

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ ile
(B₄C+FeTi) TAKVİYELİ Fe ESASLI KOMPOZİT
ÜRETİMİ
Ahmet MİLLİ**

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ**

2017

T.C
NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ ile (B₄C+FeTi) TAKVİYELİ Fe
ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ**

Ahmet MİLLİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. SERDAR OSMAN YILMAZ

TEKİRDAĞ-2017

Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ danışmanlığında, Ahmet MİLLİ tarafından “Mekanik Alaşım İlama Yöntemi ile (B₄C+FeTi) Takviyeli Fe Esaslı Kompozit Üretimi” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Juri Başkanı : Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim Savaş DALMIŞ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Sencer Süreyya KARABEYOĞLU

İmza :

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Prof. Dr. Fatih KONUKCU
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ ile (B₄C+FeTi) TAKVİYELİ Fe ESASLI
KOMPOZİT ÜRETİMİ

Ahmet MİLLİ

Namık Kemal Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

Demir esaslı nano karbür ve borür takviyeli (B₄C, Fe₂B, Fe₇C₃, TiB₂) kompozit üretimi esas alındı. Yapı içinde karbürlerin homojen dağılımı ve ebatlarının nano seviyesine düşürülebilmesi için mekanik alaşımlama tekniği kullanıldı. Yapı içindeki karbür ve borürlerin oluşturulabilmesi için ferrotitanyum ve bor karbür kullanıldı. Numunelerin sinterlenmesi için sıcaklık 900-1100 °C aralığında çalışıp en uygun sıcaklığın 1100 °C olduğu belirlendi. Çalışmada numunelerdeki boşluk konsantrasyonu, sertlik değişimi, bileşiklerin tayini ve yapıdaki elementel değişim belirlendi.

Anahtar kelimeler: Metal matrisli kompozitler, mekanik alaşımlama, B₄C, Fe₂B

2017, 93 sayfa

ABSTRACT

MSc. Thesis

**PRODUCTION of (B₄C+FeTi) REINFORCED and Fe BASED COMPOSITES by
MECHANICAL ALLOYING**

Ahmet MİLLİ

Namık Kemal University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Serdar Osman YILMAZ

It was aimed to produce carbide and boride (B₄C, Fe₂B, Fe₇C₃, TiB₂) reinforced Fe matrix composites. Mechanical alloying was used to distribute reinforce homogeneously in the structure and to decrease their size to nano scale. For reinforcement material FeTi and B₄C were used. During sintering the temperature was changed as 900-1100 °C, and we have seen that 1100 °C is the best temperature for sintering of our samples. We have investigated the concentration of voids, the change of hardness, the presence of reinforce compounds and elemental concentration change.

Keywords: Metal matrix composites, mechanical alloying, B₄C, Fe₂B

2017, 93 pages

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLolar DİZİNİ	v
ŞEKİL DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖNSÖZ	x
1. GİRİŞ	1
2. TOZ ÜRETİM TEKNİKLERİ	3
2.1 Mekanik Yöntemler	3
2.1.1 Talaşlı üretim.....	3
2.1.2 Öğütme	3
2.1.3 Mekanik alaşımlama.....	4
2.2 Kimyasal Yöntemler	5
2.3 Elektroliz Yöntemi	6
2.4 Atomizasyon Yöntemleri	7
3. MEKANİK ALAŞIMLAMA/ÖĞÜTME	14
3.1 Mekanik Alaşımlamanın Avantajları	16
3.2 Mekanik Alaşımlama/Öğütme (MA/Ö) İşlem Mekanizması.....	17
3.2.2 Sünek-Kırılgan alaşımlama	22
3.2.3 Kırılgan-Kırılgan alaşımlama	23
3.3 Mekanik Alaşımlamanın Kinetikleri.....	24
3.3.1 Çarpışma süreçleri	24
3.3.2 Difüzyon	25
3.3.3 Kontak alanları boyutu	26
3.3.4 Reaksiyon ve kimyasal kinetikler.....	26
3.4 MA/Ö Ekipman ve İşlem Parametreleri.....	26
3.4.1 MA/Ö işleminde kullanılan hammadde ve boyutları	27
3.4.2 Öğütücü değirmenin tipi.....	27
3.4.2.1 Titreşimli bilyalı değirmen	28
3.4.2.2 Yatay bilyalı değirmen	29
3.4.2.3 Atritör değirmeni	30
3.4.3 Öğütücü kap	34
3.4.4 Öğütme hızı	34
3.4.5 Öğütme zamanı.....	35
3.4.6 Öğütücü kollar	36
3.4.7 MA/Ö işleminde kullanılan bilyalar	37
3.4.8 Toz-Bilya oranı.....	37
3.4.9 Kabın doluluk oranı.....	38
3.4.10 Değirmenin atmosferi	38
3.5 Sıcaklığın Etkisi	39

3.6 Tozların Karakterizasyonu	40
4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	44
4.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı	44
4.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları.....	44
4.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	45
4.3.1 Elyafli kompozitler	46
4.3.2 Parçacıklı kompozitler.....	46
4.3.3 Tabakalı kompozitler.....	47
4.3.4 Karma (hibrit) kompozitler	47
4.4 Kompozit Malzemelerin Kullanımı	47
4.5 Kompozit Malzemelerin Üretimi	48
4.5.1 Sıvı metal emdirmesi.....	49
4.5.2 Sıkıştırılmalı veya sıvı dökme döküm tekniği.....	49
4.5.3 Basınçlı ve basınçsız infiltrasyon	50
4.5.4 Sıvı metal karıştırması.....	51
4.5.5 Hızlı katılaştırma yöntemi	52
4.5.6 Yarı katı karıştırma.....	53
4.5.7 Plazma püskürtme	53
4.5.8 Toz metalurjisi tekniği.....	53
4.5.9 Difüzyon bağlama ve vakumda presleme.....	54
4.5.10 Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme	54
5. AŞINMA	55
5.1 Aşınma Mekanizmaları	55
5.1.1 Adhezif aşınma (yapışma aşınması).....	55
5.1.2 Abrasif aşınma	57
5.1.3 Yorulma aşınması.....	58
5.1.4 Eroziyon aşınma.....	59
5.1.5 Ögütme aşınma.....	59
5.1.6 Oymalı aşınma.....	60
5.1.7 Kazınmalı aşınma	60
5.1.8 Korozif aşınma	61
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	63
6.1 Sonuçlar.....	65
6.2 Mikrosertlik.....	84
6.3 Genel Sonuçlar	87
7. KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ.....	93

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 6.1. Kullanılan FeTi tozunun kimyasal kompozisyonu.....	63
Tablo 6.2. Kullanılan numunelerin kimyasal kompozisyonu.....	63
Tablo 6.3. N2.4 numunesi EDS analizleri sonuçları.....	67
Tablo 6.4. N3.4 numunesi EDS analizleri sonuçları.....	73
Tablo 6.5. N5.4 numunesi EDS analizleri sonuçları.....	82
Tablo 6.6. Kullanılan numunelerin mikrosertlik değerleri.....	85

ŞEKİL DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Bilyalı öğütme	4
Şekil 2.2. Mekanik alaşımlama yöntemi	5
Şekil 2.3. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi	6
Şekil 2.4. Elektroliz ile toz üretimi [12]	6
Şekil 2.5. Düşey gaz atomizasyon ünitesi	8
Şekil 2.6. Su atomizasyon işlemi.....	9
Şekil 2.7. Gaz atomizasyonu ile üretilen küresel şekilli kalay tozlarının genel yüzey görüntüleri.....	10
Şekil 2.8. Döner disk ile atomizasyon yöntemi [12]	11
Şekil 2.9. Döner elektrot ile atomizasyon yöntemi [12].....	11
Şekil 2.10. Vakum atomizasyon yöntemi	12
Şekil 2.11. Ultrasonik gaz atomizasyonu	13
Şekil 3.1. Mekanik alaşımlamada kullanılan element başlangıç tozlarının ve deformasyon karakteristiklerinin gösterimi.....	19
Şekil 3.2. Mekanik alaşımlama sırasında bilya-toz-bilya çarpışması.....	19
Şekil 3.3. Tozların sünek-kırılgan kombinasyonunun öğütülme esnasında mikro yapısal gelişiminin şematik gösterimi. [1]	23
Şekil 3.4. Tozların birleşme süreçlerinin şematik gösterimi	24
Şekil 3.5. (a) Titreşimli bilyalı değirmen, (b) Karıştırıcı hazne [2].....	29
Şekil 3.6. (a) Yatay bilyalı değirmen, (b) Değirmen içerisindeki bilyaların hareketinin şematik gösterimi [2]	30
Şekil 3.7. (a) Laboratuvar tipi atritör değirmeni, (b) Değirmenin şematik gösterimi [2].....	31
Şekil 3.8. Atritör değirmeninde öğütme esnasında oluşan hareketler, (a) darbe, (b) kesme	32
Şekil 3.9. Atritörde toz şarjı ile bilyaların hareketi, (a) Düzensiz hareket (b) Grup hareketi ..	32
Şekil 3.10. Atritörde alaşımlama esnasında meydana gelen en büyük aşınma alanı.....	33
Şekil 3.11. Öğütme süresi ile ortalama tane boyutunun azalması [25]	34
Şekil 3.12. Zamana göre toz boyutundaki değişim [2].....	36
Şekil 4.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [67]	45

Şekil 4.2. Sıkıştırma döküm yöntemi [68].....	49
Şekil 4.3. Düşey makine ile sıkıştırılmalı veya sıvı dökme döküm işleminin basamakları [68]	50
Şekil 4.4. Basınçlı infiltrasyon metodu [68].....	51
Şekil 4.5. Basıncsız infiltrasyon metodu [68].....	51
Şekil 4.6. Ergimiş metal karıştırılması yöntemiyle kompozit üretim ünitesi	52
Şekil 4.7. Hızlı katılma prosesi ile kompozit üretim yöntemi [68]	52
Şekil 4.8. Plazma püskürtme aygıtının şematik görünümü	53
Şekil 4.9. Toz metalurji yönteminin temel aşamaları	54
Şekil 4.10. Folyo matris ile filamentlerin kesit görünümü [68]	54
Şekil 5.1. Adhezif aşınma örnekleri	56
Şekil 5.2. Adhezif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi	56
Şekil 5.3. İki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınma	57
Şekil 5.4. Abrazif aşınma örneği	58
Şekil 5.5. Eroziv aşınma örnekleri	59
Şekil 5.6. Öğütmeli aşınma örneği	60
Şekil 5.7. Oymalı aşınma örnekleri	60
Şekil 5.8. Kazınmalı aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi	61
Şekil 5.9. Korozif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi	62
Şekil 6.1. a) N2.4, b) N2.5, c) N2.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme).....	66
Şekil 6.2. a) N2.4, b) N2.6 numunelerinin SEM görüntüleri.....	66
Şekil 6.3. N2.4 numunesi EDS analizlerinin alındığı görüntüler.....	67
Şekil 6.4. N2.4 numunesinin XRD grafiği.....	68
Şekil 6.5. N2 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının sertlik değişimi.....	69
Şekil 6.6. a) N3.1, b) N3.2, c) N3.3, d) N3.4, e) N3.5, f) N3.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme).....	71
Şekil 6.7. N3.4 numunesinin SEM görüntüleri.....	72
Şekil 6.8. N3.4 numunesi EDS analizlerinin alındığı görüntüler.....	72
Şekil 6.9. N3.4 numunesinin XRD grafiği.....	73

Şekil 6.10. N3 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının setlik değişimi.....	74
Şekil 6.11. a) N4.1, b) N4.2, c) N4.3, d) N4.4, e) N4.5, f) N4.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme).....	76
Şekil 6.12. N4.4 numunesinin SEM görüntüleri.....	77
Şekil 6.13. N4.4 numunesinin XRD grafiği.....	77
Şekil 6.14. N4 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının setlik değişimi.....	78
Şekil 6.15. a) N5.1, b) N5.2, c) N5.3, d) N5.4, e) N5.5, f) N5.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme).....	80
Şekil 6.16. N5.4 numunesinin SEM görüntüleri.....	81
Şekil 6.17. N5.4 numunesi EDS analizlerinin alındığı görüntüler.....	82
Şekil 6.18. N5.4 numunesinin XRD grafiği.....	83
Şekil 6.19. N5 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının setlik değişimi.....	84
Şekil 6.20. a) Takviye oranına bağlı olarak numunelerin karşılaştırılması, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak numunelerin karşılaştırılması.....	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

BTO	: Bilya Toz Oranı
D_s	: Küresel Çap
D_v	: Eşdeğer Küresel Çap
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
MA	: Mekanik Alaşımlama
MÖ	: Mekanik Öğütme
ODS	: Oksit Dağılımla Güçlendirilmiş
Ppm	: Milyonda Bir
S	: Yüzey Alanı
SEM	: Tarama Elektron Mikroskobu
SPEX	: Titreşimli değirmen
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
TM	: Toz Metalurjisi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezim boyunca gerek konu seçimim olsun gerekse konu üzerindeki çalışmalarım olsun, en başından en sonuna kadar engin bilgi ve birikimini aktaran, ilgi, alaka ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. S. Osman YILMAZ'a, deneysel çalışmalarımda yardımcı ve emeği bulunan Doç. Dr. Tanju TEKER'e (Adıyaman Üniversitesi), Uzman Selçuk KARATAŞ'a (Fırat Üniversitesi) ve Makine Mühendisi Anıl BEDİR'e, Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerine en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca eğitim ve öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi beni her an destekleyen, her daim varlıklarını hissettiren sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Kasım, 2017

Ahmet MİLLİ

Makine Mühendisi

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinin imkansızlıklarından birisi de bazı metal alaşımlarının üretimindeki güçlüktür. Örneğin, ergime sıcaklığı yüksek olan bir malzemeyi ergime sıcaklığı düşük olan başka bir malzemeyle alaşımlamak eskiden süregelen yöntemlerle oldukça zordur. Bu durumdaki iki metal sıvı halde çözelti oluşturabiliyor fakat daha düşük bir ergime noktasına gelindiğinde soğuma ve katılaşma yönlerinde metal ayrılır. Aynı zamanda genellikle kullanılan imalat yöntemleriyle imal edilebilen malzemelerden daha dayanıklı, hafif, sert malzemelere olan isteğin fazlalaşması yeni malzemelerin tasarlanıp geliştirilmesi gereklilik haline gelmiştir.

Son zamanlarda metallerin birleştirilmesinde kullanılan yeni yöntemlerin gelişmesi eski yöntemlerle yapılan alaşımlamanın sınırlıklarından doğmuştur. Yöntemlerden birisi de "Mekanik Alaşımlama" (MA)'dır. Bu teknikle metal oksitlerinin ve metalin düzgün alaşımlamasıyla bir diğer bilinen geleneksel metalürji teknikleriyle imal edilmesi imkansız ve zor olan alaşımların üretilmesi mümkündür.

Bir toz üretim yöntemi olan mekanik alaşımlama, element toz karışımından oluşan homojen malzemelerin elde edilmesin imkan sağlar. John Benjamin ve arkadaşları 1966 yılında Paul D. Merica Research Lab of the International Nickel Company (INCO)'de bu yöntemi geliştirmişlerdir [3-5].

Benjamin ve arkadaşları malzeme elde etmek adına farklı yöntemler deneseler de en nihayetinde bilyalı öğütme tekniğinin en uygun yol olduğu sonucuna varmışlardır. Bunun nedeni de bilyalı öğütmenin, metal partiküllerinin yüksek plastik deformasyonu nedeniyle kırılması ve tekrar soğuk kaynak yoluyla ince partiküllerin elde edilmesine olanak sağlamasıdır. Benjamin ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu uygulama, "Öğütme-Karıştırma" olarak isimlendirilmesine karşın daha sonra bu uygulamayı Ewan C. MacQwen "Mekanik Alaşımlama" olarak isimlendirmiştir [2].

Mekanik alaşımlama bilimsel açıdan ilgi duyulan malzemelerin ve farklı ticari kullanımlı malzemelerin elde edilmesi için uygulanan yüksek enerjili bilyalı karıştırma yöntemi ve normalde de kuru bir öğütme tekniğidir. 1983'te element toz karışımlarının bilyalı öğütülmesi ile Ni-Nb sisteminde ve 1981'de bir Y-Co metaller arası bileşiklerin mekanik

öğütülmesi ile bir amorf faz oluşumu olarak nitelendirilen bu teknik potansiyel bir kararsız işlem yöntemidir [6,7].

1980'lerin ortalarından itibaren kararlı ve kararsız fazlar barındıran aşırı doymuş katı çözeltiler (kristal ve yarı kristal fazlar içeren) ve amorf alaşımların oluşumunu gerçekleştiren birçok çalışma yürütülmüştür. Bunların yanı sıra toz karışımlar açıklanırken mekanik bakımdan aktif duruma gelmiş kimyasal tepkimelerin teşviki, yani oda sıcaklığında mekanokimya tepkimeleri ya da saf metallerin, nanokompozitlerin ve farklı malzemelerin imalatı normalde istenilen sıcaklıkların çok daha altında gerçekleştirilebilir. Bütün bu özelliklere sahip olması nedeniyle, bu kolay ama etkili uygulama yöntemi metallerde, seramiklerde, polimerlerde ve kompozit malzemelerde uygulanmıştır [8-10].

Mekanik alaşımlama/öğütme uygulamasında farklı değirmenler kullanılmaktadır. Bu değirmenler çeşitli boyutlara sahip olup, gerçekleştirilecek olan mekanik alaşımlama uygulamasına göre seçilirler.

Bu projede amaç kompozit dokuya sahip, maliyeti düşük kompleks ve nanokristalli karbür ve borür içerikli demir esaslı alaşım üretmektir. Takviye malzemesi olarak katılacak tozların işlem esnasında sentezlenmeleriyle B₄C karbürü, TiB₂, FeB borürlerini matris içinde oluşmaları beklenmektedir. Karbür ve borürlerin miktarı ve ebatları yeni oluşturulacak kompozitin aşınma karakterini belirleyecektir.

2. TOZ ÜRETİM TEKNİKLERİ

Metalik tozların üretiminde uygulanan yöntemler, tozların çeşitli özelliklerini belirler. Tozların geometrik şekilleri imalat tekniklerine göre küresel, karmaşık şekil gibi birçok çeşit olabilir. Tozların yüzeyi de imalat tekniğine bağlı farklılık gösterebilmektedir. Malzemelerin birçoğu özelliklerine uygun yöntemlerle toz durumuna getirilmesi mümkündür. Piyasada genellikle, çeşitli toz imalat yöntemi olmasına rağmen sıklıkla tercih edilen yöntemler şunlardır:

- Mekanik yöntemler
- Kimyasal yöntemler
- Elektroliz yöntemi
- Atamizasyon yöntemi

2.1 Mekanik Yöntemler

Bu yöntem öğütme, mekanik alaşımlama ve talaşlı üretim olarak üç başlığa ayrılabilir.

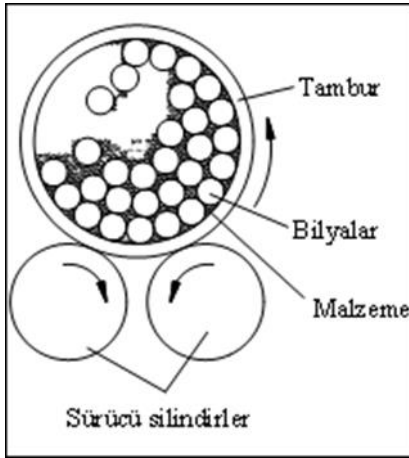
2.1.1 Talaşlı üretim

Talaşlı üretimle frezeleme, taşlama, tornalama gibi talaş elde etme yöntemleriyle çok karmaşık ve iri tozlar imal edilir. İmal edilen tozlar, öğütülme işlemiyle daha ince tozlar elde edilebilir. Tozların yapılarının idaresindeki oksitlenme, kir tutma, zorluk, yağlanma ve diğer malzeme hurdalarıyla karışıp kirlenebilir. Örneğin, bu teknikle yüksek karbonlu çelik imal edilir.

2.1.2 Öğütme

Metallerin toz haline getirilmesi için kullanılan bir yöntem olmasının yanında, diğer yöntemlerle imal edilen tozların kırılmasında da kullanılan öğütme işlemi, genellikle bilyalı

değirnenlerde yapılır. Bu yöntemle kırılğan malzeme tozları imal edilip, temel prensibi sert bir cisim ile parçalanacak malzeme arasında darbe oluşturmaktır [2].



Şekil 2.1. Bilyalı öğütme

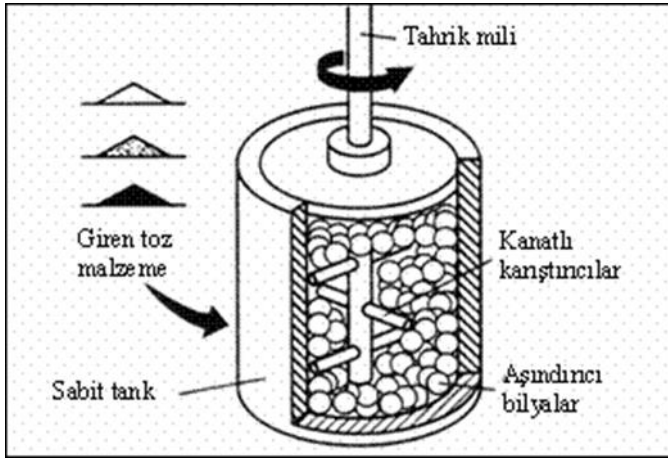
Aşınma direnci yüksek ve büyük çaplardaki sert bilyaların bulunduğu hazneye, öğütülecek olan metal kırılarak bir kap içerisinde yerleştirilir. İri taneler halinde öğütülmek istenen malzeme bulunduğu kabın içerisinde haznedeki bilyalarla döndürülüp veya titreştirilip darbenin etkisi ile daha ufak toz haline gelir (Şekil 2.1.).

Gevrek bir malzeme öğütülüyorsa, bilyalarla çarpışmasından dolayı daha ufak toz haline gelir. Sünekliği yüksek parçalardan meydana gelen bir malzeme öğütülecekse, çarpışmadan dolayı yassı bir şekle dönüşür. Karışımın homojen olması için kap içerisindeki malzemenin miktarıyla bilya hacimlerine önem verilmelidir. Kabın hacminin %25'i kadar öğütülmek istenen malzeme, toplam bilya hacmi ise kabın hacminin %50'si kadar olmalıdır. Demir-silisyum, demir-krom gibi kırılğan demir alaşımları öğütülme işlemi bilyalı değirnenlerde mekanik halde gerçekleştirilir [2].

2.1.3 Mekanik alaşımlama

Bu yöntem, katı ve kuru durumdaki tozların birbirine bağlanmasını ve bu bağları tekrar kırarak daha homojen, daha ince bir mikro yapıdaki dayanımı yüksek kompozit malzemenin imalatında uygulanır. Bu yöntemde alaşımlanacak tozlar kapalı kaba konulup şaft

döndürülmeye başlanır. Bilyalar ve şaft kollarıyla deforme olan tozlarda soğuk birleşmeler ve kırılmalar oluşur [2].

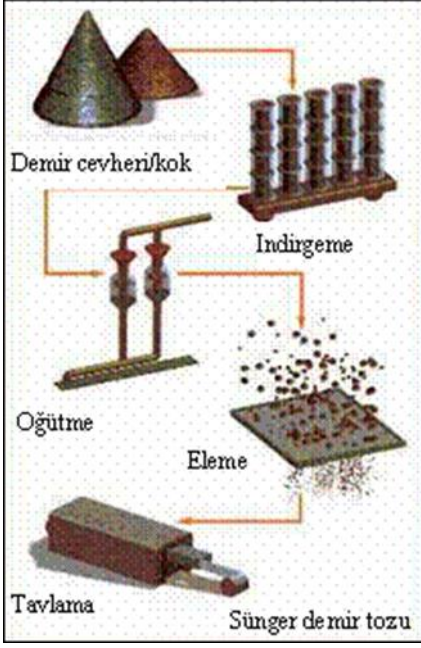


Şekil 2.2. Mekanik alaşımlama yöntemi

2.2 Kimyasal Yöntemler

Kimyasal yöntem ile metalik tozların imalatı, metal oksitlerinin (Tungsten, nikel, bakır, kobalt, demir ve molibden) hidrojen veya CO gibi indirgeyici gazların yardımıyla oksitlerinden indirgenmesidir.

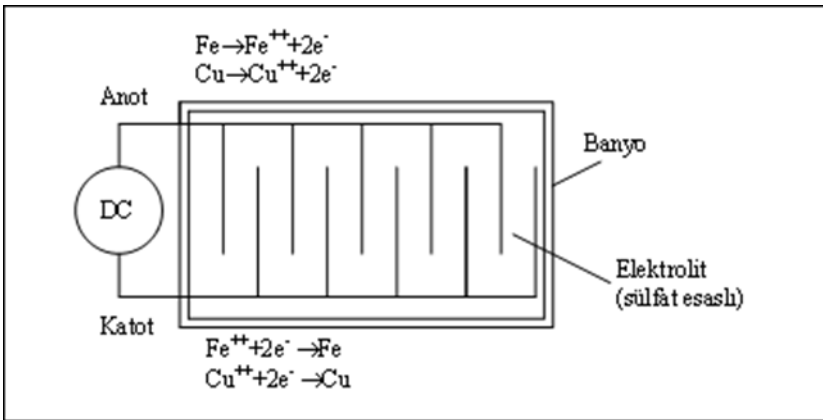
Bu teknikle imal edilen demir-sünger tozu, bu tekniğe verilebilecek en önemli örnektir. Demir oksit cevherinin ideal özellikte indirgeyici elemanlar kullanılarak süngerimsi bir hale dönüştürülerek sünger demir elde edilir. Kireç taşı ve kok ile karıştırılan magnetit, seramik kaplara konular. 1260 °C sıcaklık seviyesindeki fırınlarda seramik kaplar içerisindeki karışım 68 saat bekletilir. Sünger demir, indirgenme işleminin gerçekleşmesiyle elde edilir. Demir tozunun kimyasal teknikle üretimini Şekil 2.3.'te görülebilmektedir. Yüksek sıcaklık seviyesinde üretilen sünger demir kütleleri birbirine bağlanmış tozlardan oluştuğu için istenilen tane büyüklüklerine öğütülme işlemiyle getirilebilir. Karbon ve oksijenden olabildiğince, hidrojen gazının altında 870 °C'de artılır ve elekten geçirme işlemi uygulanır [5].



Şekil 2.3. Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi

2.3 Elektroliz Yöntemi

Bu yöntemle, oksitlerden meydana gelen tozlar elektrolitik banyoda katoda akım vererek çökertilir veya kırabilmesi iyi özellikte katotta birikir (Şekil 2.4.). Banyo için kullanılan kullanılan tekne kurşun ile kaplıdır. Sülfürik asit ile bakır sülfat elektrolitik görevini alır. Katot antimonlu kurşundan, anot ise bakırdan oluşur. Bu yöntemi genellikle bakır tozlarının üretiminde kullanılır.



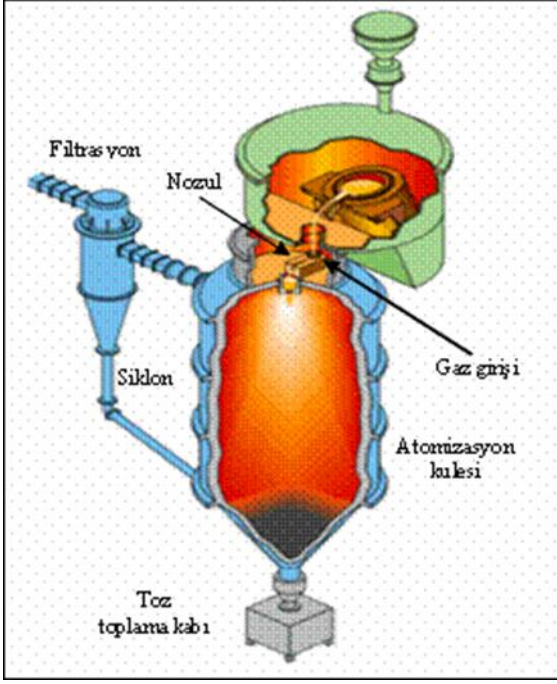
Şekil 2.4. Elektroliz ile toz üretimi [12]

Bu yöntemde, katotta toplanan ya da elektrolitik banyoda çökertilen metal kolayca öğütülüp, ince toz durumuna getirilip ve imal edilen tozlar yıkanıp elektrolitten arındırılır. Asal gazların altında kurutma işlemini gerçekleştirerek oksitlenmenin önüne geçilir. Elektroliz esnasında meydana gelen parçalar dendritik bir yapı gösterse bile daha sonraki uygulamalarla bu yapı giderilir. Elektrolitik yöntemle elde edilen tozların en büyük avantajı yüksek seviyede ki saflıkları, bu nedenle de sıkıştırılabilme özellikleri iyidir [5].

2.4 Atomizasyon Yöntemleri

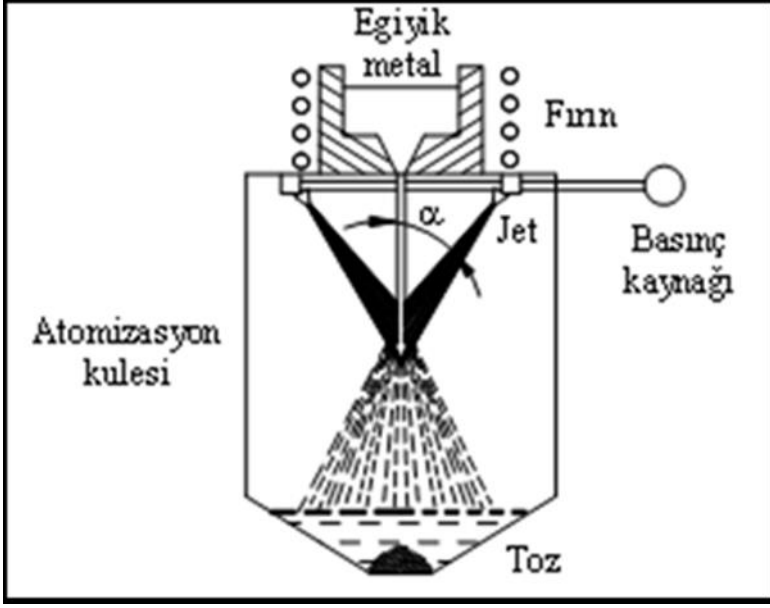
Farklı boyutlardaki birçok damlacıklara ayrılan bir sıvı demeti, atomizasyondur. Ana prensibi, bir pota dibinde bulunan delikten dökülen ergimiş metalin üzerine basıncı yüksek olan sıvı ya da gaz püskürtülmesidir (Şekil 2.5.). En çok tercih edilen sıvı, sudur. Genellikle kullanılan gazlar argon, hava ve azottur. Erimiş durumdaki metal demetini değişik boyutlarda birçok damlacığa ayıran, gaz veya sıvıdır. Ayrılan damlacıklar daha sonra katılışp metal tozlarını meydana getirirler [5]. Bu imalat tekniği üç temel bölümden oluşur:

1. Atomizasyon
2. Katılışma ve soğuma
3. Ergitme



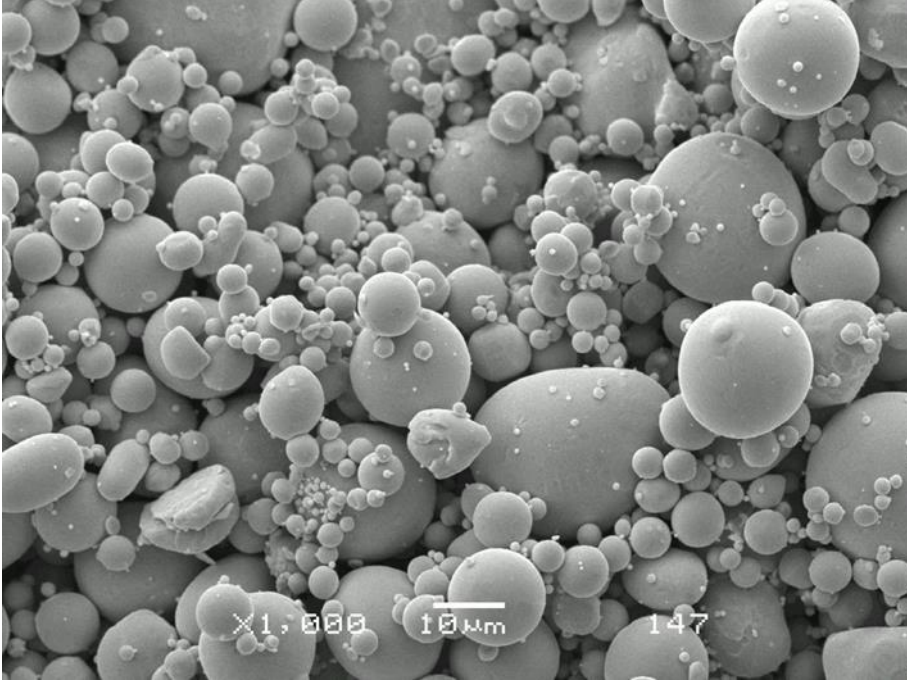
Şekil 2.5. Düşey gaz atomizasyon ünitesi

Ürünün arzu edilen özelliklere getirilmesi için, genellikle bu uygulamaların ardından gazlardan uzaklaştırma, toz boyutu dağılımı ve yüzey oksitlerinin azaltılması gibi ek uygulamalar yapılmaktadır. Metalik tozların imalatında, genellikle uygulanan atomizasyon yöntemleri pirinç, çinko, demir, paslanmaz çelik, kurşun, kalay ve alüminyum gibi metal ve metal alaşımları için gayet elverişlidir. Özellikle alüminyum ve alaşımlarının toz imalatında kullanılan atomizasyon yöntemleri, en ekonomik ve genel olan yöntemdir. Atomizasyon tekniklerinden gaz jeti ile parçalanması gaz atomizasyonunu, su jeti ile parçalanması su atomizasyonunu tanımlar. Şekil 2.6.'da tipik bir su ile atomizasyon tankını göstermektedir. Çevresel dağıtılmış memelerde meydana gelen basınçlı su jetleri sıvı metali kesip parçalar. Meydana gelen damlacıklar tankın tabanına doğru ilerlerken soğuyup katılaşır ve tabanda çöker. Su ile atomizasyon tankları kısadır genellikle 1 metre civarında, bunun nedeni suyun çok iyi soğutucu olma özelliğinden gelir. Gaz ile atomizasyon da bu duruma benzerlik gösterir. Fakat gaz ile atomizasyon tankları ortalama 6 metreden uzundur çünkü gazlar iyi bir soğutucu değildir [11].



Şekil 2.6. Su atomizasyon işlemi

Atomizasyon işlemi gazla yapılan tozların, küresel ya da küresele yakın bir şekli olur (Şekil 2.7.). Bu teknikle imal edilen tozların tane boyutu ortalama $100 \mu\text{m}$ 'dir. Atomizasyon işlemi suyla yapılan tozların şekilleri genellikle karmaşık olduğu gibi sıkıştırma sonrası ham mukavemetleri ve sıkıştırılabilirlikleri yüksektir. Su ile atomizasyon tekniğiyle imal edilen tozların tane boyutu ortalama $150 \mu\text{m}$ 'dir.



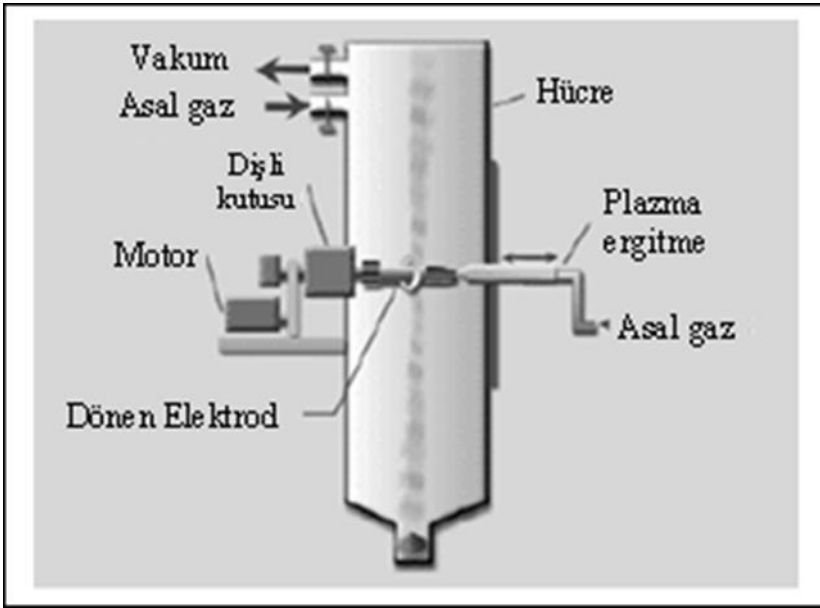
Şekil 2.7. Gaz atomizasyonu ile üretilen küresel şekilli kalay tozlarının genel yüzey görüntüleri

Ergimiş metalden toz imalatı için merkezkaç kuvvetinin uygulanması olarak bilinen döner disk santrifüj atomizasyon tekniğinde, dönen bir disk üzerine sıvı metal dökülür (Şekil 2.8.). Sıvı metal disk üzerindeki yarıklara ve sete çarpıp parçalanarak şekildeki gibi saçılır. Saçılan metal parçacıkları soğutulup katılaştırılır [11].



Şekil 2.8. Döner disk ile atomizasyon yöntemi [12]

Santrifüj atomizasyon yönteminde döner elektrot kullanılmakta olup, dönen elektrotun ergiyen kısmındaki sıvı metal damlacıklarının atomize olmasıyla gerçekleşir (Şekil 2.9.).

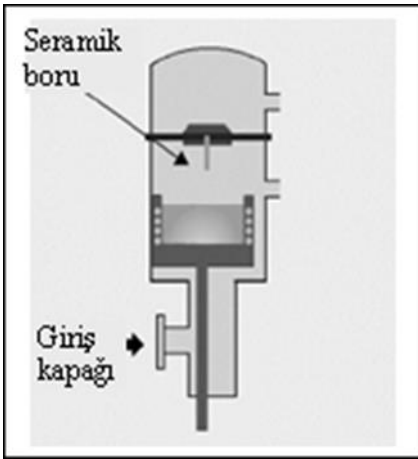


Şekil 2.9. Döner elektrot ile atomizasyon yöntemi [12]

Döner elektrot ile yapılmakta olan santrifüj yönteminde, ergimeyen tungsten elektrot ile tozu elde edilmek istenen metalden yapılmış elektrot arasında bir ark sağlanır. Ergiyecek

elektrot döndürülür ve elektrik arkı altında meydana gelen damlacıklar savrulup parçalanarak tankta birikir. Toz toplama tankı, yükseltgenmenin önüne geçmek için argon, helyum gibi soy gazlarla doldurulur. Bu teknikle kobalt, titanyum ve krom alaşım tozları imal edilmektedir [12].

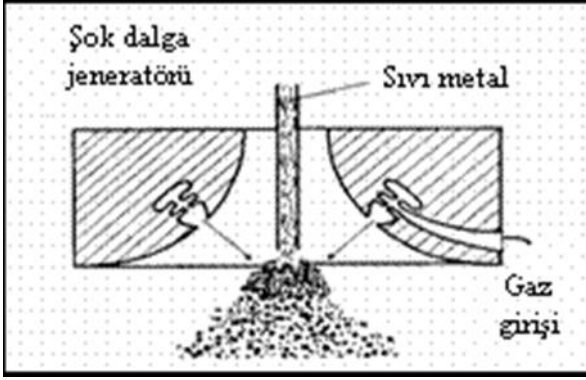
Basınçlı gaz altındaki sıvı metale aniden vakum işlemi uygulanmasıyla gazın genişmesi ve metalin atomize olmasıyla gerçekleştirilen teknik, vakum atomizasyon yöntemidir. Bu teknikte Şekil 2.10.'da görüldüğü üzere silindirik bir tankın üst kısmında vakum atomizasyon odası, alt kısmında ise sıvı metal potası bulunmaktadır. Sıvı metal vakum altında belli bir sıcaklığa kadar ısıtılır, ardından bu kısma hidrojen gazı doldurulur. Hidrojen gazı potadaki sıvı metal içerisinde çözüldükten sonra mil yardımıyla pota yukarı itilir ve seramik boru potaya daldırılır. Üst bölümde vakum olduğundan sıvı metal memeden geçip parçalanır. Böylelikle metal ve metal alaşımlarından ince küresel tozlar elde edilir [12].



Şekil 2.10. Vakum atomizasyon yöntemi

Ultrasonik gaz atomizasyon tekniğinde, yüksek basınçlı gaz rezonans boşluklarının birinden bir diğerine ivme kazandırılıp ultrasonik ses dalgaları oluşturulur ve yüksek katılma hızına göre küresel şekilli ve çok hızlı tozlar imal edilir (Şekil 2.11.). Bir tozun şekli, toz boyutu dağılımı, ortalama boyutu, yüzey kompozisyonu dahi mikro yapısı ve kimyasal bileşimi, atomizasyon teknikleri ile kontrol edilebilir. Bu ana özellikler bitmiş parçaların ve tozların görünür yoğunluk, tokluk ve sıkıştırılabilirlik gibi özelliklerini belirler. Ayrıca, atomizasyon tekniklerindeki yüksek toz elde etme hızı ekonomik bir avantajdır.

Bütün atomize partiküller bir ön alaşım ya da küçük bir kütük gibi olmakla birlikte her partikülde bileşimlerde aynıdır [12].



Şekil 2.11. Ultrasonik gaz atomizasyonu

3. MEKANİK ALAŞIMLAMA/ÖĞÜTME

Mekanik alaşımlama (MA) kimyasal ya da ısıl işlemleri uygulamadan metallerin alaşımlanması yöntemidir. Yoğun bir öğütme uygulamasıyla, sürekli olarak plastik deformasyon, kırılma, soğuk kaynak, yeniden kırılma ve kaynaklanmayla son derece homojen ve gayet ince mikro yapılar, asal bir atmosfer ortamında bu teknikle elde edilme yöntemidir [13].

Öğütme teriminin kullanılması, homojen bileşimli tozların öğütülmesinde genellikle metaller arası bileşikler, alaşımlanmış tozlar ya da saf metal gibi malzemeler için homojenizasyona gerek duyulmadığındandır. Metaller arası bileşik karışımı ya da bir amorf fazı elde etmek için, uzun süreli deforme uygulaması metaller arası bileşik malzemelerinde mekanik karıştırma olarak isimlendirilir. Mekanik karıştırmanın veya mekanik öğütmenin mekanik alaşımlamaya nazaran avantajı ise mekanik olarak ihtiyaç duyulan diğer dönüşümlere ya da sadece partikül boyutundaki azalma, alaşımlamadaki işlem süresinin kısa oluşudur [14].

Mekanik alaşımlama toz üretiminde hemen hemen bütün kompozisyonlarda uygulanır. Mekanik alaşımlama 1960'lerden beri oksit dağılımıyla mukavemetlendirilmiş (ODS) olup, yüksek sıcaklıkta sürünme dayanımını süper alaşımlarda iyileştirme adına uygulanmaktadır. Bu teknik tek kalite, tek alaşım kompozisyonunda, arzu edildiğinde yeni alaşımların geliştirilmesinde gayet elverişlidir [15].

Yakın ortam sıcaklıklarında mekanik alaşımlamayla çok homojen tozlar imal edilebilir. Bu teknikte bir tozun şekli, boyut dağılımı, ortalama boyutu ve gibi diğer işlemler uygulama esnasında kontrol edilebilir. Mekanik alaşımla yöntemi direkt kimyasal bileşme yoluyla ya da homojen dağılım göstermeyen ingot metalurjisi yolu ile ya da çok aktif elementlerin alaşımlarının elde edilmesi için bir avantaj sağlar. Mekanik alaşımlamayla üretilen çok ince taneli mikro yapılar nedeniyle olağandışı özellikler ve bunlara bağlı tipik sonuçların elde edilebilirliği görülmüştür. Mekanik alaşımlama hızlı prototip için ya da az miktarlarda standardın dışında bileşimler ya da standart bileşimin hızlı bir şekilde elde edilmesine imkan sağlar [13]. Mekanik alaşımlamayla elde edilen ürünlerde matris

içerisindeki parçacıkların arasındaki mesafenin azalmasının sonucunda malzemenin mukavemetinde artış olduğu gözlemlenmiştir [16].

Mekanik alaşımlamayla elde edilen malzemelerin diğer imalat tekniklerine göre imal edilen malzemelere karşı üstünlüklerini şöyle özetleyebiliriz; korozyon direnci çok iyi alaşımların imal edilebilmesi, birbirinden oldukça farklı ergime noktalarına sahip malzemelerden metaller arası bileşikler elde edilebilmesi, döküm gibi normal üretim yöntemiyle imal edilmesi zor olan parçaların elde edilebilmesi, mekanik alaşımlamayla imal edilen tozların yapısının bütününde homojenlik sağlanması, karmaşık şekilli, hassas toleranslara sahip parça ve ergime derecesine yakın sıcaklık seviyelerinde çalışabilen ürünler elde edilebilmesi bu tekniğin avantajları olarak özetlenebilir [16].

Mekanik alaşımlamanın dezavantajları olarak karıştırma süresinin uzunluğu, yüksek maliyeti ve oksijen içeren yabancı maddeleri sayabiliriz. Yabancı madde sorununu gidermek için asal atmosfer kullanıp ve kullanılacak takım malzemelerini dikkatli seçip ya da karıştırıcıyı öğütülecek aynı malzemeyle kaplayabiliriz. Karıştırma süresinin fazla olması diğer karıştırma işlemlerinde olduğu gibi tipik bir özelliktir. Bilyalı karışımlarda her şarj (karıştırılan toz miktarı) için süre 10 ile 50 saat arasındadır. Karıştırma süresi bazı durumlarda birkaç yüz saat fazlasını bile bulabilir [13]. Mekanik alaşımlayla imal edilen malzemelerin kullanım özelliklerine bakılacak olursa diğer alaşımlara göre aslında çokta yüksek olmadığı gözlenmektedir [17].

Mekanik alaşımlama için başka terimlerde kullanılmaktadır. Bunlar: sıfırın altında öğütme, mekanik aktiviteli tavlama işlemi, reaksiyon öğütme, ikili mekanik alaşımlama, mekanik aktiviteli kendi kendine ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi öğütme, çubuk öğütmedir.

Sıfırın altında (aşırı soğukta) öğütme: Bu imalat tekniği gün geçtikçe fazlalaşarak yaygın hale gelmektedir. Bu öğütme işleminde sıvı azot gibi aşırı soğuk madde kullanılarak ya da çok düşük seviye sıcaklıklarda uygulanır. Al ve Al alaşımları 1-10 nm boyutunda Al-Nitrit ya da Oksi-Nitrit partikülleriyle mukavemetlendirilmiş Al matris tozları böylelikle öğütülmüş olur [20].

Mekanik aktiviteli tavlama işlemi: Kısa süreli mekanik alaşımlamayla düşük sıcaklıkta izotermal tavlamanın birleşmesiyle oluşan bir yöntemdir. Silikat gibi imalatı güç olan refrakterler için bu iki aşamanın birleşmesiyle etkili olduğu saptanmıştır. Mo ve silika

tozlarını 1-2 saat bilyalı değirmende mekanik alaşımlamasını takiben, 2-24 saat 800°C'de tavlama sonucu MoSi₂ fazı oluşması buna örnek verilebilir [22].

Reaksiyon öğütme: Mekanik alaşımlamaya katı hal reaksiyonu olarak eşlik eden bir ifadedir. Bu teknikte DİSPAL diye adlandırılan Al matris ve alaşımlarında Al₂O₃ ve Al₄C₃ dağılımı bulunduran malzeme üretilmiştir [18]. Reaktif katı, sıvı ve gazların olduğu metal tozların öğütülmesi, karbürleri, metal oksitleri ve nitrürleri sentezlemek adına düzenli olan bir işlemdir. Bu teknikle WC, TiB₂, TiN gibi bileşikler elde edilebilir [19].

İkili mekanik alaşımlama: Bu teknik iki aşamalıdır. İlk aşamada bileşiği oluşturan elementlerin toz boyutları inceltir ve karışımda homojen bir dağılım oluşması sağlanır. Karışımda yüksek sıcaklık seviyesinde yapılan tavlama işlemine tabi metaller arası bileşikler meydana gelir. İkinci aşama esnasında matrisin tane boyutunu düşürmek ve metaller arası bileşikleri inceltmek için ısıtılma işlemine tabi olmuş tozlar tekrardan öğütülür. Hacim şekli için gaz çıkarmadan sonra tekrar birleştirilir. Bu teknik metaller arası ince bileşikler elde etmek için elverişli bir tekniktir [23].

Mekanik aktiviteli kendi kendine ilerleyen yüksek sıcaklık sentezi öğütme: Bu teknik mekanik alaşımlama ve kendi kendine meydana gelen yüksek sıcaklık sentezinin birleşmesiyle oluşmuştur. Bu teknikte, toz karışımı fırında bir paket ve yanma içinde tozun preslenmesi ile başlatılan, nano kristal yapı ve daha sonra kendi kendine yüksek sıcaklık sentezlemesi reaksiyonu elde etmek için mekanik olarak alaşımlanmıştır. Bazı Niyobyum-Alüminat ve alüminat gibi metaller arası bileşik bu teknikle sentezlenebilir [24].

Çubuk öğütme: Japonya'da, özellikle işlem sırasında toz kirlenmesinin önüne geçmek için geliştirilmiştir. Normal bilyalı öğütme işleminde, öğütme malzemelerinin yüzeyi darbe etkisiyle aşınmakta olup, bu kısımdan dökülen parçacıklar alaşımı kirletmektedir. Uzun çubuklar bilyaların yerini alarak çubuk öğütmede kirlenmeyi azaltmak hedeflenmiştir. Silindirik kapta kesme kuvveti daha çok çubukların dönmesiyle oluşur. Bu uygulamanın neticesinde bilyalı öğütmeye nazaran çok daha az kirlenmenin olduğu gözlemlenmiştir [21].

3.1 Mekanik Alaşımlamanın Avantajları

İkili, üçlü ve çoklu sistemlere deneysel ve üretim süreçleri açısından, mekanik alaşımlama yöntemi kolaylıkla uygulanabilmektedir. Buna bağlı olarak mekanik alaşımlama

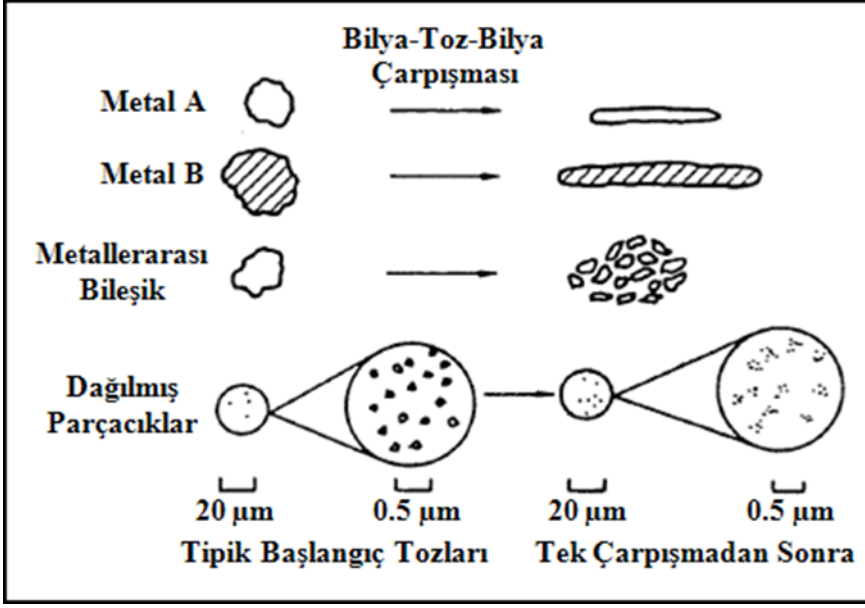
yöntemi ticari ve üretim alanında birçok avantajlar getirmektedir [2]. Sağladığı avantajları şöyle sayabiliriz.

- Sıvı fazda birbiri içerisinde (Cu-Pb) ya da katı fazda (Fe-Cu) gibi çözünmeyen elementlerin alaşımlandırılması,
- Normal ergitme teknikleriyle elde edilmesi zor ya da olanaksız olan elementlerin (WC-Co gibi), mekanik alaşımlamayla bir katı kal işleme olması dolayısıyla elde edilebilir,
- Nitrit, oksit ve karbürlerin alaşımlama esnasında katı, sıvı ve gaz halinde takviye edilebilirliği,
- Birbirinden çok farklı ergitme sıcaklığındaki malzemelerden olan intermetaliklerin elde edilmesi,
- Alaşımlamada, termodinamik açısından kompozisyon sınırlılığı bulunmamaktadır. Böylelikle sıra dışı ve farklı alaşımların üretilmesine imkan sağlar,
- Partiküllerin yardımıyla, toparlanmayı ve yeniden kristalleşmeyi engellemesi ya da yavaşlatılmasıyla malzemelerin yüksek sıcaklık kararlılığının yükseltilmesi,
- Homojen dağılmış matris içerisindeki partiküllerin yardımıyla dislokasyon hareketlerini engelleyen bariyerlerin meydana getirilmesi,
- Termal kararlılığı gelişmiş, aşınma ve korozyon direnci yüksek uygun malzemelerin elde edilmesi,
- Fabrikasyon ve depolama açısından kolaylık,
- Tek seferde oldukça fazla tozun alaşımlandırılması ve elde edilmesi,
- Nano kristalli malzemelerin elde edilmesine imkan sağlaması,
- Kritik sıcaklıklarda sinterlemeyle ısı işlem imkanı vermesi,
- Arzu edilen tepkimeleri gerçekleştirmesi ya da hızlandırması,
- Sinterleme ve preslemeyle yüzde yüze yakın yoğunlukta ürün elde edilmesi.

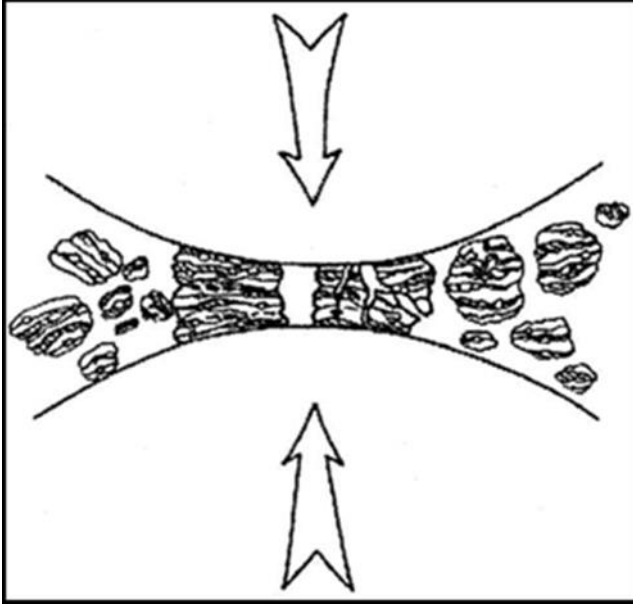
3.2 Mekanik Alaşımlama/Öğütme (MA/Ö) İşlem Mekanizması

Genellikle katı hal alaşımlaması olarak adlandırılan mekanik alaşımlama/öğütme tekniği, tane boyutu gayet ince ve kontrollü mikro yapıya sahip tozlardan meydana gelen

kompozit metal alaşım tozları imalatında kullanılan, yüksek enerjili ve kuru öğütme yöntemidir [25]. Şekil 3.1.'de Şematik olarak, mekanik alaşımlanacak başlangıç tozları gösterilmektedir. Yüksek enerjili öğütme esnasında, toz parçacıklar hızlıca yassılaşıp, soğuk kaynaklanır, kırılır ve tekrardan kaynaklanır. İki tane çelik bilyanın çarpışma esnasında aralarında bir miktar toz sıkışır. Yaklaşık 1000 adet parçacık toplam 0.2 mg ağırlığında her çarpışma sırasında sıkışır (Şekil 3.2.). Oluşan çarpma kuvvetinin etkisiyle toz parçacıklarını plastik deformasyona uğratar, bu da kırılmaya ve deformasyon sertleşmesine neden olur. Başlangıç aşamasında parçacıklar yumuşak olduğundan (sünek-kırılđan veya sünek-sünek malzeme kombinasyonu kullanıldığında), büyük parçacıklar elde edilmesi ve parçacıkların birlikte kaynaklanması eğilimi yüksektir. Gayet geniş parçacık boyut grupları oluşur ve bazıları başlangıç parçacıklarından üç kat daha büyük olabiliyor. Başlangıç içeriklerinin çeşitli kombinasyonlarını içeren bir karakteristik katmanlı yapıya, kompozit parçacıklar bu aşamada sahiptir. Parçacıklar devamı süren deformasyon ile deformasyon sertleşmesine uğrayıp ve kırılđan katmanların ayrılmasıyla ya da bir yorulma mekanizmasıyla kırılır. Birleştirici kuvvetler olmadığı zaman bu sistem ile oluşan parçacıklar boyut olarak küçölmeye devam eder. Kırılmaya olan eğilim bu safhada soğuk kaynaklanmadan daha fazladır. Mesela, parçacıkların yapısı devam eden darbelerden dolayı devamlı inceltilir, ama parçacık boyutu sabit kalır. Sonucunda parçacık içindeki katmanların sayısı artar ve katmanlar arası mesafe azalır [2].



Şekil 3.1. Mekanik alaşımlamada kullanılan element başlangıç tozlarının ve deformasyon karakteristiklerinin gösterimi



Şekil 3.2. Mekanik alaşımlama sırasında bilya-toz-bilya çarpışması

Geleneksel bilyalı değirmende hatırlanacak olunursa parçacık boyutu azaltma kabiliyeti oldukça azdır, yaklaşık olarak %0.1'dir. Yüksek enerjili bilya öğütme işlemlerinde bu verim yüksek olabileceğine rağmen yine de %1'den azdır. Genellikle ısı olarak kalan enerji

kaybedilir, lakin az bir miktarı da toz parçacıkların plastik ve elastik deformasyonunda kullanılır.

Ortalama parçacık boyutunu azaltan kırılma hızı ve ortalama kaynaklanma boyunu arttıran kaynaklanma hızı arasında, belirli bir öğütme zamanından sonra, bir denge sağlandığında sabit durum elde edilir. Küçük parçacıklar büyük parçacıklara kaynaklanma eğilimindedirler ve kırılmadan deformasyona dayanabilirler. Burada çok büyük ve ince parçaları ortalama boyuta gelmesini sağlayan bir eğilim söz konusudur [26]. Bu safhada başlangıç içeriklerinin hepsinin birlikte karıştırıldığı oranda her bir parçacık bileşik içerir ve parçacıklar deformasyon enerjisinin toplanmasından dolayı ile doyma sertliğine erişirler. Parçacıkların boyut dağılımı bu safhada dardır. Çünkü ortalamadan küçük parçacıkların topaklanarak büyüme hızıyla ortalamadan büyük parçacıkların boyutu aynı oranda küçülür [27].

Yukarda bahsi geçenlerden görüldüğü üzere mekanik alaşımlama sırasında, parçacıklar aşırı deformasyon etkisinde kalır. Bu durum, artan tane sınırı sayısı, istifleme hataları ve boşluklar gibi birçok kristal hataların sebebiyetiyle görülür. Çözen elementlerin matris içerisine dağılma kabiliyetlerini bu hata yapısının varlığıyla artırır. Difüzyon mesafelerini inceltmiş yapısal özellikler azaltır. Difüzyon davranışına öğütme sırasında sıcaklıktaki az miktardaki artış difüzyon davranışına daha fazla yardım eder. Nihayetinde içerik elementleri arasındaki alaşımlama doğru meydana gelir. Oda sıcaklığında bu alaşımlama nominal gerçekleşirken, bazen alaşımlanın gerçekleşmesi için yüksek sıcaklıkta mekanik alaşımlanmış tozun tavllanması gerekir. Bu yargı özellikle metaller arası bileşiklerin gerçekleşmesi istendiğinde doğru olduğu görülmektedir.

Muayyen bir yapı geliştirmek için herhangi bir mekanizmada gerekli olan özel zaman içeriklerin (karışımın) karakteristiklerinin, başlangıçtaki parçacık boyutunun ve mekanik alaşımla işlemi gerçekleştirmek için özel ekipman ve bu ekipmanın çalışma şartlarının bir fonksiyonu olabilir. Ama birçok durumda, iç yapının inceltme hızı (tane boyutu, parçacık boyutu, boşluk, lameller gibi) işleme hızıyla logaritmiktir kabaca ve bundan dolayı başlangıç tozların boyutu kısmen önemi yoktur. Lameller mesafe çoğunlukla küçülür, birkaç dakikadan bir saate ve tane boyutları nanometre boyutlarına kadar inceltilir.

Yukarda söz edildiği üzere, metallerin ve metal alaşımlarının üç farklı kombinasyonlarının; sünek-kırılğan, kırılğan-kırılğan ve sünek-sünek mekanik alaşımlamasını

elde etmek mümkündür. Bundan dolayı mekanik alaşımlama sistemini bu başlıklar altında incelemek uygun olacaktır.

3.2.1 Sünek-Sünek alaşımlama

Bu teknik mekanik alaşımlama için ideal ürünlerin kombinasyonudur. Alaşımlamayı gerçekleştirebilmek için Benjamin, en azından %15 sünek olması gerektiğini önermiştir [1]. Çünkü toz parçacıklarının tekrar eden soğuk kaynaklanması ve kırılmasıyla doğru alaşımlama oluşur. Soğuk kaynaklanma parçacıklar sünek değil ise oluşmaz.

Volin ve Benjamin ilk olarak alaşımlama sisteminin tanımını; iki farklı sünek eleman içeren bir mekanizmada gerçekleştirmiştir [30]. Mekanik alaşımlamanın ilk safhalarında bir mikro dövme uygulamasıyla sünek elamanların yassılaşıp, yassı kek şekline geldiğini göstermiştir. Az miktardaki toz çoklukla bir ya da iki parçacık kalınlığında bilya yüzeylerine kaynaklanır. Öğütme elamanının aşırı aşınmasına engel olduğu için, öğütme elamanı üzerinde bir tozun kaplanması yararlıdır. Heterojen ürün oluşumundan kaçınmak için öğütme elamanının üzerindeki toz katmanının kalınlığı en düşük seviyeye çekilmelidir [31]. Yassılaştırmış parçacıklar daha sonraki safhada birbirleriyle soğuk kaynaklanıp içerik metallerin bir levha kompozit yapısını meydana getirir. Bu safhada parçacık boyutundaki artışta gözlenir. Mekanik alaşımlama süresinin artmasıyla toz kompozit parçacıklar deformasyon sertleşmesine uğrarlar. Sertlik artış gösterir ve haliyle kırılgenlikta buna bağlı artar. Daha düzgün eş boyutlarda parçacıklar parçalara ayırarak, parçacıklar meydana gelir. Doğrusal olmaktan ziyade daha fazla öğütme ile kaynaklanmış tozlar dentritik olur. Eşit boyutlu toz parçacıklarının kaynaklandıkları yönlenmeye herhangi bir tercih olmadan rastgele kaynaklanmasındandır. Azalan difüzyon mesafeleri, artan kafes hata yoğunluğu ve öğütme işlemi esnasında olan herhangi bir ısıtmanın kombinasyonu nedeniyle bu safhada alaşımlama başlar. Bu safhada sertlik ve parçacık boyutu bir doyum noktasına erişme eğilimdedir. Bu durum sabit durum işleme safhası olarak adlandırılır. Katı çözeltiler, metaller arası bileşikler ya da amorf fazların oluşumuna neden olan doğru alaşımlama, daha fazla öğütmeyle atomik seviyede gerçekleşir. Katman aralıkları bu safhada o kadar ince olur ki optik mikroskop altında bile görünmez.

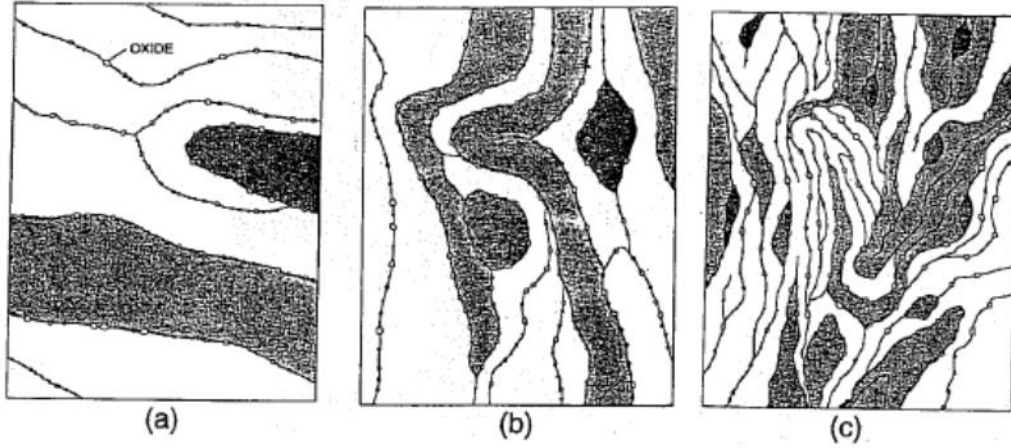
Tozda homojen yapının elde edildiğinin ve mekanik alaşımlamanın gerçekleştirildiğinin bir göstergesi olarak tozun öğütme elamanlarından ayrılabilme kolaylığını söyleyebiliriz. Benjamin, mekanik olarak alaşımlanmış tozun manyetik davranışının ergiterek ve çalışarak elde edilmiş homojen Ni-Cr alaşımına benzer olduğunu, element tozlarından başlayarak doğru Ni-Cr alaşımı oluşturmanın mümkün olduğunu göstermiştir.

Mekanik alaşımlama safhalarında çok çeşitli yapılar olduğu için yapısal inceltme istatistiği bir uygulama olsa dahi, yapısal inceltme hızı işleme giren mekanik enerji hızına ve işlenen ürünün pekleşmesine bağlı bulunmuştur [32].

3.2.2 Sünek-Kırılğan alaşımlama

Kırılğan oksit parçacıkları sünek bir matris içerisine dağıtılmış olduğundan, geleneksel ODS alaşımları (oksitle güçlendirilmiş olan) bu kısma girer. Benjamin ve diğerleri tarafından da bu tarz mekanizmalarda (mikro yapının oluşumu) açıklanmıştır. Alaşımlamanın ilk safhalarında, sünek metal parçacıkları bilya-toz-bilya çarpışmalarıyla yassılaşıp iken kırılğan oksit ya da metaller arası bileşik parçacıklar parçalanır. Sünek elemanlar tarafından bu parçalanan kırılğan parçacıklar engellenir, sünek elemanların arasında kalır. Levhalar arası boşluklar boyunca kırılğan içerikler sıkıca yerleşir (Şekil 3.3a.). Öğütme arttırılarak sünek toz parçacıklar deformasyon sertleşmesinin etkisinde kalır, lamel iyice kıvrımlaşır ve incelir (Şekil 3.3b.). Başlangıç toz karışımının kompozisyonuna her bir parçacığın kompozisyonu yaklaşır. Eğer kırılğan parçacıklar çözünebilir değil ise, mesela bir ODS alaşımında olduğu gibi (Şekil 3.3c.), devam edilen öğütle lameller arası boşluk azalır, lamel daha çok incelir ve sünek matris içerisinde düzgün bir şekilde dağılır. Eğer kırılğan faz çözünebilir ise kırılğan ve sünek elemanlar arasında kimyasal homojenlikte, alaşımlama da gerçekleşir. $NiZr_2$ ve saf Zr (sünek) metaller arası bileşik (kırılğan) karışımının öğütülmesi üzerine amorf bir faz oluşması bu sisteme örnek verilebilir [33]. Alaşımlamanın gerçekleşip gerçekleşmeyeceği sünek-kırılğan bir mekanizmada, kırılğan elamanın sünek matris içerisinde çözünebilirliğine bağlıdır. İhmal edilebilir katı çözünebilirliğine sahip ise eğer bir eleman alaşımlamanın gerçekleşmesi olası değildir, örneğin demir içindeki bor. Bundan dolayı, mekanik alaşımlama sırasında sünek-kırılğan elemanların alaşımlaması, kısa mesafeli difüzyona imkân vermesi

için tek başına kırılğan parçacıkların parçalanmasını gerektirmez, aynı zamanda sünek matris elemanı içerisinde mümkün katı çözünebilirliği de ister.



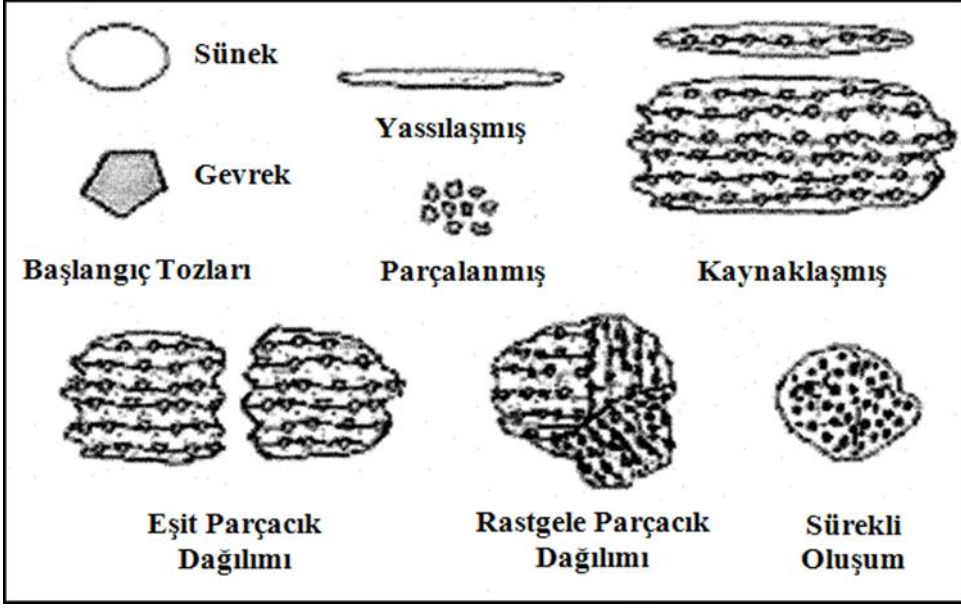
Şekil 3.3. Tozların sünek-kırılğan kombinasyonunun öğütülme esnasında mikro yapısal gelişiminin şematik gösterimi. [1]

3.2.3 Kırılğan-Kırılğan alaşımlama

Alaşımlamanın gerçekleşmesi iki ya da daha fazla kırılğan bileşenlerden meydana gelen bir mekanizmada sezgisel bir açıdan bakacak olursak pekte ihtimal dahilinde olmayabilir. Sünek bileşenin olmaması olası bir kaynaklanmaya engel olur ve bunun bulunmadığı vaziyette de alaşımlamanın gerçekleşmesi mümkün olmaz. Mn-Bi ve Si-Ge gibi kırılğan-kırılğan bileşen mekanizmalarında alaşımlamanın olduğu rapor edilmiştir [34]. Metaller arası kırılğan bileşiklerin karışımlarının öğütülmesi de amorf fazlar meydana getirmiştir [35].

Yukarıda sözü edildiği üzere, öğütme sırasında kırılğan bileşenler parçalanır ve sürekli parçaların boyutunda küçülme meydana gelir. Çok küçük parçacık boyutlarında toz parçacıklar sünek şekilde davranır ve boyutta daha fazla küçülme olanaksızdır; buna küçülme sınırı denilir [36].

Kırılğan bileşenlerin öğütülmesi sırasında malzeme transferine katkıda bulunan olası mekanizmalar kusursuz hacimlerde mikro deformasyonu, sıcaklık artışı, yüzey deformasyonunu ya da öğütme sırasında tozlarda hidrostatik gerilim durumuyla gerçekleşebilen plastik deformasyonu barındırır [37].



Şekil 3.4. Tozların birleşme süreçlerinin şematik gösterimi

3.3 Mekanik Alaşımın Kinetikleri

Önem arz eden bir diğer husus ise mekanizmanın anlaşılmasında, mekanizmanın sahip olduğu kinetiklerdir. İstenilen kriterlerde mekanizmanın oluşması, yüksek sıcaklık isteyen katı hal tepkimelerinin uygun oranlarda devam edebilmesi için, bir şekilde oda sıcaklığında meydana geldiğinin incelenmesidir.

Uygulamaya giren elemanlar arasında tüm katı hal reaksiyonları, bir ya da birden fazla ürün aşamasının gerçekleşmesini gerektirir. Tepkimeye girenler ayrıldıkça reaksiyon hacmi kademe kademe azaltılır.

3.3.1 Çarpışma süreçleri

Mekanik alaşımlamanın mekanik kısmını açıklamada çarpışan bilyaların nispi hızı önem arz eder. Kullanılan bu hızlar mekanik alaşımlama yönteminde işleme karakteristikleri ve öğütme cihazı geometrisi bazında deneysel olarak yaklaşık olarak ifade edilebilir. Saniyede metrenin ondalığında atritör için ön çarpışma hız aralığının, yatay değirmenler ve spex içinse saniyede metreye ulaştığı saptanmıştır.

Topaklanan toz parçalarının birbirleri arasında sıkışmalarının tozlu çarpışmalardaysa, öğütücü bilyalara göre oldukça azdır. Bundan dolayı toz göre sonsuz eğrilikte olduklarını çarpışan cisimlerin yüzeylerinin, kabul etmek gayet ideal bir yaklaşım olacaktır. İki paralel tabaka arasında tozlu çarpışmalar dolayısıyla özel bir küçük çaplı dövme uygulaması olarak görülebilir. Serbest bilya hareketi sebebiyle atritörde çok değişik şekillerde gerçekleşir, buna göre tozlar farklı mekanik kuvvetlere maruz kalırlar. Benzer etkiler miller ve kollar arasında da meydana gelir. Sistem içerisinde gelişmiş güzel yönlendirmeler, dönme yönünden ve çarpışmadan kaynaklanır. Bilyalar ve kollar arasında oluşan bu etki, atritörlerde diğer sistemlere göre ana farklılıklardan gelir. Atritörün birim alanda harcanan kuvvetin maksimum enerjiye dönüşümünü gerçekleştiren kol-bilya-toz-kazan çarpışmaları halinde meydana gelen bu kombinasyonlardandır. Minimum enerjiyle maksimum öğütme gerçekleştiğini gösterir. Öğütme hızı ve BTO bu çarpışma sürelerinin etkinliğindeki en önemli noktalaradır.

3.3.2 Difüzyon

İlk kontak bölgeleri ve üretim kademeleri süresince reaksiyona giren elemanların birbirleri içerisindeki difüzyonuyla, mekanik alaşımlamada tepkime oranları değişir [60]. Parçacıkların ilk temas alanı birçok katı hal tepkimeleri için sabittir, bu nedenle de difüzyon da sınır vardır. Katı hal uygulamalarının sıcaklığa aşırı bağıllığı bu yüzdendir ve tepkimeler ısıl olarak meydana gelir. Tepkime oranları (belirli şartlar altında) ve sıcaklıktaki düşüş mekanik olarak geliştirilmiş tepkimeler için, faz değişimiyle artar. Mekanik alaşımlama ve birçok şartın bir arada bulunmasıyla, oda sıcaklığında katı hal tepkimesinin gerçekleşmesini engelleyen olumsuzluklar giderilebilir [63, 64]. Reaktif derece tozların oluşmasındaki bir diğer etkidir. Oksit ya da benzeri tabakalar yüzeyde meydana gelebilecek difüzyonu etkiler. Sinterlemede ki gibi film şeklinde bir engelleyicidir, bu etki. Kullanılan atmosferin önemi bundan dolayı önem arz eder.

Isının öğütücüde belli bir değere kadar yükselmesine, difüzyon sürecini hızlandırmasından dolayı, alaşımlamanın cinsine göre izin verilebilir. Tabii tozun kirlenmesi, aşınma olayları gibi olumsuz etkileri de dikkate alınmalıdır.

3.3.3 Kontak alanları boyutu

Yalnızca ilk temas alanlarına bağlı değildir, tepkime ara yüzey alanı. Parçacık büyüklüğü azaldıkça ara yüzey alanı da artar öğütme işlemi esnasında. Böylelikle öğütme esnasında kimyasal reaktivite devamlı artış gösterir [64]. Arttırılmış olan bu reaksiyon ara yüzeyi de, kırılma olayları dinamik olarak ve tekrar kaynaklanma esnasında tozlar kırıldıkça devamlı meydana gelir.

Tepkime oranını arttırıcı bir diğer etki de, mevcut bulunan mekanik alaşımlanmış tozlar içindeki difüzyon oranıdır. Difüzyonun oda sıcaklığında meydana gelmesini sağlayan plastik deformasyon yöntemiyle birçok kristal bozulmasının ortaya çıkması, bunun nedenidir [64]. Öğütme esnasında kendini devam ettiren yanma olaylarının oluşması, mekanik alaşımlama boyunca tepkime oranlarının artmasından kaynaklanabilir.

3.3.4 Reaksiyon ve kimyasal kinetikler

Öğütme parametrelerinden öğütme süresi ve yük oranı arasındaki ters orantı olduğunu, mekanik alaşımlama esnasındaki reaksiyon kinetikleri ve bunun sonucu meydana çıkan kimyasal kinetikleri arasındaki ilişki olduğu açıklanmıştır [64]. Öğütme zamanını kontrol eden bir çarpışma esnasında her bir parçacığın absorbe ettiği enerji olduğunu, toz/bilya çarpışmalarının sayısı olmadığını göstermektedir.

Fakat çarpışma enerjisine ve de bilya etkili çarpışmaların sayısal toplamına mekanik alaşımlama kinetikleri bağlıdır. Nihayetinde mekanik alaşımlamanın kimyasal kinetiklerine etki eden unsurların anlaşılması sebebiyle, relatif uygulama süreleri mekanik alaşımlama için optimum seviyeye çekilebilecektir.

3.4 MA/Ö Ekipman ve İşlem Parametreleri

- Kullanılan tozun hammaddesi ve boyutları
- Öğütücünün tipi
- Öğütücü kap
- Öğütücü hızı

- Öğütme zamanı
- Öğütücü kollar
- Öğütücü bilyalar
- Toz/bilya oranı
- Kabın doluluk oranı
- Değirmenin atmosferi
- Değirmenin sıcaklığı

3.4.1 MA/Ö işleminde kullanılan hammadde ve boyutları

1 ila 200 µm boyutlarında aşırı miktarda bulunan, mekanik alaşımlama için kullanılan başlangıç ürünleri saf ticari tozlardır. Lakin parçacık toz boyutu öğütme bilyasının ölçülerinden küçük olmak şartıyla çok önem arz etmez. Çünkü üstel olarak zamanla parçacık toz boyutu azalır, birkaç mikron boyutuna yalnızca birkaç dakika öğütmeden sonra gelir. Esas alaşımlar, saf metaller, refrakter bileşikler ve ön alaşımlanmış tozlar grubuna, başlangıç tozları ayrılır. Karbür, nitrür ve oksit katkısını, dağılımla dayanımı arttırılmış malzemeler çoğunlukla barındırır. Yaygın olanı oksitlerdir, oksit dağılımıyla dayanımı yükseltilmiş ürünler olarak bilinir, bu alaşımlar. Mekanik alaşımlamanın ilk başlarında, değirmene konulan tozların en azından hacimce %15'i tutucu olarak görev yapması için sıkıştırılarak deforme edilebilir sünek metal tozlardan meydana gelmekteydi. Başarılı bir şekilde alaşım oluşturan tamamen kırılğan malzemelerin karışımının öğütülmesi son yıllarda bununla birlikte sağlanmıştır [38]. Sünek bir malzemenin, öğütme sırasında gerekliliği ortadan kalkmıştır. Yeni alaşımlar elde etmek için sünek-kırılğan, kırılğan-kırılğan ve sünek-sünek toz karışımları öğütülür. Son zamanlarda sıvıların karışımı ve katı toz parçacıklar öğütülmüştür [39].

3.4.2 Öğütücü değirmenin tipi

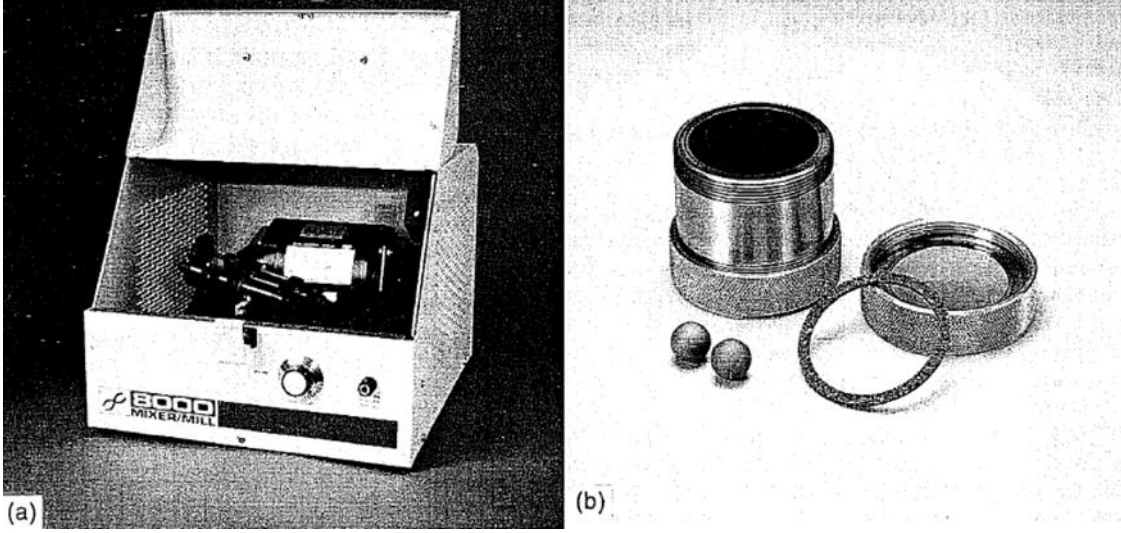
Tane şeklinin değişmesi, tane boyutunu azaltma, harmanlama ya da karıştırma gibi safhalar, mekanik alaşımlamanın en önemli safhalarıdır. Kullanılan öğütücünün türü bu safhalarda gayet önemlidir. Çok farklı öğütücüler mekanik alaşımlama uygulamasında

kullanılmaktadır. Öğütmenin değişik sıcaklıklarda kontrol yetenekleri, işlem hızı, tozun kırılma zamanının en aza indirgeme, tozun niceliği, tozun tipi, istenilen en son oluşum gibi özellikler değirmenin tipine, mekanik alaşımlama uygulamasında bağlıdır. Çoğunlukla yatay bilyalı, atritör tipi ve titreşimli öğütücüler tercih edilmektedir, mekanik alaşımlamada.

3.4.2.1 Titreşimli bilyalı değirmen

Tek seferde 10-20 gr civarı toz üretebilen SPEX değirmenler gibi karıştırıcılar, çoğunlukla laboratuvar çalışmaları için kullanılır. Bu değirmenlerin tipik olanları bir hazne bulundurur (Şekil 3.5a.). Birkaç bin defa salınım hareketi dakikada ileri-geri olmak üzere yapılır. Salınım hareketi ileri-geri hazne bitiminin yanal hareketleriyle birleştirilir olduğundan haznenin sekiz şeklinde hareket ettiği görülür. Bilyalar tozlara haznenin salınımlarıyla çarparak, haznenin sonu tozu karıştırır ve öğütür. Bağlama hareketinin genliği 5 cm civarı kadar olup ve hızından dolayı (1200 dev/dak), bilya hızları yüksektir (5 m/s büyüklüğünde). Bilyaların vuruş kuvveti bunların sonucunda anormal olarak büyüktür. Değirmenlerin yüksek enerjili olarak bilinmesi bundan dolayıdır.

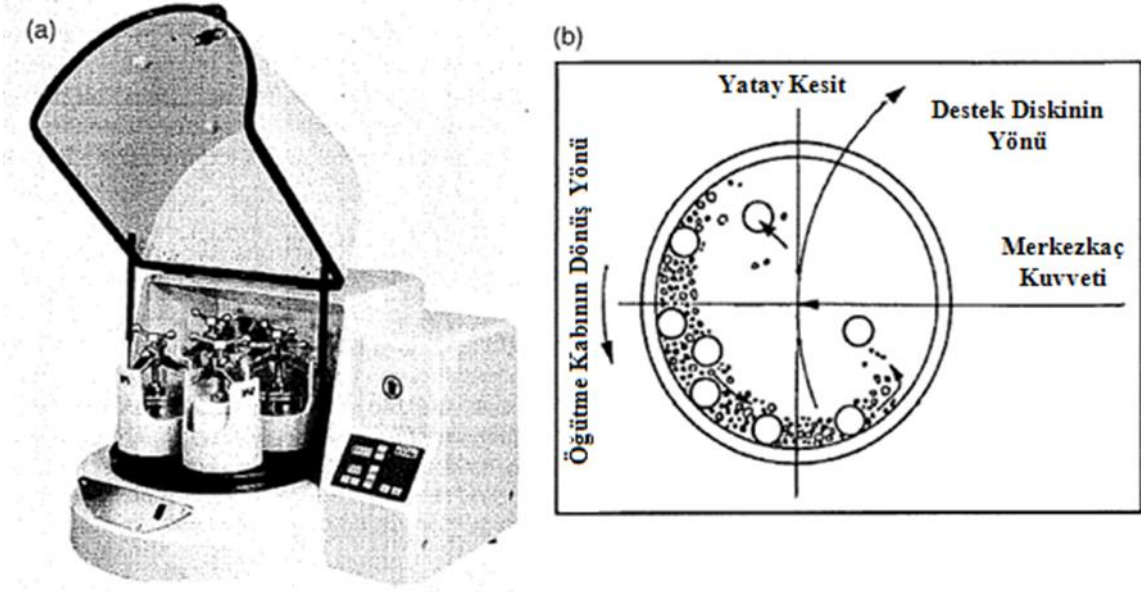
Öğütülen miktarı artırmak için son tasarlanan değirmenler, eş zamanlı olarak tozu iki haznede öğütme imkanına sahip. SPEX değirmenlerinin hazneleri için çeşitli malzemeler bulunur. Alüminyum oksit, paslanmaz çelik, sertleştirilmiş çelik, zirkonyum dioksit, tungsten karbür, metakrilik, hamatit, silis nitridi ve plastik gibi malzemeleri sayabiliriz. Şekil 3.5b.'de, tungsten karbür hazne, öğütme bilyaları ve sızdırmaz contaya sahip tipik bir SPEX değirmen görebiliriz. Bu SPEX değirmenlerinin farklı türleri kullanılarak, mekanik alaşımlamada ki temel durumlar hakkında çalışmalar gerçekleştirilir.



Şekil 3.5. (a) Titreşimli bilyalı değirmen, (b) Karıştırıcı hazne [2]

3.4.2.2 Yatay bilyalı değirmen

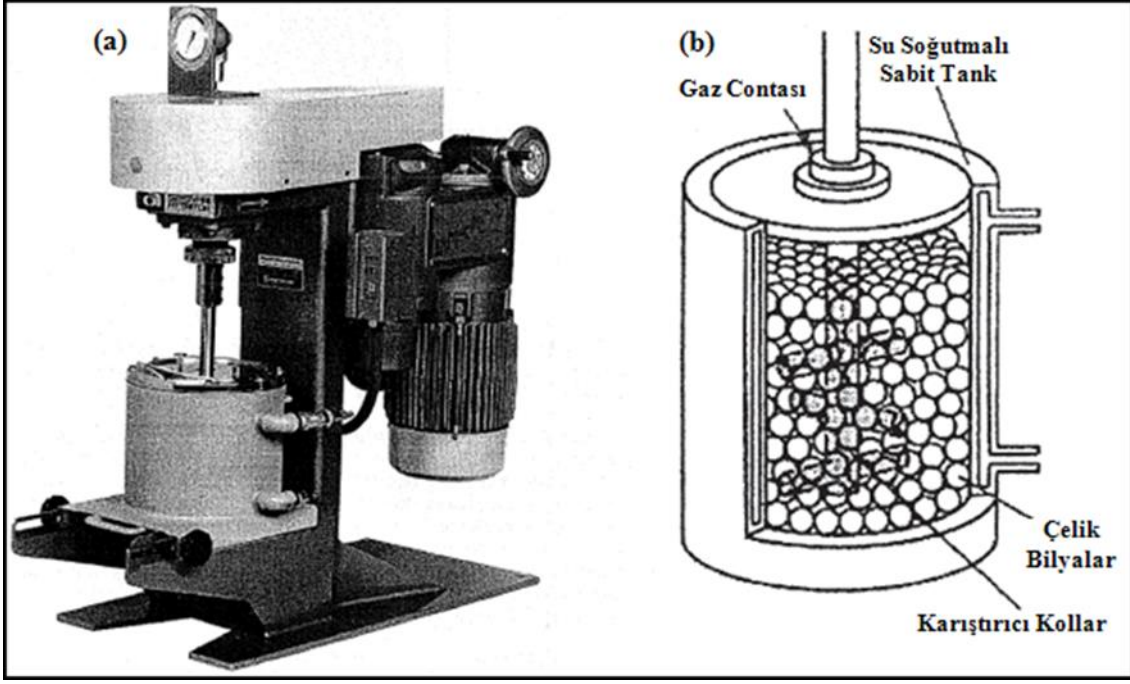
Yatay bilyalı değirmen mekanik alaşımlama çalışmalarını gerçekleştirmek adına bir diğer popüler değirmendir. Adlarına “planeter” denmesinin sebebi, bu değirmenlerin haznelerinin gezegen gibi seyretmesindedir. Kendi eksenleri etrafındaki hareketleri özel bir mekanizmadan alıp dönen bir disk üzerine yerleştirilirler. Hazne içerisindeki malzeme ve öğütme bilyalarına, dönen disk tarafından oluşan kuvvet ve kendi eksenleri etrafında dönen hazneler tarafından oluşan merkezkaç kuvveti tarafından etki olur. Merkezkaç kuvvetleri sırasıyla benzer ve zıt yönlerde etki yapmasının sebebi, hazne ve destek diski zıt yönlerde döndüğündendir. Bu durum sürtünme etkisi yaratıp, öğütme bilyalarının haznenin iç duvarlarından kaymasına neden olur. Mekanik alaşımlama işlemi, öğütülen ürün veserbest kalan öğütme bilyaları hazne içerisinde serbestçe dolaşıp karşı duvara çarpmasıyla gerçekleşir (Şekil 3.6.).



Şekil 3.6. (a) Yatay bilyalı değirmen, (b) Değirmen içerisindeki bilyaların hareketinin şematik gösterimi [2]

3.4.2.3 Atritör değirmeni

Yarısı küçük çelik bilyalarla doldurulmuş olan dönen bir yatay tamburdan oluşur, atritör değirmen (Şekil 3.6b.). Metal tozların bulunduğu kısım tamburun dönmesiyle meydana gelir. Öğütme oranı yüksek hızlardaki dönmelerde artış gösterir. Böylelikle çelik bilyalarda ki merkez kaç kuvveti etkisi, yerçekimi gücü etkisini geçer ve bilyalar tambur duvarına çarparak kuvvet azalması olur. Öğütme işlemi bu esnada durur. İç kısımlardaki karıştırıcı kollardan oluşan bir milden ve bir dikey tamburdan oluşur atritör. Alaşımlamak için kap içerisine koyulan tozlar da; karıştırıcı mil, karıştırıcı kollar, bilyalar arasında yada bilya ve kap arasındaki darbelerin etkisi nedeniyle bilyaların karıştırıcı kollardan şarj ettiği enerji sonucunda toz boyutları azalır ve alaşımlama işlemi meydana gelir. Laboratuvar standartlarında bir atritör değirmeni Şekil 3.7a.'da görülmektedir.



Şekil 3.7. (a) Laboratuvar tipi atritör değirmeni, (b) Değirmenin şematik gösterimi [2]

Partiküller arasındaki çarpışma ve bilyaların kayması neticesinde boyut azalması meydana gelir. Tambur içindeki çelik bilyaların dönmesini, güçlü bir motorla birlikte dönen karıştırıcı kollar sayesinde oluşur. Atritör değirmenlerinde ki öğütme zamanına toz büyüklüğünün miktarı bağlıdır.

Mekanik alaşımlama kullanılan atritörlerin genel özelliklerini şöyle sıralayabiliriz:

- Takometre devir sayısı
- Farklı devir sayıları için hız değiştirme sürücüsü
- Gaz giriş-çıkış tertibatı
- Su bağlantısını kesme tertibatı
- Tank yüksekliğini ayarlama mekanizması
- Kolay değiştirilebilir tank ve tanka uygun kollar
- Soğutma tankı
- Öğütülen malzemenin hızlı boşaltılma sistemi

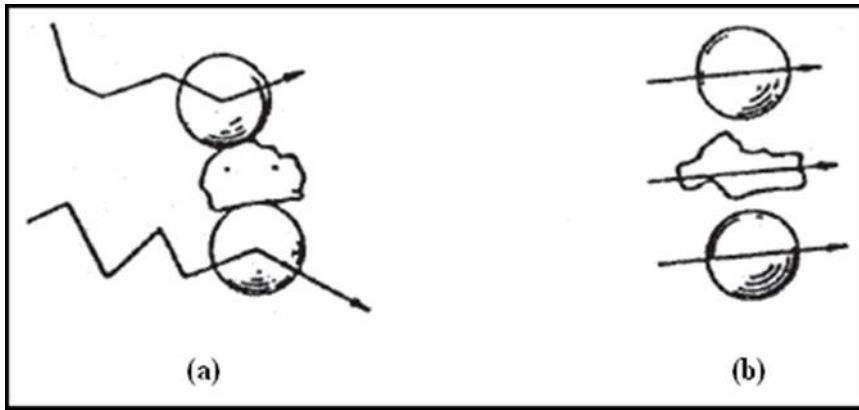
İdeal bir toz şarjı (element veya ön alaşımlanmış), ideal öğütücü bilyalarla birlikte yüksek enerjili değirmene yerleştirilir sonra toz şarjı döner bir merkezi shaft kolu ile aşındırılır, atritör ile mekanik alaşımlamada. Kesme kuvvetlerinin ve darbenin tank duvarları üzerine

küçük bir etki ve tane boyutu azaltmasıyla birlikte homojen bir tane dağılımı meydana getirir. Kesme kuvveti ve darbe etkisi etkili bir ince öğütme işlemi için aynı anda olmalıdır. Atritör değirmende öğütme bilyalarının rastgele hareketi sebebiyle değişik yörüngelere sıçrarlar, bu nedenle birbirine yakın tozlara kesme kuvveti uygulanır ve bilyaların çarpmasıyla bu darbe etkisi meydana gelir [38]. Şekil 3.8.'de bu kesme kuvvetlerini ve darbeyi görebiliriz.



Şekil 3.8. Atritör değirmeninde öğütme esnasında oluşan hareketler, (a) darbe, (b) kesme

Öğütücü bilyaların düzensiz hareketi sayesinde, atritör değirmende bulunan kollarla darbe etkileri meydana gelir. Gelişigüzel hareket eden bilyaların farklı dönme hareketlerine yayılmasıyla, kesme etsinden meydana gelir. Birkaç yatay kola sahip olan merkezi döner bir kol sayesinde öğütücü bilyalar ile toz şarjının beraber olan hareketinin bozulması be böylelikle tank boyunca düzensiz hareketlerin aynı zamanda çarpışmaların artması, atritörün etkili olmasına neden olur (Şekil 3.9.).

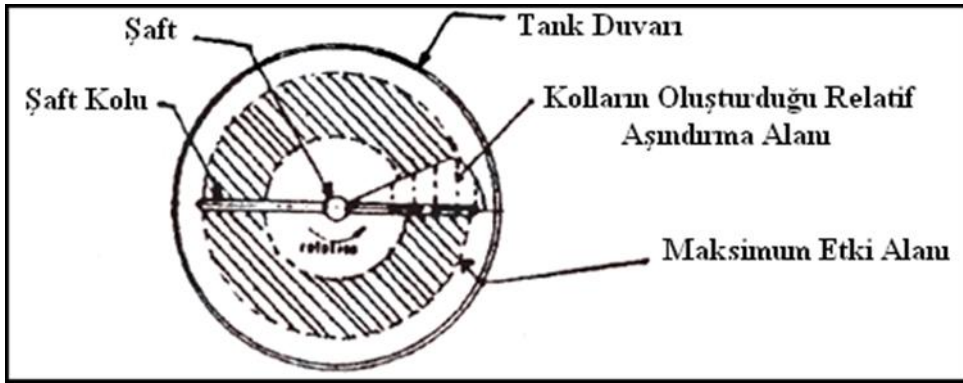


Şekil 3.9. Atritörde toz şarjı ile bilyaların hareketi, (a) Düzensiz hareket (b) Grup hareketi

Mekanik alaşımlama işleminin şaft kolu yardımıyla gerçekleştirilmesi, titreşimli ya da yatay bilyalı değirmenden ayran en önemli özelliktir, atritör değirmenini. Mekanik

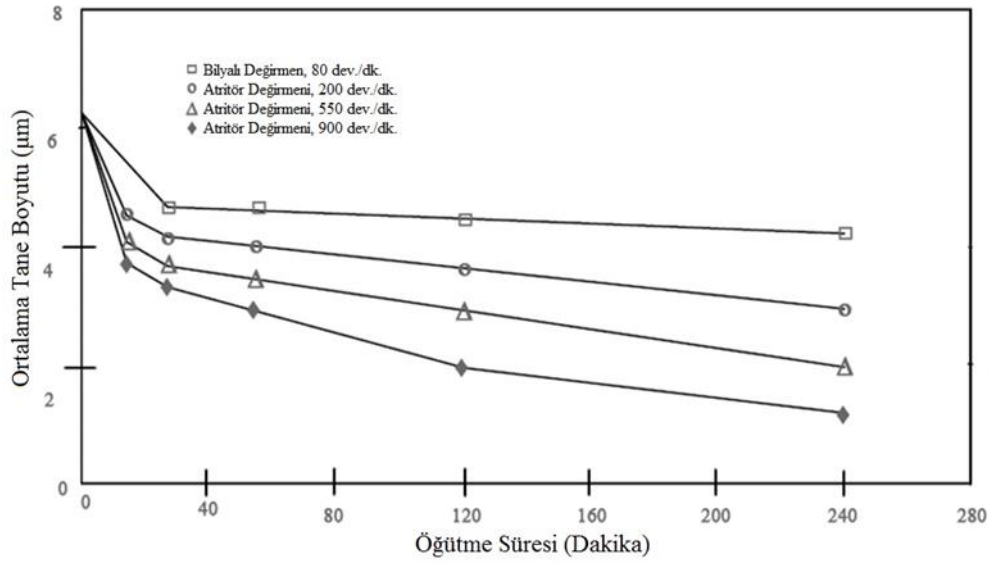
alaşımleme işlemi, daha etkili ve daha kısa sürede bilya-toz-şaft kolu ve bilya-toz-bilya gibi çarpışma sayılarının çoğalmasıyla meydana gelir. Öğütme işlemi, atritör diğer değirmenlere göre enerji bilya şarjına ek olarak kabın hareketine harcanmadığından daha az enerji ile gerçekleşir.

Tank etrafında sabit bir hareket kuvvetiyle, atritörde aşındırıcı kuvvetlerin dağılımı gerçekleşir. Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi bilya aşındırmasının en çok olduğu bölge merkezi şaftın 2/3'ü kadar yer kaplayan bölgedir. Tank duvarında bulunmaması, duvarda çok az aşınmaya sebep olur. Bundan dolayı tank duvarının kalın yapılması gibi bir maliyet artırıcı duruma girilmemelidir. Bu gerekçe ile daha uzun kullanım ömrüne çıkmakla beraber büyük ısı kontrolü ve ısı transferi de sağlamaktadır. Alümina, paslanmaz çelik, seramik, teflon kaplama, silika nitrür ve zirkonyum oksit gibi malzemelerden atritörde kullanılan kollar, farklı boyutlarda imal edilmektedir [41].



Şekil 3.10. Atritörde alaşımleme esnasında meydana gelen en büyük aşınma alanı

Toz boyutuyla öğütme süresi ters orantılıdır. Öğütme süresini ne kadar arttırsak toz boyutunu o kadar aşağı çekeriz. Şekil 3.11.'de görüldüğü üzere başlangıçta, bilyalı değirmende öğütülen tozlar çok hızlı bir boyut küçülmesi yaşamış olsa da öğütme süresinin uzamasıyla hızı düşmüştür. Atritörde öğütme hızı yüksek olmakla beraber zamanla da artış gösterir. Ayrıca şaft hızının artmasıyla atritörde, tane boyutunda azalma yaşanmaktadır [42].



Şekil 3.11. Öğütme süresi ile ortalama tane boyutunun azalması [25]

3.4.3 Öğütücü kap

Öğütme kazanının iç duvarlarına çarpmasından kaynaklanan bir kısım malzemenin kopup tozun içerisine karışıp tozu kirletip kimyasını değiştirebileceğinden, öğütücü kap için kullandığımız malzeme önem arz eder. Tozun malzemesiyle kullandığımız öğütme haznesinin malzemesi birbirinden farklıysa, haznenin malzemesi tozu kirletebilir. Eğer, kullanılan iki malzemede aynıysa, tozla karışacak olan ek elementi hesaba katarak doğru önlemler alınmazsa tozun kimyası değişebilir. Takım çeliği, paslanmaz çelik, rulman çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, WC-Co öğütme haznesinin imalatında popüler olan malzemelerdir.

3.4.4 Öğütme hızı

Toza aktarılan enerjinin değirmenin daha hızlı döndürüldükçe daha fazla olacağını tahmin etmek mümkündür. Kullanılabilecek hızı belirli sınırlamalar konulmasının sebebini değirmenin tasarımına bağlayabiliriz. Örnek verirse, bilyaların hareket hızını klasik bilyalı değirmelerdeki artan dönme hızı yükseltir. Darbe kuvveti oluşturmak için bilyalar, kritik hızın üzerinde haznenin duvarlarına yapışıp aşağıya düşmezler. Maksimum çarpışma enerjisi

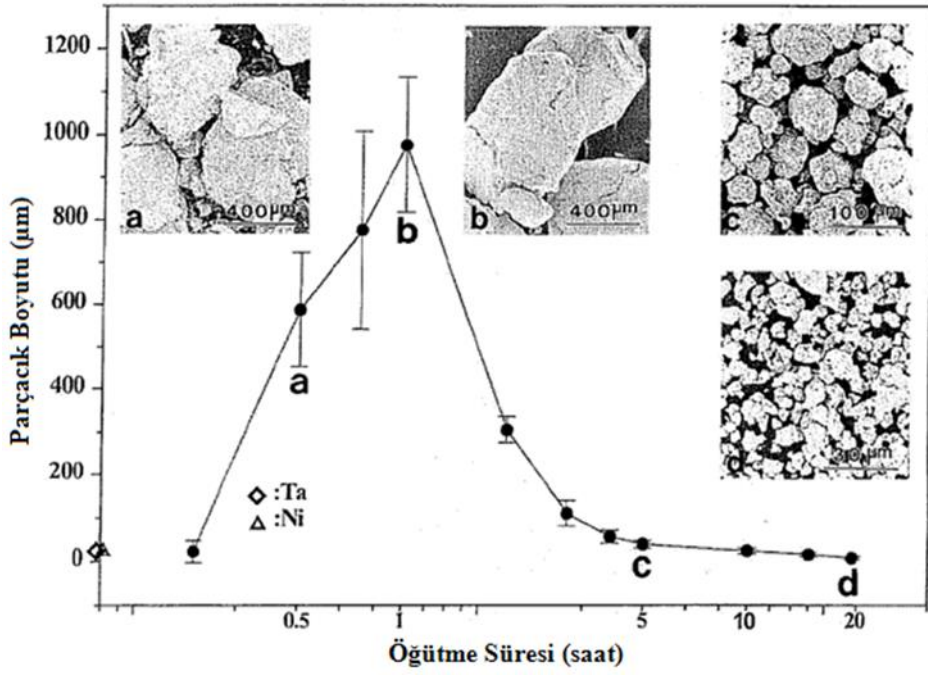
oluşturmak adına bilyaların maksimum yükseklikten aşağıya düşmeleri için, maksimum hız kritik hızdan biraz düşük olmalı.

Hazne sıcaklığının yüksek değerlere çıkması da maksimum hıza sınırlama getiren bir diğer etmendir. Fakat bazen, tozun alaşımlanması ve homojenleşmesini sağlamak için bu durum fayda getirebilir. Bununla birlikte sıcaklıkta gelişen bu artış durumu dönüşüm işlemi hızlandırdığından aşırı doymuş katı çözeltilerin ya da öğütme esnasında meydana gelen yarı kararlı faz durumlarının ayrışmasına sebep olduğu için zarar getirebilir [43]. Ayrıyeten tozu, oluşan bu yüksek sıcaklık kirlitebilir. Değirmenlerin türüne göre de maksimum sıcaklık değişkenlik gösterir.

3.4.5 Öğütme zamanı

En önemli unsur öğütme zamanıdır. Toz parçacıkları arasındaki kırılma ve soğuk kaynaklanma durumunu yakalayacak şekilde zaman seçilir, normalde. Öğütme yoğunluğuna, bilya toz oranına, öğütme sıcaklığına ve değirmen tipine göre, gerekli zaman değişir. Özel toz sistemi ve yukarıdaki unsurların her bir kombinasyonu için zaman belirlenmeli. bazı istenmeyen fazların ve kirlenmemin meydana gelmesi tozun fazla öğütülmesinden kaynaklanabilir [44]. Bundan dolayı tozun yeterli seviyede öğütülmesi ideal olmalıdır.

Ortalama parçacık boyutunu yükselten kaynaklanma hızıyla, belli bir öğütme süresinden sonra beraber artış göstermektedir. Kırılma eğilimine yeterli deformasyon sertliğine ulaşan tozlar girmiş olacaklardır. Ortalama tane boyutu da buna göre paralel bir şekilde düşecektir (Şekil 3.12.).



Şekil 3.12. Zamana göre toz boyutundaki değişim [2]

3.4.6 Öğütücü kollar

Kullanılan en önemli malzeme çeşitleri olarak; temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, sertleştirilmiş kromlu çelik ve takım çeliklerini söyleyebiliriz. Bunlara ek olarak öğütme kabının içerisinde niobyum, zirkonyum, titanyum, sağlamlştırılmış zirkonyum ve vitriyumoksit gibi farklı malzemeler kullanılabilir [45]. Tozlar ve bilyaların mevcut çarpışma kuvvetini sağladığı için, öğütücü kolların yoğunluğu ideal seviyede olmalı.

Öğütücü kol imalatında alaşımı yapılacak olan malzemeden veya ona benzer bir malzeme seçimi yapılmalıdır. Öğütücü tanktaki aşınmaya benzer bir aşınma burada da görülebilir. Tozun kimyasının değişmesine ve kirlenmesine aşınan partiküller sebebiyet verebilir.

Mekanik alaşımlamayı öğütücü kolların ölçüleri de etkiler. Çoğunlukla öğütücü kolların yüksek yoğunluğunun kullanışlılığı ve ölçüsünün büyüklüğü toz partiküllerinde bilyaların daha geniş yüksekliğinden çarpışma enerjisi aktarılır.

3.4.7 MA/Ö işleminde kullanılan bilyalar

En fazla kullanılan bilya malzemeleri olarak, takım çeliği, temperlenmiş çelik, sertleştirilmiş çelik, sertleştirilmiş kromlu çelik, rulman çeliği, paslanmaz çeliği sayabiliriz. Toz üzerine bilyaların vurma kuvveti oluşturmak adına öğütme malzemelerinin yoğunluğunun kafi seviyede olması gerekir. Öğütme haznesinde olduğu gibi bununla beraber, titanyum, bakır, niobiyum, zirkon (ZrO_2), hematit, yitriyum oksit stabilize zirkon, kısmen stabilize zirkon + yitriyum oksit, safir, silis nitriri (Si_3Ni_4) ve Cu-Be gibi özel bilya malzemeleri kullanılır. Öğütülen tozun kirlenmesini önlemek adına mümkün mertebe, öğütme elemanının ve haznenin aynı malzemedan olmasına özen gösterilmelidir [2].

Öğütme verimini bilya boyutu da etkilemekte. Faydalı olan çoğunlukla, büyük boyutlu ve yoğunluğu yüksek olan bilyalardır. Bilyaların ağırlığının fazla olması tozlara daha etkili vuruş yaparak yüksek enerji aktarmasını sağlar.

Genelde araştırmacıların çoğunluğu yalnızca tek boyutlu bilya kullansa da, aynı araştırmada ebatta bilyaların kullanıldığını da görürüz. En fazla çarpışma enerjisine farklı ebatlardaki bilyaların kullanıldığında ulaşılacağı öngörülmüştür [47]. Öğütülecek olan toz, öğütmenin başlangıç safhalarında, öğütme unsurlarının yüzeyine kaplanır hem de soğuk kaynaklanma olur. Öğütme elamanlarının aşırı bir şekilde aşınmasına engel olduğu için yarar sağlar. Bundan dolayı öğütme elamanlarının aşınmasına engel olunduğu için tozun da kirlenmesi önlenmiş olur. Heterojen son ürün oluşumunu önlemek adına kaplanan tabakanın kalınlığı en düşük seviyede olmalı [32]. Bu toz kaplamasının olumsuz tarafı ayrılması zor olduğu için toz veriminin düşmesine sebep olur. Öğütme safhasında büyük ve küçük ebatlı bilyaların kombinasyonunun soğuk kaynaklanma miktarını ve bilyaların yüzeyine kaplanan toz miktarını düşürdüğünü rapor edilmiştir [48]. Bu durumda yükselen verim için hiçbir özel açıklama verilmemesine rağmen, farklı ebatlardaki bilyaların yüzeyindeki tozun ayrılmasına yardımcı olan kayma kuvveti meydana getirmesi mümkündür.

3.4.8 Toz-Bilya oranı

Doldurma oranı olarakta, bilyalarının ağırlığının toza oranı bazı durumlarda adlandırılır. Bu durum birçok araştırmacı tarafından 1:1 [5] gibi küçük değerlerden, 220:1

[49] gibi büyük değerlerle ispatlanmıştır. Tozun öğütümünde genel olarak, 10:1 oranı SPEX değirmen gibi küçük kapasiteli bir değirmenle en fazla tercih edilendir. Ama bir atritör gibi, öğütme büyük kapasiteli bir değirmende uygulanırsa, yüksek bir toz-bilya oranı, 50:1'e kadar veya daha yüksek 100:1 kullanılır.

Öğütülen tozda, bilya-toz oranı belli bir fazı oluşturmak adına gerekli zaman üzerinde önemli bir etkiye sahip. Bilya-toz oranı ne kadar fazlaysa istenen zaman da buna bağlı olarak kısalır. Örneğin, bir SPEX değirmende bir Ti-%33 Al toz karışımında amorf fazı elde etmek için 10:1 bilya-toz oranında 7 saat, 50:1 bilya-toz oranında 2 saat, 100:1 bilya-toz oranında da 1 saat öğütme uygulanmıştır. Bilyaların ağırlığındaki artıştan dolayı ile yüksek bilya-toz oranında, birim zamandaki çarpışma sayısı yükselir ve sonucunda toz parçacıklara daha çok enerji aktarılır ve bundan dolayı alaşımlama daha hızlı gerçekleşir. Diğer araştırmacılar da buna benzer sonuçları rapor etmişlerdir [50]. Yüksek enerjiden kaynaklanan, daha fazla ısının açığa çıkacağı ve bu durumun tozun içeriğini de değiştirmesi mümkün. Meydana gelen amorf faz sıcaklık artışı kafi ise kristalleşebilme gerçekleşebilir.

3.4.9 Kabın doluluk oranı

Toz parçacıkları arasındaki alaşımlanmanın tozların üzerine gelen vurma kuvvetlerinden meydana geldiğinden, tozun ve bilyaların öğütme kazanı içerisinde serbest bir şekilde hareket etmesi için mümkün oranda alanın mevcut bulunması gerekir. Haznenin bilyalarla ve toz ile doldurulma miktarı bundan dolayı önem arz eder. Üretim hızı tozun ve bilyaların miktarı düşük ise çok yavaş gerçekleşir. Ters açıdan bakacak olursak, miktar fazlaysa bilyaların içerde hareket etmesi için yeterli alan mevcut olmadığından vurma enerjisi düşük seviyede olur. Haznenin aşırı doldurulmamasına dikkat edilmelidir. Genelde haznenin % 50' si kadar boşluk bulundurulmalıdır [2].

3.4.10 Değirmenin atmosferi

Aslında tozun kirlenmesine öğütme atmosferi etki eder. Bundan dolayı, öğütme işlemi gerçekleşecek kazanın havası ya boşaltılmalıdır ve ya kazana helyum ve argon gibi soy gazlar doldurulmalı (Azotun metal tozlarıyla etkileştiği ve sonuç olarak öğütme sırasında

kirlenmenin önüne geçemediği görülmüştür, ama nitrikler oluşturulmak istenirse kullanılabilir). Oksitlenmeyi ya da tozun kirlenmesinin önüne geçmek adına en yaygın kullanılan gaz yüksek saflıktaki argon.

Öğütme sırasında özel amaçlara yönelik farklı atmosferler kullanılmıştır. Amonyak azot atmosferleri nitrürleri oluşturmak adına kullanılmıştır [51]. Hidrit oluşturmak adına hidrojen atmosferleri kullanılmıştır [52]. Toz içerisinde oksitleri ve nitrürlerin meydana gelmesi haznenin içerisinde havanın bulunmasından dolayı olduğu görülmüştür. Özellikle tozların yapısı düşünüldüğünde reaktif oldukları durumda daha önem arz eder. Öğütme sırasında bundan dolayı asal bir atmosferin kullanılması için önlem alınması gerekir.

Atmosfer tipi son fazın özelliklerini etkilediği de görülmekte. Örneğin, Cr-Fe toz karışımı, değişik türlerdeki atmosferde öğütüldüğünde meydana gelen son tozun içeriğinin farklı olduğu görülmüş [53]. Argon atmosferinde öğütüldüğünde toz, amorf faz oluşmamış ve Cr çöküntüleri X-ışınımı kırınım grafiklerinde kalmış. Toz, hava içeren argon veya bir azot atmosferinde öğütüldüğünde tamamen amorf yapıda olduğu görülmüştür. Benzer bir açıdan oksijen, Ni-Nb mekanizmasında amorflanma kinetiğini yükseltici olarak bulunmuş [54].

Metal tozları sıvı bir nesneyle nadir olarak öğütülür ve bu durum ıslak öğütme olarak isimlendirilir. Ama hiç sıvı kullanılmaz ise buna da kuru öğütme denir. İnce öğütülmüş ürünler oluşturulmak isteniyorsa ıslak öğütmenin kuru öğütmeye nazaran daha iyi olduğu rapor edilmiştir. Çünkü, çözücü moleküller parçacıkların yeni meydana gelen yüzeylerine emilir, bu parçacıkların yüzey enerjilerini düşürürler. Islak halde toz parçacıkların az topaklanmış hali de yararlı bir unsurdur. Islak öğütme sırasında amorflanma hızının, kuru öğütme sırasındakinden yüksek olduğu rapor edilmiştir [55]. Artan toz kirlenmesi, ıslak öğütmenin olumsuz yanlarından biridir. MA/MÖ uygulamalarının çoğunluğu kuru olarak gerçekleştirilmiştir.

3.5 Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık, mekanik alaşımlama uygulamasında önemli bir faktördür. Mekanik alaşımlama sırasında tozlara etkiyen sıcaklık ara faz oluşumu, amorf yapı (cam) oluşumu, alaşımlama gibi uygulamalar üzerinde çok büyük etmendir. Bölgesel yüzey sıcaklıklarının yapışma olaylarına da ayrıca etkisi göz ardı edilemez. Mekanik alaşımlama esnasında oluşan

sıcaklıkla alakalı faaliyetler yapılmış ve değişik sonuçlar elde edilmiş. Kimi araştırmacılar 38°K, kimileri 300°K ve kimileri de 600°K olduğunu hesaplamışlardır. Mekanik alaşımlama uygulaması esnasındaki sıcaklık yükselmesi çarpışma esnasında kaynaklanırken oluşmaktadır.

3.6 Tozların Karakterizasyonu

MA/Ö uygulamasından sonra oluşturulan tozların yüzey alanları, ebatları, faz değerleri ve mikro yapısal özellikleri için karakterize edilmeli. İlaveten, tavlama uygulamasından ya da diğer uygulamalardan sonra mekanik olarak alaşımlanmış tozların, dönüşüm davranışı da karakterize edilmesi istenebilir. Kafes gerilmesinin ve tane boyutunun, mekanik alaşımlama yapılmış tozlarda ölçülmesi gayet önemlidir. Nedeni ise dönüşüm karakteristikleri ve faz bileşiği kritik olarak bu unsurlara bağlı olduğu görülür. Tozları karakterize etmek için, prensip açısından, uygulanan geleneksel yöntemler mekanik olarak alaşımlanmış tozları da karakterize etmek adına uygulanabilir.

Toz parçacıklarının şeklini ve boyutunu doğrudan ölçme tekniği olarak ya nispeten kaba tozlar için tarama elektron mikroskobu (SEM) ya da ince toz kullanılarak transmisyon (geçirme) elektron mikroskobu (TEM) ile belirleyebiliriz. Mikro yapısal özellikleri incelemek adına TEM'de mekanik alaşımlanmış tozlardan ince film numuneler hazırlamak için özel teknikler de geliştirilmiş [56]. Tozların şekli küreselse, boyutları parçacık çapıyla belirlenir. Mekanik olarak alaşımlanmış parçacıklar pek nadir harika bir küresel şekle sahip olduğu görülür. Toz, pul pul bir hale öğütmenin ilk aşamalarında (ve bazı durumlarda son aşamalarında da) bürünebilir. Eşdeğer küresel çap hacimden, yüzey alanında ya da yansıtılmış alandan ya da çökme hızı ölçümlerinden bu tarz hallerde belirlenir. Örnek olarak, ölçülen hacim V ise, eşdeğer küresel çap D_V ile gösterilir;

$$D_V = (6V / \pi)^{1/3}$$

Alternatif olarak, bir yüzey alanı S için ölçülen, eşdeğer küresel çap D_S basitçe;

$$D_S = (S / \pi)^{1/2}$$

formülü ile hesaplanır. Klasik olarak parçacık boyut dağılımı, eleme (elekleme, kalburlama) yöntemiyle yapılır. Sırasıyla toz karışımları gittikçe kalınlaşan ya da incelen eleklerle elenir ve bu elekler kare kesittedir. Genellikle bu elekler ızgara ölçüleriyle adlandırılır. Belirli birim uzunlukta olan tellerin sayısı ile belirlenir. Izgara boyutu ile açıklık ölçüsü ters orantılı olarak

değişir; küçük ızgara boyutları büyük açıklık ölçüsüne ve büyük ızgara boyutları da küçük açıklık ölçüsüne karşılık gelirler. Örnek olarak, tozlar eğer 325 ızgaradan geçer ise, 325 ızgara boyutuna sahip olduğu bilinir bu tozların ya da parçacık boyutu 45 µm'den küçük olur. Bu nedenle parçacık boyutlarını ölçüp ya da her bir parçacık boyutunun ağırlık yüzdesini hesaplayıp ağırlık yüzdesini ve parçacık boyutunu ilişkilendiren bir histogram oluşturulur.

Çoğunlukla mekanik alaşımlanmış tozlarda parçacık dağılımı olan Gaussian dağılımını belirtmek yararlıdır. Parçacık boyutunun logaritmasına karşın frekans doğrusal ölçekte çizilirse bir çan eğrisi meydana gelir.

Genellikle toz parçacıklarının topaklandığını hatırlamak önemli ve bundan dolayı doğru parçacık ebatlarının belirlenmesinde buna önem verilmelidir. Birkaç ferdi parçacıktan bir toz parçacığı meydana gelebilir. Tek bir parçacık ayrıca, yapışık kırınım bölgesi olarak tanımlanan birkaç tane barındırabilir. Normalde mikroskopik gözleme parçacık boyutunu verirken (ya da çözünürlük yeterli ise tane boyutunu verir) kırınım yöntemleri (yani, X ışınları) tane boyutunu sunar.

Tane boyutu ya da kafes gerilmesi toz parçacıklarındaki X ışını çıkıntı genişletme yöntemleriyle belirlenebilir. X ışın kırınım çıkıntıları a) küçük parçacık ebatından, b) enstrüman etkilerinden ve c) malzemedeki kafes gerilmesi nedeniyle genişletilir. Toplam genişletmeye bu etkilerin bireysel katkısı standart yöntemler kullanılarak ayrılabilir [57, 58]. Bu yöntemlerin sınırlamaları ve ayrıntıları için başvurulabilir. Genellikle, yarı maksimum yoğunlukta tane boyutu Bragg çıkıntı genişliği ölçülüp ve Scherrer formülü kullanılarak belirlenir. Scherrer formülü;

$$D = (0.9\lambda) / (B\cos\theta)$$

olarak gösterilir.

D tane boyutunu, λ kullanılan X ışını radyasyonunun dalga boyunu, B yarı maksimum yoğunlukta çıkıntı genişliğini ve θ da Bragg açısını göstermektedir. Bu teknik eğer gerilme genişlemesi ve enstrümantal için doğru düzeltmeler yapıldığında doğru değerlere yönlendirir. Bununla beraber, yalnızca tane boyut değişiminin ve öğütme şartlarının eğilimi izlenmek isteniyor ise, bu sade yöntem kabul olabilir.

Küçük tane boyutundan dolayı X ışını çıkıntı genişletme, $\cos\theta$ ile ters orantılıyken kafes gerilmesinden dolayı $\tan\theta$ ile doğru orantılı. Bundan dolayı, toplam genişleme için bu iki eşitliği birleştirerek bir eşitlik oluşturulur (enstrümantal genişletme çıkartıldıktan sonra);

$$B = (0.9\lambda) / (d \cos\theta) + \eta \tan\theta$$

burada η gerilmeyi gösterir ve düzenlemeden sonra, yukarıdaki eşitlik;

$$B \cos\theta = (0.9\lambda) / (d) + \eta \tan\theta$$

halini alır. Bundan dolayı, B ve $\theta \sin\theta$ 'ya karşı çizildiğinde eğimi η ve $0.9\lambda/d$ 'de keseni olan bir doğru çizgi meydana gelir. Buna göre, kafes gerilmesi η ve tane boyutu d hesaplanabilir.

Dolaylı olarak yapılmış X ışını çıkıntı genişletme çalışmalarıyla oluşturulan tane boyutları ve doğrudan elektron mikroskobu metotları ile her zaman birbirine tsm olarak uymayabilir. Hemen hemen elektron mikroskop metotları herhangi bir tane boyutunu ölçmede uygulansa da, 10-100 nm boyutlu taneler için X ışını çıkıntı genişletme yöntemleri en ideal olanıdır.

Mekanik alaşımlamanın ve mekanik öğütmenin değişik alaşım mekanizmalarında amorf fazlar meydana getirdiği bilinmektedir. Bir sıvıda olduğu gibi doğru amorf yapı, uzay kafesinde mikro tanemsi yapı ve simetrisiz, yani kaba tanemsi bir fazın rastgele yönelmiş toplanması arasındaki değişiklik kırınım çalışmalarına göre kolay olmamıştır. Bunun için literatürde önemli çelişkiler söz konusudur. Amorf bir yapının bir kırınım deneyinde, dağılmış radyasyonun fazı ölçülmez; yoğunluk ölçülür. Bu verilerin Fourier inversiyonu yalnızca atomik konumları eşsizce açıklayamayan yapının radyal dağılım fonksiyonunu sunar. Deneysel olarak belirlenmiş radyal dağılım fonksiyonu, yapıyı belirlemek için, dikkate alınmış yapısal modellerden hesaplanan radyal dağılım fonksiyonuyla karşılaştırılmalı [59].

Çoğunlukla X ışını kırınım şekillerinde geniş çıkıntıların varlığını gözlemleyerek bir amorf fazın meydana geldiği düşünülür. Bununla beraber, X ışını kırınım şekilleri sadece ortalama bir görünüm verdiği bilinmelidir. Bundan dolayı, sadece geniş X ışını çıkıntılarını inceleyerek, a) aşırı ince taneli, b) doğru amorf ya da c) amorf bir matris içerisine çok küçük kristallerin gömülü olduğu bir malzeme gibi malzemeler arasından hangisi olduğunu ayırt etmek çok zordur. Son zamanlarda bundan dolayı, "X ışını amorf" tanımlamasının yalnızca X ışını kırınımı teknikleriyle yapıldığını işaret eden çalışmaları kabul etmek yapılan işlemdir. Yalnızca X ışını kırınımı araştırmalarına göre elde edilen bir fazın "amorf" olarak gözlemlenmesinin farklı örnekleri mevcuttur; lakin geçirme elektron ve nötron kırınımı mikroskobu ile ek çalışmalara bağlı olarak, elde edilen fazın doğru amorf olmadığı şüpheye meyil vermeden ispatlanmıştır [60]. Ağır atomların bulunduğu, nötron kırınım yöntemlerinin yararı, hafif olan atomların seçilebilmesi. Buna ilaveten, nötron kırınım

yöntemi periyodik cetvelde birbirine komşu elementler arasında seçilebilme yeteneğine sahip [60]. X ışınımı kırınımı metotları buna uygun değildir. Nedeni, komşu elementler birbirine çok yakın atomik dağılma unsurlarına sahip ve bundandır ki, farkları makul oranda dağılmayı anlamak için çok küçük olur. X ışını kırınımı çalışmalarının bundan dolayı diğer yöntemlerle doğrulanması gerekir. Örnek olarak, geçirme elektron mikroskobu araştırmaları kontrast eksikliğini tam bir amorf fazın fotoğraflarında kanıtlayabilir. Diferansiyel termal analiz (DTA) araştırmaları sırasında cam geçiş sıcaklığının görüntüsü bir amorf fazın varlığının açık ve net ispatıdır. Ama bir cam geçişi kristalleşme başlangıcıyla engel olunabilir (çünkü kristalleşme sıcaklığı ve cam geçişi birçok metalik sistemlerde birbirine çok yakın) ve bundan dolayı genellikle görülemeyebilir. Bununla beraber, DTA uygulamaları amorf fazın kristalleştiğini ispatlayan numuneyi ısıtmadan sonra bir ekzotermik çıkıntının olduğunu kanıtlayabilir. Şayet malzeme fazla ince taneliyse (nanokristalli, amorf olmayan), yalnızca bu alaşımlarda tane büyümesi, tane sınırı serbest enerjisindeki düşüşle, bu tanelerin yüksek sıcaklıklara çıkarılması ile gerçekleştirilebilir. Tarama çıkıntıları, tane büyümesinin diğer göstergeleri arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda geniş ve düşük olup; ayrıyeten, bu çıkıntılar ön tavlama sonrası yüksek sıcaklıklara tekrar çıkarılır [61]. Bundan dolayı termal analiz, kırınım gibi yöntemlerin bir kombinasyonu uygulanarak mekanik alaşımlama metodu ile imal edilen numunelerin küçük taneli ve amorf olduğu ayırt edilir.

4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

4.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

İki ya da daha fazla malzemenin, farklı malzeme özelliklerinden yeni bir malzeme elde etmek veya tek bir malzemede buluşturmak adına yapılan malzemelerdir. Kompozit malzemeler esasında takviye elamandan ve matriks denilen ana yapıdan meydana gelir. Aşağıdaki maddeler, kompozit malzeme elde etmede, geliştirilmek amacıyla olanlardır [65].

- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Estetik
- Ağırlık azalması
- Kırılma tokluğu
- Yorulma dayanımı
- Yüksek sıcaklıktaki özellikler
- Korozyon dayanımı
- Mekanik dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Rijitlik
- Akustik özellik

4.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Metal malzemelere göre kompozit malzemeler daha gözdendir. Özgül ağırlıklarının düşük olması kompozit malzemelerin hafif konstrüksiyon uygulamalarında büyük bir avantaj getirmektedir. Kompozit malzemeler, otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi dalında bu özellikleri ile çözüm getirecek bir malzeme çeşididir.

Kompozit malzemelerin olumlu yanlarını şu şekilde söyleyebiliriz;

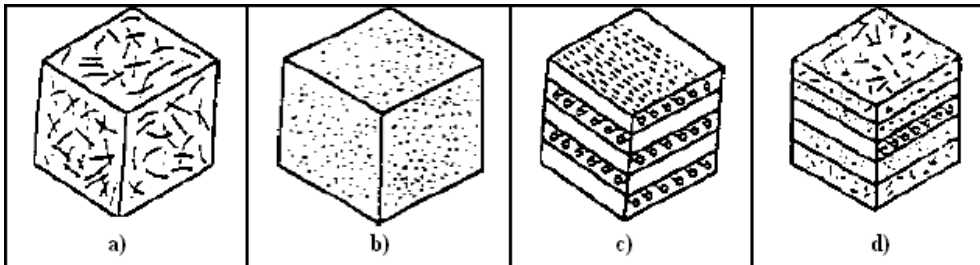
Kompozit malzemelerin büyük ve kompleks parçaların tek uygulamayla bir parça halinde kaplanabilmesi, eğilme ve çekme mukavemetinin birçok metalik malzemeye göre daha fazla olması, kompozit malzemelerin kimyevi madde tankları, aspiratör ve borular, tekne ve diğer deniz araçları imalatında güvenle kullanılabilmesi, büyük enerji nakil hatlarında kompozitlerin iyi bir iletken ve yeri geldiğinde de başka bir yapıda iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilmesi, kalıplama sırasında reçineye eklenen pigmentler sayesinde kompozitlerin istenen renkte oluşturulabilmesi, kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği sayesinde yüksek ısı altında kullanılabilmesi, kompozit malzemelerde süneklik sebebiyle doğal bir titreşim sönümlenme ve şok yutabilme özelliğinin olmasıdır [66].

Kompozit malzemelerin olumsuz taraflarını da şöyle söyleyebiliriz;

Kompozit malzemelerin farklı koşullarda farklı mekanik özellikler göstermesi, kompozit malzemelerdeki hava zerreciklerinin malzemenin yorulma özelliklerini negatif yönde etkilemesi, kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü gibi işlemlerin liflerde açılmaya neden olmasından dolayı bu tür malzemelerde hassas üretim yapılamaması, aynı kompozit malzeme için basma çekme, eğilme ve çekme mukavemet değerlerinin değişiklik göstermesi, malzemelerde sınırlı raf ömrü, hammaddenin yüksek maliyeti ve malzemenin standartlaştırılmayan kalitesi, onarımlarda problemler çıkması, bazı tür kompozit malzemelerin soğutularak saklanması gerektiği [66].

4.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapıdaki malzemelerin formuna göre kompozit malzemelerde bir sınıflama yapmak olarak dahilindedir. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Şekil 4.1. a, b, c, d) olarak sunulmuştur.



Şekil 4.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [67]

Kompozit malzemelerin sınıflandırılması şöyledir [67]:

- a) Elyafli kompozitler
- b) Parçacıklı kompozitler
- c) Tabakalı kompozitler
- d) Karma kompozitler

4.3.1 Elyafli kompozitler

Matris yapıda, ince elyafların bulunmasıyla elyafli kompozitler oluşturulmuştur. Birbirlerine paralel şekilde uzun elyafların matris içerisinde yerleştirilmeleriyle elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet elde edilirken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet görülür. Elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara aktarılan yük miktarı da yükselmektedir. Elyaf matris arasındaki bağın yapısı, kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir faktördür. Fiberler, sade bir şekilde bir boyutu diğer boyutuna nazaran çok büyük olan malzeme olarak açıklanabilir [65]. Fiber çeşitlerini sayacak olursak;

- Karbon fiberler
- Yapay organik fiberler
- Cam fiberler
- Bor fiberler

4.3.2 Parçacıklı kompozitler

Başka bir malzemenin bir matris malzeme içerisinde parçacıklar halinde olmasıyla üretilir. Parçacıklı kompozitlerin yapıları izotropdur. Parçacıkların sertliğine bağlıdır, mukavemetleri. Plastik malzeme içerisinde bulunan metal parçacıkları, en genel olandır.

4.3.3 Tabakalı kompozitler

Yüksek mukavemet değerlerine, değişik elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimiyle sağlanır. Yapıları neme ve ısıya dayanıklıdır. Metallere göre tercih edilme sebepleri, hafif olduğu gibi mukavemetli de olmalarıdır.

4.3.4 Karma (hibrit) kompozitler

İki veya daha fazla kompozit yapının bulunması, aynı kompozit yapıda mümkün olan kompozit çeşididir. Yeni türdeki kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir daldır.

4.4 Kompozit Malzemelerin Kullanımı

Genellikle keçe, cam elyafı, cam ve cam dokuma ile polyester reçineden yapılan farklı ürünler ticari ve günlük yaşamda kullanılmaktadır. Cam elyaf oranı %30 ile %40 arasındadır. Sandalye, masa, küvet, depo, tekne, bot ve otomotiv sanayi bu kompozitlerin kullanılan yerlere örnektir. Ayrıca elektrik fiberleri, baskılı devre plakaları, spor malzemeleri, araç şarjları, atlama sııkları, kaynak takımları, tenis racketleri, yarış kanoları farklı kompozit malzemelerden elde edilen ürünlerdir.

Kompozit malzemelerin kullanımı, havacılık ve uzay sektöründe ilk başlarda hafif ve sağlam olmasındandır. Buradaki hedef harcanan yakıtı azaltmak, daha yüksek hızlara çıkmak ve verimliliği arttırmaktır. Bu kullanım durumunda yalnızca maddi kazanç hedeflenmeyip stratejik performanslar da önemli olmuştur. Havacılık ve uzay sektöründe, özellikle titreşim, ısı ve yorulma dayanımı gibi özellikler birleşik malzemelerin başta sağladığı yararlarıdır.

Önemli özellikleri dolayısıyla kompozit malzemeler, hava ve uzay araçlarında gün geçtikçe daha da fazla kullanımı artmaktadır. Kompozit malzeme kullanımının fazlalaştığını, şuan bir av bombardıman uçağında kompozit malzeme kullanımı toplam uçak ağırlığının yarısına ulaşmış olduğundan anlayabiliriz. Böylelikle bor karbür, silisyum karbür, alümina karbon, cam elyafı gibi farklı reçine türleriyle birbirinden farklı kompozit malzeme üretiminde uygulanmaktadır.

Silah üretiminde kompozit malzemelerin uygulanması pek yaygın olmamakla birlikte 3000 bara kadar dayanabilen 60 ve 81 mm gibi küçük çapta havanlar için bazı araştırmalar yapılmıştır. Piyadenin savaş performansını, bu silahların hafif olmasından dolayı artırıcı özelliktedir.

Kompozit malzemelerin rolü roket imalatında oldukça önemlidir. Örnek verecek olursak, M72'de motor lançeri epoksi ve cam elyafından, Apilasta ve diğer tanksavar roketlerde gövde kısmen kevlar ve epoksiden, M77 MLRS de lüle (nozzle) karbon kompozitten imal edilmektedir.

Kompozit malzemeler mühimmat imalatında da yer yer kullanılmaktadır. M19 A/T mayınının gövdesi ABS reçine ve cam elyaf parçacıklarından, küçük ve büyük belleville yayları ise cam doku ve fenolik reçineden yapılmıştır. 155mm'lik ICM mühimmatının gövdeleri, cam elyafi epoksi sargı kullanılmıştır. Miğfer imalatında ise kevlar ve değişik reçineler uygulanmıştır.

Günümüzde kurşun geçirmez yeleklerde bitişli kevlardan, balistik testler için zırh levhaları cam ve fenolik reçinelerden elde edilmektedir. Tasarım alternatifleri ortaya çıkarıldıkça gün geçtikçe artacak ve birçok sağladığı avantajlarla insanlığın hizmetine girecektir [67].

4.5 Kompozit Malzemelerin Üretimi

Kompozit malzemeleri elde etmek için aşağıdaki maddeler uygulanmalıdır [68].

- Yüksek dayanımlı elyaflar mekanik durumlara karşı hassas olduğu için elyafların kırılmasına engel olunması,
- Sağlam bir ara yüzey bağının matris ve elyaf arasında oluşması gibi,
- Elyaflarda homojen ve eşit bir dağılım oluşması.

Matrise, elyafa, parça şekline ve arzu edilen fiziksel ve mekanik özelliklere göre üretim yöntemi belirlenir.

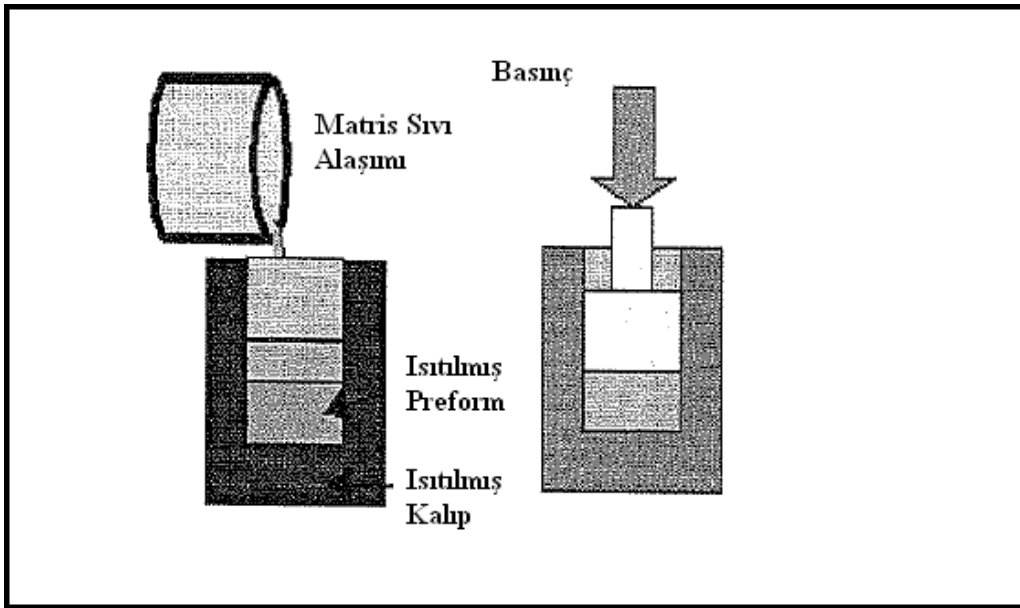
Metal matrisli kompozit malzemelerin elde etme yöntemleri şöyledir [68].

4.5.1 Sıvı metal emdirmesi

Sıvı metal emdirmesinde ana prensip, ilk başta arzu edilen şekilde uygun bağlayıcı kullanılarak master hazır hale getirilir. Kompozitte tasarlanan elyaf hacim içeriği ve doğrultuları bu safhada gerçekleştirilir. Hazırlanmış olunan model kalıp içerisine yerleştirilir. Ergimiş metal buraya enjekte edilip masterın ıslatılması, sıvı metal emdirilerek yapılır. Bu esnada organik bağlar yanar ve katılaşması için beklenir.

4.5.2 Sıkıştırılmalı veya sıvı dökme döküm tekniği

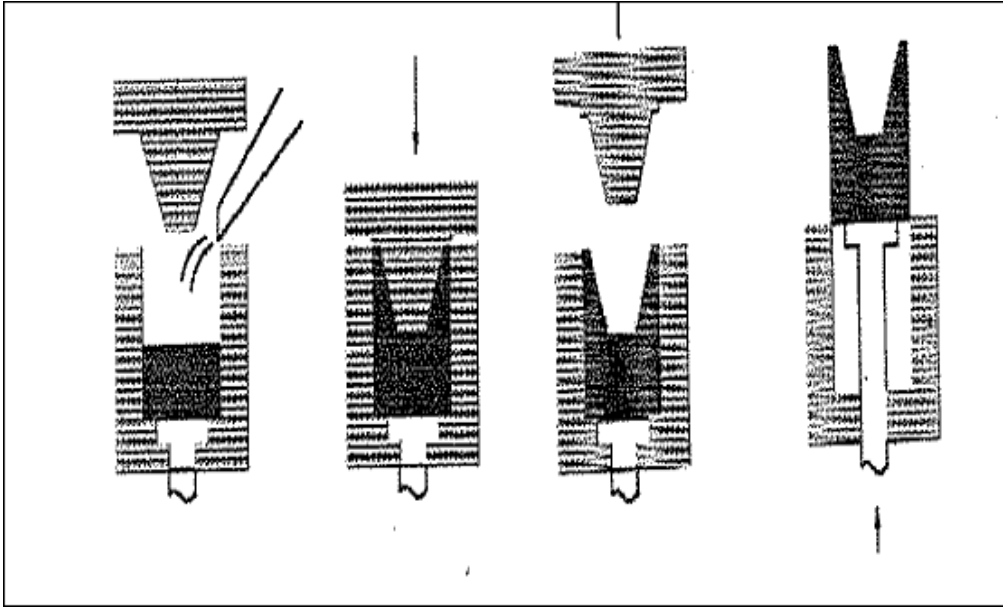
Şekil 4.2.'de görüldüğü üzere bu yöntemde takviyeden oluşturulmuş preform ya da yatağa sıvı alaşım, hidrolik basınç altında emdirilmekte. Preform, kalıp ve zımba ön ısıtmaya tabi tutularak sıvıyı soğutma etkisinden uzaklaştırılır.



Şekil 4.2. Sıkıştırma döküm yöntemi [68]

Şekil 4.3.'te sıvı dövme ile metal emdirme yönteminin aşamaları ve şematik resmi sunulmuştur. Bu yöntemde, daha önceden ısıtılmış olan seramik elyafların sıvı metal içerisine ya da metal kalıp içerisine uygun bağlayıcılar ile yerleştirilen master elyafların basınç altında

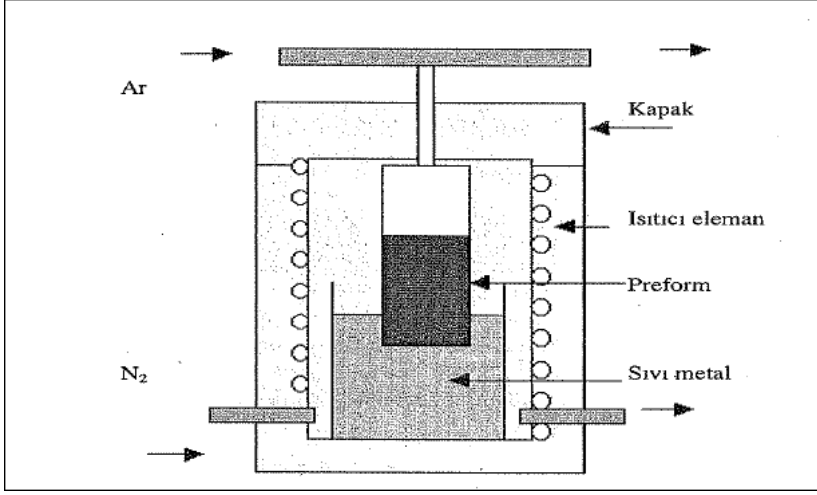
sıvı metalle emdirilip katılaşması kısa zamanda gerçekleşmekte. Bu safhalar, şekilde gösterilen sırasına göre boşaltma, dökme, sıkıştırma ve çıkartma olarak sıralayabiliriz.



Şekil 4.3. Düşey makine ile sıkıştırılmalı veya sıvı dökme döküm işleminin basamakları [68]

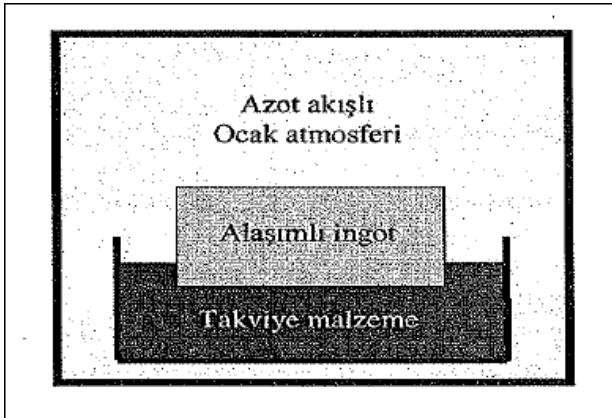
4.5.3 Basıncılı ve basınçsız infiltrasyon

Bir ucu basınç ünitesi içerisine yerleştirilmiş pota içindeki sıvı metale daldırılmış bir sistem Şekil 4.4.'te gösterilmiş. Diğer ucu ise normal atmosfer ya da vakuma bağlanmış ve içerisinde takviye malzeme olan bir silindirden oluşmaktadır. Geçiş önleyecek biçimde silindir içine, takviye yerleştirilir. Bu parçacıklar silindir içindeki sıvı metale daldırılır ya da başka bir yerde ön ısıtma uygulanır.



Şekil 4.4. Basıncılı infiltrasyon metodu [68]

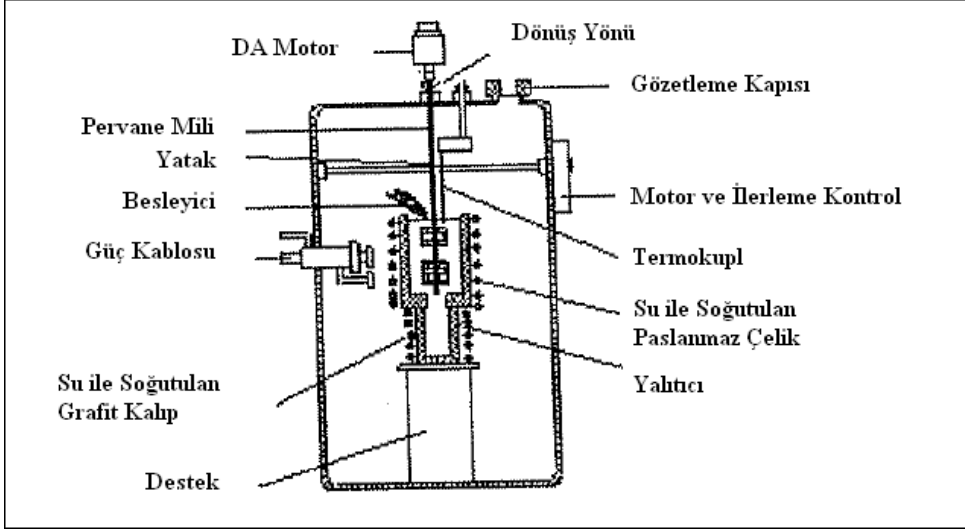
Şekil 4.5.'te gösterildiği üzere, basınçsız infiltrasyon metodunda; takviye parçacık içerisine sıvı metalin kendi kendine infiltrasyonunu gerçekleştiren bu teknikte paketlenmiş olan seramik toz yatak, azot atmosferinde basınç uygulamadan Al-Mg alaşımının infiltrasyonu gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.5. Basınçsız infiltrasyon metodu [68]

4.5.4 Sıvı metal karıştırması

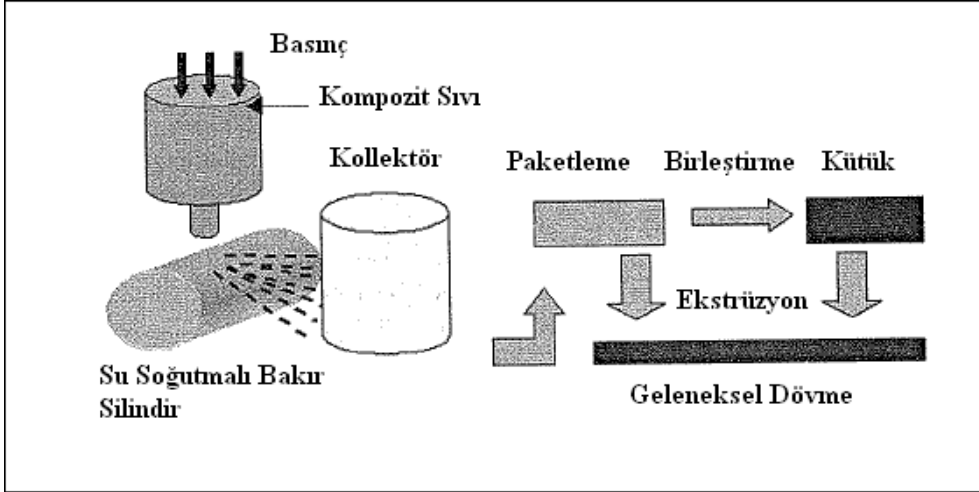
Karıştırma, kalıplama, sıkıştırma ve kurutma saflarından oluşan yöntemdir.



Şekil 4.6. Ergimiş metal karıştırılması yöntemiyle kompozit üretim ünitesi

4.5.5 Hızlı katılaştırma yöntemi

Şekil 4.7.'de gösterildiği üzere, basınç altında su ile soğutulan bakır disk üzerine sıvı jeli halinde verilerek (40-60) μm kalınlığında, (6-8) μm uzunluğunda, (0,5-0,7) μm genişliğinde lamelimsi tozlar meydana getirilir. Farklı ikincil işlemler uygulanması bunların bir araya getirilmesiyle yapılır.



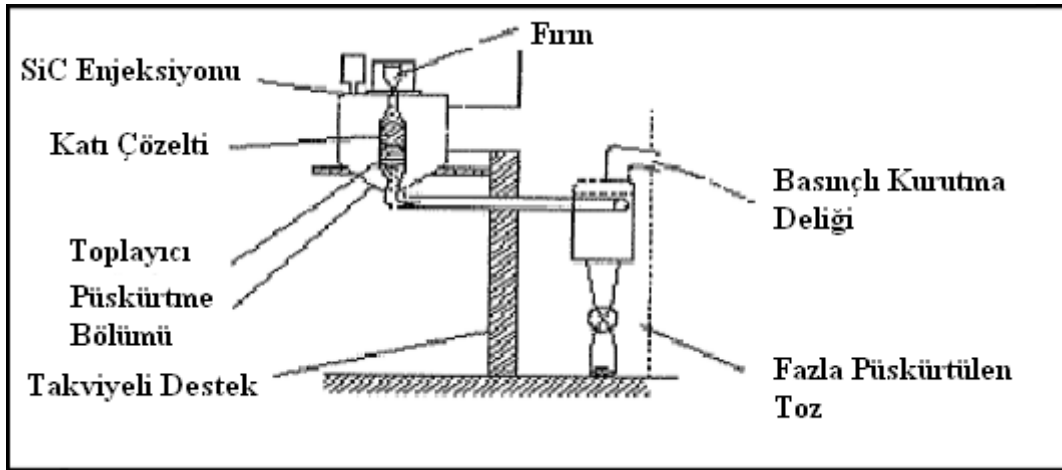
Şekil 4.7. Hızlı katılma prosesi ile kompozit üretim yöntemi [68]

4.5.6 Yarı katı karıştırma

Katıyla sıvı arasındaki sıcaklığa sahip yarı katıyı karıştırarak uygulanan takviye ekleme yöntemidir, yarı katı karıştırma tekniği.

4.5.7 Plazma püskürtme

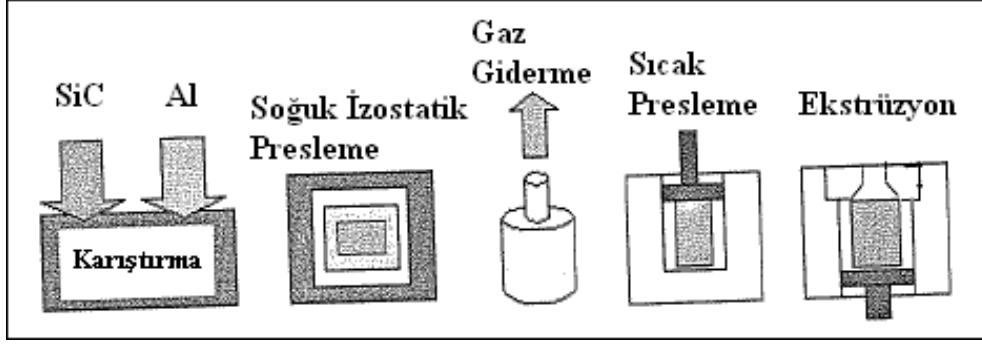
Bu yöntemde püskürtülecek olan alaşım, indüksiyon fırınında ergitilir ve ardından potaya basınç uygulaması yapılır. Ergimiş alaşım püskürtülürken Şekil 4.8.'de gösterildiği üzere, aynı zamanda parçacıklı elyaflar atomize edilmiş sıvı içerisine enjekte edilip, önceden ısıtılmış olan alt katman üzerine çökeltir ve toplayıcı üzerinde katı bir çökelti meydana gelir. Kaplanmış çökelmiş çubuk haddelenmesi için soğuma işleminden sonra göbekten çıkarılır.



Şekil 4.8. Plazma püskürtme aygıtının şematik görünümü

4.5.8 Toz metalurjisi tekniği

Toz metalurjisi tekniğinde, toz durumundaki seramik ve metal malzemeleri birleştirebiliriz. Tozlar istenilen şekli oluşturmak adına tasarlanan hacim oranlarında karıştırılıp kalıp içerisine konulup presleme işlemi yapılır. Pres uygulaması sıcak veya soğuk şekilde yapılabilen bir tekniktir. Şekil 4.9.'da toz metalurjisinin ana safhaları verilmiştir [68].



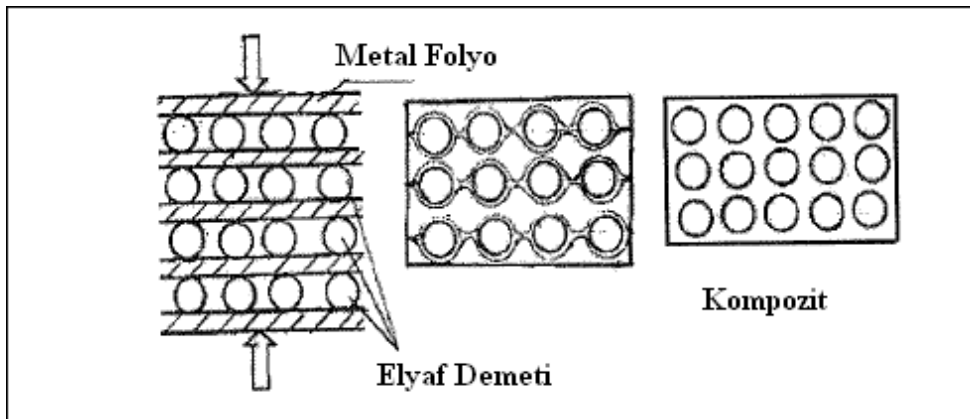
Şekil 4.9. Toz metalurji yönteminin temel aşamaları

4.5.9 Difüzyon bağlama ve vakumda presleme

Yüksek sıcaklık ve basınçta uygulanan bir birleştirme yöntemidir. Alüminyum oksit, boron, silisyum karbür, karbon gibi tek filamentli elyaf veya elyaf demetleriyle titanyum ve alüminyum gibi matris malzemeleri, tabakalar şeklinde kullanarak takviyeli kompozit malzemeler elde edilir.

4.5.10 Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme

Mg, Ti ve Al gibi metal matrisli kompozit panelleri bu yöntemle elde edilir. Şekil 4.10.'da görüldüğü üzere Filamentler metal matristen meydana gelen ince folyo tabakalar arasına yerleştirilir ve kompoziti yerinde tutmak adına bir bağlayıcıyla üzerine spreylenir ve ardından bağlayıcının ayrılması yakılarak gerçekleşir [68].



Şekil 4.10. Folyo matris ile filamentlerin kesit görünümü [68]

5. AŞINMA

Malzemenin mekanik etkilere maruz kalarak, temas eden yüzeylerden dolayı yaşanan kayıp aşınma olarak tanımlanır. Başka bir şekilde açıklayacak olursak kullandığımız malzemelerin başka malzemeler ile katı, sıvı veya gaz teması sonucunda mekanik etkenlerden dolayı malzeme yüzeyinden küçük parçacıkların ayrılmasıyla oluşan ve istenmeyen yüzey bozulması diye de açıklanabilir.

Birbiriyle temas eden yüzeylerde sürtünme kuvvetlerinin açığa çıkmasıyla güç kaybının yaşanmasına, aşınma da işleme toleranslarının olumsuz bir hale gelmesinden dolayı aşınma çok önemli bir unsurdur [69]. Bir aşınma mekanizmasında;

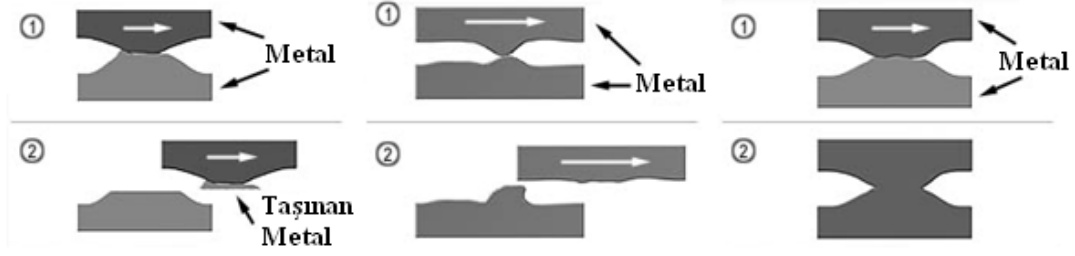
- a) Hareket
- b) Yük
- c) Ara malzeme
- d) Karşı malzeme (aşındıran)
- e) Ana malzeme (aşınan)

aşınmanın ana faktörleridir.

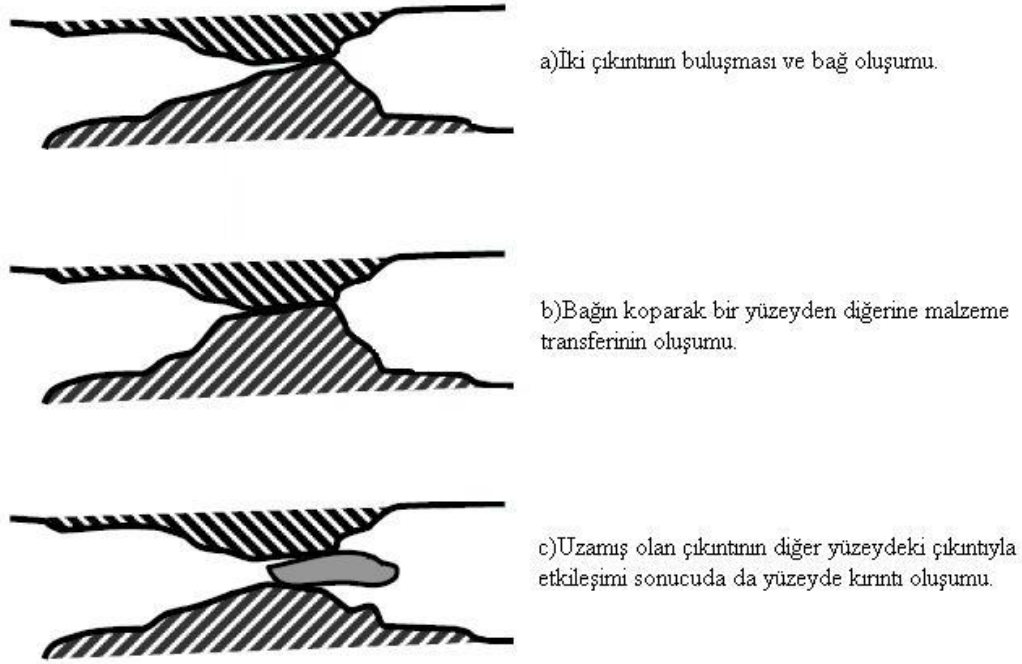
5.1 Aşınma Mekanizmaları

5.1.1 Adhezif aşınma (yapışma aşınması)

Adhezif aşınma yapışma aşınması olarak da bilinip, en yaygın olan aşınma türü olmasına rağmen, çoğunlukla hasarları hızlandırıcı etki yapmaz. Karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre göreceli olarak hareket halinde olan, iki yüzeyin birisinden bir parçacığın ayrılarak karşı yüzeye yapışması neticesinde, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme aktarımı olarak adhezif aşınma en genel halinde açıklanabilir [69].



Şekil 5.1. Adhezif aşınma örnekleri



Şekil 5.2. Adhezif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi

Adhezif aşınmayı önleme çeşitleri olarak:

1. Yağlama: Özenli bir yağlama işlemi uygulanarak sürtünmeyi azaltıp, ısıyı indirgeyebiliriz. Mikro kaynak alanları netice olarak önlenmiş olur.

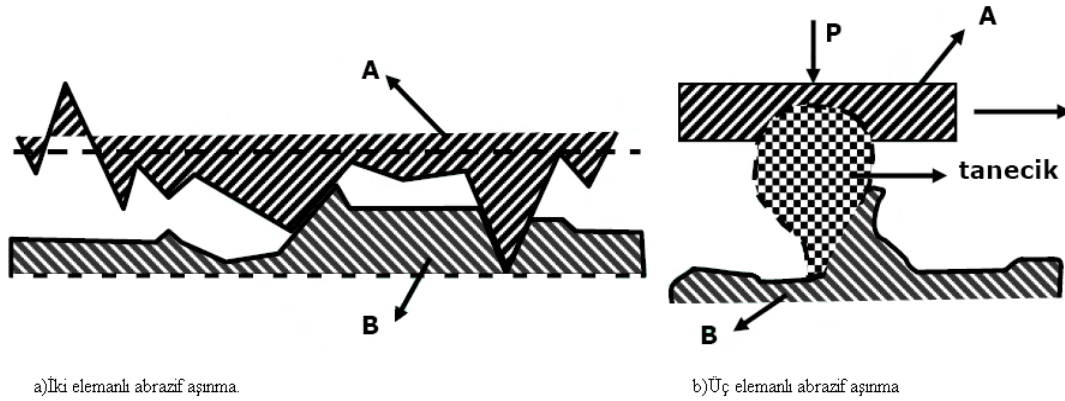
2. Birbirleri içerisinde çözünmeyen metaller kullanmak: Pratikte kullanımı sınırlı olmakla birlikte mikro kaynaklanmayı, birbiri içerisinde çözünmeyen metaller kullanarak engel olunabilir.

3. Düz yüzeyler kullanmak: Temas eden yüzeylerde çıkıntı gibi yüzey bozuklukları yok ise aşınma oluşmaz.

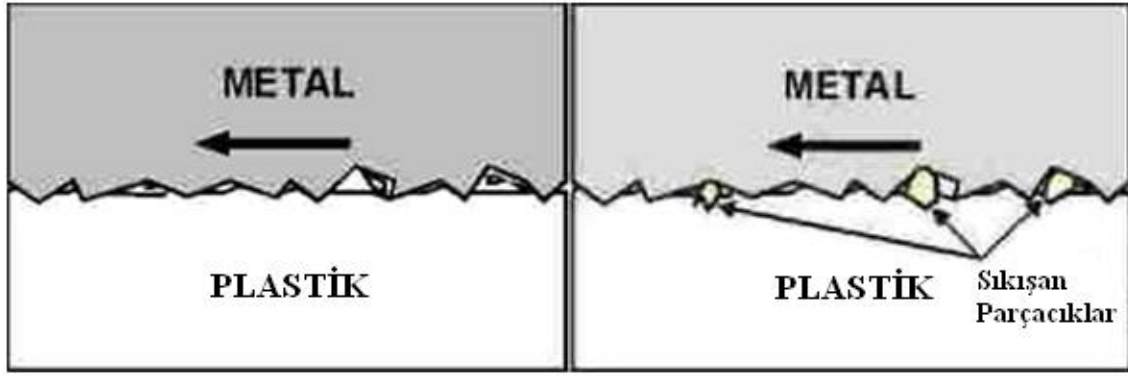
4. Metal-metal temasını önlemek: Fosfat kaplama gibi kimyasal filmler oluşturarak bu durumdan kaynaklanan aşınma önlenir.

5.1.2 Abrazif aşınma

Çizilme ya da yırtılma aşınması diye isimlendirilir. Malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküller ile basınç altında etkileşip sert partikülün malzeme yüzeyinden parça koparmasını abrazif aşınma olarak genel anlamda açıklayabiliriz. İki ve üç elemanlı olarak iki kısma ayrılır [69].



Şekil 5.3. İki elemanlı ve üç elemanlı abrazif aşınma



Şekil 5.4. Abrazif aşınma örneği

Abrazif aşınmayı önleme çeşitleri olarak:

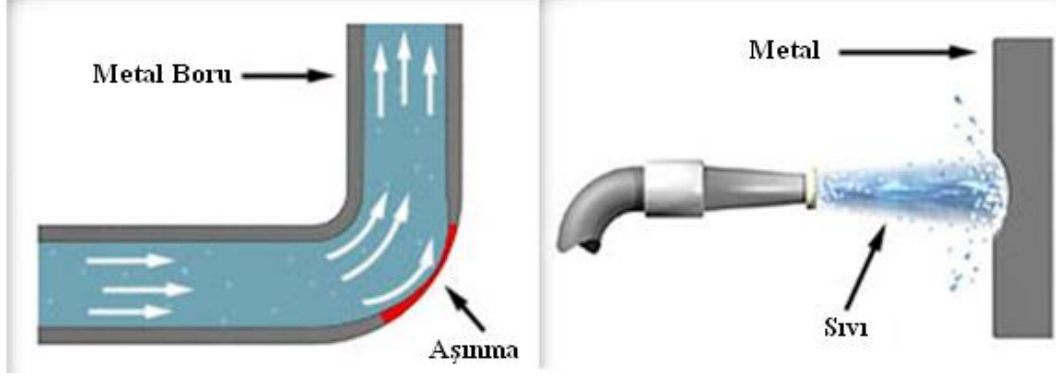
- 1. Yüzey sertliğini arttırmak:** Abrazif aşınmasının önlenmesinde en etkili yol olmakla birlikte malzemenin gevrekleşmesi dolayısıyla kırılma olasılığı yükselecektir.
- 2. Abrazif parçacıkları uzaklaştırmak:** Sert partikülleri mekanizmadan uzaklaştırılmasıyla abrazif aşınmanın önüne geçilir. Kullanılan su, hava ve yağlardaki partiküllerin filtre işlemiyle mekanizmadan uzaklaştırılması sağlanır.
- 3. Aşınmış parçaları değiştirmek:** Tasarımda, üzerinde abrazif aşınma meydana gelebilecek olan parçalarının değiştirilme olanağı sunan çalışmalarla abrazif aşınmanın önüne geçilir.

5.1.3 Yorulma aşınması

Plastik deformasyon ve dislokasyona bağlı olarak, değişken tekrarlı yüklemeler neticesinde maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu bölgelerde çok küçük boşluklar oluşur. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerleyip, büyür ve yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına neden olur. Bu durum yorulma aşınması olarak tanımlanabilir. Rulmanlı yataklarda, dişli çarklarda ve yuvarlanma hareketi yapan sistemlerin yüzeylerinde bu aşınmaya rastlanır.

5.1.4 Eroziyon aşınma

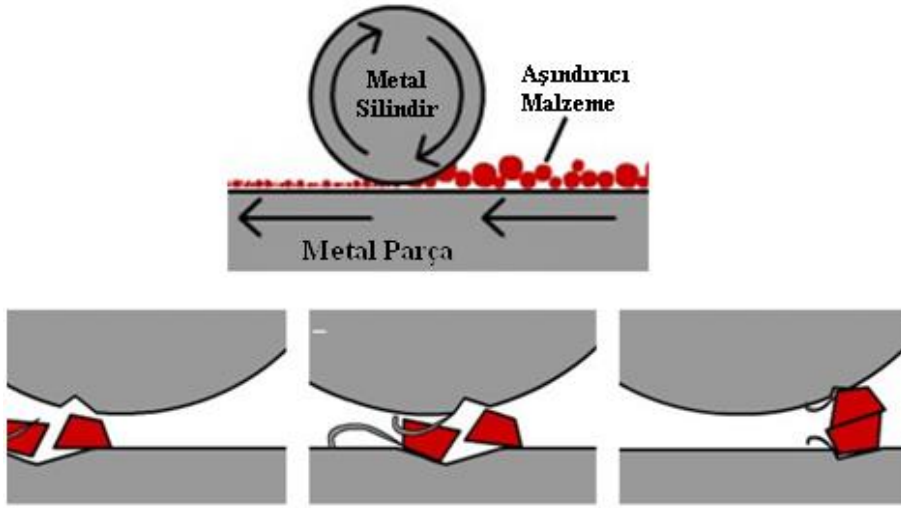
Bir sıvı ya da taşıyıcı içindeki sert partiküllerin malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda kayması ve yuvarlanması sırasında çok sayıda parça koparması neticesinde oluşur. Daha sık olarak pervanelerde, nozullarda, pompalarda, fanlarda, tüp ve boru dirseklerinde eroziyon aşınmaya rastlanır [69].



Şekil 5.5. Eroziyon aşınma örnekleri

5.1.5 Ögütme aşınma

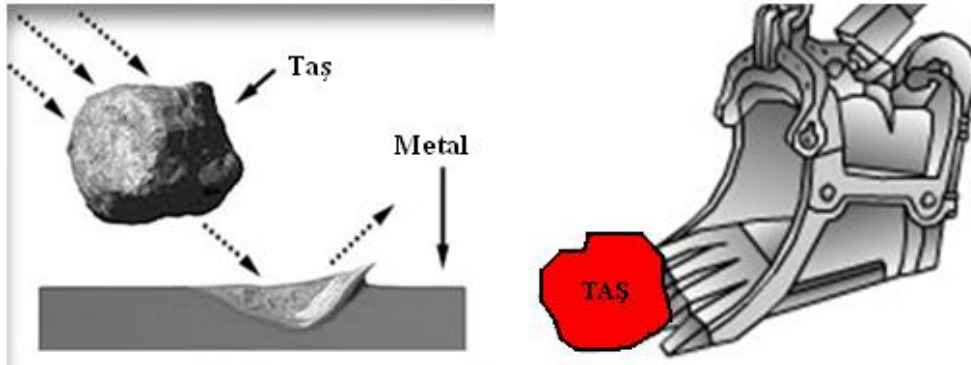
Ögütme aşınma, yüksek basınç altındaki partiküllerin metal yüzeyiyle düşük hızlarda karşılaşmalarıyla metal yüzeyinden parçacıkların kesilip birçok ufak çizikler açılarak kopartılması neticesinde oluşur. Daha fazla olarak buldozer ve kepçe kesici uç yüzeylerinde aşınma sonucundaki korozyon meydana gelir. Ayrıca bilyalı değirmenlerde de rastlanır.



Şekil 5.6. Öğütmeli aşınma örneği

5.1.6 Oymalı aşınma

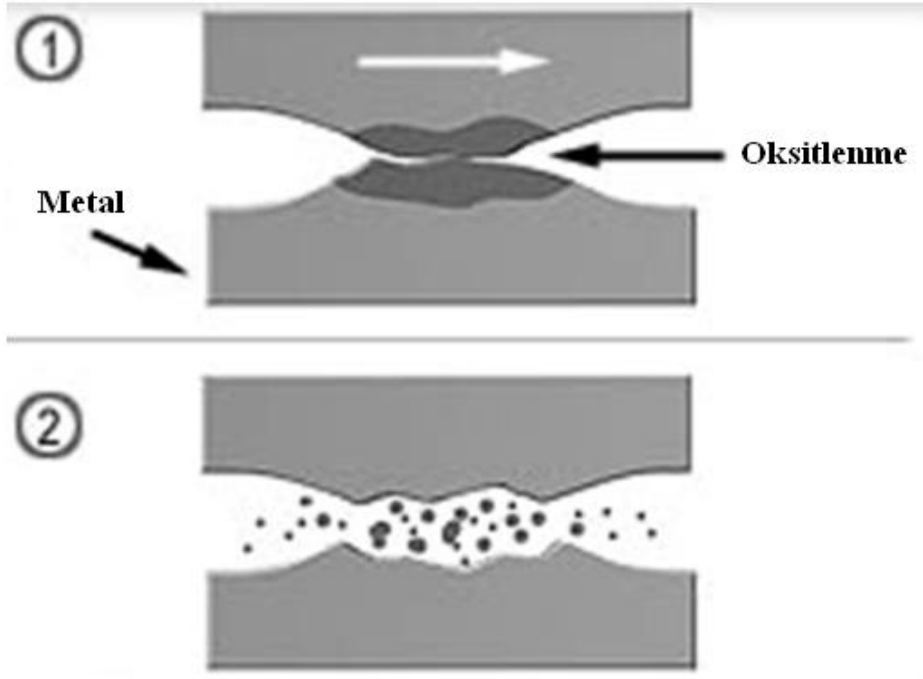
Oymalı aşınma türü, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma hallerinde yüzeyden bir parçanın kesilip ya da oyulup kopması neticesinde oluşur. Sıklıkla hafriyat, madencilik ve petrol kuyularını delme işlemi yapan mekanizmalarda rastlanır [69].



Şekil 5.7. Oymalı aşınma örnekleri

5.1.7 Kazınmalı aşınma

Mikro kaynaşmanın olduğu adhezif aşınma ile benzerlik gösterir. Adhezif aşınma birbiri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken kazınmalı aşınmada ise birbirine göre hareket etmeyen yüzeylerde olması bunların farkıdır. Titreşimli mekanizmalarda çalışan



Şekil 5.9. Korozif aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Üretilen numunelerde matris olarak Fe ve Cu tozları, takviye elamanı olarak da B₄C ve FeTi tozları kullanılmıştır. Malzemeler önce çeneli kırıcıda toz haline getirildikten sonra değirmende öğütülüp ardından elekler yardımı ile elenerek daha ince boyutlara getirilmiştir. Tablo 6.1.'de kullanılan FeTi tozunun kimyasal kompozisyonu, Tablo 6.2.'de ise elde edilen numunelerin kimyasal kompozisyonu ağırlıkça % olarak verilmiştir. Daha sonra elde edilen tozlar mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Mekanik alaşımlama işlemi için Spex tipi yüksek enerjili öğütücü kullanıldı. Öğütücüde bilye çapı 10 mm, bilye/toz oranı ise 10/1 olarak seçildi.

Tablo 6.1. Kullanılan FeTi tozunun kimyasal kompozisyonu

Ti	C	Al	Si	S
%70.35	%0.11	%3.86	%0.05	%0.008

Tablo 6.2. Kullanılan numunelerin kimyasal kompozisyonu

Numune No	Takviye				Matris	
	Oran (ağ. %)	Konsantrasyon			%Fe (ağ. %)	%Cu (ağ. %)
		B ₄ C (ağ. %)	Fe Ti (ağ. %)	Fe (ağ. %)		
N1.1	1	90	0	10	98	1
N1.2	5	90	0	10	94	1
N1.3	10	90	0	10	89	1
N1.4	15	90	0	10	84	1
N1.5	5	90	0	10	93	2
N1.6	5	90	0	10	92	3
N2.1	1	80	10	10	98	1
N2.2	5	80	10	10	94	1

N2.3	10	80	10	10	89	1
N2.4	15	80	10	10	84	1
N2.5	5	80	10	10	93	2
N2.6	5	80	10	10	92	3
N3.1	1	60	30	10	98	1
N3.2	5	60	30	10	94	1
N3.3	10	60	30	10	89	1
N3.4	15	60	30	10	84	1
N3.5	5	60	30	10	93	2
N3.6	5	60	30	10	92	3
N4.1	1	40	50	10	98	1
N4.2	5	40	50	10	94	1
N4.3	10	40	50	10	89	1
N4.4	15	40	50	10	84	1
N4.5	5	40	50	10	93	2
N4.6	5	40	50	10	92	3
N5.1	1	20	70	10	98	1
N5.2	5	20	70	10	94	1
N5.3	10	20	70	10	89	1
N5.4	15	20	70	10	84	1
N5.5	5	20	70	10	93	2
N5.6	5	20	70	10	92	3

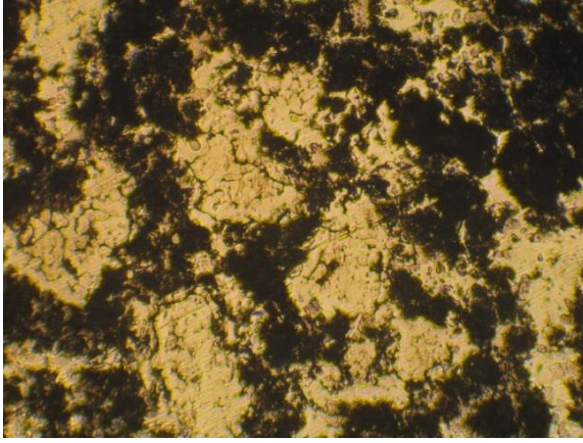
Mekanik alaşımlama işleminde takviye oranı ağırlıkça %1 ile %15 arasında belirlenmiştir. Mekanik alaşımlama işleminden sonra elde edilen karışıma yağlayıcı amaçlı olarak %1 miktarında çinko stearat katılarak soğuk pres uygulanmıştır. Numuneler sıkıştırma işleminin ardından fırında sinterlenmiştir. Sinter sıcaklığı 1100°C, sinter süresi ise 2 saat olarak belirlenmiş olup daha sonra da 1 saat fırın içerisinde soğutulmaya bırakılmıştır.

Numuneler mikroyapı görüntüleri için zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından eşit miktarlarda nitrik asit, asetik asit ve aseton karışımından oluşan nitrik asetik asit çözeltisi ile dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Dağlanmış olan yüzeylerin optik mikroskopta

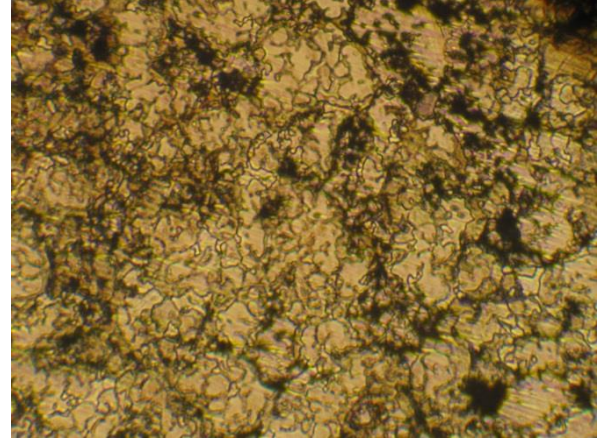
fotoğrafları çekilmiştir. Son olarak Shimadzu marka mikrosertlik cihazı ile 5 gr yük altında numunelerin yüzeyindeki mikrosertlik değişimi belirlenmiştir.

6.1 Sonuçlar

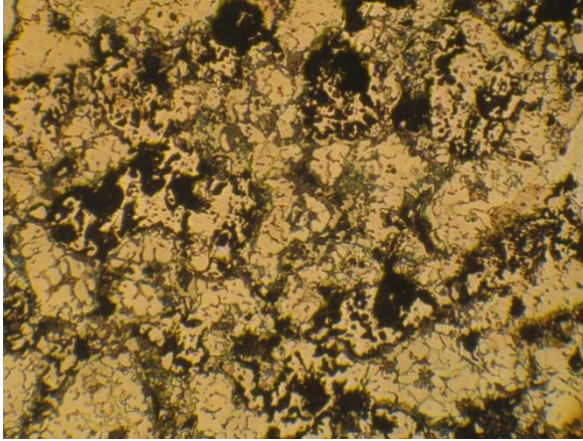
N2 grup numunelerde takviye oranı %5 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Yapıdaki takviyenin tipi olarak B₄C ile FeTi ve Fe oranları birinci grupta Tablo 6.2.'de görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Bu grupta B₄C oranı %80 olarak alınmıştır. Yapının görüntüleri Şekil 6.1.'de verilmiştir. Bu görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %15 olduğunda boşluk miktarı %30 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %5 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %15 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 10-15 µ olarak değişmiştir.



(a)

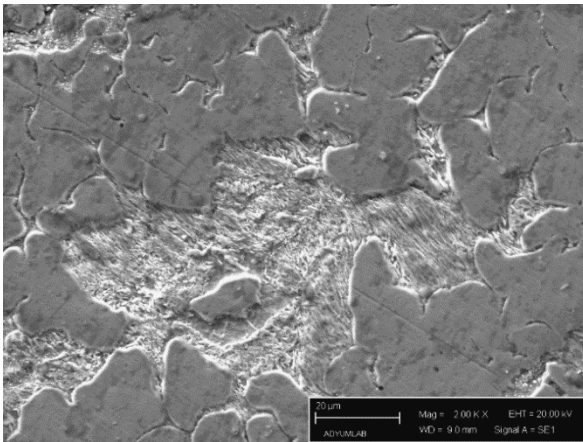


(b)

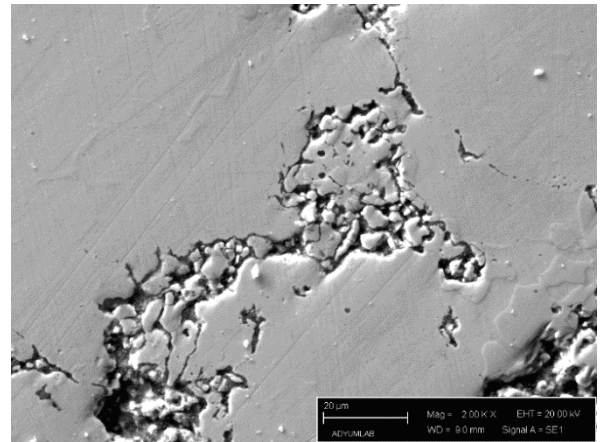


(c)

Şekil 6.1. a) N2.4, b) N2.5, c) N2.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme)



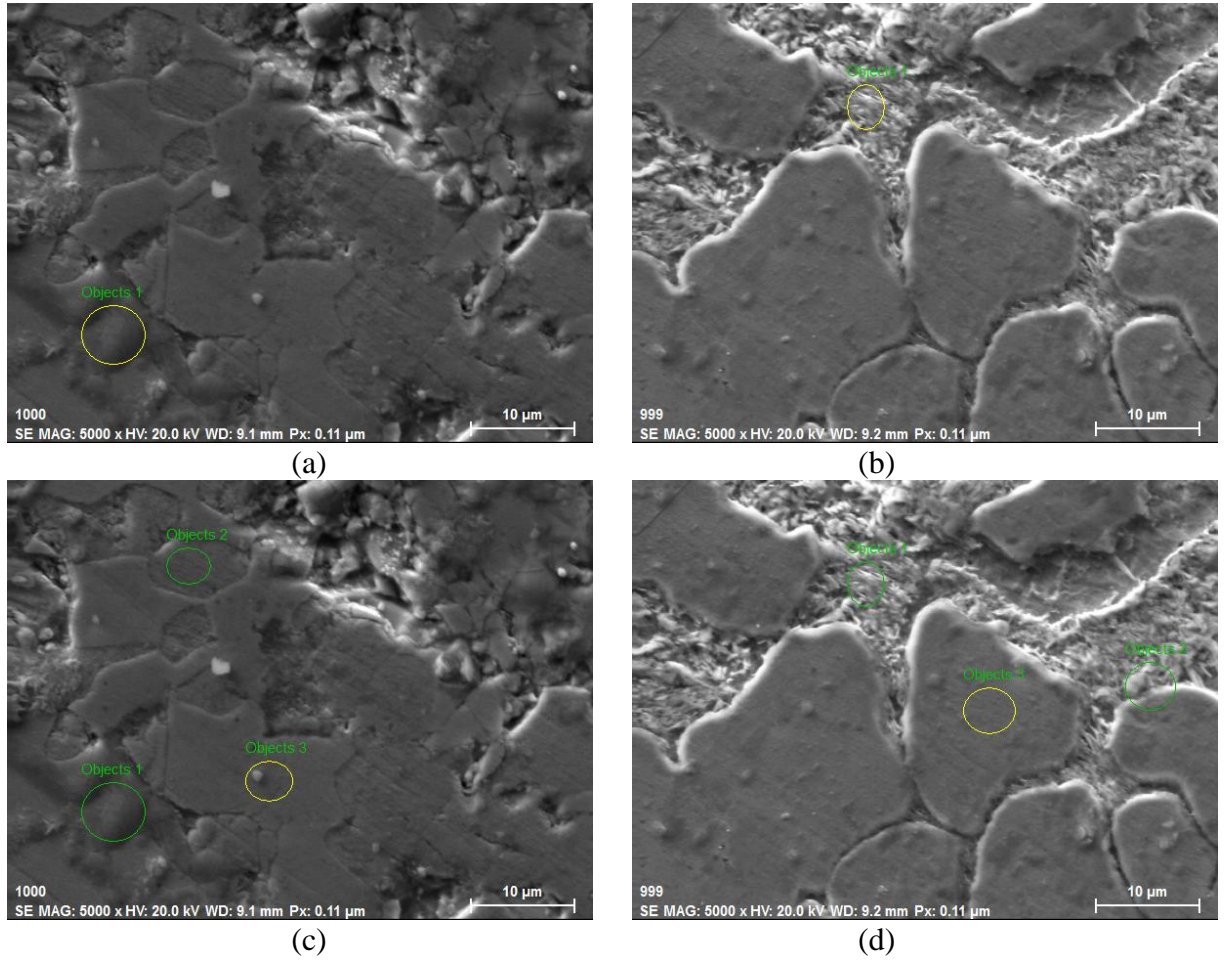
(a)



(b)

Şekil 6.2. a) N2.4, b) N2.6 numunelerinin SEM görüntüleri

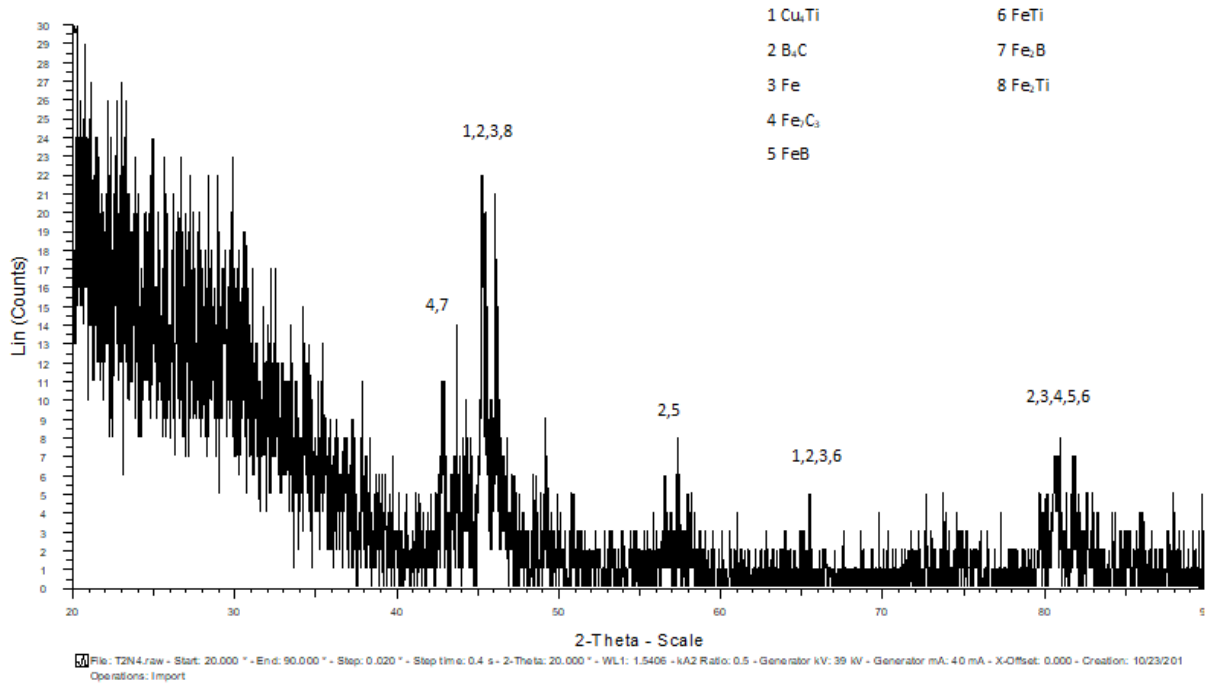
Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre Şekil 6.2.'de verilmiştir.



Şekil 6.3. N2.4 numunesi EDS analizlerinin alındığı görüntüler

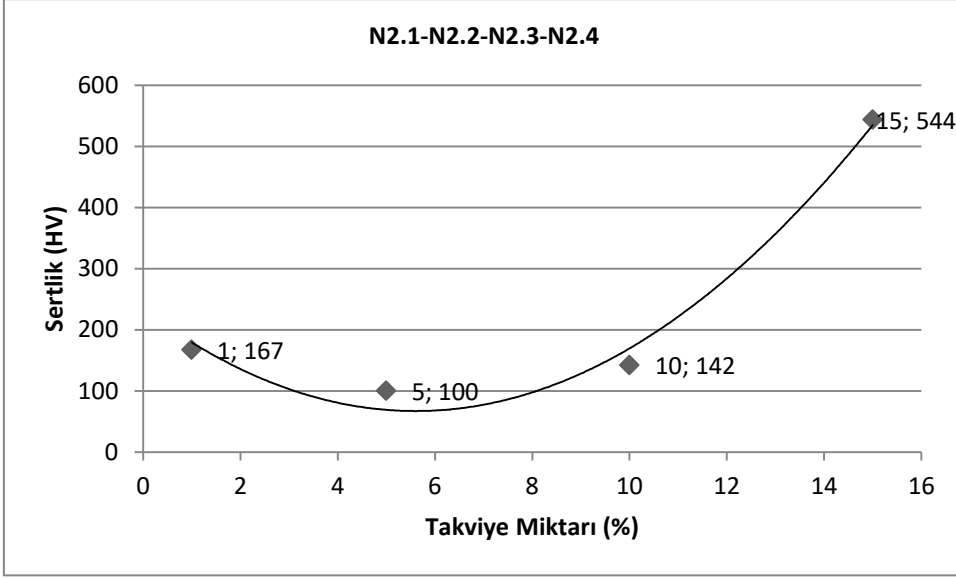
Tablo 6.3. N2.4 numunesi EDS analizleri sonuçları

Bölge	Fe (at)	C	Cu	Ti
a	74.21	25.48	0,29	0,02
b	66.65	33.09	0.25	0.01
c	73.17	26.31	0.39	0.13
d	73.62	26.30		0.07

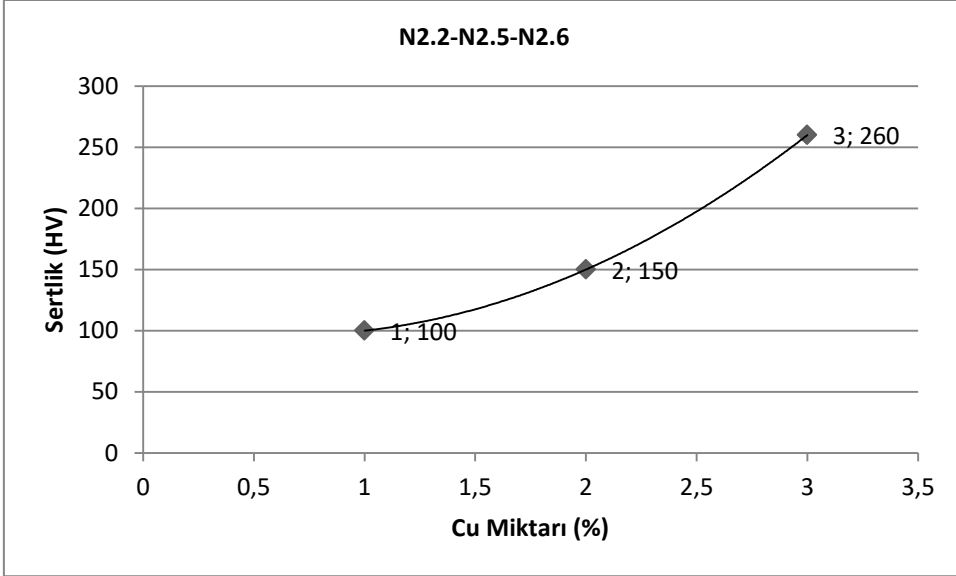


Şekil 6.4. N2.4 numunesinin XRD grafiği

Yapının sertlik değişimi Şekil 6.4.'te verilmiştir. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 167 HV değerinden 544 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 100 HV'den 260 HV'ye çıkmiştir.



(a)

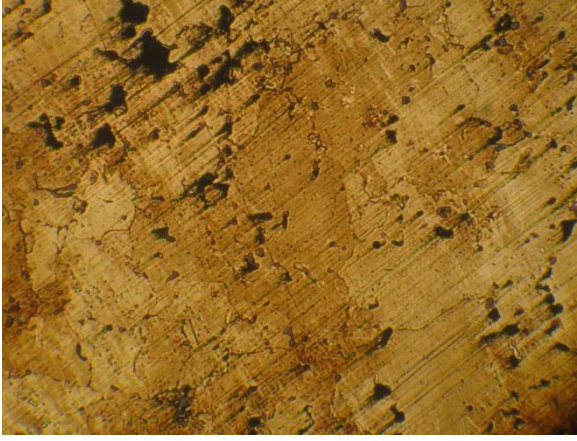


(b)

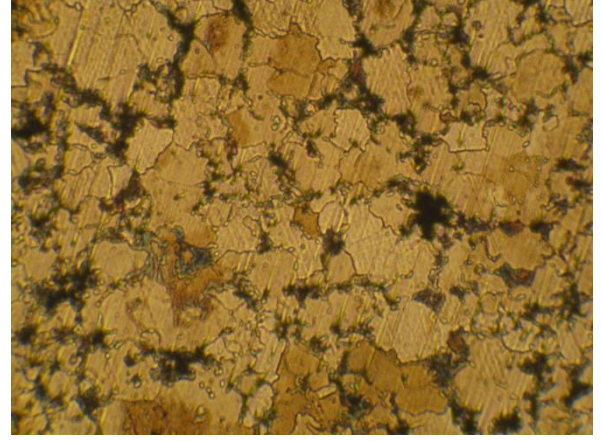
Şekil 6.5. N2 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının sertlik değişimi

N3 grup numunelerde takviye oranı %1 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Yapıdaki takviyenin tipi olarak B₄C ile FeTi ve Fe oranları birinci grupta Tablo 6.2.'de görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Bu grupta B₄C oranı %60 olarak alınmıştır. Yapının görüntüleri Şekil 6.5.'te verilmiştir. Bu görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %10 olduğunda boşluk

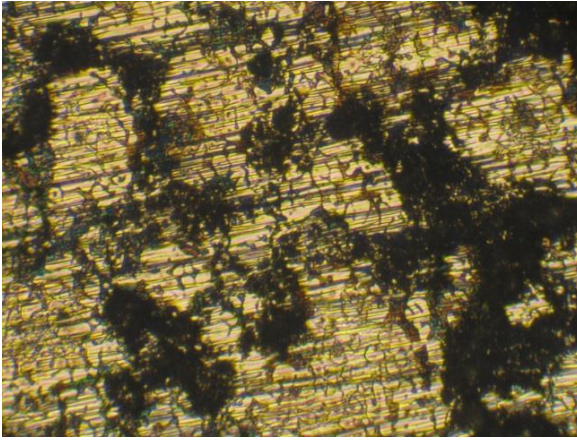
miktarı %40 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %1 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %5 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 30-35 μ olarak değişmiştir.



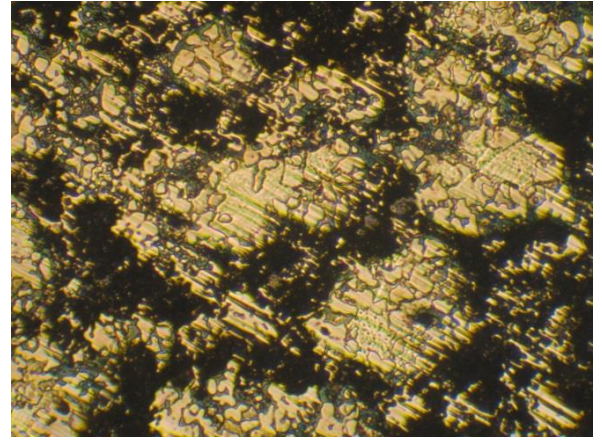
(a)



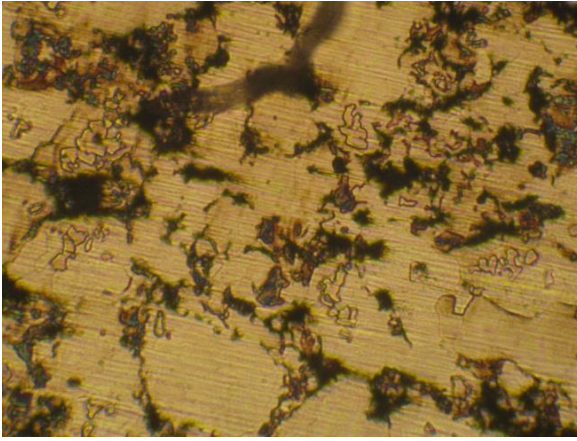
(b)



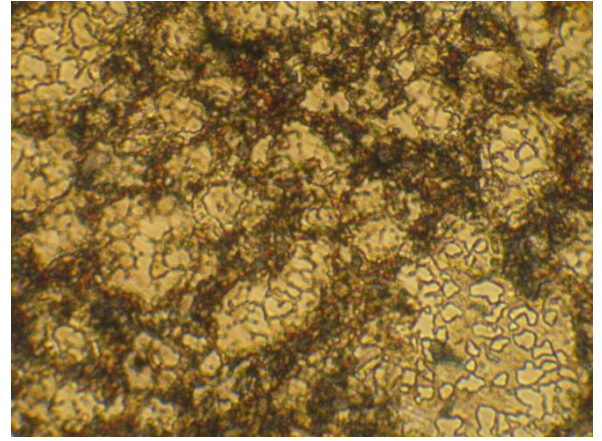
(c)



(d)

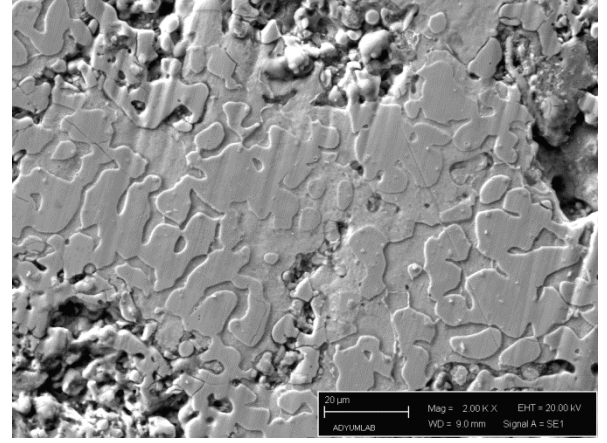
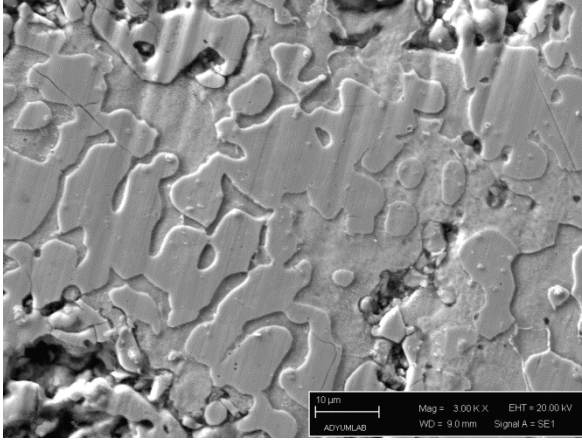


(e)



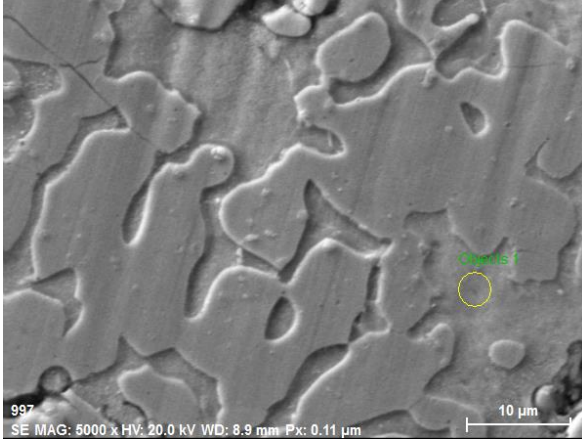
(f)

Şekil 6.6. a) N3.1, b) N3.2, c) N3.3, d) N3.4, e) N3.5, f) N3.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme)

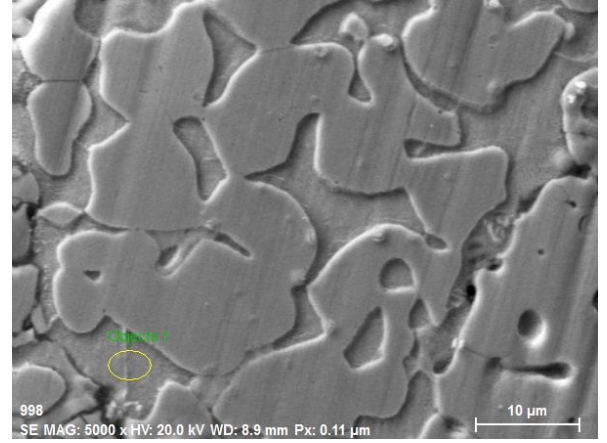


Şekil 6.7. N3.4 numunesinin SEM görüntüleri

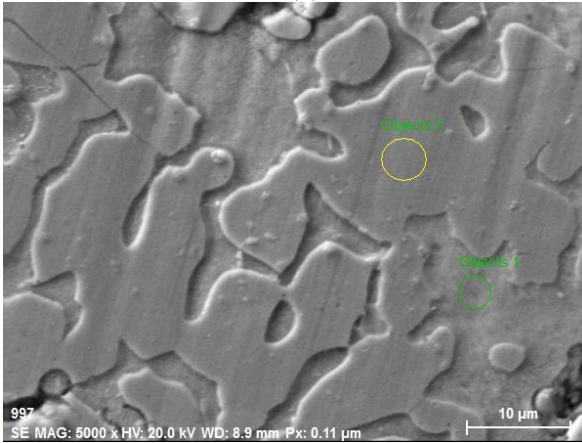
Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre Şekil 6.6.'de verilmiştir.



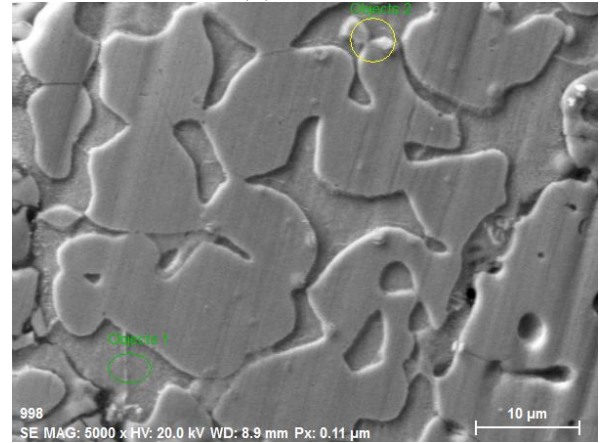
(a)



(b)



(c)

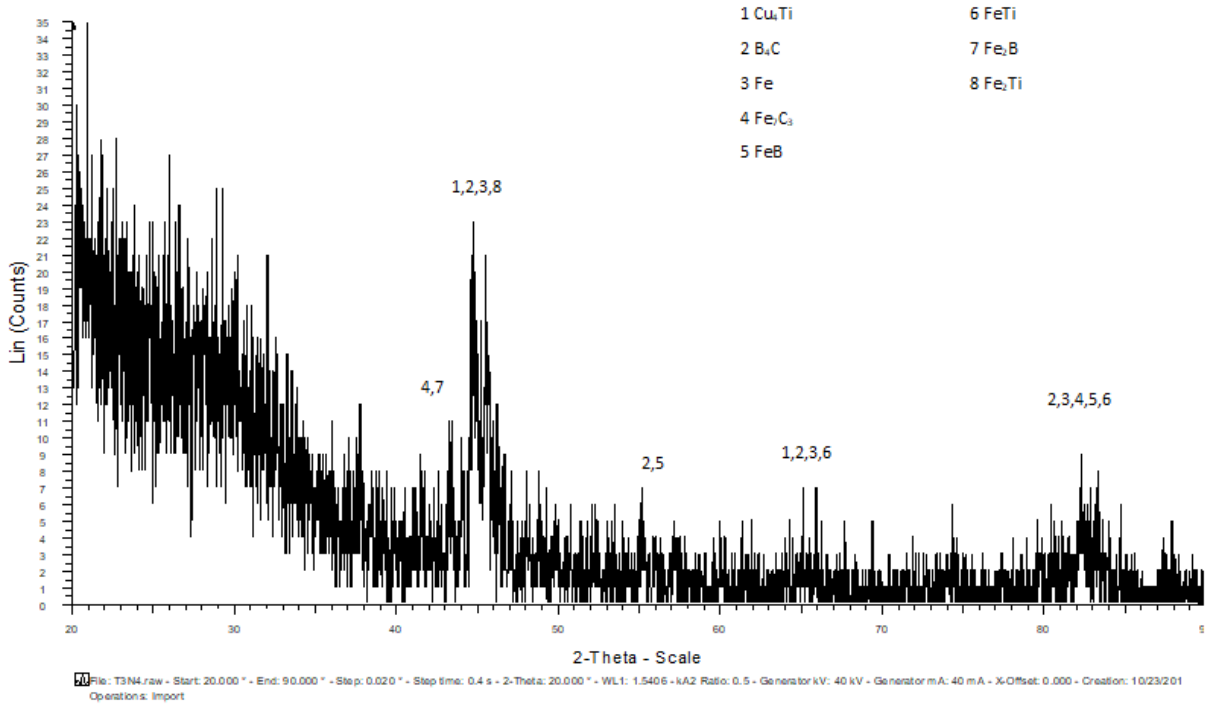


(d)

Şekil 6.8. N3.4 numunesi EDS analizlerinin alındığı görüntüler

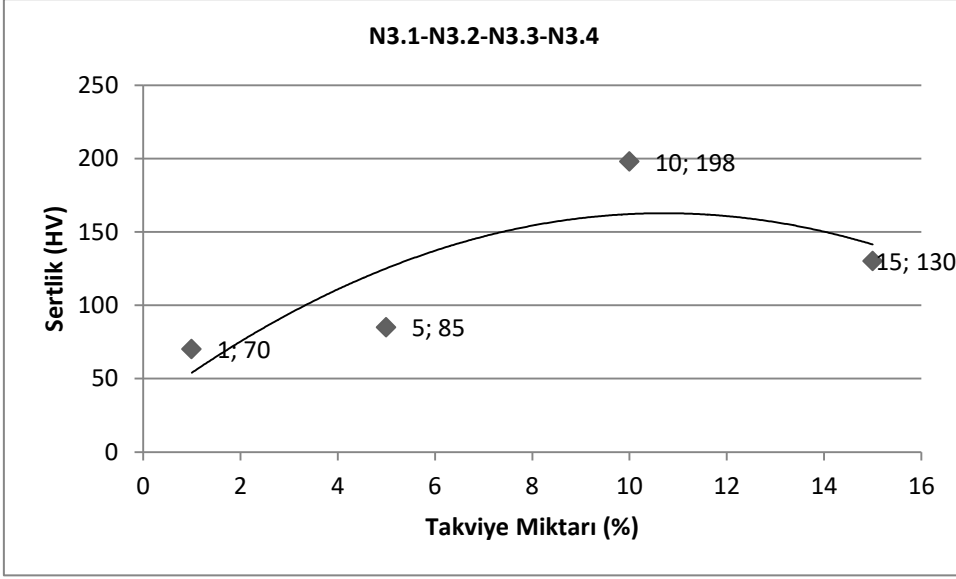
Tablo 6.4. N3.4 numunesi EDS analizleri sonuçları

Bölge	Fe (at)	C	Cu	Ti
a	68.89	26.55	4.46	0.10
b	66.09	28.62	5.18	0.11
c	75.20	23.83	0.84	0.13
d	66.55	30.60	2.82	0.03

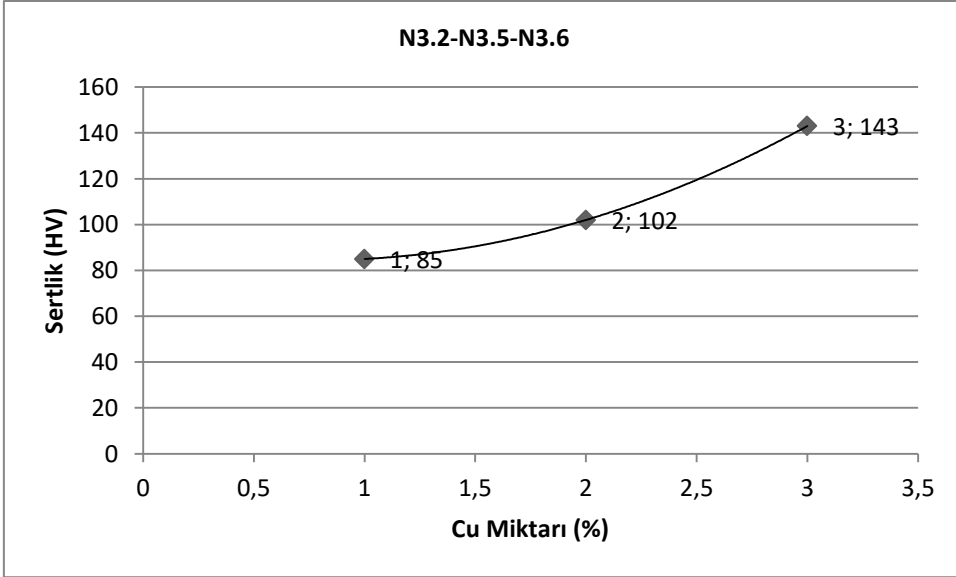


Şekil 6.9. N3.4 numunesinin XRD grafiği

Yapının sertlik değişimi Şekil 6.8.'te verilmiştir. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 70 HV değerinden 198 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 85 HV'den 143 HV'ye çıkmiştir.



(a)

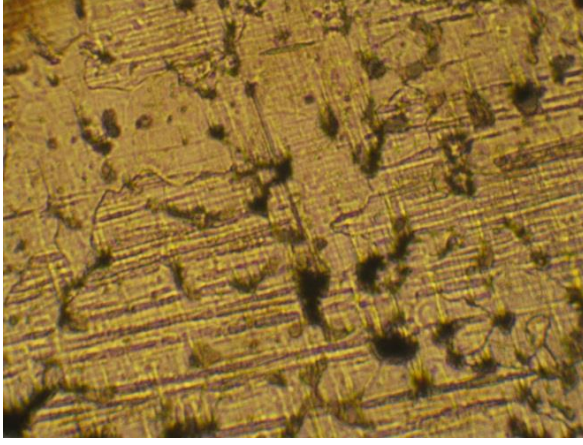


(b)

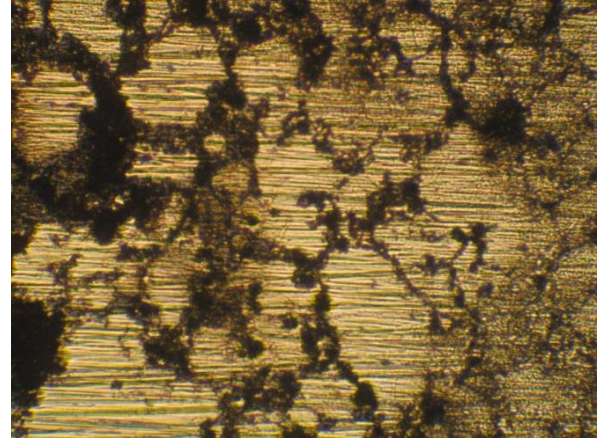
Şekil 6.10. N3 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının setlik değişimi

N4 grup numunelerde takviye oranı %1 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Yapıdaki takviyenin tipi olarak B₄C ile FeTi ve Fe oranları birinci grupta Tablo 6.2.'de görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Bu grupta B₄C oranı %40 olarak alınmıştır. Yapının görüntüleri Şekil 6.9.'da

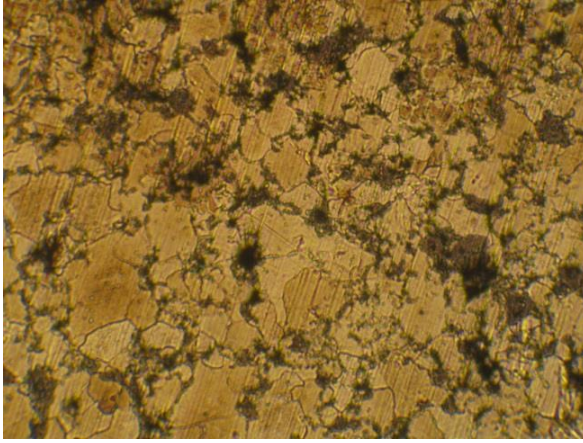
verilmiştir. Bu görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %10 olduğunda boşluk miktarı %15 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %5 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %5 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 5-10 μ olarak değişmiştir.



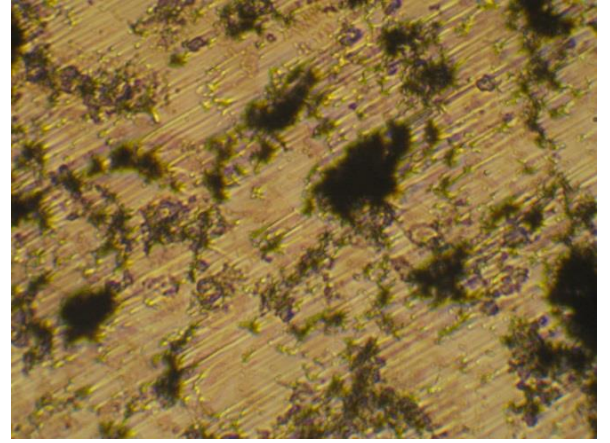
(a)



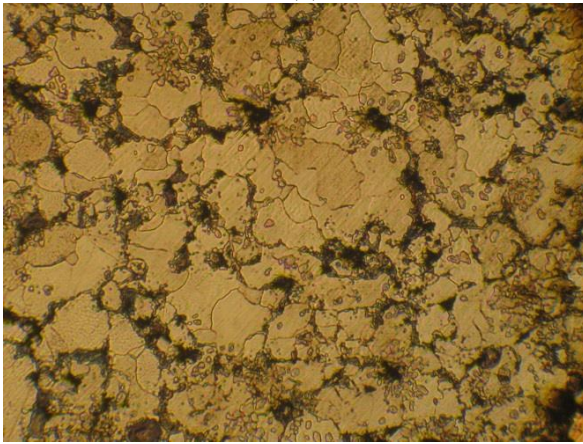
(b)



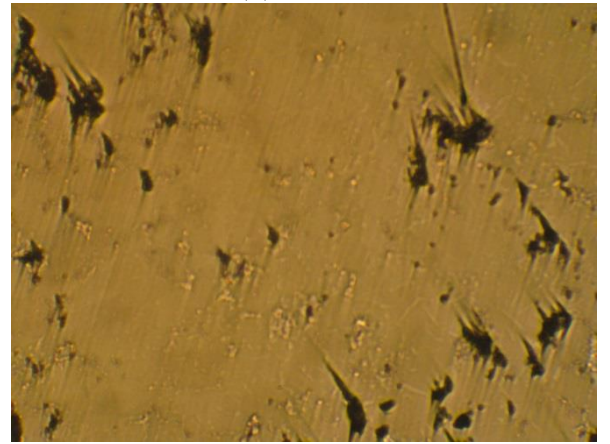
(c)



(d)

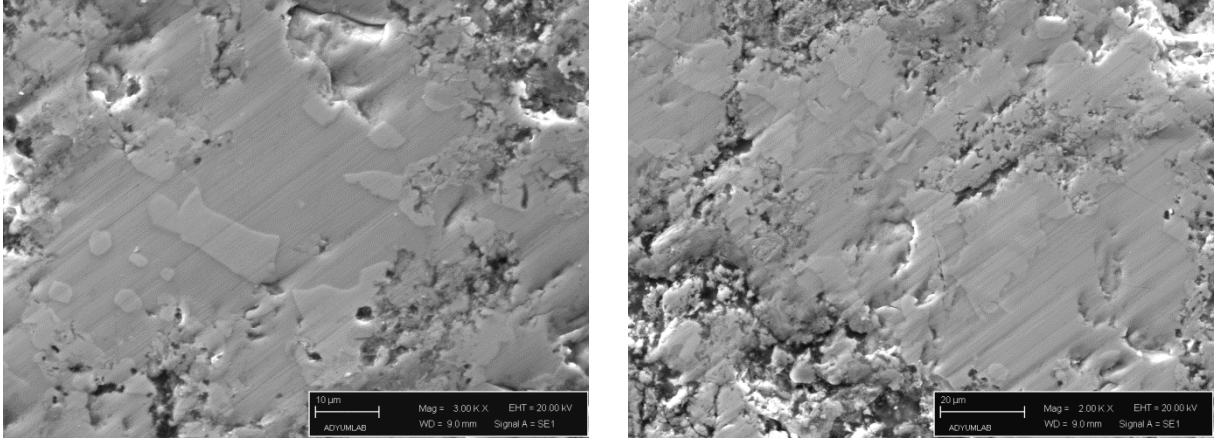


(e)



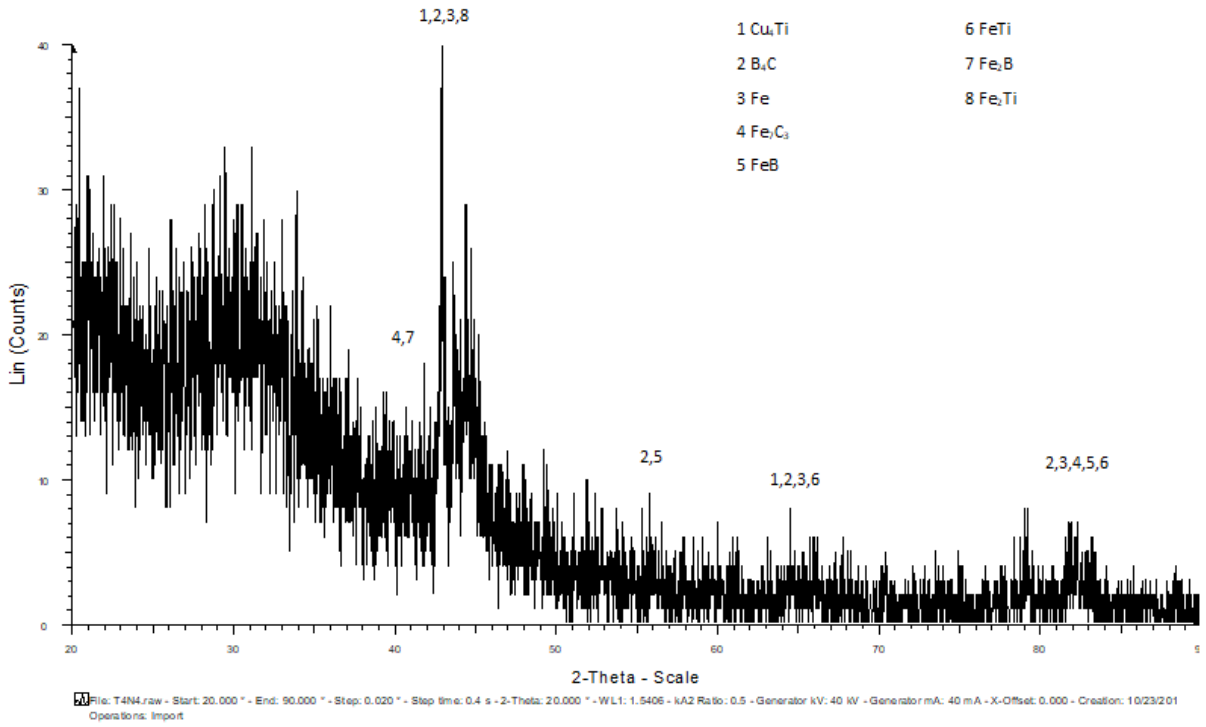
(f)

Şekil 6.11. a) N4.1, b) N4.2, c) N4.3, d) N4.4, e) N4.5, f) N4.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme)



Şekil 6.12. N4.4 numunesinin SEM görüntüleri

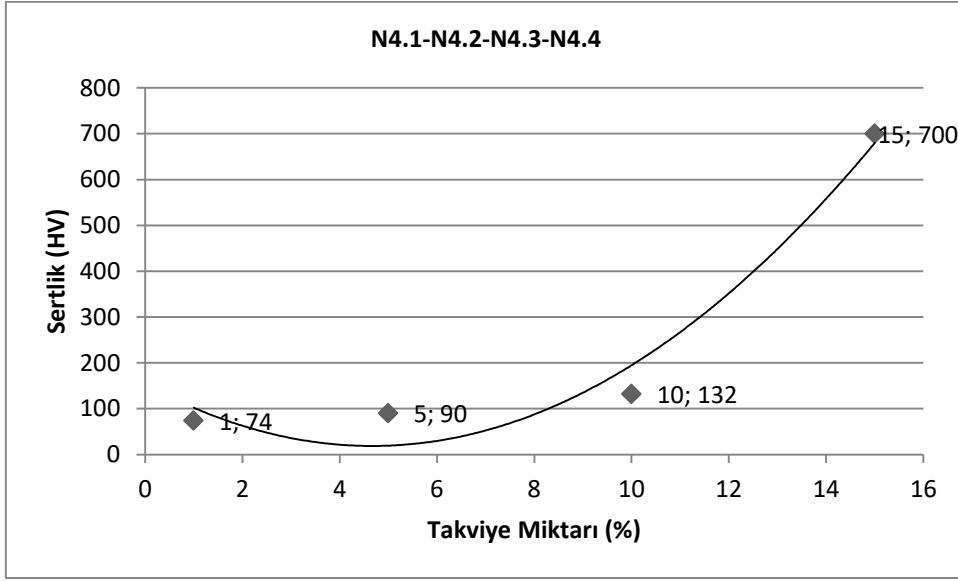
Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre Şekil 6.10.'de verilmiştir.



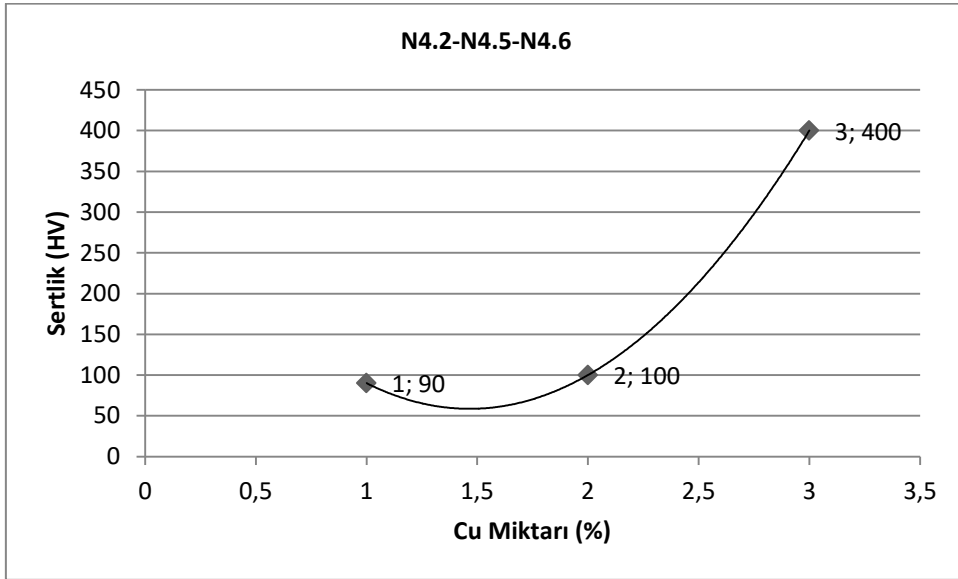
Şekil 6.13. N4.4 numunesinin XRD grafiği

Yapının sertlik değişimi Şekil 6.11.'te verilmiştir. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 74 HV değerinden 700 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak

değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 90 HV'den 400 HV'ye çıkıştır.



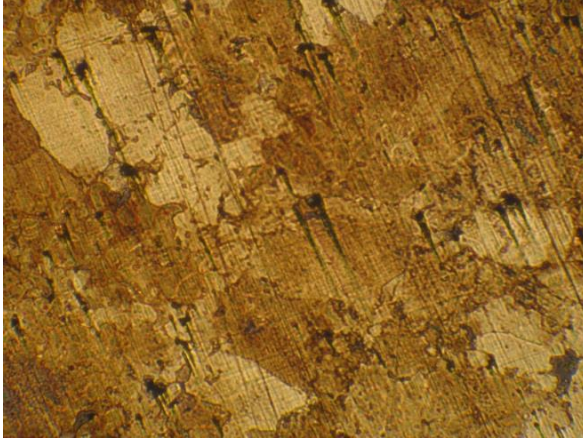
(a)



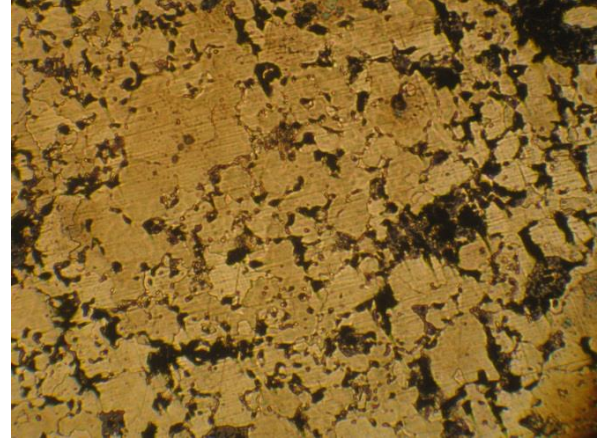
(b)

Şekil 6.14. N4 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının setlik değişimi

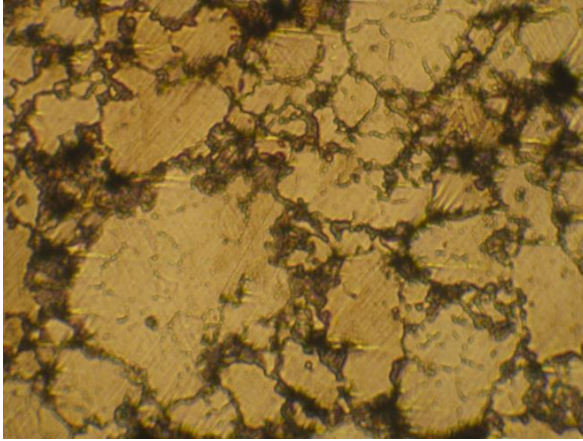
N5 grup numunelerde takviye oranı %1 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Yapıdaki takviyenin tipi olarak B₄C ile FeTi ve Fe oranları birinci grupta Tablo 6.2.'de görüldüğü gibi değiştirilmiştir. Bu grupta B₄C oranı %20 olarak alınmıştır. Yapının görüntüleri Şekil 6.12.'de verilmiştir. Bu görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %5 olduğunda boşluk miktarı %15 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %1 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %5 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 5-10 µ olarak değişmiştir.



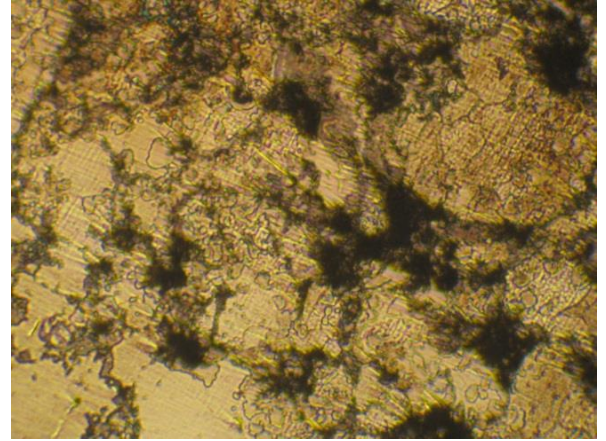
(a)



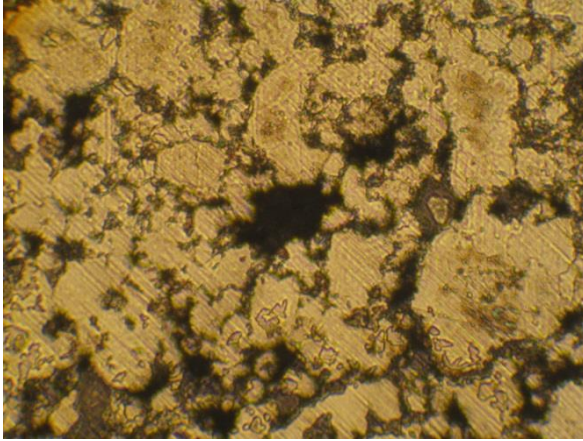
(b)



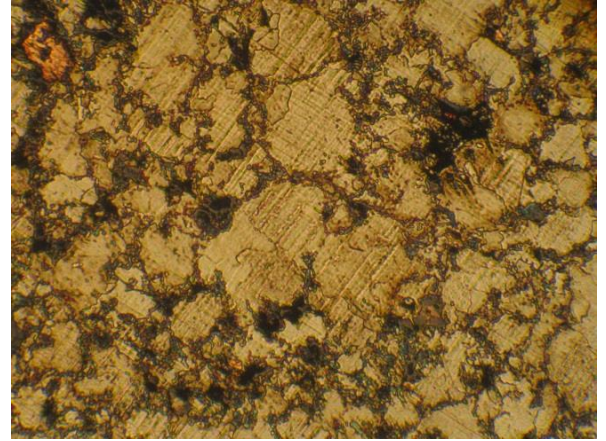
(c)



(d)

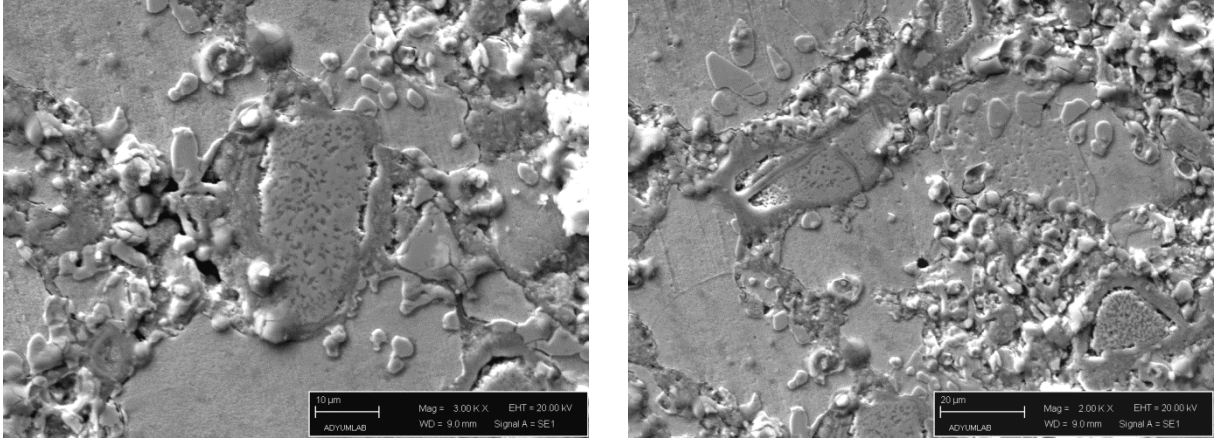


(e)



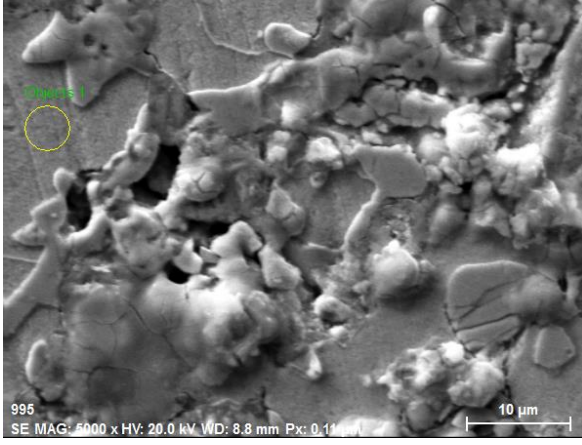
(f)

Şekil 6.15. a) N5.1, b) N5.2, c) N5.3, d) N5.4, e) N5.5, f) N5.6 numaralı numunelere ait optik fotoğraflar (10x15 Büyütme)

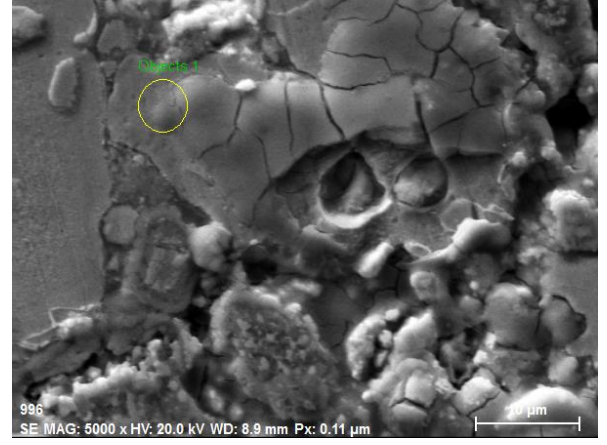


Şekil 6.16. N5.4 numunesinin SEM görüntüleri

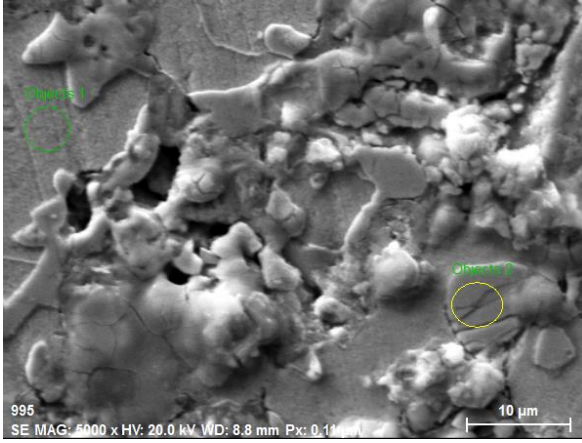
Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre Şekil 6.13.'te verilmiştir.



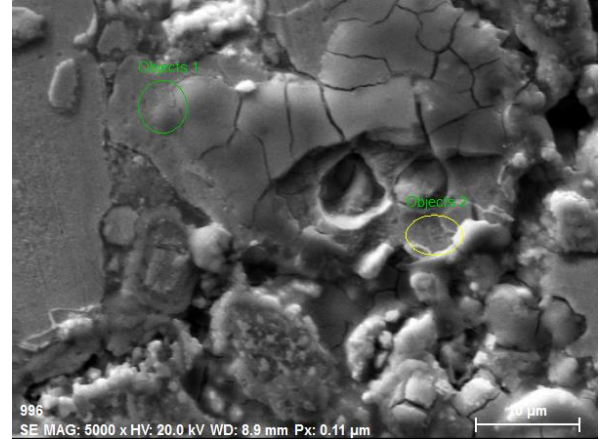
(a)



(b)



(c)

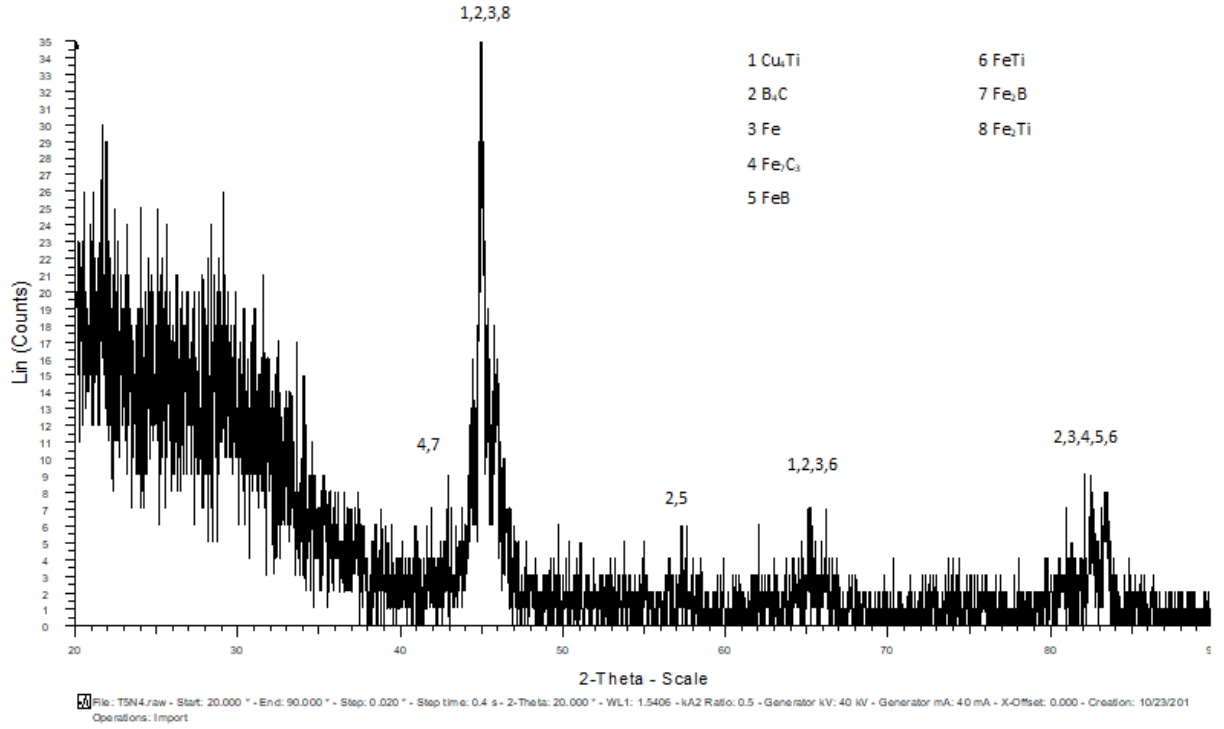


(d)

Şekil 6.17. N5.4 numunesi EDS analizlerinin alındığı görüntüler

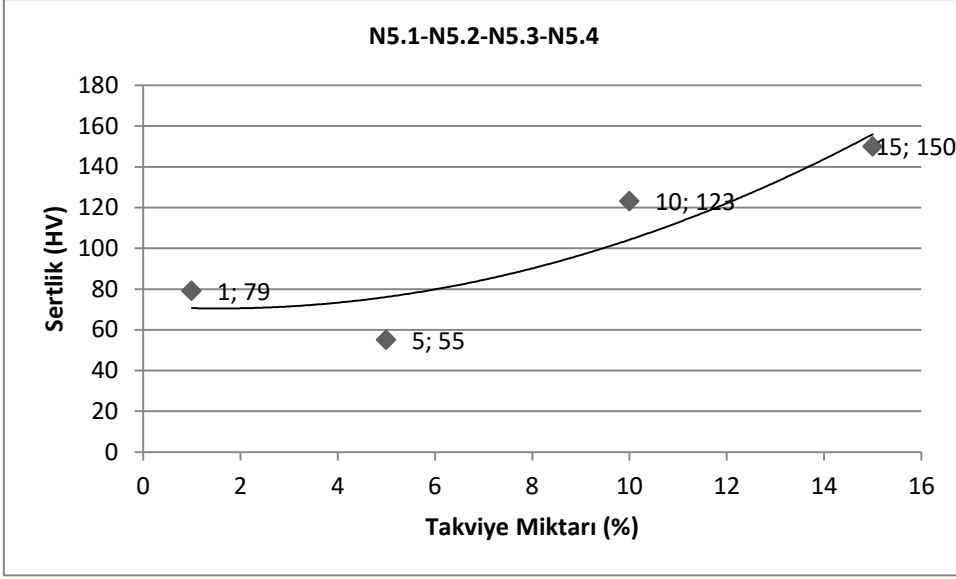
Tablo 6.5. N5.4 numunesi EDS analizleri sonuçları

Bölge	Fe (at)	C	Cu	Ti
a	78.15	21.47	0.30	0.08
b	72.45	25.46	1.54	0.55
c	77.15	22.39	0.45	0.01
d	62.71	35.08	1.20	1.02

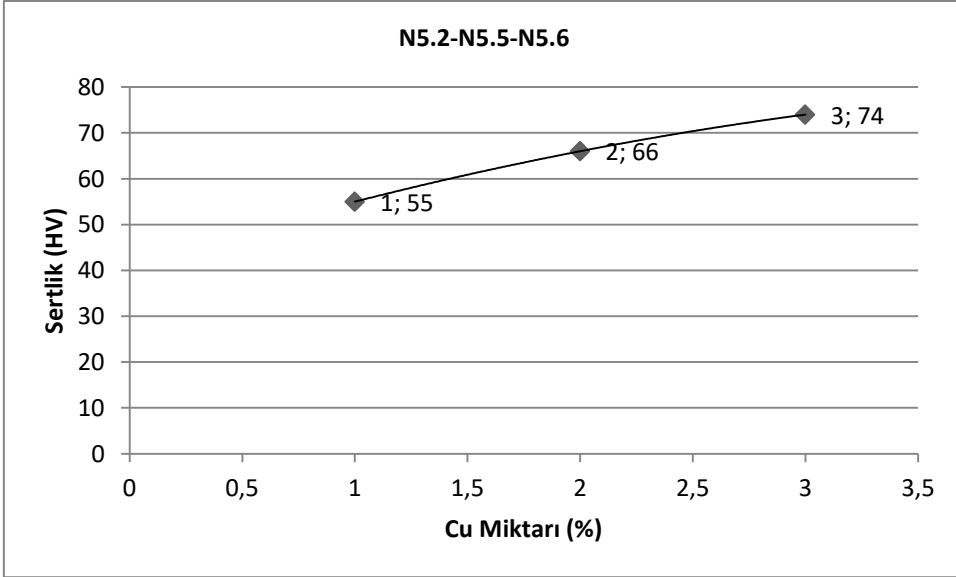


Şekil 6.18. N5.4 numunesinin XRD grafiği

Yapının sertlik değişimi Şekil 6.15.'te verilmiştir. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 79 HV değerinden 150 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 55 HV'den 74 HV'ye çıkmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.19. N5 gurubu ile ilgili a) Takviye oranına bağlı olarak malzemenin sertlik değişimi, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak yapının setlik değişimi

6.2 Mikrosertlik

Numunelerin yüzeyindeki mikrosertlik değişimi, Shimadzu marka mikrosertlik cihazı ile 5 gr yük altında HV olarak belirlenmiştir. Deney parametreleri doğrultusunda kullanılan

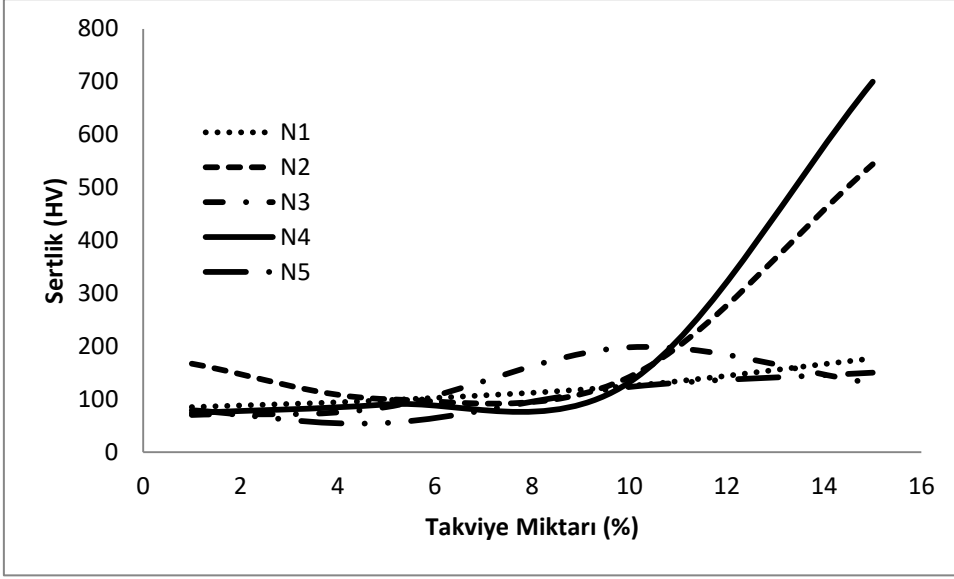
bileşim oranlarına göre mikrosertlik değişimleri incelenmiştir. Bu doğrultuda mikrosertlik değerlerinin değişimleri Tablo 6.6.'te verilmiştir.

Tablo 6.6. Kullanılan numunelerin mikrosertlik değerleri

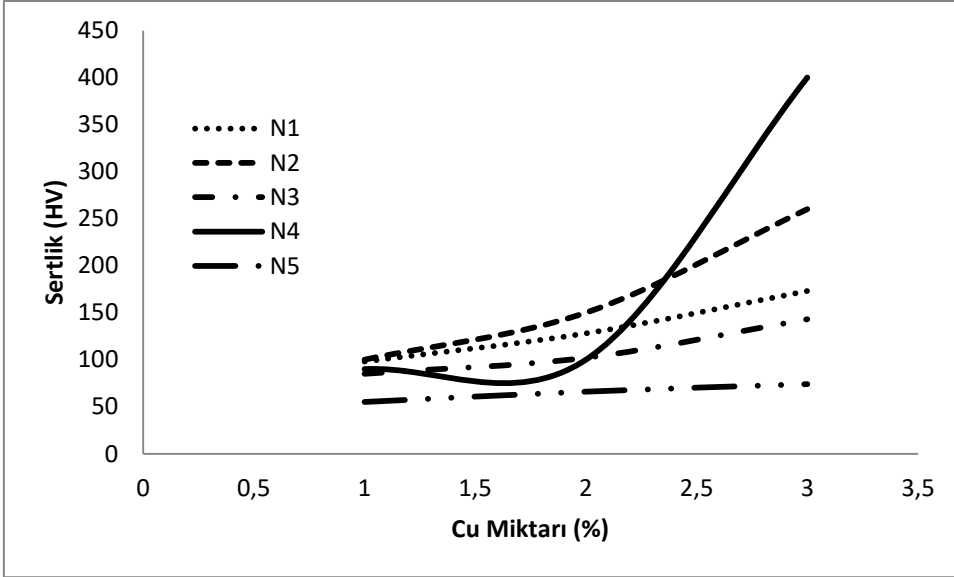
N1.1	72,6	85,9	64,4	103	96,3	298	244	249	
N1.2	50,8	43,2	84,9	89,6	44,5	105	109	99,8	
N1.3	156	144	72,6	73,2	111	86,6	91,8		
N1.4	188	213	129						
N1.5	99,2	104	162	147	148	112			
N1.6	161	193	183	194	263	140	168	118	113
N2.1	146	192	149	181	171	91	83		
N2.2	82	96	110	105	101	112	95		
N2.3	150	152	157	121	136	138	141		
N2.4	202	752	382	433	731	425			
N2.5	222	265	140	174	152	130			
N2.6	303	211	226	428	233	322	158		
N3.1	67,1	69,6	107	119	103	70,9	68,1		
N3.2	86,9	83,7	67,4	73,3	93,1	88,4			
N3.3	102	130	188	179	212	206	208	95,8	
N3.4	254	106	163	115	108	166			
N3.5	143	95,4	97,5	102	111	102	131	105	
N3.6	162	184	233	199	126	119	126		
N4.1	73,1	74,2	61	78,5	78,9	79,1			
N4.2	251	194	450	817	688	610	122	481	566
N4.3	85,3	98,5	288	154	162	153	129	97,2	
N4.4	713	825	572	259	817	517	792	670	
N4.5	84,8	107	72,2	88,3	176	102	316	99,4	115
N4.6	639	342	371	171	312	582	255	535	
N5.1	85,1	78	63,6	86,6	92,2	68,5			

N5.2	55,7	56,5	54,2	58,4	51,1	55,8			
N5.3	83,8	130	145	242	192	107	172		
N5.4	134	491	207	122	114	111	136		
N5.5	62,2	73,1	68,5	66,7	66,5	63,2			
N5.6	72,5	58,2	59,5	81,3	88	82,2			

Şekil 6.20.'de numunelerin mikrosertlik verilerine göre yapıdaki B₄C oranına ve ayrıca yapıya ek olarak kullanılan Cu oranına bağlı olarak grafik üzerinde karşılaştırılması yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 6.20. a) Takviye oranına bağlı olarak numunelerin karşılaştırılması, b) Yapıdaki ilave Cu oranına bağlı olarak numunelerin karşılaştırılması

6.3 Genel Sonuçlar

N2 grup numunelerde takviye oranı %5 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Bu grupta

B₄C oranı %80 olarak alınmıştır. Görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %15 olduğunda boşluk miktarı %30 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %5 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %15 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 10-15 µ olarak değişmiştir. Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre EDS analizi neticesinde yapıda Fe, C, Cu ve Ti görülmüştür. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 167 HV değerinden 544 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 100 HV'den 260 HV'ye çıkıştır.

N3 grup numunelerde takviye oranı %1 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Bu grupta B₄C oranı %60 olarak alınmıştır. Görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %10 olduğunda boşluk miktarı %40 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %1 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %5 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 30-35 µ olarak değişmiştir. Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre EDS analizi neticesinde yapıda Fe, C, Cu ve Ti görülmüştür. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 70 HV değerinden 198 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 85 HV'den 143 HV'ye çıkıştır.

N4 grup numunelerde takviye oranı %1 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Bu grupta B₄C oranı %40 olarak alınmıştır. Görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %10 olduğunda boşluk miktarı %15 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %5 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %5 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 5-10 µ olarak değişmiştir. Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre EDS analizi neticesinde yapıda Fe, C, Cu ve Ti görülmüştür. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 74 HV değerinden 700 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 90 HV'den 400 HV'ye çıkıştır.

N5 grup numunelerde takviye oranı %1 ile 15 aralığında değiştirilmiştir. Ayrıca yapıya bakır ilave edilmiştir. Bakır miktarı %1 ile 3 aralığında değiştirilmiştir. Bu grupta B₄C oranı %20 olarak alınmıştır. Görüntülerden elde edilen sonuçlara göre takviye oranı %5 olduğunda boşluk miktarı %15 oranına çıkmıştır. Takviye miktarı %1 olduğunda ise boşluk konsantrasyonu %5 oranında belirlenmiştir. Yapıdaki tane ebadı takviye miktarına bağlı olarak 5-10 μ olarak değişmiştir. Yapıdaki takviye miktarındaki değişim sonuçları elektron mikroskobu ile alınan sonuçlara göre EDS analizi neticesinde yapıda Fe, C, Cu ve Ti görülmüştür. Takviye miktarına bağlı olarak sertlik 79 HV değerinden 150 HV değerine artmıştır. Ancak bu artış doğrusal olarak değişmemiştir. Yapıdaki Cu miktarı sertlik değişimi üzerine doğrusal olarak etki etmiştir. Cu miktarındaki %1'den %3'e kadar olan artış sertliği 55 HV'den 74 HV'ye çıkmıştır.

7. KAYNAKLAR

- Benjamin, J. S., 1988, Mechanical Alloying, A Perspective, Proc. Conf. Of New Materials By MA Techniqes E D. By E. Arzt And L. Shultz, Alw-Hirasu, 3-7.
- Suryanarayana, C, 2001, Mechanical Alloying And Milling, Progress In Materials Science, Vol. 46, Pp. 1-184.
- Benjamin JS. 1976, Sei Amer, 234(5):40-8.
- Benjamin JS., In: Arzt E, Schultz L, 1989, New Materials By Mechanical Alloying Techniques. Oberursel, Germany: DGM Inforrnationgesellschaft, Pp. 3-18.
- Benjamin JS. 1990, Metal Powder Rep, 45:122-7.
- Ermakov AE, 1981, Yurchikov EE, Barinov VA. Phys Met Metallogen 52(6):50-8.
- Koch CC, Cavin OB, Mckamey CG, Scarbrough JO. 1983, Appl Phys Lett, 43:1017-9.
- Heinicke G. 1984, Tribochemistry., Akademie Verlag, Berlin.
- Mccormick PG. 1995, Mater Trans Japan Inst Metals, 36:161-9.
- Maurice DR, Courtney TH. 1990, Metall Trans, A21:289-303.
- <Http://Www.Usace.Army.Mil/Usace-Docs/Eng-Manuals/Em1110-2-3401/C-2.Pdf>
- KUSOGLU, I. M., ÇELİK, E., ÇETİNEL, H., ÖZDEMİR, I., DEMIRKURT, O., ONEL, K., “Wear Behavior Of Flame-Sprayed Al₂O₃-TiO₂ Coatings On Plain Carbon Steel Substrates” Surface & Coating Technology 200, Sayfa 1173-1177, 2005
- Sago, A.S., Newkirk, J.W., And Brasel, G.M., 1997, Rapid Mechanical Alloying For Metal Powder Production, Adv. In PM, Vol. 2, Part 11-3.
- Weeber, AW, Bakker H, Deboer FR. 1986, Europhys Lett, 2:445-8.
- Sago, A.S., Newkirk, J.W., And Brasel, G.M., 1998, Metal Injection Molding Of Mechanically Alloyed Advanced Materials, Adv. In PM, Vol. 2, Part 5-93.
- ÖZBİLEN, S., Toz Metalürjisi Ders Notları.
- UYGUR, E., 1996, Toz Metalürjisi Ekonomik Bir Üretim Tekniği, 1. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı, 16-17 Eylül, S. 447-484, Ankara.
- Awakumov EG. 1986, Mechanical Methods Of Activation Of Chemical Processes. Novosibirsk, Russia: Nauka.
- Mccormick PG. 1995, Mater Trans Japan Inst Metals, 36:161-9.
- Aikin BJM, Juhas JJ. In: Froes FH, Hebeisen JC, 1997, Advanced Particulate Materials And Processes D 1997. Princeton, NJ: Metal Powder Industries Federation,, P. 287-94.
- El-Eskandarany MS, Aoki K, Suzuki K. J., 1990, Less-Common Metals, 167, 113-8.
- Gaffet E, Malhouroux-Gaffet N. J., 1994, Alloys And Compounds, 205:27-34.
- Lebrun P, Froyen L, Delaey L., 1992, Mater Sci And Engng, A1 57:79-88.

- Chariot F, Gaffet E, Zeghmati B, Bernanrd F, Niepce JC, 1999, Mater Sci And Engng, A262:279-88.
- ASLANOGLU, Z., 1994, Demir-Karbon Sisteminin Mekanik Alaşımlama Tekniği İle Üretim Süreçlerinin İncelenmesi Ve Karakterizasyonu, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Benjamin JS., 1976, Sci Amer, 234(5):40-8.
- Lee PY, Yang JL, Lin HM. J., 1998, Mater Sci, 33:235-9.
- Koch CC, 1993, Nanostructured Mater, 2:109-29.
- Suryanarayana C, 1995, Internat Mater Rev, 40:41 -64.
- Benjamin JS., 1976, Sci Amer, 234(5):40-8.
- Gilman PS, Benjamin JS., 1983, Annu Rev Mater Sci, 13:279-300.
- Benjamin JS, Volin TE., 1974, Metali Trans, 5:1929-34.
- Lee PY, Koch CC, 1988, J Mater Sci, 23:2837-45.
- Davis RM, Koch CC, 1987, Scripta Metali, 21:305-10.
- Lee PY, Koch CC, 1987, Appl Phys Lett, 50:1578-80.
- Harris CC, 1967, Trans Soc Min Engrs, 238:17.
- Davis RM, Mcdermott B, Koch CC, 1988, Metali Trans, A19:2867-74.
- Koch CC. In: Cahn RW., 1991, Processing Of Metals And Alloys, Vol. 15 Of Materials Science Andbtechnology D A Comprehensive Treatment. Weinheim, Germany: VCH Verlagsgesellschaft Gmbh, P. 193-245.
- Ivanov E., 1992, Mater Sci Forum, 88±90:475-80.
- Padden, S.A. And Reed, J.S., 1993, Grindings Kinetics And Wear During Attrition Milling, Am. Cer. Soc. Bull., Vol 77, Pp. 101-103.
- KARA, H., 1996, Elementel W Ve C Tozlarından Mekanik Alaşımlama Süreçleri Sonucu Geliştirilen WC Toz Alaşımı İle Sinter WC-Co Alaşımının Mikroyapisal Karakterizasyonu, I.T.U. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Istanbul.
- Becker, G.E., 1986, Attrition Mill Fine Grinding Of Advanced Ceramic Powders, Conference Of Advenced Ceramics, Ohio, Feb.
- Kerr, M.C., And Reed, J.S., 1992, Comparative Grinding Kinetics And Grinding Energy During Ball Milling And Attrition Milling, Am. Cer. Soc. Bull., Vol. 71, Pp. 1809-1816.
- Suryanarayana C, 1995, Intermetallics, 3:153-60.
- Suryanarayana C, Ivanov E, Noufi R, Contreras MA, Moore JJ. 1999, J Mater Res 14:377-83.
- Watanabe R., Hashimoto H., Park Y-H., In: Pease III LF., Sansoucy RJ., 1991. Advances In Powder Metallurgy, Vol. 6. Princeton, Metal Powder Industries Federation, 1. P. 119-30.

- Gavrilov D, Vinogradov O, Shaw WJD. In: Poursartip A, Street K, 1995, Proc Inter. Conf. On Composite Materials, ICCM-10, Vol. III. Woodhead Publishing, P. 11.
- Takacs L, Pardavi-Horvath M. J., 1994, Appl Phys, 75:5864-6.
- Kis-Varga, Beke DL. 1996, Mater Sci Forum, 225-227:465-70.
- Suryanarayana C, Chen GH, Froes FH. 1992, Scripta Metall Mater, 26:1727-32.
- Miki M, Yamasaki T, Ogino Y. 1992, Mater Trans Japan Inst Metals, 33:839-44.
- Chen Y, Williams JS., 1996, Mater Sci Forum, 225-227:881-8.
- Ogino Y., Yamasaki T, Maruyama S., Sakai R.J., 1990, Non-Cryst Solids 117/118:737-40.
- Lee PY, Koch CC, 1987, Non-Cryst Solids, 94:88-100.
- Lee PY, Koch CC. 1987, J Non-Cryst Solids, 94:88-100.
- Harris AM, Schafer GB, Page NW. 1993, Mater Sci Lett, 12:160-1.
- Mccandlish LE, Seegopaul P, Wu L. In: Kneringer G, Roedhammer P, Wilhartitz P, 1997, Proc. 14th International Plansee Seminar, Vol. 4. Reutte, Tyrol, Austria: Plansee AG, P.363-75.
- Lonnberg B., 1994, Mater Sci. 29:3224-30.
- Cargill III GS. 1975, Solid State Phys, 30:227.
- Hunt J, Soletta I, Battezzati L, Cowlam N, Cocco G. 1993, Alloys And Compounds, 194:311-7.
- Chen LC, Spaepen F. 1991, Mater Sci And Engng, A133:342-5.
- Bolderev, V.V., "Reactivity Of Solids", *Elsevier Scientific*, 519, (1988).
- Schaffer, G.B., And McCormick, *Metall Transaction A*, 23:835, (1989).
- Schaffer, G.B., And McCormick, *Metall Transaction A*, 22:3019, (1991).
- Kılıç, E., 2006. Kompozit Malzemedden Yapılan Yaprak Yayların Analizi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, İzmir.
- Arıcasoy, O., 2006. İstanbul Ticaret Odası, Kompozit Sektör Raporu, İstanbul.
- Ünal, O., 2007. Kompozit Malzemelerin Özellikleri Ve Sınıflandırılması [Http://Www.İnsaatmuhendisligi.Net/Index.Php?=438.0](http://www.İnsaatmuhendisligi.Net/Index.Php?=438.0).
- Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi Yayını, 327s. Ankara.
- E.S. Kayalı, N. Eruslu, M. Ürgen, Y. Taptık, H. Çimenoğlu; Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, İstanbul, 1997.
- M. Darabara, G.D. Papadimitriou, L. Bourithis, Production Of Fe–B–Tib₂ Metal Matrix Composites On Steel Surface, *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 3518–3523.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Osmaniye’de doğdu. İlk ve ortaokulu Cumhuriyet İlköğretim Okulu’nda tamamladı. 2009 yılında Osmaniye Anadolu Lisesi’nden mezun oldu. 2011’de Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde başladığı lisans eğitimini Ocak 2016’da bitirdi. İş hayatına Şubat 2016’da Cemer Makine Kalıp ve Mühendislik San. Tic. Ltd. Şti.’de yedi ay boyunca Üretim ve Planlama Mühendisi ve eş zamanlı olarak Satın Alma Mühendisi görevlerini ifa ederek başladı. Eylül 2016’da Namık Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Programı’nda başladığı tezli yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir.