzgün olması sağlanır. Bir atomizasyon işleminde 1.7 MPa basınçlı su kullanılarak 117 µm ortalama toz boyutu elde edilmiştir. Ancak bu basıncın sekiz kat artırılmasıyla üretilen toz parçacıklarının boyutunun aynı oranda küçülmesi gerçekleşmemiştir. Bu oran yaklaşık üç katına kadar ulaşabilmiştir. Su gaza göre daha yoğun ve basıncı daha farklı ayarlanabildiği için nozulun mesafesi bu üretimde ve şekillerin düzgün olmasında önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca maliyetinin düşük olmasının istendiği üretim şekillerinde su atomizasyonu diğerlerine nazaran daha uygundur.

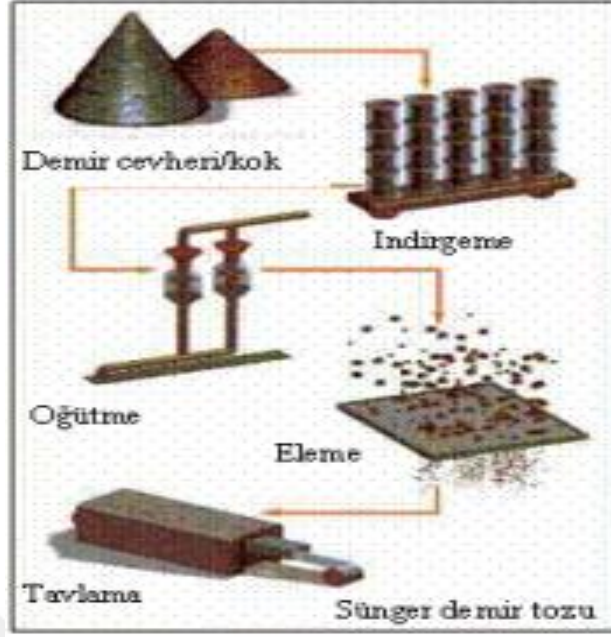
Sıvı atomizasyonunda parametrelerin formüle edilmiş hali aşağıdaki gibidir:

$$D = \frac{\beta \ln(P)}{V \sin(\alpha)} \quad (2.4)$$

Bu değişkenler içerisinde β atomizasyon etkileri içeren bir sabit, P su basıncı, V suyun hızı ve α ise ergiyik demeti ve su jetleri arasındaki açıdır. Burada basınç ve suyun hızı parçacıkların boyutunu kontrol eder [27].

2.8.2.2. Kimyasal yöntemler

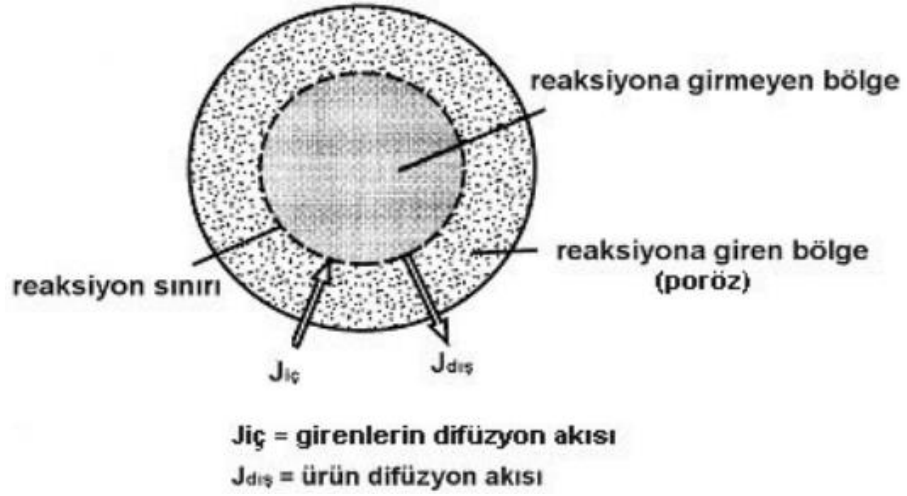
Kimyasal yöntemlerle malzemelerin birçoğu toz formuna dönüştürülebilmektedir. Parçacık boyutu kimyasal tepkimelerdeki parametrelerin değiştirilmesiyle kontrol edilebilmektedir. Metal tozların kimyasal yöntemlerle üretimi, metal oksitlerin(demir, nikel, bakır, tungsten, molibden) CO ve hidrojen gibi gazlarla indirgenmesine dayanmaktadır. Sünger demir uygun bir şekilde seçilen indirgeyici elementlerin uygulanmasıyla elde edilir. Magnetit (Fe_3O_4), kok ve kireç taşı bir seramik kaba konarak karıştırılır ve sünger demir elde edilir. Karışım 1260° C'e 68 saat bekletilir ve indirgenmenin tamamlanmasıyla sünger demir elde edilir.



Şekil 2.16. Kimyasal yöntemlerle demir tozu üretimi [29].



Tepkimeler sonucu elde edilen sünger demir külçeleri 1260 °C'de birbirine yapışmış halde olduğundan öğütülerek istenilen tane boyutlarına getirilir. 870 °C 'de hidrojen gazıyla tavlansarak oksijen ve karbondan maksimum oranda arındırılır. Daha sonrasında ise elekten geçirilerek toz parçacıklar elde edilir.

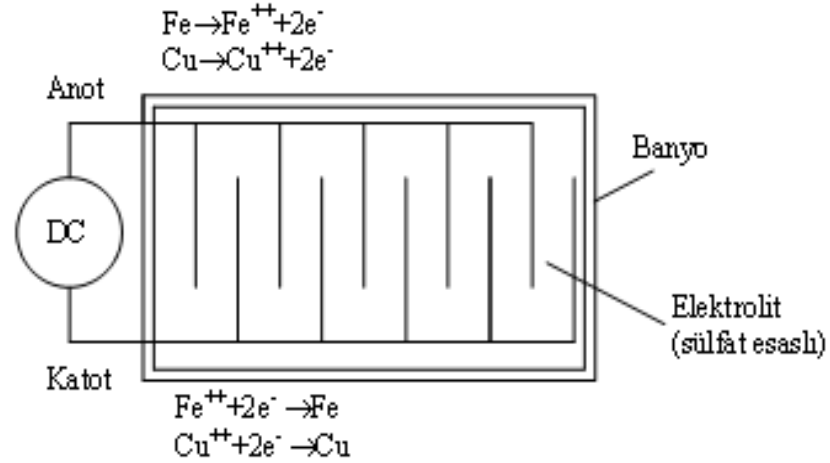


Şekil 2.17. Metalik toz üretiminde oksit partikülünde gerçekleşen tepkime gösterimi [29].

Kimyasal tepkimelerde redükleyen gaz redüklenen metalin üzerine doğru yavaş bir şekilde hareket eder. Bu aşamalarda metalin içine doğru yani redüklenen metale doğru difüzyon gerçekleşir. Aynı şekilde redüklenen metalden de dışa doğru yani tepkime ürününün dış yönüne doğru bir difüzyon gerçekleşir. Reaksiyonlarda genellikle tepkimenin hızını da bu difüzyon mekanizmalarından biri belirler [28,29].

2.8.2.3. Elektrolitik ayrıştırma yöntemleri

Bu yöntemin gerçekleşmesi, belirli bir gerilim altında ve belirli bir havuz içerisinde anodun çözünmesi ile gerçekleşir. Oksitlerden oluşan tozlar katoda akım vererek elektrolitik banyoda çökertilir veya katotta birikmesi sağlanır. Elektrolitik olarak bakır sülfat ve sülfirik asit kullanılır. Anot bakır, katot ise antimuanlı kurşundur.



Şekil 2.18. Elektroliz ile toz üretim şeması [26].

Bu aşamada elektrolitik hücrede çökertilen tozlar ve ya katotta biriken metal öğütme işlemiyle toz haline getirilir ve yıkanarak elektrolitik sıvıdan arındırılır. Kurutma esnasında oksitlenme tepkimesinin meydana gelmemesi için asal gazlar vasıtasıyla gerçekleştirilir. Elektrolitik yöntemin en iyi avantajı ise işlemten sonra yüksek saflıkta toz elde edilmesidir [28,29].

2.8.2.4. Mekanik yöntemler

Mekanik yöntemleri dört kısımda ele almak mümkündür. Bunlar kesme, darbe, aşındırarak öğütme ve basma şeklindedir. Darbe toz haline getirilecek olan malzemenin çekiçle vurmak suretiyle meydana gelen bir işlemdir. Aşındırarak öğütme ise, aşındırıcının malzeme ile sürtünmesi sonucu küçük boyutlara ayırma işlemidir. Kesme işlemi malzemenin kesilerek küçük boyutlara ayrılmasıdır. 1-100µm boyutta toz elde etmek için ise bilyeli öğütücü ve diğer varyasyonlardaki öğütücüler ile öğütmek daha uygundur.

Öğütme işlemi sert bilyeler, çubuklar ve çekiçler vastasıyla gevrek olan malzemelerin darbe uygulanarak küçük boyutlara ulaştırmaya yarayan mekanik bir işlemdir. Öğütme işleminde toz haline getirilecek malzemenin darbe gerilmesi malzemenin kusur yapısına ve çatlak ilerleme davranışına bağlıdır:

$$\sigma = \left(\frac{2Er}{D} \right)^{1/2} \quad (2.5)$$

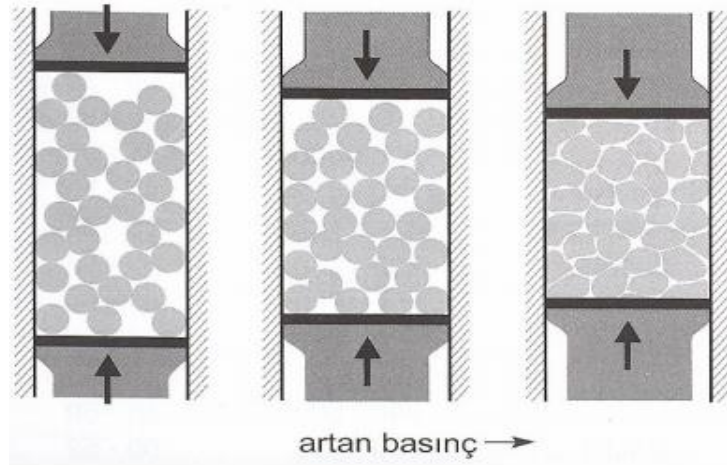
Burada E elastik modül, r kusur boyutu ve ya toz içindeki çatlak ucu boyutu ve D parçacık boyutudur. Öğütme işleminde parçacık boyutu küçüldükçe sisteme uygulanan yani parçacıklara uygulanan enerjinin daha da artırılması gerekir. Bunun sebebi de parçacık ulaşması gereken en küçük kararlı boyuta ulaşmıştır ve artık öğütme işleminin devam etmesi parçacığa etkisi olmaz. Bu yüzden kullanılan öğütücü değirmenlerin devirlerinde artışa gitmek durumunda kalınır. Parçacıkların öğütülmesinde gereken bağıl enerjiyi belirleyen basit bir bağıntı vardır:

$$W=g\left(\frac{1}{D_F^a} - \frac{1}{D_I^a}\right) \quad (2.6)$$

Bu denklemde ilk parçacık boyutu D_I , son parçacık boyutu D_F , malzemeyi parçalamak için gerekli olan enerji W , g ise bilyelere, öğütücüye ve öğütücünün tasarımına bağlı olan bir katsayıdır. Öğütülen malzemelerden gevrek olanlar daha kolay öğütülür, sünek malzemelerde ise topaklanma gibi istenmeyen durumlar meydana gelir [28].

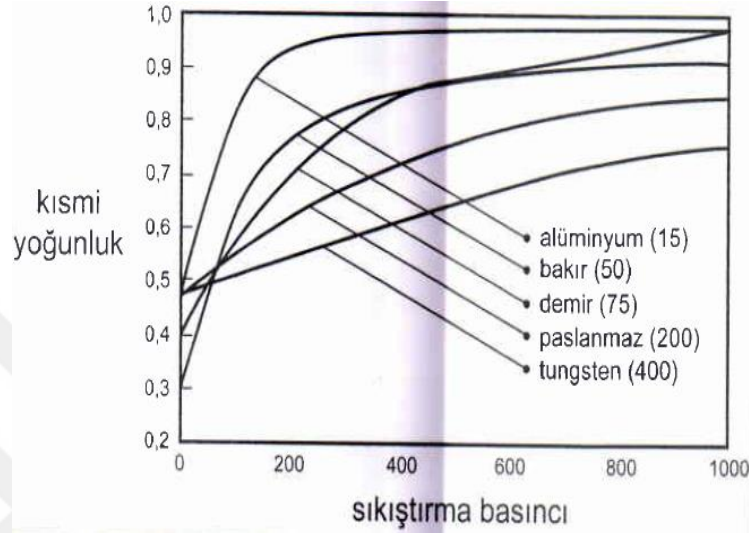
2.8.3. Tozların preslenmesi

Tozlar presle basıncın başlamasıyla ilkönce birbirini üzeri kayarlar ve basıncın artmasıyla birlikte şekil değişimine giderler. Genellikle tozlar presleme yapmadan önce 400-800 °C arasındaki değerlerde ön ısıtmaya tabi tutulur. Böylece oksit, rutubet, karbon, fosfor ve nem ortamdaki mümkün mertebe uzaklaştırılmış olur. Bu işlem neticesinde tozlara ısı işlem uygulanmış olur ve bu da tozların sıkıştırma esnasında daha fazla sıkışmasına sebep olur.



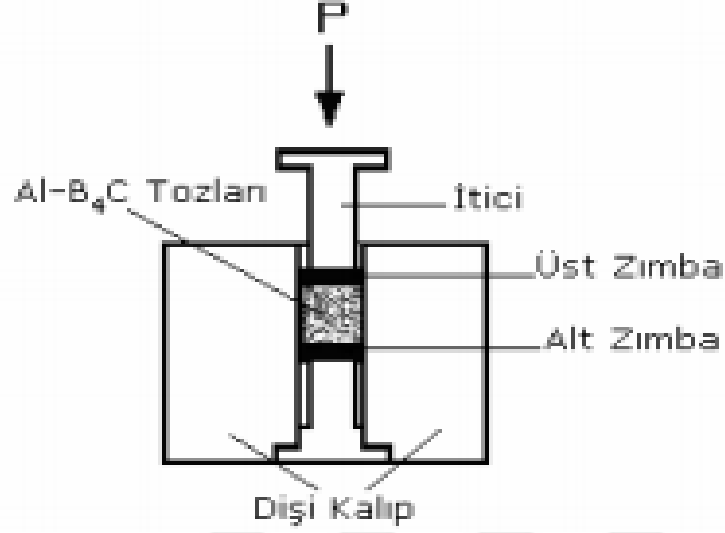
Şekil 2.19. Toz sıkıştırma kademeleri [21].

Basınç devam ederek partiküller arasında bağ mukavemeti oluşur. İlk aşamada az basınçla partiküller birbirine yaklaşır ve gözenekler tamamen kapanmaya başlar bu proses devam ettikçe yoğunluk hızla artmaya başlar. Partiküllerin birbirine yaklaşımı arttıkça yoğunlaşma hızı düşer.



Şekil 2.20. Çeşitli metallerin basınç ile yoğunluğunun değişimi [21].

Bu mekanizma partiküllerin sertliğine göre de değişir. Sıkıştırma esnasında parçacıklar komşu parçacıklar ile temas halindeyken herhangi bir bağ mukavemeti oluşmaz. Tozlar deforme oldukça ve basınç arttıkça bağ mukavemeti oluşur. Oluşan bağ mukavemeti partiküllerin cinsine göre de değişir. Basınç devam ettikçe partiküllerin sertliği artar ve bundan dolayı da daha yüksek değerlerde basınç gerekir. Çok sert ve çok yumuşak sertlikte olan tozlar daha düşük basınçlarda sıkıştırılır.



Şekil 2.21. Toz presleme kalıbı [30].

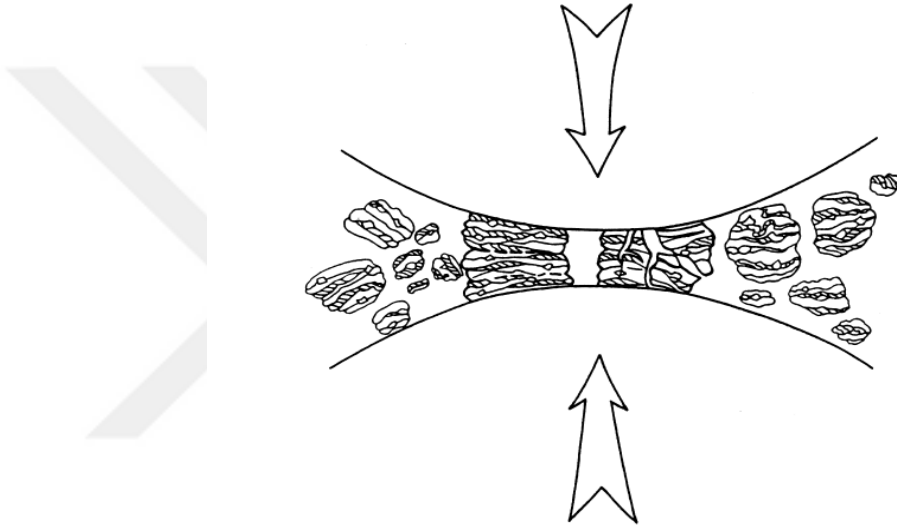
Presleme sonrası oluşan yoğunluğa ham yoğunluk, ortaya çıkan mukavemete ise ham mukavemet adı verilir. Sıkıştırma iki zımbanın basınç yapmasıyla toz elde edilirse oluşan sıkıştırılmış toz daha homojen olur. Eğer sıkıştırma tek bir zımbanın kuvvet uygulamasıyla meydana gelirse sıkıştırılmış toz yoğunluğunun homojenliği bakımından elverişli olmaz. Bu işlemden sonra sıkıştırılan tozlar kalıp içerisinde sıkışmış durumda kalır, işte bu sıkışan tozların çıkarılması için uygulanan kuvvete çıkarma kuvveti denir. Bu aşamada doğal olarak yağlayıcının etkisi de çok önemlidir. Yağlayıcı ilavesiyle uygulanan çıkarma kuvveti, hem de çıkarırken aşınmadan dolayı oluşacak tahribat en aza indirilir [27,28].

2.9. Mekanik Alaşımlama

Yüksek enerjili öğütme süresince toz partikülleri hızlı bir şekilde düzleştirilir. Bu sürecin devam etmesiyle partiküller arasında soğuk kaynak meydana gelir. Yapılar kırılır ve tekrar yeniden bir yapılanma oluşur. Bu mekanizmada iki yüksek enerjili top çarpışır ve bu çarpışan toplar arasında kalan bir miktar toz sıkışır ve düzleşme, parçalanma, tozların soğuk kaynak yaparak yeniden yapı oluşturmaları meydana gelir. Yaklaşık olarak bu sıkışma esnasında 1000 partikül ve ağırlık olarak yaklaşık 0.2mg bir toz sıkışması olur. Çarpışmalar esnasında malzemeler plastik deformasyona uğrar bunun sonucunda da partiküllerin kırılmasına sebep olur. İşlem devam ettikçe partiküllerin yeni yüzeyleri oluşur ve bu partikül boyutlarının artmasına sebebiyet verir. Hatta başlangıç tane boyutlarına göre üç kat daha büyük partikül boyutları meydana

gelebilir. Diğer yöntemlerle üretimi zor, karmaşık ve ya imkansız olan ve bileşimi oksitlerle güçlendirilmiş alaşımlar MA ile zorlanmadan imal edilebilmektedir.

Bu proses sünek-sünek ve sünek-gevrek olan sistemlerde geçerlidir. Çünkü bu sistemde malzemelerin başlangıç sertliği yumuşaktır dolayısıyla bu malzemeler yeni yüzeyler oluşturup partikül boyutlarını büyümeye meyillidirler. Öğütme devam ettikçe partiküller sertleşeceğinden artık kırılma aglomerasyon kuvvetine üstün gelir. Proses devam ettikçe toplanan partiküller rafine edilir ama partikül boyutları aynı kalır [27].



Şekil 2.22. Mekanik alaşımlamada Bilye-Toz-Bilye çarpışması [27].

Homojen ürün elde etmek için kullanılacak formülasyon şu şekildedir;

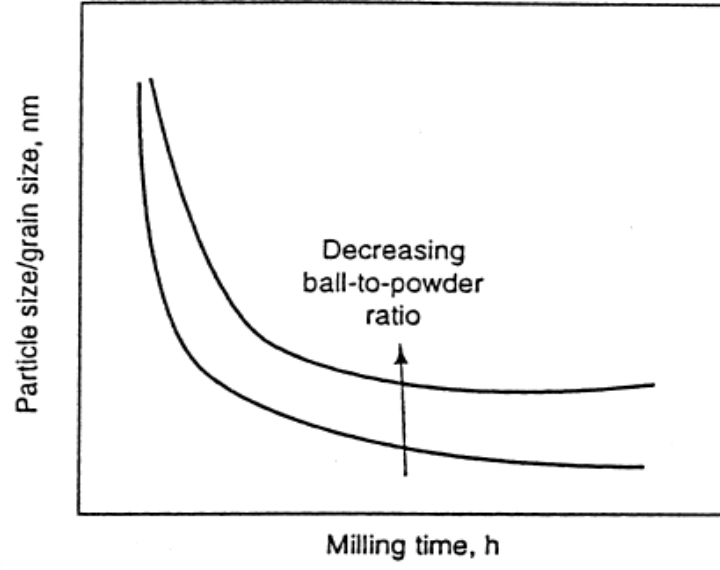
$$t = C \frac{d^2}{N^{1/2}} \quad (2.7)$$

Burada t öğütme zamanını, tahrik milinin dönme hızı da N olarak belirtilir. Diğer parametreler ise d öğütücü bilye çapı, C ise işlem süresinde prosesden kaynaklanan değişikliklerin belirlediği sabittir. Bilye çapı küçüldükçe öğütme zamanı azalır.



Şekil 2.23. Mekanik alaşımlamanın şematik gösterimi [27].

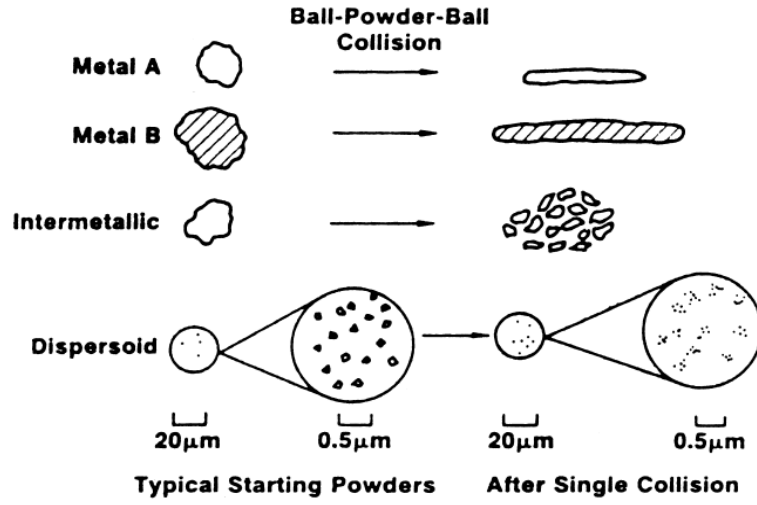
Proses devam edildikçe toz partiküllerinin uğradığı değişim şeklim aşağı kısımdaki gibi gittikçe homojenleşir. İşlem devam ettikçe sırasıyla soğuk kaynak ve kırılma adımları birbirini izler [25,31,32].



Şekil 2.24. Zamanın partikül boyutuna etkisini gösteren bir grafik [31].

2.9.1. Sünek – sünek sistem

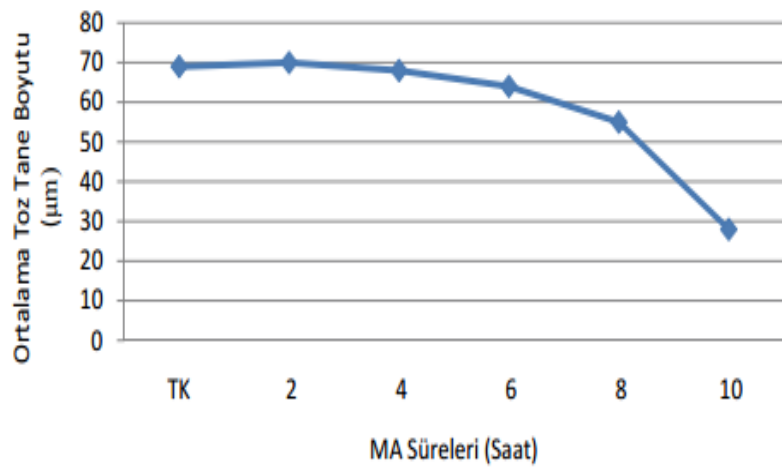
Bu kombinasyon öğütme sisteminin başarıya ulaşması için gerekli olan bir yöntemdir. En azından başarılı olan bir alaşımlamanın içeriğinde %15 oranında düktil bir malzemenin olması gerekir. Eğer düktil bir yapının olmadığı bir sistem düşünüldüğünde soğuk kaynak ve kırılmalar meydana gelmez ve alaşımlama istenilen değerleri vermez. Bu işlemler sırasında topraklar üzerine bir ve ya iki partikül kalınlığında tabaka oluşur. Tabakanın oluşması avantajlı bir durumdur. Çünkü toprakların bilye üzerinde tabaka oluşturmasıyla toprakların heterojen dağılımı engellenmiş ve toprakların yüzeyinin yıpranması engellenerek toprakun kirlenmemesi sağlanmış olur. Ancak bu tabakanın kalınlığı da minimum seviyede olmalıdır. Öğütücünün prosesi devam ettirmesiyle partiküllerdeki küçülme oranında bir durağanlık gözlenir. İşte bu hale kararlı hal denir [31].



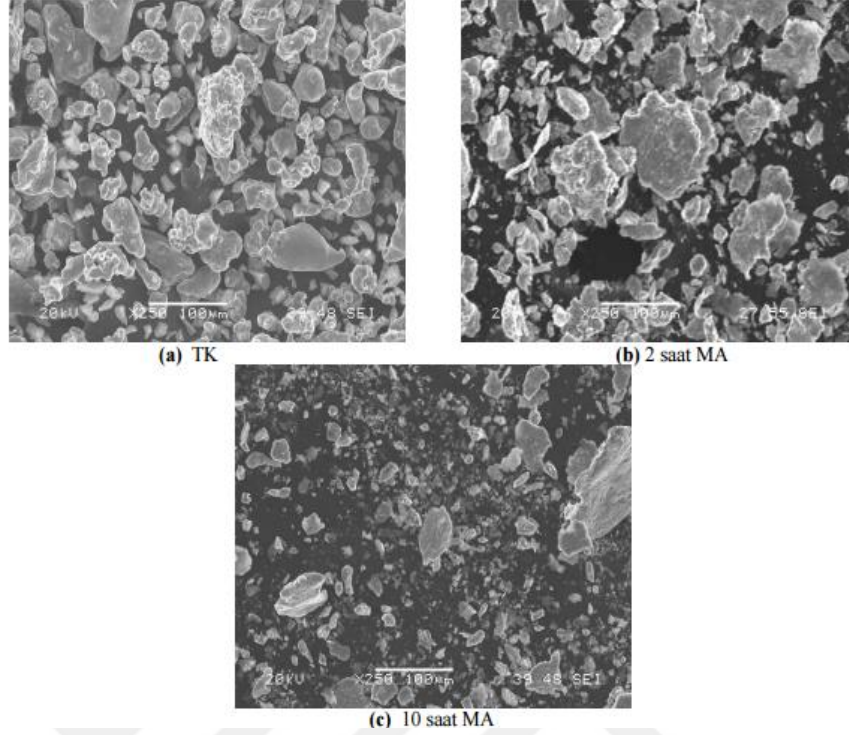
Şekil 2.25. Zamanın partikül boyutuna etkisini gösteren bir grafik [31].

2.9.2. Sünek – gevrek sistem

Bu sistemin kategorisine geleneksel oksit yapan bileşikler girer. Çünkü bu bileşiklerin partikülleri sünek olan malzemenin içerisinde dağılırlar. Başlangıç aşamasında sünek olan metal tozları metal bilyelerin arasında kalarak düzenli, oysa gevrek olan oksit partikülleri ise kırılırlar. Karabulut, H. ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada alüminyum ve %10 Al_2O_3 partikülleri mekanik alaşımlama prosesi uygulandıktan sonra diğer yapılan çalışmalardan farklı olarak iyonik bağlı olan alüminanın partiküllerin devam eden öğütme süresinde de etkili olduğu düşünülmektedir. İyon düzlemlerinin kayması sonucu aynı kutuplu olan parçacıklar elektrik alan içerisinde birbirlerini iterler ve kırılmalara sebep olurlar [29,30].



Şekil 2.26. Gevrek-sünek sistemde zamana bağlı olarak tane boyutunun değişimi [33].



Şekil 2.27. Zamana bağlı olarak mekanik alaşımlamada tane boyutunun değişimi [33].

2.9.3. Gevrek – gevrek sistem

Bu sistemin alaşımlama prosesini gerçekleştirmesi biraz ihtimal dışıdır. Çünkü gevrek olan malzemelerin öğütülmesi esnasında sünek malzemenin olmamasından dolayı kaynak işlemi gerçekleşmemektedir. Ama alaşımlama işlemi gevrek-gevrek sisteminde Si-Ge ve Mn-Bi arasında meydana geldiği biliniyor. Ayrıca bu sistemde amorf faz oluşumu da gözlemlenmektedir. Öğütme işlemi devam ettikçe küçük olan partiküller sabit olarak kalırlar ve boyutlarında değişiklik olmaz davranış biçimi olarak sünek sistemdeki gibi davranır ve buna sınırlı parçalanma denir. Diğer sistemlerde düşük sıcaklıklarda difüzyon meydana gelmektedir, lakin gevrek-gevrek sistemde bu olay gerçekleşmemektedir. Bunun sebebi olarak diğer sistemlerde gerçekleşen plastik deformasyonun buna sebep olmasıdır [31].



Şekil 2.28. α_2 -TiAl alaşımı içerisinde düzgün bir şekilde dağılmış olan Er_2O_3 partiküllerinin SEM’de çekilmiş görüntüsü [31].

2.9.4. Kullanılan öğütücü türleri

Bazı metallerin alaşım işlemi gerçekleştirilirken sıcaklık farklılıklarından dolayı metallerin birbiri içerisine difüze edilmesi oldukça zordur ve döküm esnasında da büyük zorluklarla karşılaşmıştır. Bu nedenle de yüksek hızlı öğütücü değirmenler ile bu mekanik alaşımlama işlemi gerçekleştirilmektedir [31].

2.9.4.1. Spex tipi öğütücü

SPEX tipi MA prosesi diğer öğütücü türlerine nazaran daha kısa sürede yapılabilmektedir. Bu değirmenlerde 20 dakikalık bir öğütme, BX 920/2 tipi düşük enerjili bir değirmende 20 saatlik bir öğütmeye eş değer olarak saptanmıştır. Bilyelerin çarpma hızının çok yüksek olduğu bu değirmenlerde öğütme zamanı diğer ticari değirmenlerle mukayese edilecek olursa, diğer değirmenlerde günlerce ve saatlerce süren bir öğütme işlemi SPEX öğütücülerde ise sadece dakikalar almaktadır [32].



Şekil 2.29. SPEX öğütücü tipi [31].

2.9.4.2. Planetary tipi öğütücü

Planetary öğütücü tipinin hareket mekanizması gezegenlere benzediği için bu isim verilmiştir. Bu öğütücü haznesinde birkaç yüz gram toz öğütülebilir. Bu öğütücü tipinin mekanizmasında alt kısımdaki disklerin hazneleri belirli eksenlerde döndürerek bilyeleri çepelere ve birbirine çarptırır ve tozların öğütülmesi sağlanır. Öğütücü hazneleri ve topları sekiz farklı metalden elde edilebilir. Akık, silikon nitrat, sinterlenmiş korundum, zirkonya, krom çelik, Cr + Ni çeliği, tungsten karbür ve plastik poliamid şeklindedir [31].



Şekil 2.30. Planetary tip öğütücü

2.9.4.3. Attritör tipi öğütücü

Geleneksel bir değirmen olan bu öğütücü tipi yatay olarak çalışır ve yarısına kadar küçük bilyelerle doludur. Yatay olduğundan dolayı tozlar zemindedir ve dönme hareketiyle bilyeler zemindeki tozlara çarpar bu sayede de tozlar öğütülmüş olur. Dönme hızı yani öğütücünün devrinin artırılması ile öğütme hızı da artar. Aşırı hız artışlarında bilyeler haznenin çeperine sabitlenir ve öğütme işlemi durmuş olur. Bu işlev hızın artması sonucu merkezkaç kuvvetinin bilyeleri çeperlere yapıştırmasıyla gerçekleşir. Attritor tipi öğütücülerde 0.5 den 40 kg'a kadar toz öğütülebilir [31].



Şekil 2.31. Attritor tipi öğütücü [31].

2.9.5. Öğütme tipi

Mekanik alaşımlamada farklı türlerde öğütücüler mevcuttur. Tozun miktarına, türüne ve istenen tozun boyutuna göre öğütme tipi tercih edilebilir. Kirlenme derecesi, partikülleşme sıcaklığı, amorf fazın oluşum miktarı ve amorf fazın partikülleşmesi için gereken eşik enerjisi öğütücü tipine bağlıdır. Araştırmacıların yaptığı bir deneyde, Zoz smolayer ve Spex 8000D tipi öğütücülerde Ni-%43 Mo öğütülmüş ve ortaya değişik yapılarda amorf fazlar çıkmıştır. Daha fazla toz üretimi yapmak için de öğütme tipi çok önemlidir. Bu yüzden daha fazla toz üretimi yapmak için planetary ve attritor tipi öğütücüler kullanmak daha elverişlidir. SPEX tipi öğütücülerde ise bu pek mümkün değildir. Spex tipi öğütücüler genellikle özel uygulamalar için kullanılır [6, 31].

2.9.6. Öğütme hızının etkisi

Öğütme hızının etkisi tozların istenilen seviyeye ulaşmasında en etkili faktörlerden bir tanesidir. Şöyleki öğütücü hızının artmasıyla birlikte bilyelere tesir eden enerji yoğunlaşacağından tozların küçülmesi daha da hızlanır. Fakat aşırı yüksek hızlı proseslerde bilyelerin hazne çeperine yapışma ihtimali vardır. Bu yüzden kritik devir hızının iyi bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Aşırı öğütme hızlarında kirlenme problemiyle de karşılaşılabilir. Tabı bu durumun bilye türüyle de alakası vardır. Hızlı dönen bilyelerin tozlara ve çeperlere daha hızlı enerjiyle çeperlere çarpması sonucu bilye ve çeperlerde partikül çıkmasına sebebiyet verilebilir. Bunun neticesi itibariyle tozların içerisinde yabancı ve istenmeyen oluşumlara neden olur [31].

2.9.7. Bilye/toz ağırlık oranı

Hazne içerisindeki toz ve bilye miktarlarının ağırlıkça oranı tozların öğütülmesinde zaman açısından çok önemli bir faktördür. Orandaki artış ne kadar fazla olursa öğütme zamanı o derecede kısalmaktadır. Çünkü bilyeler arasında sıkışan toz miktarı azaldığından bilyelerin çarpma enerjisi daha fazla toza çarpar ve daha kısa zamanda öğütme işlemi gerçekleşmiş olur. Öğütme işlemi değişik oranlarda olabilir. Genel olarak en yaygın olarak kullanılan oran 10:1 oranıdır. Bunun dışında özel durumlarda 220:1, 1:1, 20:1 oranlarında da öğütme işleminin yapıldığı mevcuttur. Bu oranlardaki artışın tozlarda kirlenmeye sebebiyet verdiği de görülmüştür. SPEX türü öğütücüde yapılan öğütmelerde 10:1 oranda 7 saat, 50:1 oranda 2 saat ve 100:1 oranda ise 1 saatte tozlar aynı oranda öğütülmüştür [31].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

Bu çalışmada, yaklaşık 40-80 nano boyuta sahip B₄C partikülü %3, %5, %10, %15, %20 oranlarında, gaz atomizasyonu ile üretilen Etial 141 tozu içesine mekanik alaşımlama yöntemiyle karıştırılıp, 9x9x25 mm ebatlarında öncelikli olarak 350 MPa soğuk preslemeyi takiben 35 MPa basınç altında 540 °C’de sıcak preslenerek nano B₄C takviyeli Al kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karıştırılan nano boyutlu B₄C ve Etial 141 tozu 3 saat süreyle ve 350 devir/dk süreyle mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Kompozit üretimi için kullanılan nano B₄C üretimi için Boroptik Mühendislik A.Ş’ den temin edilen 20µm boyutundaki B₄C tozu kullanılmıştır. Kullanılan mikron boyutlu B₄C partikülü nano öğütme öncesinde XRD, SEM ve titrasyon yöntemiyle element analizlerinden geçirilmiştir. Kompozit üretimi için kullanılan Etial 141 alaşımı 80 mikron boyutunda gaz atomizasyon yöntemiyle üretilen bir ürün olarak hazır halde temin edilmiştir. Mekanik alaşımlama sonrasında soğuk presleme ve akabinde sıcak presleme yöntemiyle üretilen numuneler optik, XRD, sertlik ve SEM analizlerine tabi tutulmuştur.

3.2. Kompozit Üretimi İçin Kullanılan Malzemeler

Nano B₄C takviyeli Al matrisli kompozit malzemenin mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yöntemiyle üretimi amacıyla Etial 141 alaşım tozu kullanılmıştır. Kullanılan Etial 141 alaşım tozunun makro fotoğrafı Şekil 3.1. ve kimyasal içeriği Tablo 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1. Matris malzemesi olarak kullanılan Etial 141 alüminyum alaşımı tozu

Takviye malzemesi olarak da Şekil 3.2’de makro fotoğrafı, Tablo 3.2.’de fiziksel ve kimyasal özellikleri verilen B₄C tozu kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Takviye malzemesi olarak kullanılan nano boyutlu B₄C tozu makro fotoğrafı

Öğütme esnasında ise işlem kontrol katkısı olarak propilen glikol kullanılmıştır. Başlangıç alüminyum alaşımının toz boyutu ortalama 80µm boyutundadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan nano B₄C tozunun ortalama tane boyutu ortalama 60-70 nm civarındadır.

Tablo 3.1.Etial 141’ kimyasal kompozisyonu (% ağırlık) [34].

Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Ti	Zn	Ni	Al
11.5-13.5	1,1	0,3	0,2	0,2	0,15	0,1	0,1	Kalan

Tablo 3.2. B₄C Tozlarının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri [35].

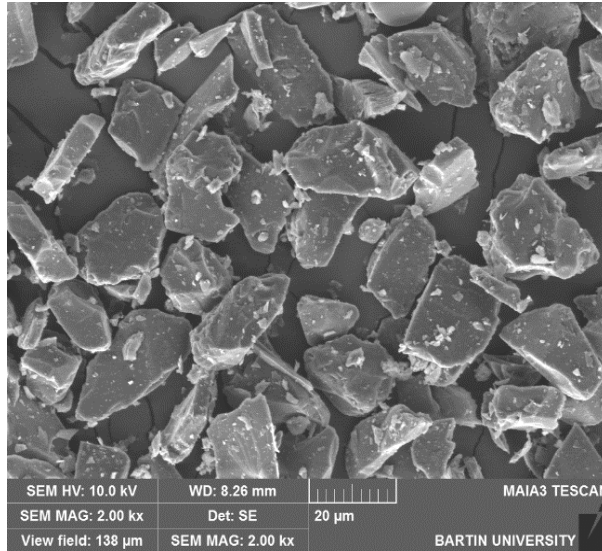
Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Erime Noktası(oC)	Eğme Dayanımı (MPa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Basma Dayanımı (MPa)	Sertlik (Vickers) (GPa)
2.52	2400	345	155	290-450	2750	27,4 - 34,3

Tablo 3.3 Etial 141'in fiziksel ve mekanik özellikleri [36].

Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Erime Noktası(oC)	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Basma Dayanımı (MPa)	Sertlik (Vickers) (MPa)
2.68	575-585	130	240	2750	60

3.3. Nano B₄C Üretimi

Kompozit üretiminde kullanılacak olan nano B₄C tozunun üretimi amacıyla Boroptik Mühendislik A.Ş' den temin edilen SEM mikroyapısı Şekil 3.3'de görüldüğü gibi 20µm boyutundaki B₄C tozu kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Mikron Boyutlu B₄C Tozu SEM Fotoğrafi

Mikron boyutunda alınan tozlar biyeli öğütücü kullanılarak 48 saat süre 1/10 toz oranında öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen tozlar boyut analizi için SEM analizleri yapılmıştır.

3.4. Mekanik Alaşım İşlemi

Kompozit üretimi için kullanılacak ve içerisinde %3, %5, %10, %15, %20 oranlarında nano B₄C takviye edilmiş Etial 141 tozlarının mekanik olarak alaşımlanması işleminde gezegen tipi öğütücü (Fritsch Pulveriste Premium 7) kullanılmıştır. Haznelerin hacmi 80 ml'dir. Tozların mekanik olarak alaşımlanması amacıyla 10 mm çapında WC (volfram karbür) bilyeler kullanılmıştır. Hazneye hassas terazi ile tartılan tozlar 3 saat süreyle 600 devir/dak. Dönme hızında 3 saat süreyle mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Kullanılan öğütücü ve hazne resimleri Şekil 3.4. ve Şekil 3.5.'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Mekanik alaşımlama ve toz öğütme prosesinde kullanılan öğütücü

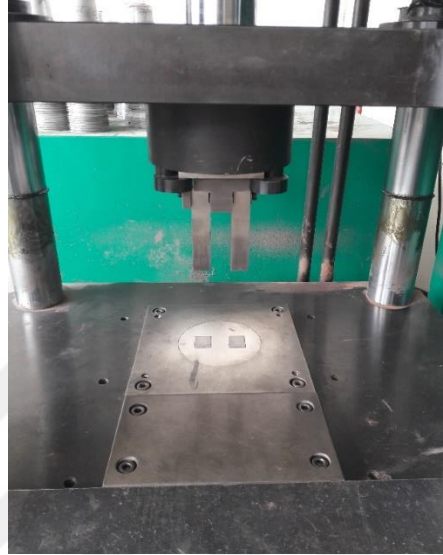


Şekil 3.5. Öğütücü hazneleri

3.5. Sıcak Presleme Yöntemiyle Kompozit Üretimi

Mekanik alaşımlama işlemi sonrası çıkarılan toz karışımı çift etkili hidrolik pres vastasıyla 350 MPa basınç altında 9x9x25 mm ebadında soğuk presleme ve bunu

takiben argon atmosferi altında 35 MPa basınç ve 540 °C'de 4 dk boyunca sıcak presleme işlemine tabi tutularak kalıptan çıkarılmıştır. Kullanılan Soğuk presleme cihazı Şekil 3.6'da, sıcak presleme cihazı resmi ise Şekil 3.7'de görülmektedir.

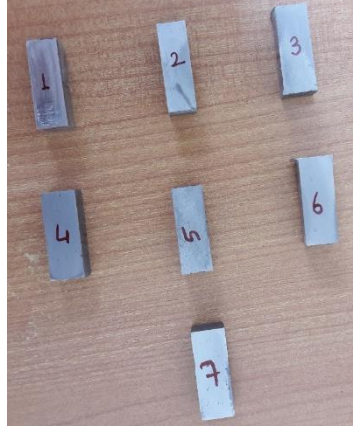


Şekil 3.6. Soğuk presleme cihazı ve kullanılan kalıp şekli



Şekil 3.7. Sıcak Presleme Cihazı

Sıcak presleme sonrasında üretilen kompozit numunelerin makro fotoğrafları Şekil 3.8.'de görülmektedir.



Şekil 3.8. Sıcak preslemeden sonra oluşan (1) %3, (2) %5, (3) %10, (4) %15, (5) %20 oranlarında nano B4C tozu takviyeli ve ortalama 20 µm boyutunda B4C tozu (6) %3, (7) %10 oranlarında ilave edilmiş kompozit numuneler

3.6 Optik Mikroyapı ve SEM Analizi

Metanik alaşımlama ve takiben sıcak presleme sonucunda üretilen 7 adet kompozit numune, Nikon MA 100 Ters Metal Mikroskobu (Şekil 3.9) ile optik ve Zeiss marka EVO LS10 model SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) mikroskobu (Şekil 3.10) ile de SEM mikroyapı analizleri gerçekleştirilerek mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 3.9. Nikon MA 100 Ters Metal Mikroskobu



Şekil 3.10. Zeiss marka EVO LS10 model SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu)

3.7. X- Işımları Analizi (XRD)

Nano B_4C üretimi amacıyla kullanılan mikron boyutlu bor karbür tozu ve Üretilen kompozit numuneler BRUKER AXS D8 ADVANCE marka XRD cihazı kullanılarak (Şekil 3.11) XRD analizine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.11. X-ışını cihazı

3.8. Mikrosertlik Ölçümü

Üretilen kompozit malzemelerin mikro sertlik değerleri, Şekil 3.12’de fotoğrafı verilen Future Tech FM-700 marka mikro sertlik ölçme cihazında ölçülmüştür. Bu işlem 10sn süre ve 25g yük altında gerçekleşmiştir. Her bir numuneden 5 adet sertlik ölçümü alınmıştır.



Şekil 3.12. Future Tech FM-700 sertlik ölçme cihazı

3.9. Metalografi Çalışmaları

Üretilen kompozit malzemelerin optik ve SEM analizleri amacıyla yüzey parlatma işlemleri Şekil 3.13’de fotoğrafı verilen Mikrotest marka yarı otomatik zımparalama cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi öncesinde numuneler Metkon ECOPRESS 50 bakalite cihazı (Şekil 3.14) kullanılarak kalıplanmıştır. Zımparalama işleminde sırasıyla 60µm, 15µm ve 3µm boyutlu microthin zımpara kullanılmıştır. Parlatma işleminde soğutucu olarak su kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Zımparalama ve parlatma cihazı



Şekil 3.14. Metkon ECOPRESS 50 bakalite alma cihazı

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

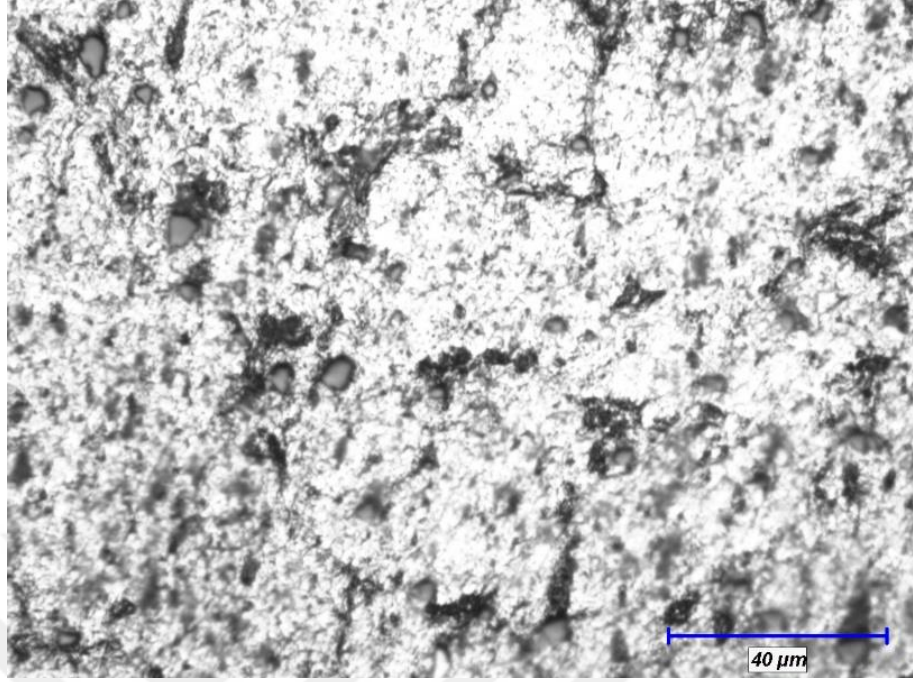
4.1. Giriş

Bu çalışmada % 3, %5, %10, %15, %20 oranlarında nano B₄C takviye edilen Etial 141 Al alaşımından oluşan kompozit malzemeler mekanik alaşımlama ve sıcak presleme yöntemiyle üretilmiş ve elde edilen numunelerin optik, XRD, sertlik ve SEM analizleri yapılmıştır.

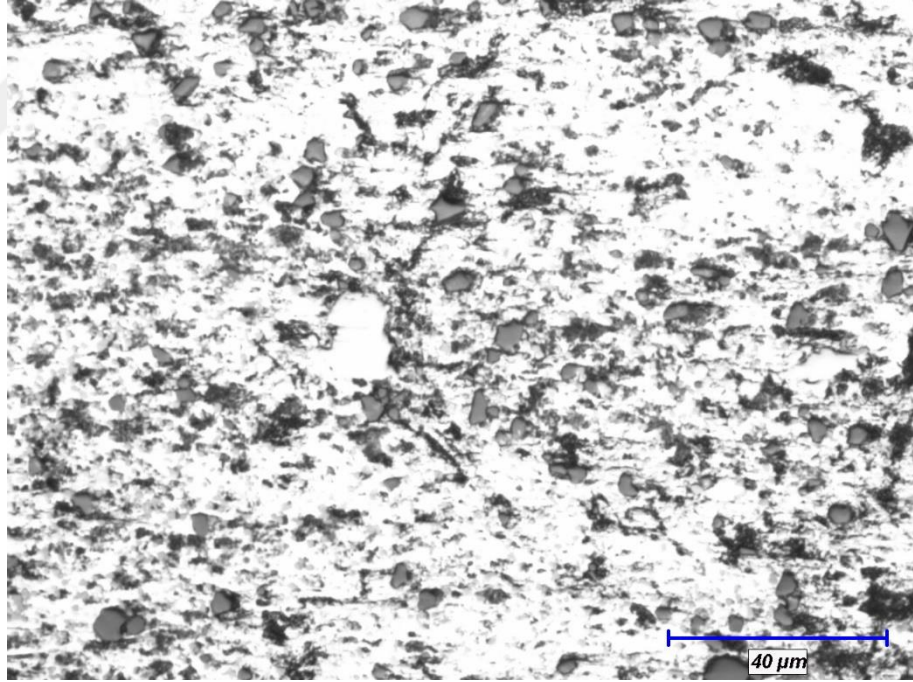
4.2. Üretilen Kompozit Malzemelerin Optik Mikro Yapı Görüntülerinin İncelenmesi

İçerisine % 3, %5, %10, %15, %20 oranlarında nano B₄C takviye edilen Etial 141 Al alaşımının optik mikro yapı görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'de görülmektedir.

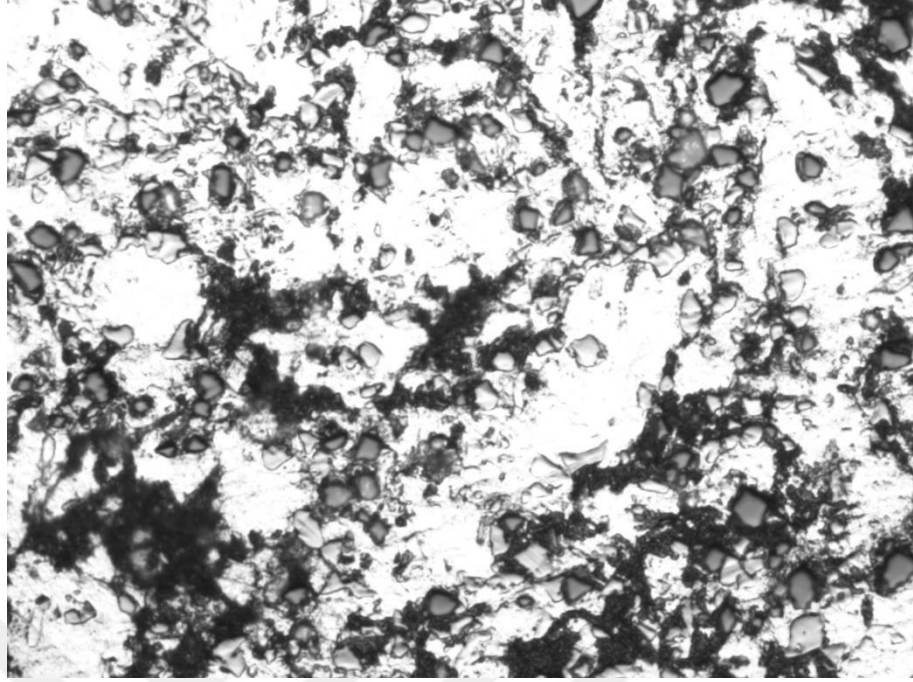
Optik mikroyapı fotoğraflarından % 3 ve % 5'lik nano B₄C takviyelerinde daha homojen bir dağılımın gerçekleştiği görülürken % 10, 15 ve % 20'lik B₄C takviyelerinde kümelenmelerin arttığı görülmektedir. Optik mikroyapı fotoğraflarından aynı zamanda matris fazın içeriğine bağlı olarak Al-Si ötektik fazının tüm numunelerde olduğu da görülmektedir.



Şekil 4.1. %3 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafi



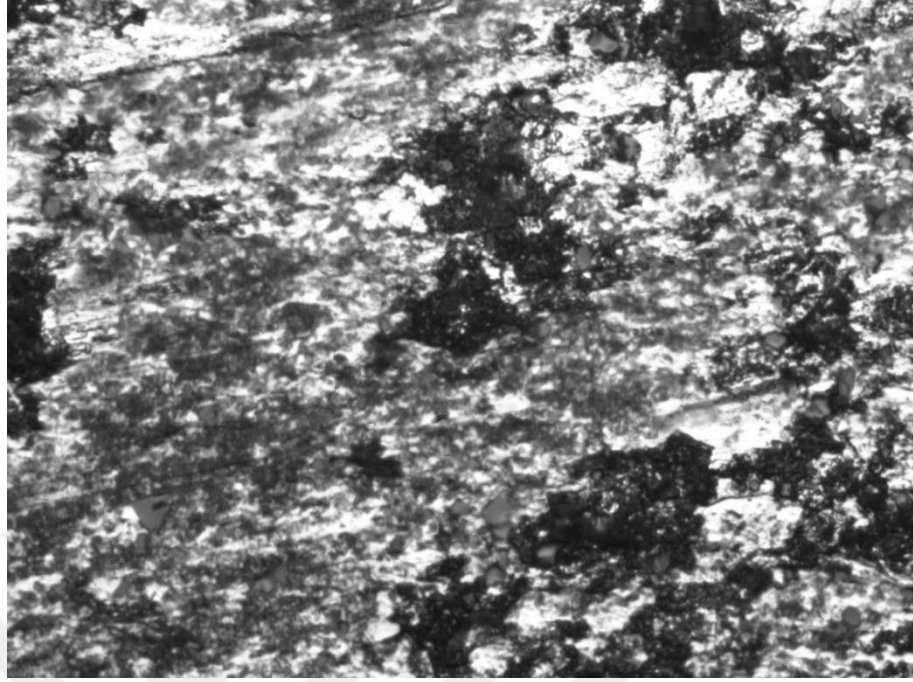
Şekil 4.2. %5 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafi



Şekil 4.3. %10 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafi



Şekil 4.4. %15 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafi

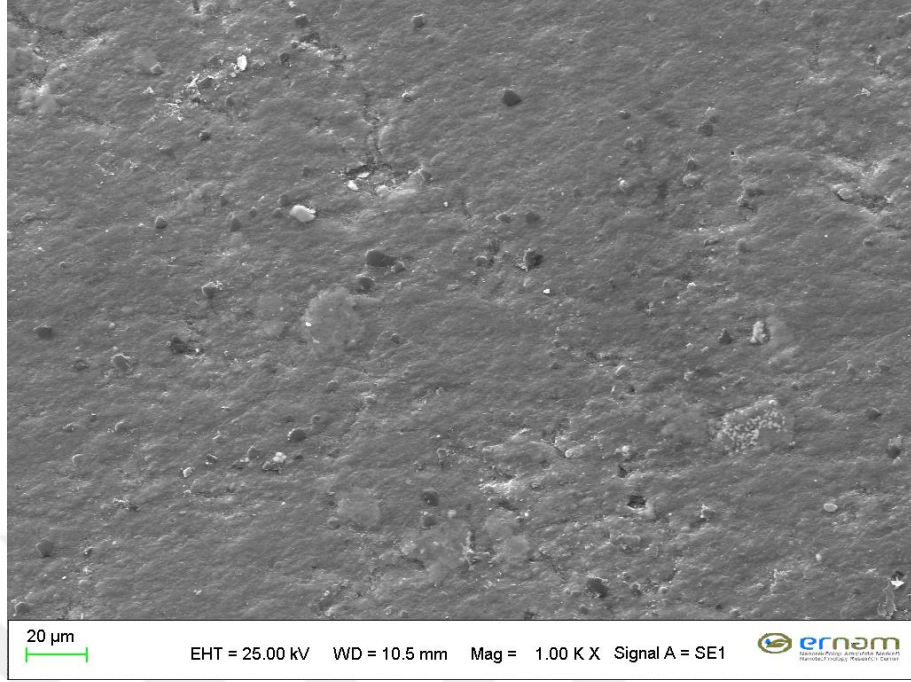


Şekil 4.5. %20 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin Optik Mikroyapı Fotoğrafi

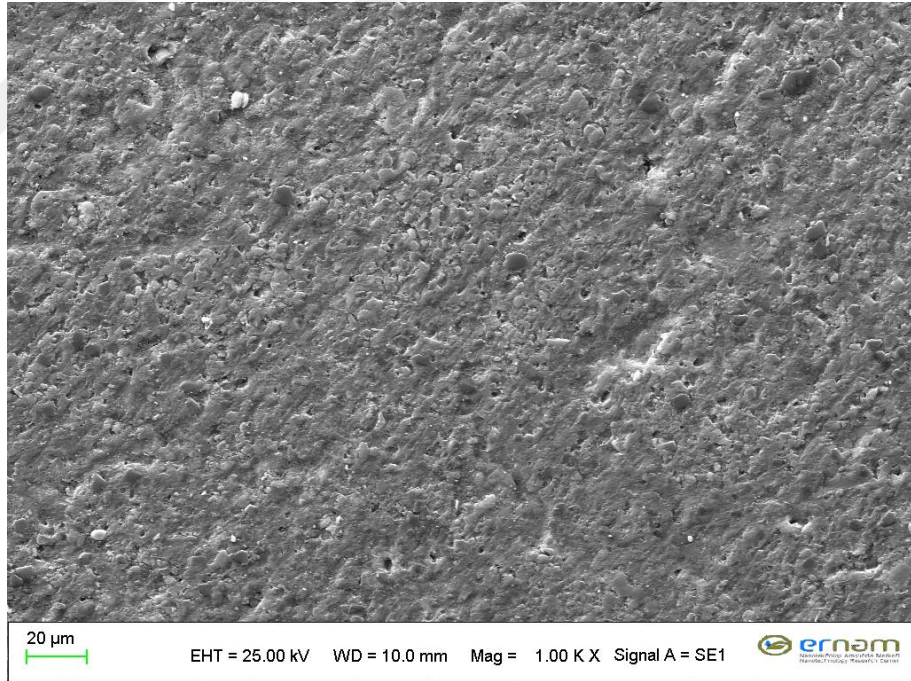
4.3. Üretilen Kompozit Malzemelerin Sem Mikro Yapı Görüntülerinin İncelenmesi

İçerisine % 3, %5, %10, %15, %20 oranlarında nano B₄C takviye edilen Etial 141 Al alaşımının mekanik alaşımlama ve takiben sıcak presleme sonucunda üretilen kompozit malzemelerin SEM mikro yapı görüntüleri sırasıyla Şekil 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10'da görülmektedir.

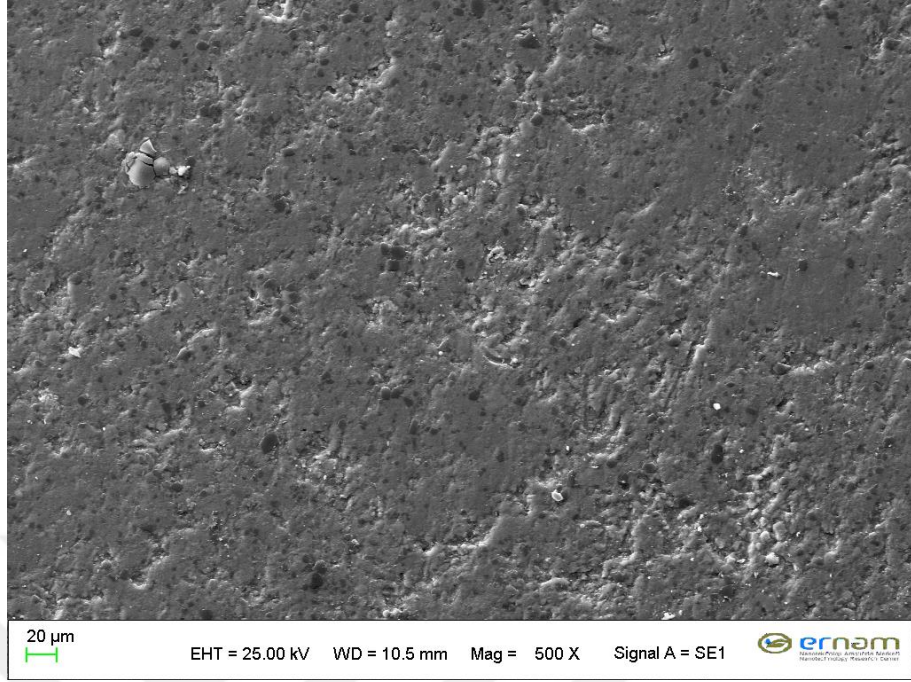
SEM mikroyapı fotoğraflarından genel itibariyle % 3, % 5 ve %10'luk nano B₄C takviyelerinde daha homojen bir dağılımın gerçekleştiği görülürken % 15 ve % 20'lik B₄C takviyelerinde kümelenmelerin meydana geldiği görülmektedir. Kümelenmeler özellikle tane sınırlarında gözlemlenmiştir. Ama aynı zamanda tüm nano takviyeli numunelerde matris ve B₄C takviye partikülleri uyumunun mükemmel olduğu özellikle SEM mikroyapı fotoğraflarında aşikar bir şekilde görülmektedir. Bu durum özellikle nano partiküllerin dislokasyonlar üzerindeki rolünü artırarak malzemenin mekanik özelliğini önemli ölçüde iyileştirecektir. Yani çekme dayanımını artırmakla birlikte malzemenin tokluk özelliğinde de mikron boyutlu takviyelere nazaran önemli bir azalmanın meydana gelmeyeceği düşünülmektedir.



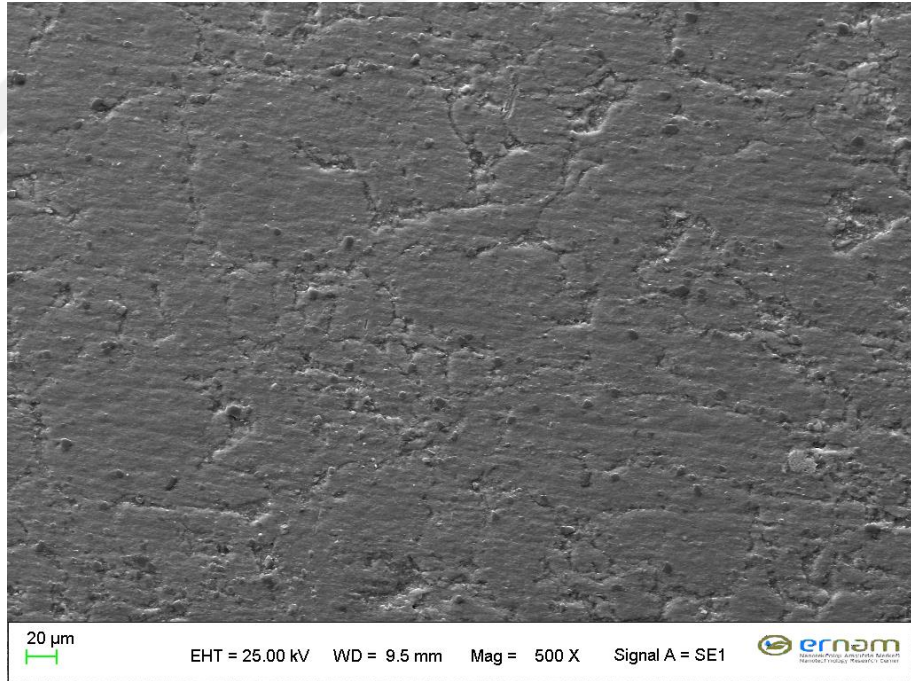
Şekil 4.6. %3 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafi



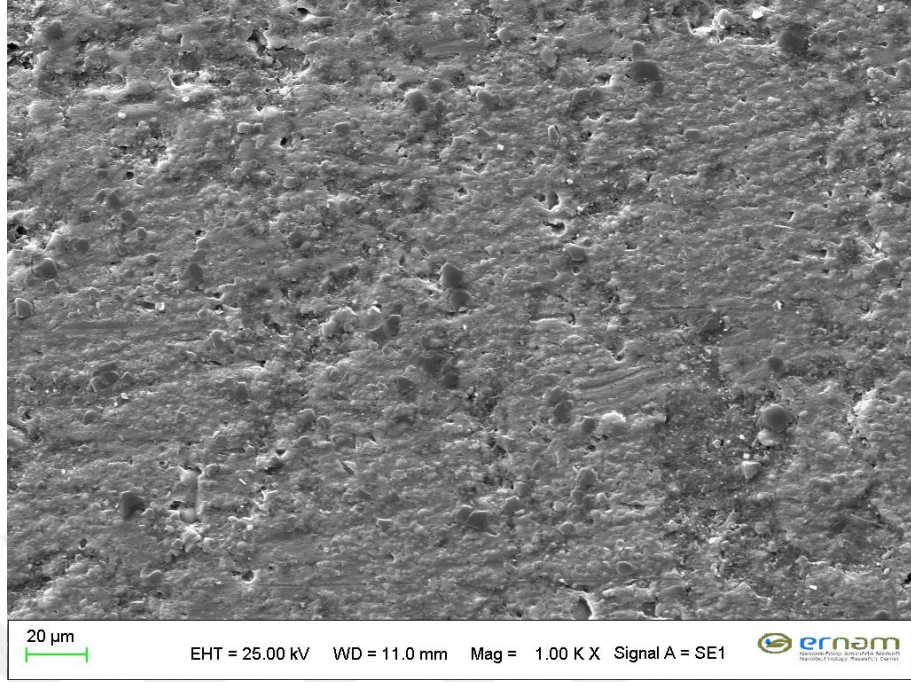
Şekil 4.7. %5 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafi



Şekil 4.8. %10 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafi



Şekil 4.9. %15 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafi

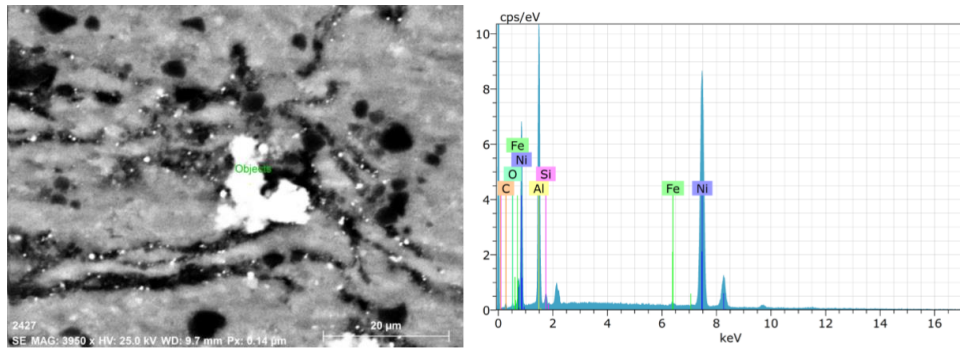


Şekil 4.10. %20 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitin SEM Mikroyapı Fotoğrafi

4.4. Üretilen Kompozit Malzemelerin EDX Analizi

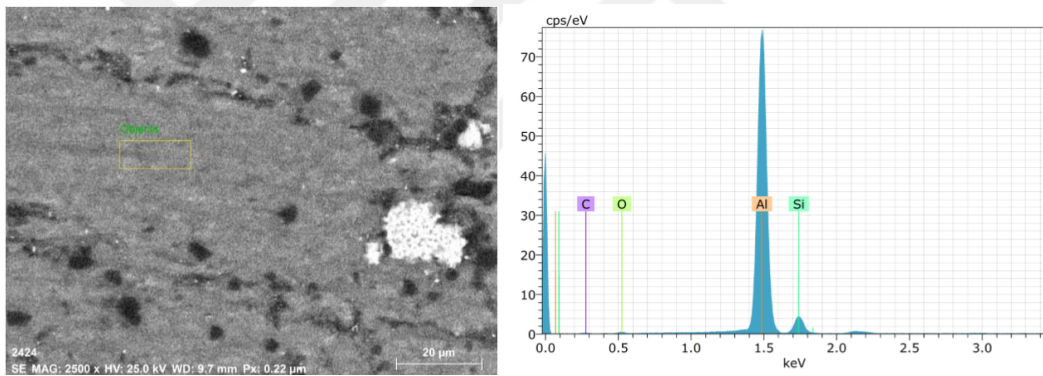
Üretilen kompozit numunelerden alınan EDX analiz sonuçları Şekil 4.11’de verilmiştir. Mikroyapıda da görüldüğü gibi mikroyapıda nadir olarak görülen beyaz kısımdan alınan EDX analiz sonucundan meydana gelen yapının Al-Ni bileşiği olduğu açıkça görülmektedir. Oluşan bileşiğin matris faz olan Etial 141 alaşımının içeriğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

2. EDX noktasından alınan sonuç ve mikroyapıdaki görünüm matris yapıda meydana gelen bileşiğin yine matris fazın silisyum içeriğine bağlı olarak Al-Si ötektik bileşiği olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.
3. Mikroyapıda takviye malzemesi olarak yer alan siyah görünümlü B₄C üzerinden alınan EDX analizi matris fazdaki partikülün B₄C olduğunu göstermektedir.



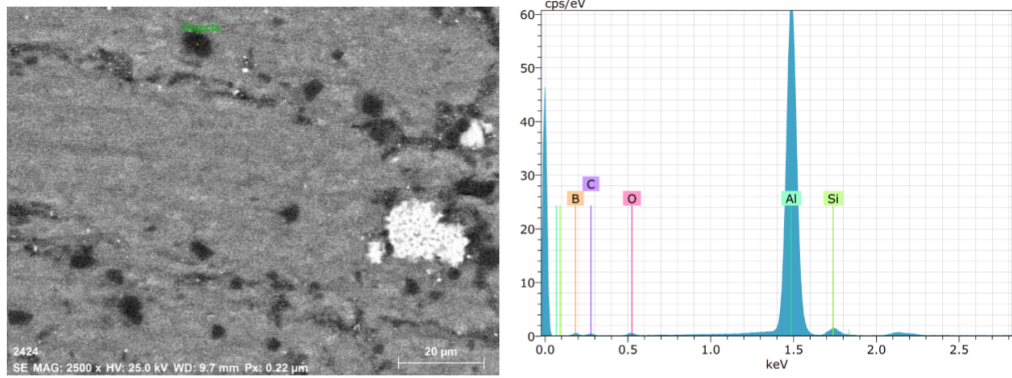
Spectrum: Objects

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ni	28	K-series	61.90	61.90	39.15	0.35
Al	13	K-series	27.94	27.94	38.44	0.83
C	6	K-series	4.75	4.75	14.68	1.27
Si	14	K-series	1.99	1.99	2.63	0.07
O	8	K-series	1.71	1.71	3.98	0.44
Fe	26	K-series	1.70	1.70	1.13	0.03
Total:			100.00	100.00	100.00	



Spectrum: Objects

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	73.52	73.52	64.72	2.15
Si	14	K-series	12.97	12.97	10.97	0.33
C	6	K-series	8.64	8.64	17.09	2.51
O	8	K-series	4.86	4.86	7.22	1.15
Total:			100.00	100.00	100.00	



Spectrum: Objects

El	AN	Series	unn. [wt.%]	C norm. [wt.%]	C Atom. [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
B	5	K-series	43.03	43.03	59.73	10.09
Al	13	K-series	40.65	40.65	22.61	1.20
C	6	K-series	10.29	10.29	12.86	2.48
O	8	K-series	3.92	3.92	3.68	0.88
Si	14	K-series	2.11	2.11	1.13	0.07
Total:			100.00	100.00	100.00	

Şekil 4.11. %15 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozitten alınan EDX Analiz Sonuçları

4.5. Üretilen Kompozit Malzemelerin Mikrosertlik Analizi

İçerisine % 3, %5, %10, %15, %20 oranlarında nano B₄C takviye edilen Etial 141 Al alaşımı kompozit numuneler ile % 3 ve % 10 oranında 20 mikron boyutlu B₄C takviye edilen Etial 141 Al alaşımı kompozit malzemelerin mikrosertlik ölçüm sonuçları Tablo 4.1 görülmektedir.

Alınan mikrosertlik ölçümlerinden artan nano B₄C takviye oranı attıkça mikrosertlik değeri de sürekli artış göstermiştir. Mikron boyutlu B₄C takviyesi de yine nano takviyeye göre benzer bir göstermiştir.

Tablo 4.1. Üretilen Kompozit Numunelerin Mikrosertlik Analiz Sonuçları

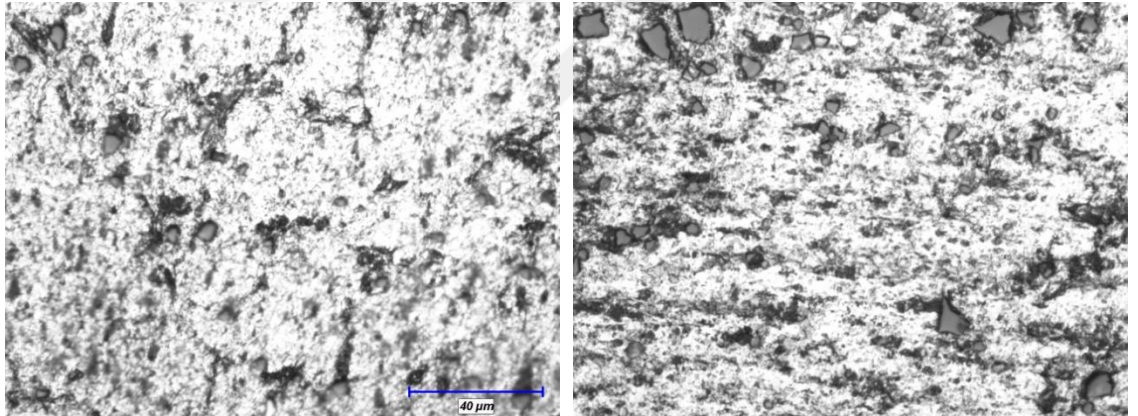
Takviye Malzemesi	%3 Nano B4C	%5 Nano B4C	%10 Nano B4C	%15 Nano B4C	%20 Nano B4C	%3 Mikron B4C	%10 Mikron B4C
Mikrosertlik (HV)	107.7	114	120	126.6	134.8	111.7	115.7

4.6. Üretilen Nano ve Mikron B₄C Kompozit Malzemelerin Mikroyapı

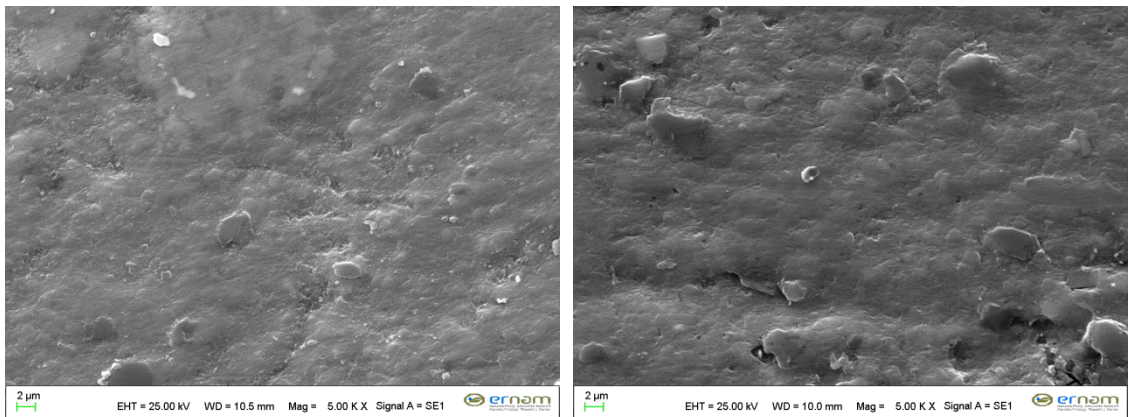
Karşılaştırması

Mekanik alaşımlama ve aynı zamanda sıcak presleme yöntemiyle üretilen B₄C takviyeli Al kompozit malzeme üretiminde % 3 ve %10 nano B₄C takviyesiyle birlikte aynı zamanda % 3 ve %10 mikron boyutunda (20 Mikron) B₄C takviye edilmiş Al kompozit numunelerin mikroyapıları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.12 % 3 nano ve mikron boyutunda B₄C takviye edilen Al kompozit numunelerin optik mikro yapılarını göstermektedir.

% 3 B₄C takviyeli numunelerin optik mikroyapılarından nano takviyeli numunede daha homojen bir oluşumun meydana geldiği görülmektedir. Yine aynı numunelerin SEM mikro yapı fotoğrafı incelendiğinde nano takviyenin matris malzemeyle daha iyi uyum sağladığı ve mikron boyutlu B₄C'lerin matris içerisinde matris fazla bir bütünlük oluşturmamış şekilde görülmektedir.

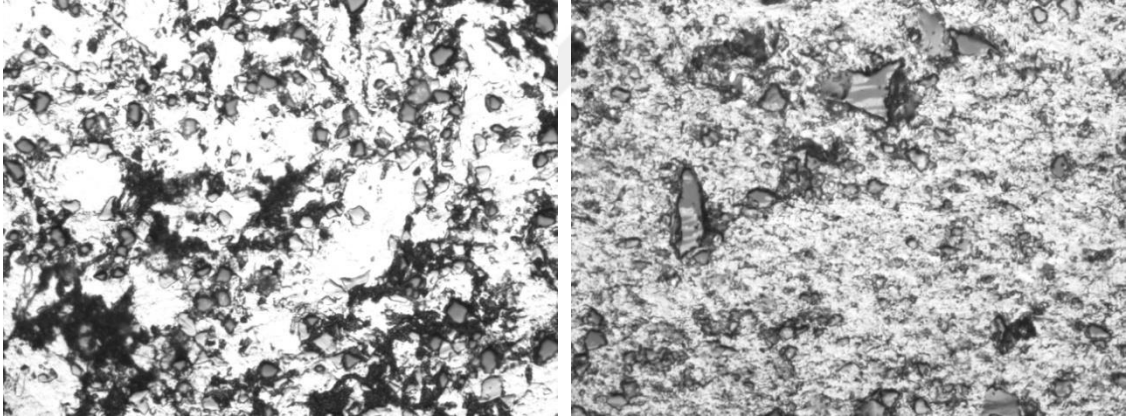


Şekil 4.12. % 3 Nano (a) ve % 3 Mikron Boyutlu B₄C Takviye Edilen Numunelerin Optik Fotoğrafları

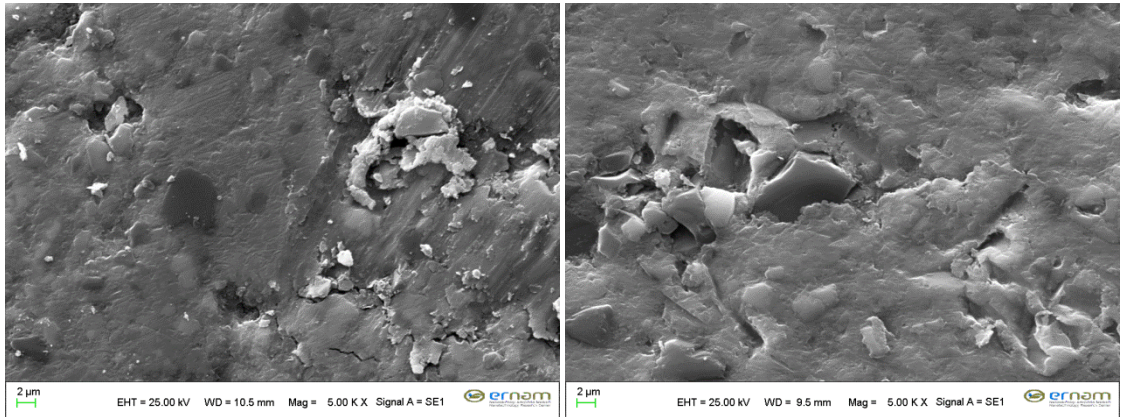


Şekil 4.13. % 3 Nano (a) ve % 3 Mikron (b) Boyutlu B₄C Takviye Edilen Numunelerin SEM Fotoğrafları

% 10 B₄C takviyeli numunelerin optik fotoğraflarından özellikle Al-Si ötektik fazının nano takviyeli numunede daha homojen ve faz boyutlarının mikron boyutlu B₄C takviyeleri numuneye nazaran daha küçük boyutlu olarak oluştuğu açıkça görülmektedir. Bu malzemede ötektik faz dağılımının malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin önemli olduğu göz önünde bulundurulduğunda meydana gelen bu oluşum son derecede büyük bir öneme sahiptir. % 10 B₄C takviyeli numunelerin SEM mikroyapı fotoğraflarından Şekil 4.15. özellikle mikron boyutlu B₄C takviyeli numunede B₄C partikülünün matris fazdan parlatma esnasında ayrıldığı görülmektedir. Bu durum, nano boyutlu takviyelerle kıyaslandığında matris fazın nano partiküllere karşı daha kararlı bir davranış sergilediği anlamını taşımaktadır. Bu davranış, aynı zamanda nano partiküllerin kristal yapı içerisinde kristal yapının tane içindeki genel diziliş durumunu önemli ölçüde bozmadan takviye görevini yerine getirdiği anlamına gelebilir.



Şekil 4.14. % 10 Nano (a) ve % 3 Mikron (b) Boyutlu B₄C Takviye Edilen Numunelerin Optik Fotoğrafları

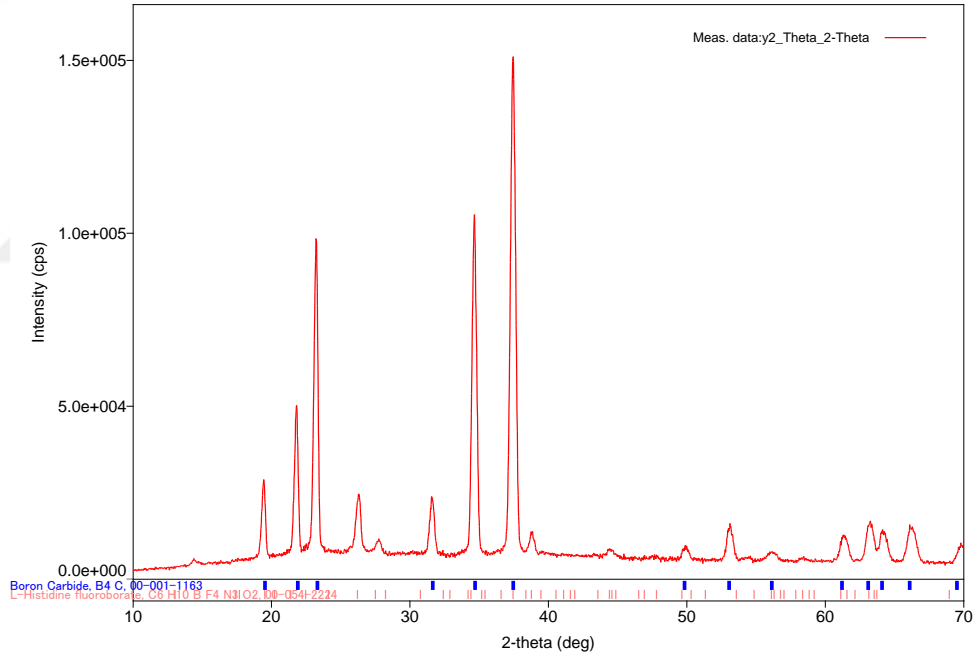


Şekil 4.15. % 10 Nano (a) ve % 3 Mikron (b) Boyutlu B₄C Takviye Edilen Numunelerin SEM Fotoğrafları

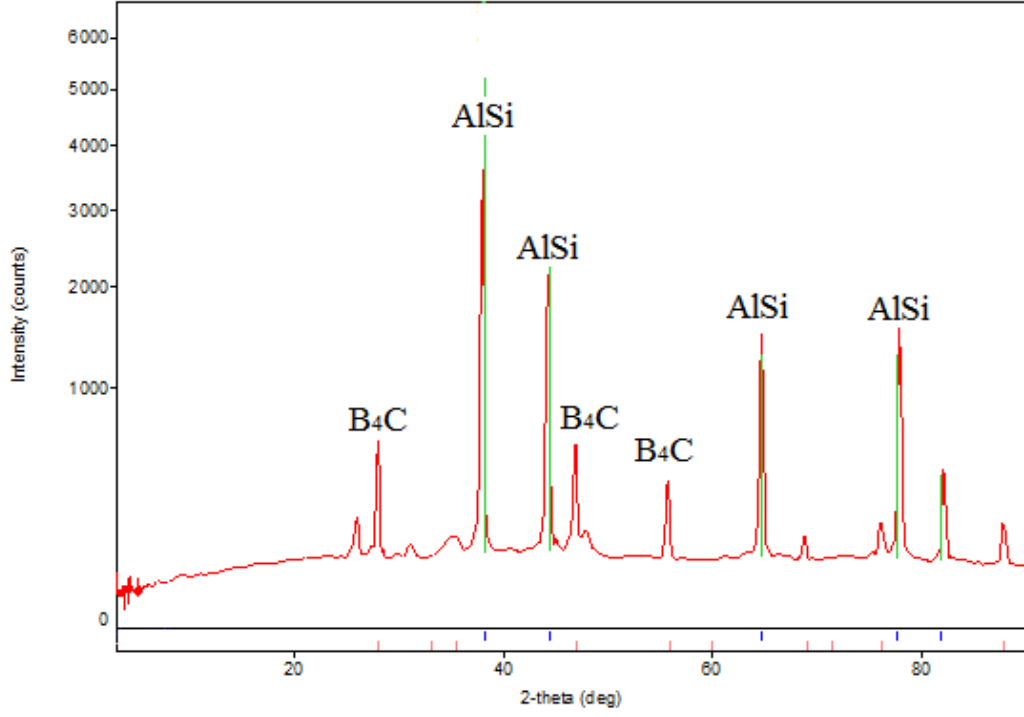
4.7. XRD Analiz Sonuçları

Nano B₄C takviyeli kompozit üretiminde nano partiküllerin üretimi öncesinde Boroptik A.Ş'den temin edilen yaklaşık 20 mikron boyutlu B₄C numune öncelikli olarak XRD analizine tabi tutulmuştur. Bu numune daha sonra nano B₄C üretimi amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen XRD sonucu Şekil 4.16'da görülmektedir. Elde edilen sonuç grafikte de açıkça görüldüğü gibi numunenin tamamen B₄C karbür bileşiğinden meydana geldiğini göstermektedir.

Şekil 4.17.'deki % 10 nano B₄C takviyeli Al kompozit numunenin XRD grafiğinden Etial 141 alaşımı içeriği ve takviye malzemesine bağlı olarak Al-Si ötektik bileşiği ve B₄C bileşiğinin ve Al matris fazın ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.16. Mikron Boyutlu B₄C Partikülünün XRD analiz Grafiği



Şekil 4.17. % 10 Nano B₄C Takviyeli Al Kompozit Numunenin XRD analiz Grafiği

KAYNAKLAR

1. Turgut, O., Keskin, H.,L., Avşar, A., F., Mayıs , “Nano Teknoloji Nedir”, *Türk Tıp Dergisi*, s.46, 2010.
2. Nazik, C., Tarakçıoğlu, N., Özkaya, S., Erdemir, F., Çanakçı, A., “Determination of Effect of B₄C Content on Density and Tensile Strength of AA7075/ B₄C Composite Produced via Powder Technology”, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, Vol 4, s.251, 2016.
3. Bodukuri, A., K., Eswaraiah, K., Rajendar, K., Sampath, V., “Fabrication of Al-SiC-B₄C Metal Matrix composite by Powder Metallurgy Technique and Evaluating Mechanical Properties”, *ScienceDirect*, s.428,430, 2016.
4. Moradi, M., R., Moloodi, A., Habibolahzade, A., “Fabrication of Nano-composite Al-B₄C Foam via Powder Metallurgy-Space Holder Technique”, *5th International Biennial Conference on Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, s.553, Tahran, 2015.
5. Püskül, H., “Effect Of Different Fibre Orientations Of Composite Materials On The Performamnce Of Adhesively Bonded Joints”,*University Of Turkish Aeronautical Association İnstitute Of Science and Technology,master thesis*,s.8, Türkiye, 2016.
6. Nazik, C., “Alüminyum Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Konya, 2014.
7. İnternet: sakarya üniversitesi, Sakarya Meslek Yüksekokulu Makina Ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı , Kompozit Malzemeler Ders Notu, s.9 http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/31395/kompozit_malzemeler_ders_notu.pdf.
8. Şen, F. , Palancıoğlu, H. , Aldaş, K. , 7 “Polimerik Nano Kompozit Malzemeler ve Kullanım Alanları”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, s.112-113, 2010.
9. Kaw, K, A., “Mechanics of Composite Materials 2nd ed.”, Frank Kreith, *Taylor & Francis Group*, s.16-18, New York, 2006.
10. İnternet: Yıldız Teknik Üniversitesi, *Kompozit Malzemeler*, http://www.yarbis1.yildiz.edu.tr/web/userCourseMaterials/akdogan_895a461f0c21a16f319f061a4e1f071e.pdf

11. Wenlong, T., Lehua, Q., Cihangqing, S., Jiming, Z., Zhao, J., “Numerical Simulation on Elastic Properties of Short-Fiber-Reinforced Metal Matrix Composites:Effect of Fiber Orientation”, *Composite structure.* , 408-417, 2016.
12. Davis, J., D., “Aluminium and Alloys”, Understanding the Basics, *ASM International*, s.351-416, 2001
13. Kulekci, M.,K., “Magnesium and its alloys applications in outomotive industry”,*Springer*, s.851-865, 2007.
14. Cowie,J.,G., “Copper and Copper Alloys”, Materials and Mechanical Design 3rd ed., *Jhon Wiley and Son*, New York, s. 117-123, 2006.
15. Auerkari, P., “Mechanical and Physical Properties of Engineering Alumina Ceramics ”, *VTT Manufacturing Technology, Vuorimiehentie 5*, s. 6, 1996.
16. A., H., Rashed, “Properties and Characteristics of Silicon Carbide”, *Poco Graphite, Inc.*, s.1-2, 2002.
17. Okpala, C., C., “Nanocomposites – An Overview”, *International Journal of Engineering Research and Development*, s.17, 2013.
18. Ateş, H., “Nano Parçacıklar ve Nano Teller”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, s.437, 2015.
19. Kumar, V., “Nanosilicon, First Edition”, *Vijay Kumar, Elsevier Science*, 2007.
20. Ateş, H., Bahçeci, E., “Nano Malzemeler İçin Üretim Yöntemleri”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 483-491, 2015.
21. Abdullah, Y., Reusmaazran, Y., Muahmmad, A., Kamarudin, N., Paulus, W., S., Shamsudin, R., Shudin, N.,H., Zali, N., M., “Al/B₄C Composites with 5 and 10 %wt Reinforcement Content Prepared by Powder Metallurgy”, *Nuclear and Related Technologies*, s.42-44, Malaysia, 2012.
22. Kumdalı, F., “Alüminyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Toz Metalürjisi Yöntemi ile Üretimi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, s.24, İstanbul, 2008.
23. Özçelik, B., “Sprey Piroliz Yöntemi ile Zn,Fe ve B Esaslı Oksit Dışı Nano Partikül Üretimi”, *Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Doktora Programı*, Doktora Tezi, s.---, İstanbul, 2014.
24. Taşçı, U., “AA2014-B₄C Metal Matrisli Kompozitin Toz Metalürjisi Ve İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilebilirliği, Karakterizasyonu ve Aşınma

- Özelliklerinin İncelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s.--- Ankara, 2012.
25. German, M. ,R., Toz Metalürjisi ve Parçacıklı Malzeme 1.ed.,Giriş, Sarıtaş, S., Türker M., Durlu N., *Uyum Ajans*, s. 3-4, Anakara, 2007.
 26. İnternet: Prof. Dr. Alsaran, A., “*Toz Metalurjisi*”, <http://akgunalsaran.com/doc/07-toz-metalurjisi-4127.pdf>.
 27. German, M. ,R., Toz Metalürjisi ve Parçacıklı Malzeme 1.ed.,Toz Üretimi, Sarıtaş, S., Türker M., Durlu N., *Uyum Ajans*, S. 61-84, Anakara, 2007.
 28. Biçer, A., “Toz Metalurjisi İle Üretilen Ni₃Al Partikülleriyle Pekiştirilmiş Metal Matrisli Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir, 2015.
 29. İnternet: Yrd. Doç. Dr. Yamanoglu, R., “*Toz Üretim Yöntemleri*”, http://ryamanoglu.com/index_htm_files/TMpart3.pdf
 30. Orhan,A. Gür,A.,K., Çahgülü, U., “Al Matrsli B₄C Takviyeli Kompozitlerin Sıcak Presleme Yöntemiyle Üretimi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, s.10, Elazığ, 2007.
 31. C., Suryanarayana, “Mechanical Alloying and Milling”, *Progress in Materials Science*, 46, 2001.
 32. Kaya, H., “Spex Tipi Mekanik Alaşım Cihazının Tasarımı, İmalatı ve Öğütme kabiliyetinin İncelenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 2009.
 33. Karabulut, H., Çıtak, R., Çinici, H., “Mekanik Alaşım Süresinin Al + Al₂O₃ Kompozitlerde Eğme Dayanımına Etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*”, s.636-637, 2013.
 34. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, “Bor Raporu”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, Ankara, s.7-8, 2003.
 35. Coşkun, Y., Aslan, S., Akbulut, H., “Uçucu Kül Takviyeli Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışı”, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7.cilt, 3.sayı, s.221, Sakarya, 2003.

36. Internet: European Steel and Alloy Grades/Numbers SteelNumber, “*ENAC-
AlSi12(Fe)(a)*”,
http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1236

