

**ALÜMİNYUM – SİLİSYUMNİTRÜR KOMPOZİT MALZEMENİN
DİFÜZYON KAYNAĞI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

İBRAHİM OKAN ERDEN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2005
ANKARA**

İbrahim Okan ERDEN tarafından hazırlanan ALÜMİNYUM- SİLİSYUMNİTRÜR KOMPOZİT MALZEMENİN DİFÜZYON KAYNAĞI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Halil ARIK
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Adem KURT

Üye : Doç. Dr. Halil ARIK

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ERTÜRK

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

**ALÜMİNYUM – SİLİSYUMNİTRÜR KOMPOZİT MALZEMENİN
DİFÜZYON KAYNAĞI İLE KAYNAKLANABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI
(Yüksek Lisans Tezi)**

İbrahim Okan ERDEN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ARALIK 2005**

ÖZET

Bu çalışmada, ağırlıkça %5, %10 ve % 15 oranlarında silisyumnitrür (Si_3N_4) içeren alüminyum toz karışımı yüksek enerjili atritör içerisinde 2 saat süreyle mekanik alaşımlama (MA) işlemine tabi tutulmuştur. MA sonrası tozlar, sabit presleme basıncında (500 MPa) preslenerek Ø10 x 15 mm boyutlarında blok numuneler üretilmiştir. Daha sonra bütün numuneler 4 saat süreyle 650 °C sıcaklıkta ve atmosfer kontrollü tüp fırında argon gazı ortamında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası numuneler 2,5 MPa yük altında farklı sıcaklıklarda (620, 630 ve 640 °C) ve farklı sürelerde (60, 90 ve 120 dak) difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmişlerdir. Kaynak işleminden sonra numunelere mekanik test olarak kesme testi uygulanmıştır. Ana malzeme ve kaynaklı numunelerden elde edilen kesme testi değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan optik mikroskop çalışmaları, kompozitin homojen bir yapıya sahip olduğu ve gözenek miktarının düşük olduğu görülmüştür. Kesme testinde elde edilen sonuçlara göre %15 Si_3N_4 içeren ve 640 °C’ de 2 saat süre ile yapılan difüzyon kaynağının en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 710
Anahtar Kelimeler : Difüzyon Kaynağı, Kompozit Malzemeler, Toz Metalurjisi
Sayfa Adedi : 99
Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Halil ARIK

**INVESTIGATION OF WELDABILITY OF Al-Si₃N₄ COMPOSITE
MATERIALS BY DIFFUSION WELDING**

(M.Sc. Thesis)

İBRAHİM OKAN ERDEN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DECEMBER 2005**

ABSTRACT

In this study, Al powders containing 5%, 10% and 15% wt (Si₃N₄) silicon nitride were mechanically alloyed in a high energy attritor for 2 h. Mechanically alloyed powders were compacted at constant pressing pressure (500 MPa) to produce block specimens with dimensions Ø10 x 15 mm. Specimens were then sintered at constant temperature (650 °C) for 4 h under argon atmosphere in a tube furnace. Sintered specimens were welded different temperatures (620, 630, 640) °C and different times (60, 90 and 120) min. under 2,5 MPa pressure by diffusion welding. After welding process, specimens were treated cutting test as mechanical test. Cutting test valves obtained main material and welded specimens were compared each other. It was observed that composite was homogeneous structure and low pores quantity in optic microscope studies. It was determined that the best result occurred at diffusion welding made at 640 °C for 2 h according to results obtained cutting test.

Science Code : 710

Key Words : Diffusion Welding, Composite, Powder Metallurgy

Pages : 99

Supervisors : Assoc. Prof. Dr. Halil ARIK

TEŞEKKÜR

Tez konusu seçiminde, deneysel çalışma aşamalarında ve tez yazımı esnasında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Halil ARIK'a teşekkür eder, saygı ve şükranlarımı sunarım. Difüzyon kaynağında deney parametrelerini belirlememde ve difüzyon kaynak fırınının temininde yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Mustafa AYDIN'a bu yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans süresi boyunca her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Ahmet DURGUTLU'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarım boyunca sabırla beni destekleyen eşim ve oğluma şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ÖZELLİKLERİ	4
2.1. Alüminyum	4
2.2. Alüminyumun Özellikleri	5
2.2.1. Saf alüminyum	5
2.2.2. Alüminyumun kimyasal özellikleri.....	5
2.2.3. Alüminyumun fiziksel özellikleri	6
2.2.4. Alüminyum alaşımları.....	6
2.3. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler.....	7
2.3.1. Alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi	7
3. SİLİSYUM NİTRÜR (Si_3N_4)	9
4. MEKANİK ALAŞIMLAMA.....	11
4.1. Mekanik Alaşımlama İşlemi	12
4.2. Mekanik Alaşımlama Mekanizması.....	13
4.3. Mekanik Alaşımlama'nın Avantajları.....	14

	Sayfa
5. TOZ METALURJİSİ	17
5.1. Metal Tozların Üretimi	18
5.1.1. Mekanik yöntemler	19
5.1.2. Elektroliz yolu ile üretim	21
5.1.3. Kimyasal yöntemler	22
5.1.4. Atomizasyon yöntemi	24
5.2. Metal Tozların Karakterizasyonu.....	25
5.2.1. Fiziksel özellikler	26
6. SİNERLEME.....	28
6.1. Sinterleme Teknikleri.....	30
7. KOMPOZİT MALZEMELER.....	33
7.1. Polimer Kompozitler	35
7.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK)	36
7.3. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)	36
8. DİFÜZYON	38
8.1. Difüzyon Mekanizmaları	39
8.1.1. Arayer difüzyonu	39
8.1.2. Boşluk difüzyonu	40
8.1.3. Yeralan difüzyonu	40
8.2. Aktivasyon Enerjisi	41
8.3. Difüzyon Çeşitleri	42
8.4. Difüzyon Kanunları.....	43
8.4.1. I. Fick kanunu	43

	Sayfa
8.4.2. II. Fick kanunu	44
9. DİFÜZYON KAYNAĞI.....	46
9.1. Difüzyon Kaynağı Mekanizması.....	47
9.2. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler	48
9.2.1. Kaynak sıcaklığı.....	49
9.2.2. Kaynak basıncı.....	50
9.2.3. Kaynak süresi	51
9.2.4. Yüzey şartları	52
9.2.5. Kaynak ortamı.....	53
9.2.6. Birleştirilecek malzemelerin tane boyutları ve mikro yapıları.....	53
9.2.7. Difüzyon kaynağı yapılan malzemeler.....	55
9.2.8. Difüzyon kaynağı teknikleri.....	56
9.2.9. Difüzyon kaynağı uygulamaları	58
10. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	61
10.1. Deneysel Çalışmalar ve Malzemeler.....	61
10.2. Mekanik Alaşımlama	62
10.3. MA Sonrası Elde Edilen Tozların Karakterizasyonu.....	63
10.3.1. Toz tane boyut ölçümü.....	63
10.3.2. Metalografi incelemesi.....	63
10.4. Mekanik Alaşımlama Sonrası Tozların Preslenmesi	64
10.4.1. Preslenen numunelerin ham yoğunluklarının ölçülmesi	65
10.5. Sinterleme	66
10.5.1. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluklarının ölçülmesi	67

Sayfa

10.5.2. Sinterlenen numunenin optik mikroslopta yapısının incelenmesi	67
10.6. Kaynak Numunelerinin Hazırlanması ve Difüzyon Kaynağı	68
10.6.1. Kesme testi	69
10.6.2. Kaynak bölgesinin mikroyapı incelemesi	70
10.6.3. Kompozit malzemenin ve kaynak bölgesinin sertlik ölçümü	70
11. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	71
11.1. Toz Tane Boyutu	71
11.2. Tozların Morfolojisi	73
11.3. Presleme Sonrası Ham Yoğunluk	74
11.4. Sinterleme Sonrası Yoğunluk	76
11.5. Sinterlenmiş Numunelerin Mikroyapı İncelemesi	77
11.6. Kompozit malzemenin ve kaynak bölgesinin sertlik ölçüm sonuçları.....	78
11.7. Kesme Test Sonuçları	80
11.8. Kaynak Bölgesinin Mikroyapı İncelemeleri	83
12. SONUÇ VE ÖNERİLER	91
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Türkiye alüminyum üretimi, tüketimi, ithalatı, ihracatı.....	4
Çizelge 3.1. α ve β - Si_3N_4 birim hücrenin parametrelerinin karşılaştırılması	9
Çizelge 7. 1. Bazı takviye elamanlarının özellikleri	35
Çizelge 10.1. α - Si_3N_4 tozun özellikleri.....	61
Çizelge 10.2. Mekanik alaşımlama deney parametreleri	62
Çizelge 11.1. Presleme sonrası ham yoğunluk değerleri	75
Çizelge 11.2. Sinterleme Sonrası Yoğunluk	76
Çizelge 11.3. Kompozit malzemenin sertlik ölçüm sonuçları	78
Çizelge 11.4. Kaynak bölgesi sertlik ölçüm sonuçları	79
Çizelge 11.5. Kaynak için hazırlanan kompozit malzemelerin kesme testi sonuçları	80
Çizelge 11.6. Numunelerin kaynak bölgesi kesme deneyi sonuçları.....	81

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Silikatlarda ve nitrür seramiklerdeki dörtlü birim yapı	10
Şekil 3.2. β - Si_3N_4 'ün kristal yapısı	10
Şekil 4.1. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü	13
Şekil 4.2. Bilyeler arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü.....	14
Şekil 5.1. Değirmende öğütme ile toz üretimi	20
Şekil 5.2. Darbe yöntemi ile toz üretimi	21
Şekil 5.3. Elektroliz yolu ile toz üretimi	22
Şekil 5.4. Dendritik yapının dağılması.....	22
Şekil 5.5. Küresel, pul ve karmaşık toz şekilleri.....	26
Şekil 5.6. Üretim metoduna göre toz şekilleri.....	27
Şekil 6.1. Sinterlemenin 4 safhası	29
Şekil 6.2. Sinterleme işlemi seması ve işlem sırası.....	31
Şekil 7.1. Kompozit malzemelerde yapı türleri	34
Şekil 8.1. Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı	38
Şekil 8.2. Arayer mekanizması	39
Şekil 8.3. Boşluk Mekanizması.....	40
Şekil 8.4. Yeralan mekanizması.....	41
Şekil 8.5. Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q) değişimi	41
Şekil 8.6. 1. Fick kanunu ile ilgili büyüklükler.....	43
Şekil 8.7. Akının basit gösterimi.....	44
Şekil 8.8. Kararsız Difüzyon.....	45

Şekil	Sayfa
Şekil 9.1. Difüzyon kaynağı için üç aşamalı mekaniksel model.....	48
Şekil 9.2. Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine etkisi.....	49
Şekil 9.3. Yüzey kusurları.....	52
Şekil 10.1. Mekanik alaşımlama düzeneği.....	63
Şekil 10.2. Difüzyon kaynağı için hazırlanmış numune boyutları.....	64
Şekil 10.3. Numunelerin üretiminde kullanılan kalıp ve zımbalar	65
Şekil 10.4. Sinterlemede kullanılan deney düzeneği	67
Şekil 10.5. Zımparalama aparatı	68
Şekil 10.6. Şematik olarak difüzyon kaynak fırını.....	69
Şekil 10.7. Kaynak işlemi için hazırlanan numunelerin şematik görünümü.....	69
Şekil 10.8. Numune kesme aparatı.....	70
Şekil 11.1. Saf Al toz tane boyutu dağılımı	71
Şekil 11.2. % 5 Si ₃ N ₄ ihtiva eden tozun tane boyut dağılımı.....	72
Şekil 11.3. %10 Si ₃ N ₄ ihtiva eden tozun tane boyut dağılımı.....	72
Şekil 11.4. % 15 Si ₃ N ₄ ihtiva eden tozun tane boyut dağılımı	73
Şekil 11.5. Si ₃ N ₄ miktarına bağlı olarak malzemenin ham yoğunluk değerlerindeki değişim	75
Şekil 11.6. Sinterleme sonrası yoğunluk ile ham yoğunluk arasındaki fark.....	77
Şekil 11.7. Kompozit malzeme sertlik ölçüm grafiği	79
Şekil 11.8. 640 °C’de 120 dk kaynatılan numunelerin kaynak bölgesi sertlik ölçüm grafiği	79
Şekil 11.9. Kaynak için hazırlanan kompozit malzemelerin kesme testi grafiği	80
Şekil 11.10. Al + % 10-15 Si ₃ N ₄ ihtiva eden kompozit malzemenin difüzyon kaynağı sonrası kesme testi grafiği (Süre : 60 dk)	81

Şekil	Sayfa
Şekil 11.11. Al + % 10-15 Si ₃ N ₄ ihtiva eden kompozit malzemenin difüzyon kaynağı sonrası kesme testi grafiği (Süre : 90 dk)	82
Şekil 11.12. Al + % 5-10-15 Si ₃ N ₄ ihtiva eden kompozit malzemenin difüzyon kaynağı sonrası kesme testi grafiği (Süre : 120 dk).....	82

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 10.1. Hassas terazi	66
Resim 11.1. Saf Al toz tane tane şekli	74
Resim 11.2. Al-% 5 Si ₃ N ₄ toz tane boyutu görünümü	74
Resim 11.3. Al-% 10 Si ₃ N ₄ toz tane boyutu görünümü	74
Resim 11.4. Al-% 15 Si ₃ N ₄ toz tane boyutu görünümü	74
Resim 11.5. Al-% 5 Si ₃ N ₄ oranındaki ana kompozitin yapısal görünümü	77
Resim 11.6. Al-% 10 Si ₃ N ₄ oranındaki ana kompozitin yapısal görünümü	78
Resim 11.7. Al-% 15 Si ₃ N ₄ oranındaki ana kompozitin yapısal görünümü	78
Resim 11.8. %5 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 60 dk)	83
Resim 11.9. %5 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 120 dk)	84
Resim 11.10. %10 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 60 dk)	84
Resim 11.11. %10 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 120 dk)	85
Resim 11.12. %10 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 60 dk)	85
Resim 11.13. %10 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 120 dk)	86
Resim 11.14. %10 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 60 dk)	86
Resim 11.15. %10 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 120 dk)	87
Resim 11.16. %15 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 60 dk)	87

Resim	Sayfa
Resim 11.17. %15 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 120 dk)	88
Resim 11.18. %15 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 60 dk)	88
Resim 11.19. %15 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 120 dk)	89
Resim 11.20. %15 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 60 dk)	89
Resim 11.21. %15 Si ₃ N ₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 120 dk)	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simge ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

H	Yükseklik
B	Beta
A	Alfa
Q	Aktivasyon Enerjisi
Atm	Atmosfer
A°	Angstrom

Kısaltmalar

Açıklama

MA	Mekanik Alaşımlama
MMK	Metal Matrisli Kompozit
SMK	Seramik Matrisli Kompozit
HIP	Sıcak İzostatik Presleme
CIP	Soğuk İzostatik Presleme
HMK	Hacim Merkezli Kübik
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
TM	Toz Metalurjisi
TTBOD	Toz Tane Boyutu Ortalama Değeri
ODS	Oksit Dağılımla Güçlendirilmiş
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
Akb	Atomik kütle birimi

1. GİRİŞ

Alüminyum, hafif olmasından, kolay şekillendirilebilmesinden, oksidasyon direncinin iyi olması ve benzeri üstün özelliklerinden dolayı çok geniş kullanım alanları olan önemli bir metaldir. Alüminyumun mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmeye yönelik şimdiye kadar pek çok araştırma yapılmıştır. Bu yönde yapılan çalışmaların en önemli bölümünü çeşitli seramik esaslı malzemeler katılarak oluşturulan alüminyum matrisli kompozit malzemeler oluşturmaktadır. Bu uygulamalar eriyik yöntem ve toz metalurjisi yöntemi (katı yöntem) olmak üzere iki şekildedir. İlk uygulama sıvı alüminyum içerisine katı halde seramik esaslı ikinci bir fazın katılması şeklindedir. İkinci yöntemde ise alüminyum ve seramik tozun birbiri içerisine katı halde katılarak toz metalurjisi metoduyla kompozit malzemenin üretimi şeklindedir. Üretilen kompozit malzemenin mukavemeti üzerine etki eden en önemli etkenlerden biride takviye elemanının matris yapı içerisindeki dağılım şeklidir. Bu nedenle gerek sıvı gerekse katı yöntemle kompozit üretiminde temel hedeflerden biride ikincil fazın matris yapı içerisindeki homojen dağılımını sağlamaya yöneliktir (1). Bu çalışmada α -Si₃N₄ ve Al tozlarının birbiri içerisine karıştırılması MA yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

Difüzyon kaynağı, özellikle uzay ve nükleer enerji alanında geniş çapta kullanılan bir kaynak yöntemidir. Prensibi çok eskiden beri bilinmesine rağmen, uygulaması son yirmi beş yıl içerisinde hız kazanmıştır.

Difüzyon kaynağı, birbirleri ile temasta olan yüzeyler arasında minimum makroskobik deformasyon ile belirli bir süre ısı ve basınç uygulayarak kontrollü difüzyonla oluşturulan katı hal (faz) kaynağıdır. Bu tanımdan görüleceği üzere, difüzyon kaynağının birinci aşaması, birleştirilecek parçaların genelde bir vakum ortamında ısıtılması ve basma kuvvetinin uygulanmasıdır. İkinci aşamada ise metal atomlarının bir parçadan diğerine yayınması ve kuvvetli bir bağın oluşmasıdır. Bazı hallerde ince bir metal ara tabaka'da kullanılmaktadır. Difüzyon kaynağında işlemin düşük sıcaklıklarda yapılması, birleştirilecek parçalardaki deformasyonun çok azalması ve farklı metal ve alaşımlarının birleştirilebilmesi donanımlarının basitliği

bu yöntemin avantajlarıdır. İşlemin yavaş oluşu, büyük parçalara uygulanmasının zorluğu ve tahribatsız kontrol olanağının da sınırlı oluşu dezavantajlarını teşkil eder (2).

Difüzyon kaynağı mekanizmasıyla ilgili birbirinden farklı bir çok model ileri sürülmüştür. Bunun sebebi ise sınırlı bir süre için basınçla ısıнын birlikte uygulanmasıyla bağ oluşturma mekanizmalarının oldukça karmaşık olmasıdır. Bu konu Salehi tarafından 1990 yılındaki çalışmasında detaylı olarak incelenmiş ve tartışılmıştır.

Bu konuda ilk teorik yaklaşım 1944 yılında Kinzel tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra 1965 yılında Gerken ve Owczarski üç safhalı bir mekanizma ileri sürmüşlerdir. Sonraki yıllarda Schwartz, King ve Owczarski birbirleriyle aynı olan bir model geliştirerek kendi modellerinin son safhalarıyla, Gerken ve Owczarski modelinin ilk safhasını birleştirmişlerdir. Bu modele göre ilk safhayı, birleştirilecek yüzeye basınç altında ilk temas ve sürünme meydana getirmektir. Bağlantı ara kesitinde esas itibariyle boşluklar tane sınırı olarak tanımlanmıştır, ikinci safhada, birinci aşamada yok edilmeyen ara kesit boşlukları difüzyon yoluyla yok edilmekte ve ara kesit tane sınırları daha düşük bir enerji seviyesine, yani ara kesit düzlemi dışına göçmektedir. Buradaki hakim mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Son safha ise, tane sınırı içindeki boşlukların hacim difüzyonuyla doldurulmasıdır (2).

Mc Keag, saf titanyum ve bakır difüzyon çiftini incelemiş ve altı safhalı bir mekanizma ortaya atmıştır. Bu mekanizmaya göre birinci safhada, sıcaklık altında ve yüzey pürüzlerinin teması esnasında, metal oksitleri çözünmekte ve ara kesitin her iki tarafında yeniden kristalleşmiş ince bir tabaka meydana gelmektedir. Enerji engelini kıran bu tabakadır. İkinci safhada, daha kalın bir tabaka yeniden kristalleşmektedir. Üçüncü safhada ana metal yeniden kristalleşirken daha alt tabaka kristalleri yok edilir. Dördüncü aşamada ara kesitleri daha önce kristalleşen taneler yok olurken, küçük fakat görülebilir boşluklar oluşur. Beşinci safhada ara kesitteki boşlukların sayıları azalırken, boyutları büyür. Altıncı safhada orijinal ara kesit düzleminde tane sınırı göçü ve tane büyümesi başlar (2).

Araştırmacılar, başlangıç safhasında plastik deformasyonun, birleşecek yüzeyleerin büyük bir kısmı temas ettiği zaman ise, yüzeyleden kaynaklanan ve ara yüzeyle mekanizmalarının etkili olduğu konusunda hem fikirdirler. Sıvı faz kütle transferi, ancak yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı zaman söz konusudur (2).

Yapılacak olan tez çalışmasında alüminyum (Al) ile silisyumnitrür (Si_3N_4) malzemelerinden mekanik alaşımlama yöntemi ile kompozit bir malzeme üretilerek üretilen bu malzemenin difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliği araştırıldı.

2. ALÜMİNYUM VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Alüminyum

Alüminyum demirden sonra en fazla kullanılan bir metal olmasına rağmen tarihçesi çok yenidir. 1886 yılında, Fransa’da Paul Heroult ve ABD’de Charles Martin Hall birbirinden habersiz olarak ekonomik metotlarla üretimini başarmışlardır. Böylece düşük maliyetle üretimi sağlanmış ve bu tarihten itibaren alüminyum kullanımında büyük aşamalar kaydedilmiştir (3). Günümüzde çelikten sonra en çok tüketilen metalik malzeme alüminyum ve alaşımlarıdır. Alüminyum diğer metaller ile birleşmiş olarak yer kabuğunun % 8’ini oluşturmaktadır (4).

Oksijene karşı aşırı ilgisi nedeni ile çelik üretiminde deoksitan element olarak kullanılır. Alüminyum iyi bir iletken olduğundan elektrik iletkenliği gerektiren yerlerde yaygın olarak kullanılır (3). Fakat saf alüminyum gayet yumuşak ve demirden yaklaşık üç kat daha hafiftir. Diğer metallerle alaşımlandırıldığında, yoğunluğu az artmasına karşılık mekanik dayanımda önemli oranda artışlar meydana gelmektedir (4). Tavlanmış durumda çekme gerilmesi 90 N/mm^2 ’den fazla değildir. Bu nedenle mühendislik malzemesi olarak alaşımlanmış durumda kullanılır (5, 6).

Alüminyum yüzyıl içinde kendisinden binlerce yıl öncesinden değeri bilinen, demir ve bakır gibi metallerin kullanılma hızından çok daha büyük bir kullanılma hızı ile demir-çelik dışında en çok üretilen ve tüketilen metal olmuştur. 1904 yılında 10 000 ton olan dünya yıllık üretimi, 1915 yılında 100 000 ton, İkinci Dünya Savaşı’nın getirdiği büyük tüketimle 1941’de 1 000 000 ton sınırını aşmıştır (7).

Çizelge 2.1. Türkiye Alüminyum Üretimi , Tüketimi , İthalatı ve İhracatı (8)

Yıllar	Üretim(Ton)	İthalat (Ton)	İhracat (Ton)	Tüketim (Ton)
1997	62.020	237.514	71.893	227.641
1998	61.803	234.701	107.259	189.245
1999	61.705	219.114	107.545	173.274

2.2. Alüminyumun Özellikleri

2.2.1. Saf alüminyum

Alüminyum çeliğin özgül ağırlığının yaklaşık olarak 1/3'ü değerinde bir özgül ağırlığı olan, gümüş beyazı renginde bir metaldir. Bir metal ne kadar saf olursa, onun mukavemeti o kadar az, fakat şekil değiştirilebilirliği o kadar kolay olur. Alüminyum havada kullanılması halinde derhal yeniden teşekkül eden, sızdırmaz, sıkı tutunan bir oksit tabakası ile kaplanır. Bu oksit tabakası metale, deniz suyuna karşı da direnç gösterme kabiliyeti kazandırır (4).

Saf alüminyum, özgül ağırlık, elektrik ve ısı iletkenliğinin büyük olması, ayrıca korozyona karşı dayanıklılık özellikleri, onun bazı teknik alanlarda kullanımını değerli hale getirir. En saf alüminyum; % 99,99 saflıktaki alüminyum, izabe alüminyumun özel rafinasyonu veya hurda alüminyumlardan elde edilir. Saf alüminyumun özelliklerini en fazla etkileyen katkı elemanları, silisyum, demir, bakır ve çinko gibi katkı elemanları etkiler. Artan katkı elemanları miktarına bağlı olarak mukavemet ve yüzde uzama oranı artarken, elektrik iletkenliği azalma göstermektedir (7, 9).

2.2.2. Alüminyumun kimyasal özellikleri

Alüminyum soy olmayan metallerden olmasına rağmen, yüzeyinde çok ince fakat yoğun bir oksit tabakasının bulunması, onu kimyasal etkenlerden özellikle korozyona karşı çok iyi korumaktadır. Bu tabaka alkellerden ve klordan kolayca etkilenebilmektedir. Anotlama metodu ile yüzey dayanımı oldukça artırılabilir. Saf alüminyum beslenme ve gıda maddeleri endüstrisinde, büyük mutfak aletleri imalatında paketlenme amacıyla ve kimyasal maddeler için depo olarak kullanılmaktadır. Çeşitli alüminyum alaşımları da uygun ısıl işlemler ile alüminyum şartlarına, deniz suyuna ve diğer korozyon maddelere karşı dayanıklı hale getirilir (10). Alüminyum hava şartlarına dayanıklı, düz çatı uygulamaları, temel

suyuna karşı izolasyon, gemi ve uçak imalatında kullanılır. Yüksek mukavemetli fakat atmosfer şartlarına karşı dayanıksız olan alaşımların kaplanması için kullanılır (7, 11).

2.2.3. Alüminyumun fiziksel özellikleri

Saf alüminyumun bazı fiziksel sabitleri aşağıda verilmiştir.

Atom ağırlığı	= 26,97 akb (atomik kütle birimi)
Yoğunluk	= 2,7 g / cm ³
Atom çapı	= 1,430 Å
Kafes sistemi	= YMK
Ergime sıcaklığı	= 660 °C
Buharlaşma sıcaklığı	= 2327 °C
Özgül ısı	= 0,214 cal / g
Isı iletme kabiliyeti	= 0,55 cal / °C.s.cm
Lineer genişleme katsayısı	= 26,6 x10 ⁻⁶ / °C
Elastisite modülü	= 72200 N / mm ²
Elektrik öz direnci (20 °C’de)	= 0,0266 mm ² / m
Elektrik iletkenliği (20 °C’de)	= 37,6 m / mm ²

2.2.4. Alüminyum alaşımları

Ticari olarak sadece yüksek elektrik iletkenliğinin istendiği uygulamalarda kullanılan saf alüminyum, oldukça yumuşak ve düşük dayanımlıdır. Mekanik özelliklerini iyileştirmek için, alüminyum matris içerisine Cu, Si, Mg, ve Zn gibi alaşım elemanları ilave edilir. Bu elemanların çoğu alüminyumu alaşımlandırarak genelde çökeltme sertleşmesi mekanizması ile mukavemet değerlerini önemli ölçüde arttırırlar. Çökeltme sertleşmesi demir ve demir dışı malzemelerde uygulanıyor olmasına rağmen, en çok Al alaşımlarının güçlendirilmesinde uygundur diye kabul edilir. Yaşlanma sertleşmesi olarakta bilinen bu mukavemetleşme mekanizması, matris yapı içerisinde ısıtılma işlemi yoluyla, Al₂Cu₃, Al₃Mg ve Mg₂Si gibi sert kimyasal

bileşikler oluşturmaları ve bu bileşiklerin dislikasyon hareketlerini frenlemesi ile mukavemet değerlerinin artırılması şeklinde gerçekleşir (12, 13).

2.3. Alüminyum Matrisli Kompozit Malzemeler

Geliştirilmiş fiziksel mekanik özellikleri, malzeme ve enerji kazancı bakımından hafif olmaları nedeni ile Metal Matrisli Kompozitler (MMK), yeni malzemeler olarak dikkati çekmektedir. Bu özelliklerinin yanında iyi sürtünme ve aşınma özellikleri nedeni ile aşınmaya karşı uygulamalarda sürtünen ve aşınan bölgelerin veya parçanın tamamının bu malzemelerden yapılması giderek yaygılaşan metal matrisli kompozit uygulamalarındandır (14).

Alüminyum hafif bir metal olması nedeniyle, son yıllarda alüminyum matrisli kompozitler üzerinde yoğun bir araştırma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda amaç, hafif ve üstün özelliklere sahip yapılar elde etmektir. Alüminyum içerisine katılan SiC, TiC, Al₂O₃ v.b. küresel seramik parçacıklar çekme dayanımını, elastiklik sabiti, aşınma dayanımı ve özellikle yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri olumlu yönde etkilemektedir (7,15).

2.3.1. Alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde çok sayıda değişik yöntem mevcut olmasına rağmen, bu yöntemlerin bir çoğunda kompozit malzeme üretiminin en önemli sorunu matris ve takviye elemanının birbirini ara yüzeyde yeterince ıslatamamasıdır. Bu problemlere takviye fazın eriyik metal içerisine dışarıdan ilave edildiği tüm kompozit üretim yöntemlerinde rastlanılmaktadır ve mekanik özellikler bu problemin varlığından dolayı olumsuz etkilenmektedir (5, 16).

Günümüze kadar yapılan çalışmalar ve elde edilen deneyimler yüksek sıcaklıklardaki dayanımın, yapıdaki çökelti yerine, ince dağılımlı parçacıklarla sağladığını göstermektedir. Ancak bu yapıyı geleneksel döküm yöntemleri ile elde etmek mümkün olmamaktadır. Takviye parçacığının boyu, hacimsel oranı, homojen

dağılımdaki problemler ile parçacık – matris ara yüzeyinde meydana gelen tepkimeler, döküm yerine toz metalurjisi teknikleri ile rahatlıkla aşılabilmektedir (17).

3. SİLİSYUM NİTRÜR (Si_3N_4)

Si_3N_4 adından ilk defa 1857 yılında Devile ve Wohler bahsetmiştir (18). Fakat seramik malzeme olarak geliştirilmesi 1960'lerden sonra olmuştur (19). Silisyum nitrür sahip oldukları yüksek sıcaklıklardaki mekanik ve termomekanik özelliklerinden dolayı nitrür seramikler içerisinde en fazla öneme sahip teknolojik seramik malzemedir. Sahip olduğu üstün özelliklerinden ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklara kadar koruyabilmesinden dolayı Si_3N_4 seramik malzemelerin kullanım alanları her geçen gün daha da artmaktadır (20, 21).

Toz halinde üretilen Si_3N_4 malzemeler α ve β - Si_3N_4 olmak üzere iki farklı polimorfik yapıda kristalleşmektedir ve her iki yapıda hegzagonal kristal kafes yapısına sahiptir. Uzun yıllar α - Si_3N_4 , β - Si_3N_4 'ün bir silisyum oksinitrürü olarak kabul edildi. Ancak daha sonra α - Si_3N_4 'ün gerçek bir polimorf olduğu ve β - Si_3N_4 arasındaki 30 kJ/mol kadar bir entalpi farkı tespit edildi. α - Si_3N_4 yapısal olarak β - Si_3N_4 'e çok benzemektedir. α - Si_3N_4 'ün kimyasal formülü, β - Si_3N_4 'ün kimyasal formülünden $\text{Si}_{11.4}\text{N}_{15}\text{O}_{0.3}$ den $\text{Si}_{11.5}\text{N}_{15}\text{O}_{0.5}$ şeklinde değişim göstermektedir. β - Si_3N_4 yapıya göre α - Si_3N_4 yapıda her 30 N atomundan birinin yerini oksijen atomu almış durumdadır (20, 21, 22, 23, 24). Kristal kafes yapı aynı olmasına rağmen bu durum kafes yapının bazı parametrelerinde küçük değişimlere neden olmaktadır Çizelge (3.1).

Çizelge 3.1. α ve β - Si_3N_4 birim hücrenin parametrelerinin karşılaştırılması (18)

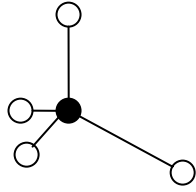
Silisyum Nitrür	Birim Hücre	a (Å)	c (Å)	c/a	V (Å ³)	Yoğunluk g cm ⁻³
α	$\text{Si}_{12}\text{N}_{16}$	7.748	5.617	0.7250	292.0	3.184
β	Si_6N_8	7.608	2.9107	0.3826	145.9	3.187

α - Si_3N_4 'e göre β - Si_3N_4 daha kararlı yapıda olduğundan yaklaşık 1400 °C üzerindeki sıcaklıklarda sürekli olarak α - Si_3N_4 'den β - Si_3N_4 ' e bir dönüş vardır ve

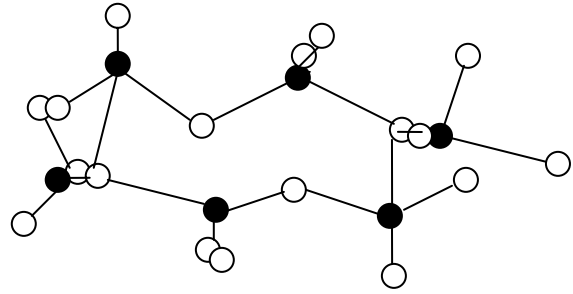
bu dönüşüm tersinir değildir (18, 21). Si_3N_4 'ün birim yapısı Si_3N_4 dörtlüsünden oluşmaktadır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Bu yapıda kendi içinde üç boyutlu bir ağ oluşmaktadır. Yapı içerisindeki her azot atomu üç ayrı silisyum atomu ile bağlanmaktadır (20, 21, 25, 26, 27).

● Si

○ N



Şekil 3.1. Silikatlarda ve nitrür Seramiklerdeki dörtlü birim yapısı



Şekil 3.2. β - Si_3N_4 'ün kristal yapısı

Her iki yapıda da yoğunluklar birbirine yakın olup ($3,20 \text{ g/cm}^3$), α - Si_3N_4 'den β - Si_3N_4 'e dönüşüm $1300 - 1450 \text{ }^\circ\text{C}$ aralığında olmaktadır (20, 26, 27).

4. MEKANİK ALAŞIMLAMA

Mekanik alaşımlama (MA) ısıtıl veya kimyasal işlemlere başvurmaksızın metallerin alaşımlanması işlemidir. Bu işlem asal bir atmosfer ortamında yoğun bir öğütme işlemi ile sürekli olarak plastik deformasyon, kırılma soğuk kaynak ve yeniden kırılma ve kaynaklanma ile çok ince ve son derece homojen yapılar üretilmesi işlemidir (28).

Homojen bileşimli tozların öğütülmesi genellikle saf metal, metaller arası bileşikler veya alaşımlanmış tozlar gibi malzemeler için homojenizasyona ihtiyaç duyulmadığından öğütme terimi kullanılmaktadır. Bir amorf fazı veya metaller arası bileşik karışımı üretmek için, metaller arası bileşik malzemeleri uzun süreli deforme etme işlemi mekanik karıştırma olarak adlandırılır. Mekanik öğütmenin yada mekanik karıştırmanın mekanik alaşımlamaya göre avantajı ise mekanik olarak ihtiyaç duyulan diğer dönüşümlere veya sadece partikül boyutundaki azalma, alaşımlamada ihtiyaç duyulan işlem süresinin kısa oluşudur (29).

MA. hemen hemen her kompozisyonda toz üretiminde kullanılır. MA 1960' lardan beri oksit dağılımıyla mukavemetlendirilmiş (ODS) süper alaşımlarda yüksek sıcaklıkta sürünme dayanımını iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem tek alaşım kompozisyonunda, tek kalite ve arzu edildiğinde yeni alaşımların geliştirilmesinde çok kullanışlıdır (30).

MA işlemi ile yakın ortam sıcaklıklarında çok homojen tozlar üretilir. MA yönteminde bir tozun ortalama boyutu, boyut dağılımı şekli ve diğer nitelikleri işlem sırasında kontrol edilebilir. MA işlemi doğrudan kimyasal sentez yoluyla veya homojen bir dağılım (karıştırma) olmayan ingot metalurjisi yoluyla veya çok aktif elementlerin alaşımlarının üretimi için bir avantaj sağlamaktadır. MA ile elde edilen çok ince tane mikro yapılar sebebiyle olağan dışı özellikler ve bunların tipik sonuçları üretilir olduğu görülmüştür. MA küçük miktarlarda veya hızlı prototip için standart dışı bileşimler veya standart bileşimin hızlı bir şekilde üretilmesine müsaade eder (28).

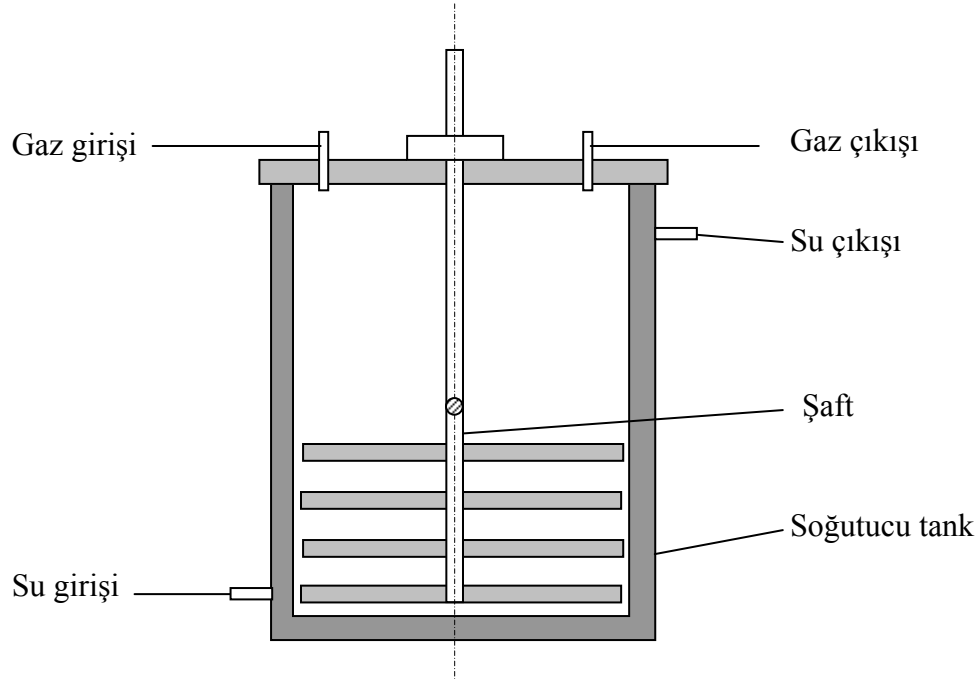
MA işleminin avantajlarının yanı sıra yüksek maliyet, aşırı uzun karıştırma süresi ve özellikle oksijen içeren yabancı maddeler başlıca problemler olarak söylenebilir. Burada yabancı madde problemini asal atmosfer kullanarak ve diğer takım malzemelerini dikkatlice seçerek veya karıştırıcıyı öğütülecek aynı malzeme ile kaplamayla giderilebilir. Uzun karıştırma süresi maalesef bütün karışırmaların bir karakteristik özelliğidir. Tipik bilyeli karışırmalarda her şarj (karıştırılan toz miktarı) için 10-50 saattir. Bazı durumlarda karıştırma süresi birkaç yüz saatten fazla olabilir. MA ile üretilen malzemelerin kullanım özellikleri göz önüne alındığında maliyetinin de diğer alaşımlara nazaran çok yüksek olmadığı görülmektedir (31).

Mekanik alaşımlama alışlagelmiş metotların aksine tamamen bir katı-hal işlemi olup sert refrakter oksit partiküllerinin yumuşak matris içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlamakta ve Al, Ti gibi reaktif elementlerin alaşımda bulunmasına müsaade etmektedir. Alaşımlama için değirmene konan metal tozları yüksek hızda çarpışan bilyelerin arasında kalarak kaynamakta, kırılmakta ve tekrar kaynayarak refrakter oksit partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılımı sağlanmaktadır. Yapının homojenliği katılan tozun durumu, öğütme zamanı, koruyucu atmosfer, bilye çapı ve değirmenin dönme hızı gibi birçok parametreye bağlıdır. Mekanik olarak alaşımlanan tozlar daha sonra birleşme, sıcak haddelme ve ikinci yeniden kristalleşme işlemine tabi tutulur ve iri, uzun taneli malzemeler elde edilir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık performansını arttırmak için özellikle uzay sanayi ve gaz türbünü uygulamaları için geliştirilmiş olmalarına rağmen oldukça yaygın bir kullanım alanını bulmuşlardır (32, 33).

4.1. Mekanik Alaşımlama İşlemi

Mekanik alaşımlama işlemi, yüksek enerjili atritör kullanarak homojen dağılımlı oksit veya karbür içeren katı hal kompozit metal tozu üretim metodudur. Üretimi istenen alaşıma ait metal tozları Şekil 4.1’de görülen yüksek enerjili atritör içerisine bilyelerle birlikte konur. Bu tozlarda en az bir tanesi bağlayıcı olması bakımından yumuşak olmalı diğeri ise kırılğan metal veya metal dışı tozlar olmalıdır. Sert ve kırılğan tozlar matris içerisinde takviye elemanı olarak bulunmaktadır. Ayrıca reaktif

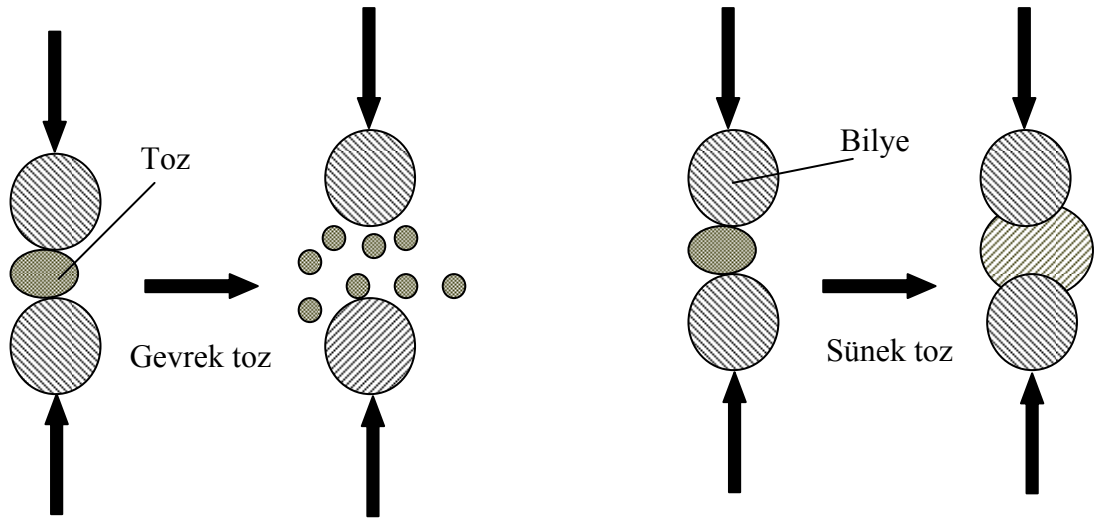
elementlerden Al ve Ti ilave edilir. Bu partiküller elementel veya doğrudan oksit olarak katılır. Mekanik alaşımlama değirmeni genelde su soğutmalı ve öğütme sırasında meydana gelecek oksitlenmeyi önlemek için, alaşımlama Ar, He, H veya N gazı ortamında kullanılır (32, 34).



Şekil 4.1. Yüksek enerjili atritörün şematik görünümü

4.2. Mekanik Alaşımlama Mekanizması

Mekanik alaşımlama işlemi için yüksek enerjili atritör çalıştırıldığında, yüksek bir enerji ile bilyeler birbirine çarpar ve çarpmanın etkisi ile bilyeler arasında kalan tozlar ezilir ve aynı zamanda sert oksit partikülleri daha küçük parçalar halinde kırılarak yumuşak matris içerisine gömülür. Şekil 4.2’de bilyelerin çarpışması sonucu ezilen ve birbirine kaynayan tozlar görülmektedir. İşlem devam ettikçe tozlarda pekleşme, kırılma ve soğuk kaynama devam eder. Çok kısa bir sürede dahi karışım elde edilir ancak homojen değildir. Artan öğütme zamanına bağlı olarak katmanlı yapı kaybolur ve homojen bir yapı elde edilir. Elektron mikroskobu altında lamelli yapıyı tespit etmek mümkündür. Ancak kimyasal homojensizliği tespit etmek oldukça zordur (35, 36).



Şekil 4.2. Bilyeler arasında ezilen kompozit tozların şematik görünümü

Bu katı hal işleminde en uygun alaşımı elde edebilmek için bir çok faktörün çok dikkatli seçilmesi gerekmektedir. Bu faktörler arasında ilk kullanılan tozun sertliği, büyüklüğü, saflığı kullanılan bilye çapı ve atritör hızı verilebilir. Öğütme sırasında atmosfer ve uygun öğütme süresi homojen olmayan toz üretimine sebep olacağı gibi uzun öğütme süresi ise tozların aşırı sertleşmesine neden olur ve daha sonra yapılacak termomekanik işlemi zorlaştırır (37, 38).

4.3. Mekanik Alaşımlama' nın Avantajları

- Yüksek sıcaklık dayanımı birden fazla mekanizma ile oluşmaktadır. Y_2O_3 gibi refrakter oksit partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılımı ile sürünme dayanımı artmakta, ikinci yeniden kristalleşme işlemi ile de oluşan iri ve uzun tane yapısı yüksek sıcaklıklarda tane sınırı kaymasını önleyerek dayanımı arttırmaktadır.
- Yapıda tamamen homojenlik elde edilebilir, böylece segregasyon problemi ortadan kaldırılır.
- Dış etkenlere karşı dayanıklı malzeme elde etmek mümkündür.

- Diğer üretim metotlarının aksine termodinamik olarak alaşımlamada kompozisyon sınırlaması yoktur.
- Bir seferde fazla miktarda toz üretmek ve alaşımlamak mümkündür.
- Hassas toleranslar dahilinde malzemeler üretilebilir.
- Termomekanik işlem sırasında tane yapısının kontrolü ile değişik özellikte malzeme elde edilebilir (32).
- Mekanik alaşımlama işlemi, gelişmiş malzemelerin tasarlanmasını sağlayan birkaç yeni işleme tekniklerinden bir tanesidir.
- ODS malzemeler, türbin paletlerini üretmek için geliştirilen malzemelerdir. Bu malzemelerin üretimi, mekanik alaşımlama ile yeni malzeme üretiminde kullanılan özel bir metottur.
- Mekanik alaşımlama temelde katı malzemelerin bilyeli bir değirmende asal bir ortamda işlendiği bir toz metalurjisi tekniğidir, işlem içerisinde sıvılar bir kontrol elemanı olarak bulunabilirler.
- Mekanik alaşımlama işlemi bir katı hal difüzyon işlemi olmasından dolayı alaşımlar sıvı halde bulunmayan karışımlardan yapılabilirler.
- Yeni mikro yapılar kullanılarak aşırı kararlı alaşımlar üretilebilmektedir.
- Matris içerisine dağılmış oksit parçacıklarının yüksek sıcaklıkta kararlı olması gerekmektedir. MA metodu ile Y_2O_3 matrise genellikle parçacık olarak katılmakta ve bu da yeterli dayanımı sağlamaktadır.
- Oksit parçacıklarının diğer bir avantajı da toparlanma ve yeniden kristalleşmeyi engellemesidir. Bu sayede oldukça iri uzun ve birbirine geçmiş taneler elde etmek mümkündür, iri tane yapısı, ikinci yeniden kristalleştirme işleminden sonra ortaya çıkmakta ve malzemenin yüksek sıcaklıkta tane sınırının kaymasını engellemektedir.
- Mekanik alaşımlama metodu ile elde edilen tozların yapısı tamamen homojen olarak elde edilebilir, böylece segregasyon problemi ortadan kaldırılmış olur.
- Diğer üretim metotlarının aksine termodinamik olarak, alaşımlamada kompozisyon sınırlaması yoktur. Böylece çok geniş ve alışılmadık dışındaki bileşimlerde malzeme üretmek mümkündür.

- Endüstriyel uygulamalar için karmaşık şekilli ve hassas toleranslar dahilinde malzeme üretimi mümkündür. 0,1 mm et kalınlığında sac levha ve 0,4 mm kalınlığında boru malzeme üretilmektedir.
- Fabrikasyonu kolaydır.
- Malzemelerin ve alaşımların, üretim maliyetlerini azaltarak direkt olarak üretilmesini sağlar.
- Performans / birim fiyat dikkate alındığında ucuz malzeme üretimini mümkün kılmaktadır (39).

5. TOZ METALURJİSİ

Toz metalurjisi, metalik toz veya bu tozların şekillendirilip sinterlenmesiyle elde edilen ürünlerin imalatını kapsar. Başka bir deyişle toz metalurjisi, metal tozlarının, kendine has yöntemler ile küçük, girintili, çıkıntılı, diğer klasik metalurji yöntemleri ile üretilmesi zor olan iş parçalarının seri olarak üretilmelerine olanak sağlayan toz malzeme teknolojisidir (40, 41).

Toz Metalurjisi ile şekillendirmenin ilk modern uygulamaları, I. Dünya Savaşı yıllarında başlamıştır. Gözenekli gereçler, mıknatıslar ve elektrik lamba flamanlarının üretimi bu yıllarda başlamış ve gelişmiştir. Otomobil sanayindeki gelişmelere paralel olarak toz metalurjisi üretim yöntemleri de artarak gelişmiştir. Günümüz endüstrisinde, bu yöntemle üretilen parçaların, özellikle şekil ve ağırlık bakımından sağladığı avantajlar nedeni ile tercih edilmesi, bu yönde üretim ve araştırma yapan kuruluşların sayısı artmıştır (42, 43). Ülkemizde 2005 yılında gerçekleştirilen IV. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, bu alandaki gelişmelerin daha da iyi olacağının bir göstergesidir.

Toz Metalurjisi (T/M) modern bir imalat yöntemidir ve ileri teknoloji malzemelerinin üretilmesine çok uygundur. Genelde küçük parçaların çok sayıda ve ekonomik üretimini sağlar. Parçaların özellikleri oldukça dar toleranslarda kontrol edilebilir. T/M'nin askeri uygulamaları iki ana gruba ayrılır. Birinci grup alışılmış T/M uygulamalarıdır. Metal veya alaşım tozları, çeşitli T/M teknikleri ile biçimlendirilirler ve böylece T/M bir parça üretilmiş olur. Bu gruba; çeşitli titanyum parçalar, mermi ve silah parçaları, askeri taşıtların parçaları, uçak parçaları (hafif alaşımlar, süper alaşımlar vb.) zırh deliciler ve benzerleri girer. İkinci grubu piroteknik uygulamalar oluşturur. Piroteknik uygulamalar, alışılmış T/M uygulamalarından oldukça farklıdır. Piroteknik uygulamalarda metal ve metal olmayan pek çok maddenin tozları çeşitli organik maddelerle karıştırılarak istenilen piroteknik bileşim elde edilir. Bu gruba; roket yakıtları (propellants), patlayıcılar (explosives), tutuşturucular (incendiaries), geciktiriciler (delays), ateşleyiciler (igniters), aydınlatma bombaları ve sinyaller, dumanlar (smokes) ve benzeri girer. Bu

uygulamalarda kullanılan metal tozu miktarı alışılmış T/M uygulamaları ile karşılaştırılabilir boyutlardadır. Uzay mekiğinin her fırlatılışında 160 ton alüminyum tozu yakılmaktadır (44).

T/M'de kullanılan metal tozları 200 μm 'den küçüktür ve her geçen yıl daha da küçülmektedir. Tozların üretiminde kullanılan teknikler metale göre değişmektedir. Başlıca sık kullanılan metal tozu üretim teknikleri atomizasyon, doğrudan indirgeme, elektroliz, çöktürme ve öğütmedir (45). Toplam üretilen tozun % 60'ından fazlası atomizasyon teknikleri ile üretilir. Parça üretmek için çeşitli tekniklerle tozlar pres kalıplarına sıkıştırılarak "briket" haline getirilir. Parçaların presten çıkmış "ham" halleri ile mukavemetleri çok düşüktür. Mukavemet kazandırmak için, indirgeyici gaz altında uygun sıcaklıklarda sinterlenir. Preslenmiş-sinterlenmiş parçaların yoğunlukları genellikle % 90'ı geçmez. Yüzey kaliteleri ve boyut toleransları talaşlı imalata göre çok iyidir. T/M parçaların yüksek mukavemetli olmaları istenirse sinterlemeden sonra dövülerek %100 yoğunluğa çıkarılmaları gerekir (46).

Talaşlı imalat gerektirmeyen parçalar, sert metaller, takım çelikleri, kendi kendini yağlayan burçlar, gözenekli ortamlar ve filtreler, sürtünme elemanları, elektrik kontak malzemeleri, grafit fırçalar ve mıknatıslar bunlardan bazılarıdır. Parça üretimi dışında pek çok uygulamada metal tozları doğrudan kullanılmaktadır. Kaynak elektrodu örtüsünde, diş dolgularında, fotokopi tonerinde, gıda maddelerinde, metalik boya ve yaldızlarda, sert yüzey kaplamalarında ve kimyasal reaksiyonlarda. ABD'de yıllık tüketilen metal tozu miktarı 400 bin ton civarındadır (47). Ülkemizde yıllık 5 bin ton civarında metal tozu tüketilmektedir ve henüz toz üretimi yapılmamaktadır (48).

5.1. Metal Tozların Üretimi

Metal tozların üretiminde çeşitli yöntemler vardır. Tozların imalinde kullanılan yöntemler, tozlara ait bazı karakteristik özellikleri de tayin eder. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır;

1. Mekanik yöntemler
 - a) Talaş kaldırma
 - b) Değirmende öğütme
 - c) Darbe yöntemleri
 - d) Mekanik alaşımlama
2. Elektroliz yolu ile üretim
3. Kimyasal yöntemler
 - a) Gaz fazı ile ayrıştırma
 - b) Termal ayrıştırma
 - c) Sıvı fazdan çökeltme
 - d) Gaz fazdan çökeltme
4. Atomizasyon yöntemi
 - a) Gaz atomizasyon
 - b) Su atomizasyon
 - c) Santrifüj atomizasyon

5.1.1. Mekanik yöntemler

Bu yöntemlerde darbe, sıkıştırma ve burma kuvvetleri ile karmaşık şekilli tozlar üretilir. Bu yöntemlerle en az maliyetle toz üretimi için, kayma sistemi az olan kimyasal bağları zayıf, karışık kristalli yapıya sahip malzemeler ile çok sert ve kırılgan olan metal alaşımları ve seramikler kullanılır. Sünük malzemeler pul şeklinde tozların üretilmesine neden olacağından, genellikle kolay parçalanan, gevrek malzemeler, bu metot ile tozu elde edilecek uygun malzeme grubunu teşkil ederler (49).

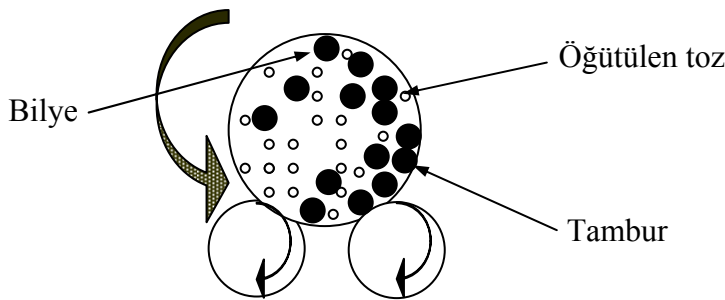
a) Talaş kaldırma yöntemi

Bu yöntemde yüksek karbonlu çelik tozları üretilir. Çeşitli talaş kaldırma yöntemleri

ile üretilen metal talaşı, kırma ve öğütme gibi işlemlerle inceltilip sonrada reaksiyona sokularak tozlar üretilir. Yeterli gevreklikte olmayan metal parçalar içerisine katık elemanı katılmak suretiyle gevrekleştirilir ve kırılabilirlik sağlanır.

b) Değirmende öğütme

Talaş kaldırma yöntemi ve diğer darbe yöntemleri ile elde edilen tozlar, genellikle köşeli veya pul şeklinde karmaşık görünüme sahiptir. Bu tozlar öğütülerek inceltilebilir. Öğütme işleminde, aşınmaya dayanıklı bilyeler ile birlikte iri taneli toz malzeme öğütücü değirmen içerisine konulur. Değirmen döndürülerek sert bilyeler ile toz malzemenin çarpışması sağlanarak iri taneli toz malzemenin daha ince hale gelmesi sağlanır. Şekil 5.1’de değirmende öğütme ile elde edilen toz üretim sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



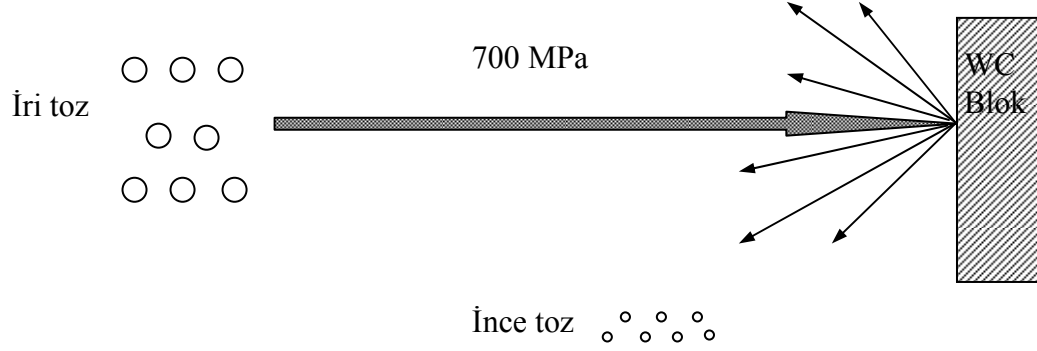
Şekil 5.1. Değirmende öğütme ile toz üretimi

Bu yöntem ile karmaşık şekilli ve soğuk deformasyon sertleşmesi görmüş malzeme tozu üretilir.

c) Darbe yöntemleri

Bu yöntem diğer yöntemlerle elde edilen iri taneli tozların tane boyutunu inceltmek amacıyla kullanılır. Bu yöntemlerde iri taneli tozlar yüksek bir basınç (700 MPa) altında sert bloğa (WC) çarptırılmak suretiyle toz tane boyutu inceltir. Çarpma etkisiyle meydana gelecek ısıdan dolayı tozlarda oksitlenme olacağı dikkate alınarak,

bu işlem koruyucu gaz atmosferi altında yapılmalıdır. Paslanmaz çelik tozları bu yöntemle elde edilir.



Şekil 5.2. Darbe yöntemi ile toz üretimi

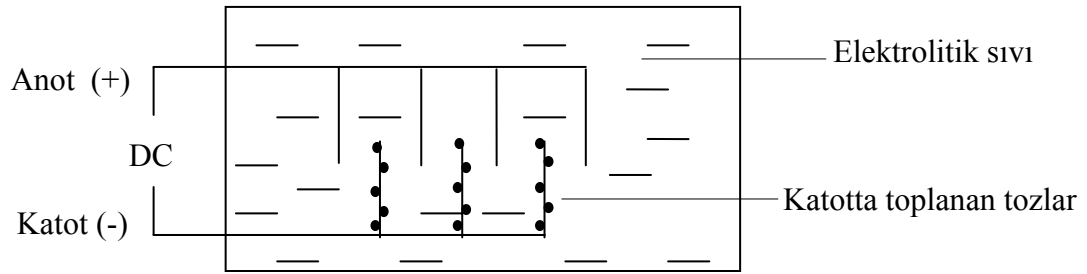
d) Mekanik alaşımlama

Mekanik alaşımlama yüksek enerjili atritör kullanılarak yapılan bir düşük sıcaklık alaşım sentezleme yöntemidir. Bu yöntemde iki yada daha fazla elementel toz birbiri içerisinde belli oranlarda karıştırılarak yüksek enerjili atritör içerisine konulur ve mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulur. Bu işlemde amaç sünek matris içerisinde sert oksit yada karbür oluşturarak, bu seramik fazın matris içerisinde homojen dağılımı sağlamaktır. Bu yöntemle aşırı miktarda deforme olmuş kompozit malzeme tozu elde edilir (36).

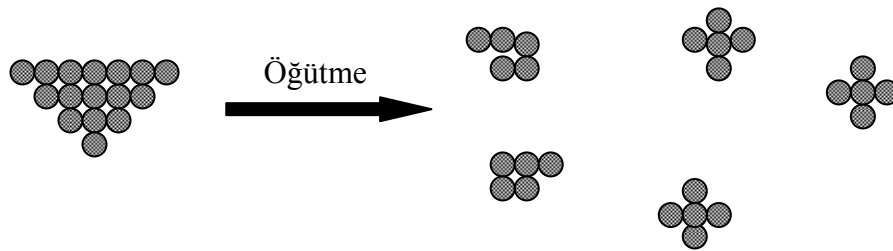
5.1.2. Elektroliz yolu ile üretim

Elektroliz yolu ile genel olarak bakır tozu üretilir. Bu yöntemle demir tozları elde etmek mümkün olmakla beraber, maliyetinin yüksek olması nedeni ile demir tozu üretiminde diğer yöntemler daha avantajlıdır. Bu metot da tozlar doğrudan elektrolitik banyoda çökeltilir yada iyi kırılabilme özelliğinde katot da toplanır. Bu

yöntemle üretilen demir veya bakır tozları elektrolitin bulunduğu tekne içerisindeki paslanmaz çelik olan katot da ortalama 48 saatte 2,5 mm kalınlığında toplanır. Katotta biriken Cu veya Fe tozları sıyrılarak alınır, yıkanır, kurutulur ve gerekirse öğütme işlemi yapılarak toz tane ebadı küçültülebilir. Bu yöntemle elde edilen tozlar indirgeyici gazlar ile tavlansak sıkıştırılabilme özellikleri artırılır. Bu yöntemle sadece saf element tozları üretilir, alaşım tozları üretilmez. Üretilen tozlar dendritik yapıya sahiptir (Şekil 5.4). Dendritik yapı tozların yüksek derecede üretiminde bu yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır (43).



Şekil 5.3. Elektroliz yolu ile toz üretimi



Şekil 5.4. Dendritik yapının dağılması

5.1.3. Kimyasal yöntemler

Bu yöntemler ile bütün metal tozları üretilir. Kimyasal yöntemlerde işlem parametrelerinin kontrolü ile istenilen şekilde ve ebatla toz üretilir.

a) Gaz fazı ile ayrıştırma

Bu yöntemde (Demir, Bakır, Tungsten, Molibden, vb.) malzeme oksitleri, redükleyici gazlar (Hidrojen veya katı karbon eriyiği) ile indirgenerek metal tozu haline getirilirler. Halen tungsten ve molibden gibi bazı metaller için tek üretim yolu olarak bilinir. Oksit ve karbonun maliyetinin düşük olması, gözenekli toz imal imkanı, oksit ve parçacık boyutunun kontrolü bu yöntemin avantajı olarak bilinirken, indirgeyici gazların maliyetinin yüksek olması, toz saflığının oksit saflığına bağlı olması, alaşım tozların üretim imkansızlığı bu yöntemin dezavantajı olarak bilinir (42).

b)Termal ayrıştırma

Bu yöntemle demir, nikel ve CO gazı etkisinde karbonillerini veren metallerin tozları yüksek saflıkta, düzgün dağılmış ve küresel olarak elde edilirler. Fe, Cu, Cr, Mg, Ni, Co uygun sıcaklıkta CO gazı etkisinde karbonille parçalanarak ve tane boyları 2–10 µm olan yeterince ince tane şekilli tozlardır.

c) Sıvı fazdan çökeltme

Çeşitli sıvılardan faydalanarak kimyasal yollarla metal tozları üretmek mümkündür. Metal iyonları kapsayan, nitratlar, klorürler ve sülfatlar gibi eriyiklerden daha az asal olan başka bir eleman ile kimyasal yer değiştirme suretiyle metal tozları üretilir.

Nikel tozları cevherden doğrudan çökeltme ile üretilirler. Cevherlerin saflaştırılması ile elde edilen sülfat eriyiği karıştırılmakta olan indirgeme otoklavına konulur ve ısınmakta olan eriyiğe nikel tozu ilave edilerek, 14 atm basınçta hidrojen gazı gönderilir. Karıştırmaya son verildiğinde nikel tozu otoklav dibine çöker. Bu yöntemle elde edilen tozlar % 99,8 saflıkta olup yüksek yoğunluk ve akma hızına sahiptir. Reaktif metaller erimiş tuz eriyiklerinden çökeltme ile de imal edilirler. Bu yöntemle toprak halinde, ince ve saflık oranı yüksek tozlar elde edilir (43).

d) Gaz fazdan çökeltme

Çeşitli gazlardan faydalanarak kimyasal yollar ile metal tozları üretmekte mümkündür. Metal ihtiva eden buhar fazlı bir malzeme tozu üzerinden geçirilerek esas malzeme buhar fazındaki metalin yerine geçerek metal tozun üzerine çöker. Demirli malzemeler Cr, Al, B, Ti, Mn, ile kaplanabilirken, Mo ise Ti, Zr, Cb ile kaplanabilir (49).

5.1.4. Atomizasyon yöntemi

Bir sıvı demetinin farklı boyutlarda çok sayıda parçacıklara bölünmesi olarak tanımlanan atomizasyon, metal tozların üretiminde etkin bir şekilde kullanılmakta olup, her türlü çelik, demir, bakır ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, çinko, kurşun ve kalay gibi metal ve alaşımlarında iyi sonuçlar verir.

Sıvı metalin gaz jeti ile parçalanması, gaz atomizasyonu, su jeti ile parçalanması ise su atomizasyonu olarak bilinir. En yaygın olarak kullanılan bu iki yönteme ilaveten merkezkaç kuvvetlerinin kullanılması olarak bilinen santrafuj atomizasyon, atomizasyon ile toz üretim tekniklerinden bazılarıdır (50, 51).

a) Gaz atomizasyonu

Gaz atomizasyonunda genellikle azot gazı kullanılır. Gaz atomizasyonu sıvı metal huzmesine, yüksek basınçlı gazın belli bir açı ile püskürtülerek huzmenin dağılımı ile sıvı metal damlacıkları elde edilmesi işlemidir. İki yada daha fazla ağızlık sıvı metalin akma eksenini etrafına eşit açıda yerleştirilir ve gaz jetleri ile sıvı metal huzmesi bir noktada kesişirler (52).

b) Su atomizasyonu

Atomizasyon yöntemleri içerisinde en çok kullanılanıdır. Sıvı metal, akış eksenini etrafına en az iki tane olmak üzere eşit açıda yerleştirilen su jetleri ile kesilir. Serbest

bir düşüşle akmakta olan metalin kesilmesi yassı huzmeli V-jetleri ile sağlanır.

c) Santrifüj atomizasyon

Bu yöntemde sıvı demetinin merkezkaç kuvvetlerinin yardımı ile parçalanması ve katılaşması ile metal tozları elde edilir. Santrifüj atomizasyon döner disk ve döner elektrot metodu olmak üzere iki şekilde yapılabilir.

Döner disk metodunda sıvı metal, dönmekte olan disk üzerine akıtılır. Dönmenin etkisi ile sıvı metal etrafa saçılır ve katılaşarak bir toplama kabında biriktirilir. Diskin hızı arttıkça elde edilen toz ebadı küçülür. Disk malzemesi sıvı metalin ısınıp alıp, katılaşmayı sağlaması bakımından genellikle bakırdan yapılır. Disk şekil olarak düz, çanak ve kanat gibi değişik şekillerde olabilir.

Döner elektrot modelinde ise bir ark plazma ile ısıtılan metal çubuğun çok hızlı devirle dönmesi ile ergimiş damlacıklar merkezkaç kuvvetleri etkisi ile savrularak katılaşır ve özel odalarda toplanır.

5.2. Metal Tozların Karakterizasyonu

Metal tozlarının üretim teknikleri tozlara ait bir çok özelliği tayin eder. Bu nedenle kullanım alanlarına göre değişik metotlarla üretilmiş tozlar, toz metal parçalarının üretiminde kullanılabilir. Bazı durumlarda bir tek toz metal parçanın üretiminde, farklı üretim yöntemleri ile hazırlanmış tozlar kullanılabilir. Ancak bu istisnai bir durumdur. Genelde bir toz metal parçanın üretiminde belli özelliklere sahip tozlar kullanılır. Metal tozların karakteristik özelliklerini, fiziksel ve kimyasal özellikler olmak üzere iki ana başlık altında incelemek mümkündür.

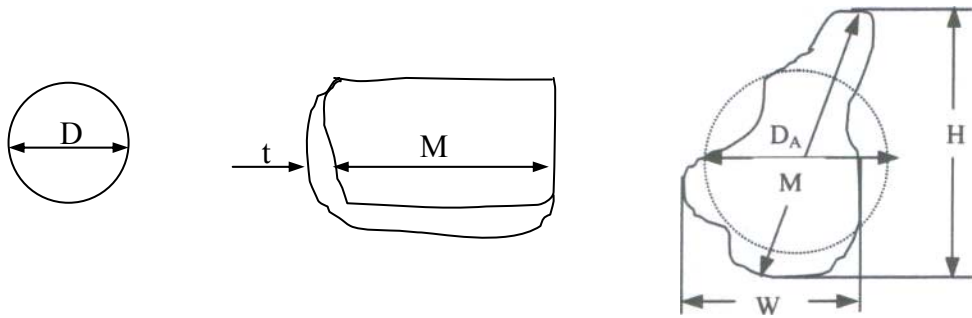
Tozlara ait fiziksel ve kimyasal özellikleri tespit edebilmek için toz kütleden numune alınır. Numune toz kütlenin tüm kesitinden alınmalı ve toz kütleye ait özellikleri tam olarak yansıtmalıdır. Numune alma işlemi, tüp şeklindeki numune alıcıları ile yapılır.

5.2.1. Fiziksel özellikler

Tozların fiziksel özelliklerini, toz tane boyutu, toz tane şekli, tane yapısı, tozların özgül yüzey alanı, görünür yoğunluk ve akış hızı gibi özellikler belirler. Presleme ve sinterleme gibi özelliklerde bu özelliklerle yakından ilgilidir.

a) Toz tane boyutu

Toz tanelerini eleme yöntemi, çökeltme yöntemi ve elektron mikroskobu altında inceleme v.b. gibi tane boyutu ölçüm teknikleri ile elde edilen boyutlardır. Tozların tamamının aynı boyutta olduğu söylenemez, ancak ortalama tane boyutundan bahsedilebilir. Toz parçacıklarının şekli karmaşık hal aldıkça toz tane boyutu ölçüm teknikleri de değişir. Örneğin küresel tozlar için hem kalınlık hem de boyunun ölçülmesi gerekir. Toz parçacıklarının şekli karmaşığa gittikçe, birkaç boyutun ölçülmesi gerekir. Çok fazla karmaşık şekilli tozların tane boyutu yüzey alanından yola çıkılarak bulunabilir. Şekil.5.5’de küresel, pul ve karmaşık şekilli tozlar görülmektedir.



Şekil 5.5. Küresel, pul ve karmaşık toz şekilleri (42)

Tozların tane büyüklüğü genellikle elek analizi ile tespit edilir. Elek büyüklükleri delik büyüklükleri ile anılır. Elek delik büyüklükleri μm cinsinden de belirtilebilir. Elek analizi sonrası toz tane boyutu belli değerler arasında sınıflandırılır.

b)Toz tane şekli

Toz üretim yöntemleri ile üretilen tozların şekilleri birbirinin aynı değildir. Üretim yöntemlerine göre toz tane şekilleri, Şekil 5.6’da görüldüğü gibi küresel, yüksek gözenekli, karmaşık, dendritik, pul ve iğnesel şekillerde olabilirler.

<u>Üretim Metodu</u>		<u>Toz Şekli</u>
Gaz Atomizasyonu	→ 	Küresel
Su Atomizasyonu	→ 	Karmaşık
Gaz Fazı ile Ayrıştırma	→ 	Gözenekli
Elektroliz Yöntemi	→ 	Dendritik
Değirmende Öğütme	→ 	Pul

Şekil 5.6. Üretim metoduna göre toz şekilleri (42)

Tozların şekli özellikle tozların akıcılığını etkiler. Küresel şekilli tozlar pul şeklindeki tozlara göre iyi akış özelliği gösterirken, genellikle düzgün olmayan şekilli tozlar ise hiç akmazlar. Toz şekli ayrıca tozların, görünür yoğunluk, sıkıştırılabilirlik, ham mukavemet, gerginlik, sinterlenebilirlik gibi özelliklerini etkiler. Görünür yoğunluğu en yüksek olan toz küresel tozdur. Köşeli ve yüksek gözenekli tozlar düşük yoğunluğa sahiptir. Düzgün şekilli tozlar kolay preslenirken, düzgün olmayan tozlar daha zor sıkıştırılırlar. Sıkıştırılması zor olan tozlar preslenirken, toza yağlayıcı katmak suretiyle sıkıştırma kolaylaştırılır.

6. SİNERLEME

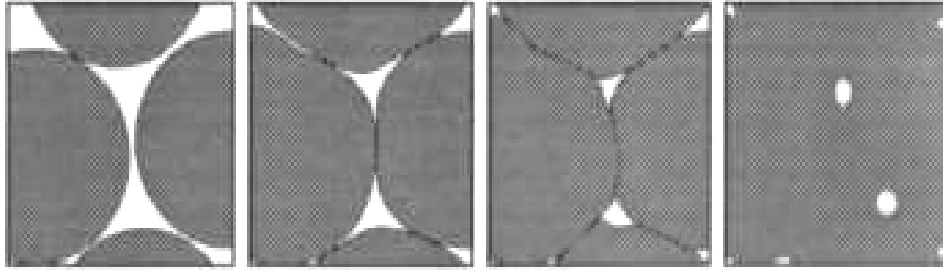
Sinterleme, toz halindeki malzemenin ergime sıcaklığı altındaki bir sıcaklığa belli bir süre maruz bırakılarak tozların birbirlerine değdikleri noktalardan başlayarak kaynaşmasına denir. Moleküler çekim kuvvetleriyle partikül kabuğunda oluşan yüzey geriliminin, sıcaklıkla azaltılıp birbirine kaynaşması, bu yönüyle eriterek kaynaşmadan çok farklılık gösterir (53).

Sinterleme süreçlerinde kullanılan sıcaklıklar genellikle sinterlenecek olan parçada katı-hal atom yayınması ve ergime sıcaklığının altında seçilirse de özellikle çok sistemli alaşımlarda sıvı faz sinterlemesi olarak bilinen bir sıvı fazın varlığında da gerçekleşebilir. Sıvı faz sinterlemesi sırasında sıvı bir faz sinterleme sıcaklığında katı bir toz kümesiyle aynı anda bulunur. Genellikle sıvı faz, sinterleme esnasında parçacıklar arası bağ oluşumunu arttırır. Parçacıklar arası bağlanmaya eşlik eden mukavemet, süneklik, iletkenlik, manyetik geçirgenlik ve korozyon direnci gibi faktörler gözenek yapısında ve parça özelliklerindeki önemli değişikliklerdir (54, 55).

Presten çıkmış parçaların ham mukavemeti düşüktür. Ham mukavemet genellikle tozlar arası mekanik kilitlenmeden kaynaklanır. Sünek tozlar için kısmen soğuk kaynak oluşması gerçekleşebilir. Parça bu hali ile yük taşıyamaz. Sinterleme ile her bir toz komşu tozlara kaynak edilir. Böylece mukavemet, ham mukavemete göre 100-1000 kat arasında artabilir.

Tek bir unsurdan oluşan malzemelerin katı hal sinterlemesi en iyi bilinen sinterleme şeklidir. Bu durumda bile tozun ısıtılmasıyla birlikte geçirdiği evrelerde karışıklık söz konusudur. Bu duruma örnek olarak parça boyutu dağılımı verilebilir. Bu konu ile ilgili teorilerin büyük bir kısmı tek büyüklükteki küresel tozlar öngörmesine rağmen, uygulanan sinterleme yöntemlerinde elde edilen yapılar belli bir parça boyutu aralığı ve hatta küresellikten epeyce farklı biçimleri olan parçacıkları içerebilmektedir. Katı hal sinterlemesi yine de en iyi bilinen ve anlaşılan yöntem olmasına karşın, bir anlamda bu yöntemle rekabet eden sıvı faz sinterlemesi daha büyük endüstriyel kullanım bulmuştur. Ancak büyük ölçüdeki bu kullanıma karşın

bu sinterleme şekli iyi bir şekilde anlaşılamamıştır. Toz parçacıklarının yüksek yüzey enerjileri aşılacak ya da ortadan kaldırılarak gerçekleşen sinterleme sonucu parçacıklar arasında tam ve mükemmel metalurjik bağlar oluşur ve bu suretle iç yapıdaki gözeneklilik sıfıra düşer. Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapının tersi ile doğru orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları büyüklere kıyasla daha kolay sinterlenir. Sinterleme hızına etki eden parçacık boyutunun yanı sıra başka faktörler de vardır. Metalik tozlarda kristal tane sınırları boyunca yayınma ve tane sınırlarının keskin ya da yayvan oluşu da sinterlemeyi etkiler. Şekil 6.1. de sinterlemenin safhaları görülmektedir.



Şekil 6.1. Sinterlemenin 4 safhası

Endüstriyel sinter parça üretiminde geleneksel toz metalurjik sinterleme süreçleri birkaç bölümü olan sürekli uzun konveyör ya da bant fırınlarında gerçekleştirilir. Bu tür fırınların ilk bölümünde presleme için tozlara karıştırılan katışıkların yakılarak uçurulduğu bölümdür.

Günümüzde artık yaygın olarak bazı malzeme ve alaşımlar için hem presleme hem de yüksek sıcaklıkları birleştirerek pekiştirme ve sinterlemenin aynı süreçlerde birleştirilerek gerçekleştirildiği teknolojik süreçler geleneksel presleme ve sinterleme süreçlerinin yerini almaktadır. Bunların arasında en yaygın uygulama ve kullanıma sahip olanları sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme (HIP) teknikleridir. Sıcak tek yönlü preslemede çift taraflı, etki eden su soğutmalı baskı plakaları arasına

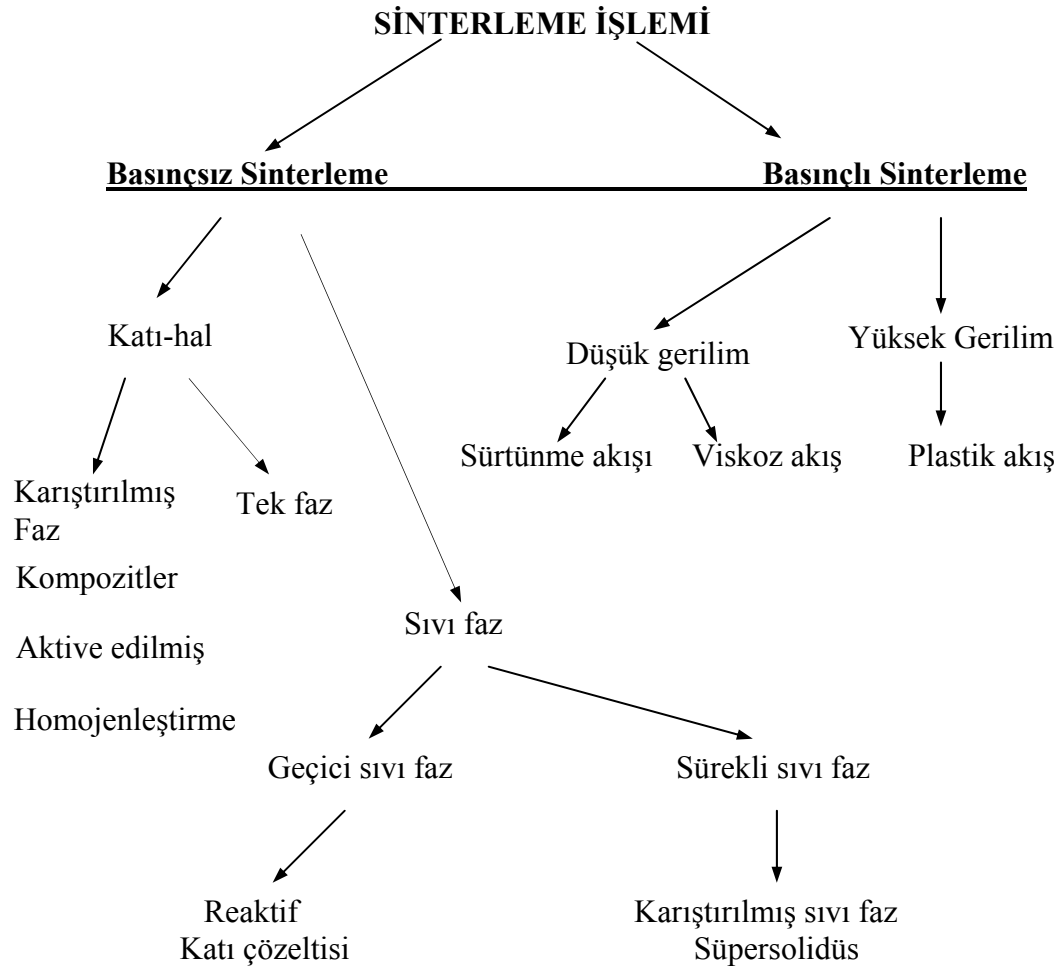
yerleştirilen tozlar endüksiyon ısıtma etkisiyle ilk olarak preslenir daha sonra baskı altında yüksek sıcaklıklarda sinterlenir. Tek yönlü sıcak presleme normal şartlarda gerçekleşebileceği gibi, tozların özel kalıplara yerleştirilmesi suretiyle vakum veya azot, argon gibi gazlar altında da gerçekleşebilir (56).

Tek yönlü sıcak preslemenin avantajların yanı sıra, karmaşık şekilli ve uzun boyutlardaki parçaların sinterlemesinin gerektiği durumlarda sıcak izostatik presleme (HIP) işleminin de kullanılması son yıllarda giderek yaygınlaşmıştır. Uygulama olarak HIP tekniğinin prensibi kalıp etrafına sarılan ısıtma hücresi haricinde CIP ile aynıdır. Isı hücrelerinin maliyet ve tasarımı dolayısıyla CIP' e kıyasla oldukça pahalı olan HIP yönteminin uygulamasında yağ yerine He gibi gazlar ortam olarak kullanıldığından dolayı oldukça yüksek sıcaklıklar sağlanabilir ve bu suretle sadece metalik tozlar değil aynı zamanda seramik esaslı tozlar da pekiştirilerek sinterlenir.

6.1. Sinterleme Teknikleri

Bir çok sinterleme sistemleri sıvı oluşumunun meydana getirdiği hatta yoğunlaşmanın artırılması için dışarıdan bir basıncın uygulandığı çoklu fazlardan ibarettir. Şekil 6.2'de sinterleme tekniklerinin anlaşılabilmesine yardımcı olacak bir şemadır. Bu şema bir çok işlemin kavramsal haritasıdır.

Genel bir sınıflama yapılacak olursa, basınç ilk kabuldür. Sinterleme işlemlerinin çoğu herhangi bir basıncın etkisi olmadan gerçekleştirilir (basınçsız sinterleme). Basıncılı sinterleme teknikleri daha yenidir ve sıcak izostatik pres ve basınçsız sinterleme gibi yüksek-basınç yaklaşımları arasında bir tekniği temsil eder. Bu yaklaşımlar gaz basıncı yardımıyla kalan gözenegi gidermek yerine, malzemeyi düşük seviyede kalıcı gözenek seviyesinde sinterlemeyi içerir. Malzemenin sinterlenmesi esnasında basınç uygulanması, geleneksel sinterleme aşamalarından etkilenmeyen malzemeler için en faydalı işlemlerdir.



Şekil 6.2. Sinterleme işlemi şeması ve işlem sırası (56)

Kompozitler ve yüksek sıcaklık intermetalikler bu durum için örnek teşkil edebilirler. Yayınmalı sürünme ile yoğunlaşmanın kontrol edebildiği durumlarda, basınç düşük olabilir. Eğer etkin gerilim malzemenin akma gerilimini aşarsa, alternatif olarak yüksek basınçlarda yoğunlaşma çok ani gelişir. Basınç genellikle hidrostatik (sıcak izostatik presleme) yada tek yönlüdür (dövme ve sıcak presleme). Basıncsız sinterleme teknikleri arasındaki en büyük farklılık katı-hal ve sıvı faz sinterleme işlemleri arasındadır. Tek fazlı katı hal sinterlemesi, teorik anlamda yada bakır gibi saf malzemeler uygulanabilir. Katı hal işleminin üzerinde, ikinci fazı içeren seçenekler mevcuttur. Kompakt homojenizasyon, aktive edilmiş sinterleme,

katı halde karışık fazlı sinterleme işlemleri bunlara dahildir. Bir sonraki işlem, kompozitlerin sinterlenmesi için bir baz oluşturmaktadır. Aktive edilmiş sinterleme, ikinci katı fazın hızlı partikül bağı oluşturmaya katkıda bulunduğu bir katı-hal işlemidir. Böyle bir durumda, sinterleme iki fazlı bölgede denge halinde gerçekleşir. Örneğin; yüksek-karbonlu çeliklerde, ferrit (HMK Fe) ve sementitin (Fe_3C) yeniden oluştuğu sıcaklıklarda olduğu gibi. Homojenizasyon, tek fazlı ürünlerin oluştuğu karışık tozların sinterlenmesi esnasında ortaya çıkar, örneğin; katı-çözelti oluşturan alümina ve krom. Bir çok sinterleme döngüsü sıvı meydana getirir. Bu sıvı fazın varlığı anlık olabileceği gibi sinterleme süresince sürekli de olabilir (56).

7. KOMPOZİT MALZEMELER

Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacı ile bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir. İki malzeme, orijinal malzemelerde elde edilemeyen bir özellik kombinasyonu elde etmek için birleştirildiğinde kompozitler üretilir. Kompozit malzemeler alışılmışın dışındaki bükülmezlik, mukavemet, ağırlık yüksek sıcaklık performansı, korozyon direnci, sertlik ve iletkenlikten oluşan kombinasyonları elde etmek için seçilebilmektedir (57).

Cam elyafı polyester levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, otomobil lastikleri ve seramik metal karışımı olan sermetler bunlara birer örnektir. Kompozitler çok fazlı malzeme sayılırlar. Yapılarında sürekli bir ana faz ile onun içinde dağılmış pekiştirici bir donatı fazı bulunur. Bazı malzemelerde bu tür yapı üretim sırasında oluşabilir ve fazların karışımı mikroskobik düzeydedir. Örneğin perlitik çelikte yumuşak ve düşük mukavemetli ferrit ile sert ve gevrek sementit yan yana ince tabakalar halinde dizilir.

Tek başlarına mekanik özellikleri elverişli olmayan ferrit ve sementitin mikroskobik düzeyde homojen karışımından oluşan perlit yüksek mukavemete ve yüksek tokluğa sahiptir. Ancak uygulamada kompozit malzeme olarak anılan sistemlerde bileşenler makroskobik düzeydedir, boyutları 0,1 mm üstünde olup gözle görülebilirler. Bunlar sonradan bir araya getirilerek üstün özellikli bir kütleye dönüştürülmüştür (58).

Örneğin fiberglas yapay bir kompozittir ve gemi gövdesi, olta değneği, yay ve ok gibi birçok spor malzemesinin yapımında kullanılır. Fiberglas, "polimer" adı verilen jölemsi plastik bir maddenin içine karıştırılan cam liflerinden elde edilir. Polimerin sertleşmesi sonucunda oluşan kompozit malzeme hafif, sağlam ve aynı zamanda esnektir. Karışımda kullanılan liflerin yada plastik maddenin nitelikleri değiştirilecek olursa, kompozit malzemenin özellikleri de değişir (59)

Kompozitlere donatılı veya pekiştirilmiş malzemelerde denir. Pekiştirici bileşenin türüne ve düzenlenme biçimine göre üç gruba ayrılabilirler;

1. Taneli kompozitler
2. Lifli kompozitler
3. Tabakalı kompozitler (Şekil 7.1).

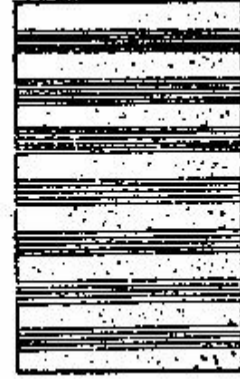
Lifli ve tabakalı kompozitlerin sağladığı özelliklerdeki artış, tanelilere göre daha yüksektir. Taneli kompozitler için en önemli örnek betondur. Sert tanelilerin sünek bir bağlayıcı madde ile birleştirilip aglomere haline getirilen kompozitlere diğer bir örnek asfalt yol kaplamalarıdır. Asfalt viskoz ve düşük mukavemetlidir, taş ise sert ve gevrek, kütle halinde fazla şekil değiştirmeden, çatlayarak kolayca kırılabilir. Halbuki değişik boyutlu kırma taş ile asfaltın karışımından oluşan yol kaplama malzemesi hem sünek hem de yeter mukavemetlidir. Tungsten karbür (WC) taneciklerinin Co metali ile yüksek sıcaklıkta basınç altında sinterlenmesi sonucu elde edilen seramik kompozit çok sert olup yüksek hızlı kesme takımı üretimine elverişlidir. Uygulamada bunlara sermet denir. Uygulamada en önemli kompozitler lifli olanlardır (58).



1. Taneli kompozit



2. Lifli kompozit



3. Tabakalı kompozit

Şekil 7.1. Kompozit malzemelerde yapı türleri

MMK malzemeler günümüzde malzeme biliminin üzerinde en fazla çalışılan konularından birisi haline gelmiştir (60). Bu malzemelerin ortaya çıkışı insanların ihtiyaçları doğrultusunda gelişmektedir. İnsanoğlu günümüze kadar tabiattaki kompozit malzemelerden istifade etmiş, bunları daha da geliştirerek günümüz malzeme biliminin önemli konularından olan kompozit malzemelere çalışmaları

yönlendirmiştir. Yirminci yüzyılın yarısından sonrası " Kompozit Çağı " olarak tanımlanmaktadır (61). Son elli yılda kompozit malzemelerde kayda değer gelişmeler olmuştur, iki veya daha fazla malzeme karıştırılarak özelliklerinin artırılması başarılmıştır. Evlerin yapımında halen yaygın olarak kullanılan çamur ve saman karışımı, seramik esaslı kompozitlere temel olmuştur. Bu malzemede kompozitin ısı izolasyonu, tokluğu ve dayanımı sınırlı oranda katılan saman ile geliştirmiştir. Bu şekilde sadece yapının özelliklerini değil, mukavemet, ısı izolasyonu gibi özelliklerini de artırmışlardır (61).

7. 1. Polimer Kompozitler

Liflerle pekiştirilmiş polimer kompozitler endüstride çok geniş kullanma alanına sahiptirler. Pekiştirici olarak cam, karbon, kevlar ve boron lifleri kullanılır. Çizelge 7. 1’de bu liflerin özellikleri verilmiştir.

Kevlar lifleri aromatik poliyamid polimerlerinden üretilir. Liflerin çapları yaklaşık 0,1 mm civarındadır. Kalınlıkları arttıkça kusur oluşma olasılığı nedeni ile mukavemetleri çok azalır. Bu lifler uygun bir bağlayıcı malzeme ile istenilen boyutta taşıyıcı kütleye dönüştürülürler (58).

Çizelge 7.1’de görüldüğü gibi karbon, kevlar ve boron liflerinin cam liflerine göre mukavemetleri ve elastisite modülleri daha yüksektir, ancak fiyatları cam lifinin yaklaşık 10 – 15 katı kadardır.

Çizelge 7. 1. Bazı takviye elamanlarının özellikleri

Malzeme	Özgül ağırlık g/cm ³	Çekme mukavemeti MPa	Elastisite modülü MPa
Cam lifi	2,54	2410	70000
Karbon lifi	1,75	3100	22000
Kevlar lifi	1,46	3600	124000
Boron lifi	2,36	3110	360000

Polimer kompozitlerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Lifler yönlenmiş veya rasgele dağılmış olabilir. Yönlenmiş lifler doğrultusunda mukavemet doğal olarak yanal doğrultudan çok daha büyük olur. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Yönlenmiş çiftlerde bu miktar hacmen % 80 'e kadar çıkabilir, rasgele yönlenmişlerde %40-50 arasında kalır. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet ve özgül elastisite molekülüdür, dolayısıyla diğer malzemelere bu yönden üstün durumdadır (58).

7.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK)

Beton ve kurutulmuş çamur, seramik matrisli kompozitlerin ticari olarak tanınmasında esastır. Seramikler doğada kaya ve taşların dış etkilerle parçalanması sonucu oluşan kaolin, kil vb. maddelerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesi ile elde edilirler. Bunlar farklı şekillerde silikatlar, alüminatlar, ile birlikte metal oksitlerinden oluşur ve endüstriyel seramikler olarak bilinirler. İyonik" veya iyonik + kovalent bağa sahip oldukları için çok sert, gevrek ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Bu malzemelerde kayma direnci yüksek olup, plastik şekil verme olmaksızın gevrek kırılırlar. Sert oldukları için A_2O_3 ve SiC aşındırıcı malzeme olarak kullanılırlar. Bunlara ilave olarak Si_3N_4 de yaygın olarak kullanılır. Bunlarla seramik matrisli kompozit üretildiğinde, 1200 °C gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilir (62, 63).

7.3. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)

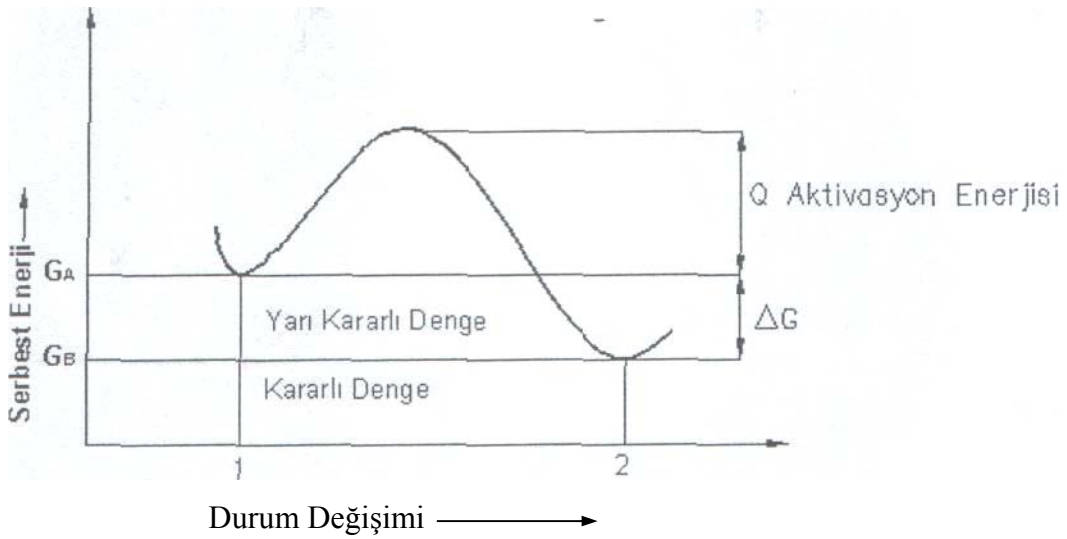
Metal matrisli kompozitler, matris metal esashı olmak üzere, iki veya daha fazla malzeme kombinasyonu ile elde edilen mühendislik malzemeleridir. Metal matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesinin amacı fiziksel, mekaniksel ve kimyasal özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesine yöneliktir. Ticari malzemeler ile dayanım, süneklik, genleşme oranı ve yoğunluk gibi kombinasyonların birlikte başarıyla sağlanması sınırlıdır. MMK malzemeler sürekli fiber, wisker veya parçacıklar ile takviye edildiklerinde bu kombinasyonların bir sonucu olarak, çok

özel yüksek dayanım ve modül elde edilebilmektedir. MMK'ler yüksek elastik modülü, çekme-basma dayanımı, kayma mukavemeti ve servis sıcaklığının yanı sıra, metallerin sünekliliği ve tokluğu ile, seramiklerin yüksek mukavemeti ve yüksek elastik modül özelliklerinden dolayı son derece önemli mühendislik malzemeleridir (63).

8. DİFÜZYON

Atomların, moleküllerin ve iyonların sıcaklığa bağlı olarak yer değiştirmeleri sonucu meydana gelen kütle akışı olayı difüzyon (yayınma) olarak adlandırılır (64, 65).

Difüzyonun meydana gelme sebebi atomların sahip olduğu Gibbs serbest enerjilerini azaltma eğilimleridir (66, 67). Şekil 8.1' de enerji değişimi görülmektedir (66).



Şekil 8.1. Serbest enerjinin durum değişimine bağlılığı (66)

Atomlar kararlı denge durumuna ulaştığında Gibbs serbest enerjisi minimuma ulaşır. Yüksek enerjili kademelerde ise yarı kararlı denge olarak adlandırılır. 1 konumundan 2 konumuna geçiş için sisteme önce Q enerjisinin verilmesi gerekir. Yani yayınan bir atomun bir enerji engelini aşması için atomların aktive edilmesi gerekmektedir ve bu Q değerine aktivasyon enerji denir (68). Q aktivasyon enerjisini sıcaklık, pekleşme oluşturacak şekil değişimi, elektrik ve manyetik alanlar etkiler (64).

Difüzyon sıcaklık, basınç ve konsantrasyon farkı ile doğrudan ilgilidir. Sıcaklık yükseldikçe atomların hareket kabiliyeti artar dolayısıyla difüzyon hızlanır (69).

Basıncın artması atomların hareket kabiliyetini artırmanın yanında konsantrasyon farkını da artıracaktır. İki alan arasındaki konsantrasyon farkı ne kadar büyük olursa,

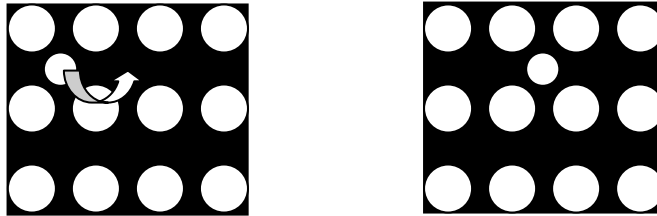
yüksek konsantrasyonlu alandan düşük konsantrasyonlu alana moleküller o kadar hızlı yayılır (70). Kimyasal potansiyel her yerde aynı olunca da difüzyon olayı durur (66).

8.1. Difüzyon Mekanizmaları

Atomların difüzyonu ile ilgili bir çok mekanizma vardır. Bu difüzyon mekanizmaları 4 grupta toplanabilir (64, 68, 71).

8.1.1. Arayer difüzyonu

Bu mekanizmada çözünen bir malzemenin atomları, içerisinde çözüldüğü diğer malzemenin atomlarından çok küçük (yaklaşık % 40) ise çözüldüğü atomlar arasındaki arayer noktalarından birini doldururlar (67, 69). Mekanizmanın gerçekleşmesi için boşluklara gerek yoktur (71). Bu mekanizmada matris atomları yer değiştirmezler (Şekil 8.2).



○ : Matris atomu, A

○ : Arayer atomu, B

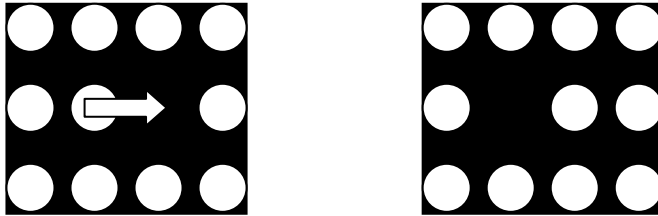
Şekil 8.2. Arayer mekanizması (72)

Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri B, C, H, N gibi atom yarıçapı küçük elementlerle arayer katı çözeltisi oluştururlar. Malzemelerde arayer noktaları, kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Bunlar oktahedral noktalar olarak bilinir (73).

8.1.2. Boşluk difüzyonu

Kristal yapıya sahip olan malzemelerin tümünde kafes pozisyonlarının bazıları atomlar tarafından doldurulmamış olabilir. Bu yerlere boşluk adı verilir (64, 71). Boşluk difüzyonunda bir atom yanındaki boşluğu doldurmak için kendi kafesindeki yerini terk eder. Bu nedenle orijinal kafes yerinde bir boşluk oluşturur (Şekil 8.3). Yapılan araştırmalarda bu mekanizmanın YMK (Yüzey Merkezli Kübik) metallerde, HMK (Hacim Merkezli Kübik) metallerde, iyonik bileşikler ve oksitler gibi hegzagonal kristal kafesli metallerde de gerçekleştiği görülmüştür.

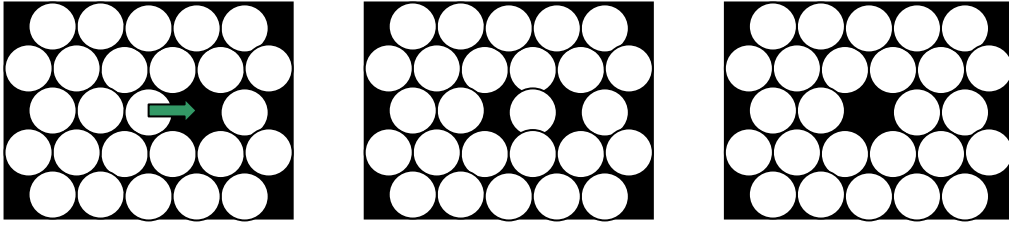
Boşluk difüzyonunda atomların ve boşlukların hareket yönü birbirine zıt yöndedir (71). Atomu hareket ettirmek için gerekli aktivasyon enerjisi küçüktür. Örneğin bir demir atomunu bitişik bir boşluğa hareket ettirmek için demir kristal kafesine verilecek aktivasyon enerjisi, karbon atomunu aynı kafeste bir arayerden diğer arayere hareket ettirmek için gerekli olan enerjiye eşittir (64).



Şekil 8.3. Boşluk Mekanizması (72)

8.1.3. Yeralan difüzyonu

Şekil 8.4'de görüldüğü üzere yer alan atomu komşu atomlar tarafından sınırlandırılmışlardır ve ancak komşu kafes noktalarından birinin boş olması halinde sıçrayabilir. Yer alan difüzyonunun en basit hali bir saf metaldeki atomların tabi (kendi kendine) difüzyonlarıdır (67).

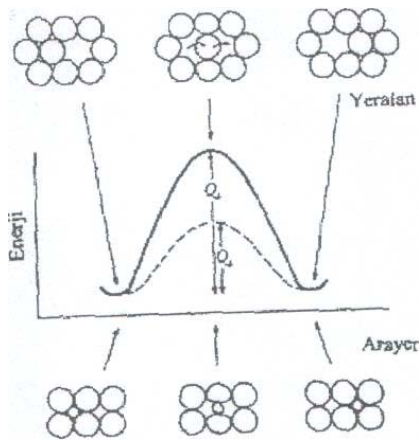


Şekil 8.4. Yeralan mekanizması (72)

Bir atomun kristal yapı içerisinde hareket edebilme kabiliyeti boşluk konsantrasyonuna bağlıdır. Boşluğa sıçrama ihtimali ve boşluk konsantrasyonu sıcaklıkla yakından ilgilidir (67, 69).

8. 2. Aktivasyon Enerjisi

Difüze olan bir atom yeni yerine ulaşmak için komşu atomlarını sıkıştırıp geçmek zorundadır. Bunun gerçekleşmesi için atomların yeni yerine geçmesini sağlayacak enerjiye ihtiyacı vardır. Bu durum Şekil 8.5' de yeralan difüzyonun şematik gösteriminde verilmiştir. Burada atom , orijinal olarak nispeten kararlı konumda ve düşük enerjili haldedir. Yeni bir noktaya hareket etmek için enerji engelini aşmak zorundadır. Bu gerekli olan enerjiye aktivasyon enerjisi denir ve "Q" ile gösterilir. Söz konusu bu enerji engelini aşmak için, atom ısıtılır.



Şekil 8.5. Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q) değişimi (71)

Normal olarak bir arayer atomunun, çevre atomları geçmek için ihtiyaç duyduğu enerji, yeralan difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisinden daha azdır. Bunun sonucu olarak, arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri yeralan difüzyonundan daha azdır.

Düşük yoğunluklu kristal yapılar boyunca difüze eden atomlar için gerekli aktivasyon enerjileri, sıkı paket kristal yapılar için gerekli olan aktivasyon enerjileri ile karşılaştırıldığında, genellikle daha düşüktür. YMK demirde difüze eden karbon atomlarının aktivasyon enerjisi $137,850 \text{ J mol}^{-1}$; ancak HMK demirde difüze eden karbon için sadece $87,570 \text{ J mol}^{-1}$ dir.

Atomların difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjileri, düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerde daha azdır. Ayrıca yeralan atomların aktivasyon enerjileri birbirleriyle kıyaslandığında, atom çapı küçük olan yeralan atomun aktivasyon enerjisi daha küçüktür. Düşük bir aktivasyon enerjisi, element difüzyonun daha kolay gerçekleşeceği anlamındadır (71).

8.3. Difüzyon Çeşitleri

Katılarda difüzyonu, hacim, tane sınırı ve yüzey difüzyonu olmak üzere üç grupta toplamak mümkündür. Tane sınırları malzemelerin diğer bölgelerine göre atomik seviyede hatalı olan bölgelerdir. Buralar atomik boşluk içerdiğinden difüzyon olayı tane sınırı boyunca daha kolay gerçekleşir (64, 70). Hacim difüzyonun da atomlar bir kafes veya arayer bölgesinden diğerine hareket eder. Çevre atomlarından dolayı aktivasyon enerjisi büyüktür ve difüzyon hızı nispeten düşüktür. Yüzey difüzyonu ise en kolay gerçekleşen difüzyon tipidir.

Her ne kadar yüzey ve tane sınırları difüzyonunun hızı hacim difüzyonundan çok daha yüksek ise de , bunların toplam difüzyon miktarına katkısı, yüzey ve tane sınır bölgelerinde atom sayısının az olması nedeniyle daha az olur. Yüzey difüzyonu için gerekli aktivasyon enerjisi; $\Delta Q_{\text{Yüzey difüzyonu}} < \Delta Q_{\text{Tane sınırı difüzyonu}} < \Delta Q_{\text{Hacim difüzyonu}}$

Hacim difüzyonu şeklinde yazılabilir.

8.4. Difüzyon Kanunları

8.4.1. I. Fick kanunu

Konsantrasyon farkları atomların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. Bu olay matematiksel olarak I. Fick kanunu ile ifade edilebilmektedir.

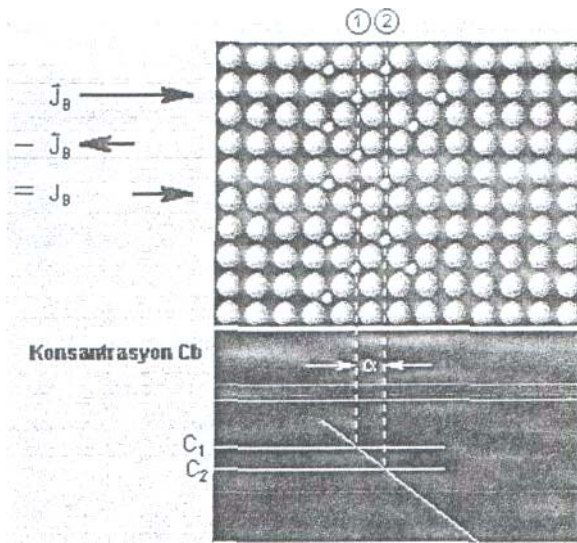
$$J_a = -D(\Delta c/\Delta x) \quad [8.1]$$

J_a : A atomlarının akışı ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

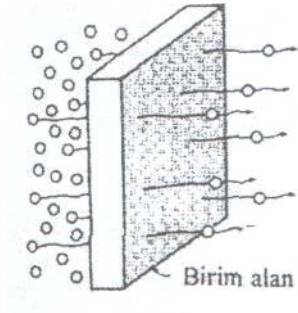
D : Difüzyon katsayısı (m^2/s)

$\Delta c/\Delta x$: Konsantrasyon gradyanı ($\text{m}^3 \text{m}^{-1}$)

Konsantrasyon gradyanı malzeme kompozisyonunun uzaklık ile nasıl değiştiğini gösterir; $\Delta c, \Delta x$ uzaklığındaki konsantrasyon farkıdır (Şekil 8.7). Akı difüzyon sırasında birim zamanda birim alandan geçen atom sayısıdır (71).



Şekil 8.6. I. Fick kanunu ile ilgili büyüklükler (72)



Şekil 8.7. Akının basit gösterimi (71)

8.4.2. II. Fick kanunu

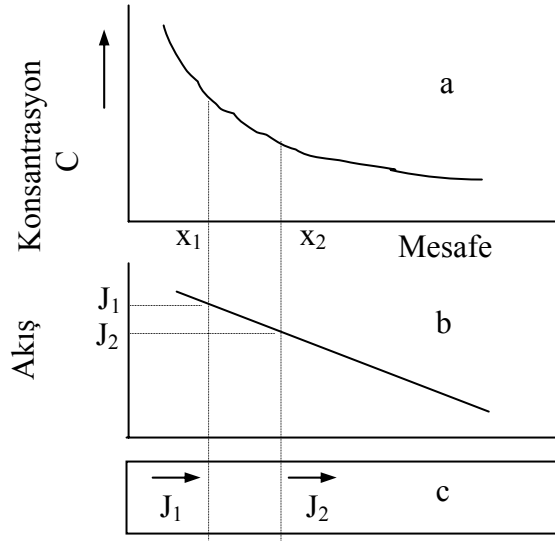
Eğer bir yayınma olayında kararlı bir durum mevcut değilse, örneğin konsantrasyon zamanla değişiyorsa II. Fick kanunu geçerlidir. Kararlı olmayan bir yayınmayı ifade eden II. Fick kanunu, I.Fick kanunu'nun türevi alınarak çıkarılır.

$$d_c/d_t = D(d^2c/dx^2) \quad [8.2]$$

Bu denklemin çözümü bazı sınır değerlere bağlıdır ve bu da;

$$(C_s - C_x) / (C_s - C_o) = \text{erf} (x/2 (Dt)^{1/2}) \quad [8.3]$$

şeklinde ifade edilir. Burada ; C_s : yüzeydeki konsantrasyon, C_x : yüzeyden veya arakesitten x kadar mesafedeki bir noktanın yoğunluğu, C_o : difüzyon çiftinden birinin ilk yoğunluğu, x : C_x ' in ölçüldüğü noktanın yüzeye olan uzaklığı; D : ortak difüzyon katsayısı t : difüzyon süresi , erf hata fonksiyonudur. Denklemin fiziksel anlamına göre yayınım olayı başlangıçta çok hızlıdır. Zamanla konsantrasyon gradyanı azaldığından hız düşer ve tam homojen yapı için sonsuz süreye gerek vardır (74). Difüzyonda konsantrasyon mesafe eğrileri Şekil 8.8'de gösterildiği gibidir (65).



Şekil 8.8. Kararsız Difüzyon a) Konsantrasyonun mesafe ile değişimi, b) Akış miktarının mesafeyle değişimi, c) Birim hacme giren (J_1) ve çıkan (J_2) akış miktar (64)

II. Fick Kanunu aşağıdaki uygulama alanlarına sahiptir:

- a) Çeliğin karbürlenmesi (Sementasyon)
- b) Çeliğin dekarbürüzasyonu
- c) Kaynak ve lehimleme
- d) Galvanizasyon

9. DİFÜZYON KAYNAĞI

Katı hal kaynak yöntemi olan difüzyon kaynağının çok eski bir geçmişi ve yaygın bir kullanım alanı vardır. Difüzyon kaynağı; birleştirilmek üzere eşleştirilmiş iki yüzeyin, malzemelerin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, plastik akmaya sebep olmayacak bir basınçta, katı hal difüzyonu yoluyla malzemeler arasında metalurjik bir bağ oluşuncaya kadar, malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecek bir süre tutulmasıyla uygulanan bir kaynak yöntemidir (66).

Bu kaynak yöntemi, aralarında seramik ve kompozitlerin de yer aldığı, birbirleriyle birleştirilmeleri diğer kaynak yöntemleri ile mümkün olmayan demir ve demir dışı alaşımların birleştirilmesini mümkün hale getirmiştir (75).

Kristal yapıya sahip katı bir malzemenin atomları arasındaki çekim kuvveti, kohezyon kuvvetini meydana getirir. Normal olarak her bir atom, üzerine tesir eden kuvvetin sıfır olduğu dengeli bir pozisyonda bulunur. Katı malzemeler, dış kuvvetlerin etkisi altında kalırsa, atomların denge pozisyonları bozulur. Katı malzemenin kristallerinin içinde, dış kuvvet tarafından dengelenen bir kuvvet meydana gelir. Atomlar arasındaki oluşan bu çekim kuvveti, atomların birbirlerinden uzaklaşma dereceleri ile orantılı olarak artar (2).

Farklı iki katı malzemenin yüzeyleri arasındaki çekim ise adhezyon olarak tanımlanır. Gerek kohezyon gerekse adhezyon olayı, yüzeyin serbest enerjisinin bir fonksiyonudur. Malzeme yüzeyleri arasında birleşmenin sağlanması, yani adhezyon ve kohezyon kuvvetlerinin teşekkülü için, malzeme yüzeylerinin atomlar arası bağın oluşabileceği yakınlıkta temasını sağlamak gerekir.

İki malzemenin difüzyonla birleştirilmesinde, birleşmenin davranışını önemli derecede etkileyen diğer bir kuvvet ise malzemelerin kimyasal yapılarına bağlı olarak moleküller arasında etki eden Van Der Walls kuvvetleridir. Bu kuvvetler, gres, su buharı, gaz gibi metal yüzeyindeki moleküllerin baş sebebidir (66, 76).

Difüzyon kaynağında birleştirilecek yüzeylerin birbirleri ile ilk teması sağlanıp, kaynak için gerekli sıcaklık ve zamana ulaşılması ile yüzeyler arasındaki temas alanı artar. Kaynağın ilk aşamasında yüzeydeki pürüzlülüklerde akma ve sürünme mekanizmaları ile ara yüzeyde büyük bir alanda temas sağlanır. Bu esnada birleşme genelde tane sınırlarında oluşur. Basıncın etkisi ile yüzeydeki oksit filmi kırılarak, oksitlerin kırılmış olan noktalarından atom akışı başlar. Bu aşamadan sonra difüzyonun etkisi deformasyondan daha önemlidir. Bir çok gözenek tane sınırı difüzyonu neticesinde kaybolur ve birleşme yerinden tane içine geçerek tane içinde oluşur. Bu aşamada gözenekler hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir (77, 78).

9.1. Difüzyon Kaynağı Mekanizması

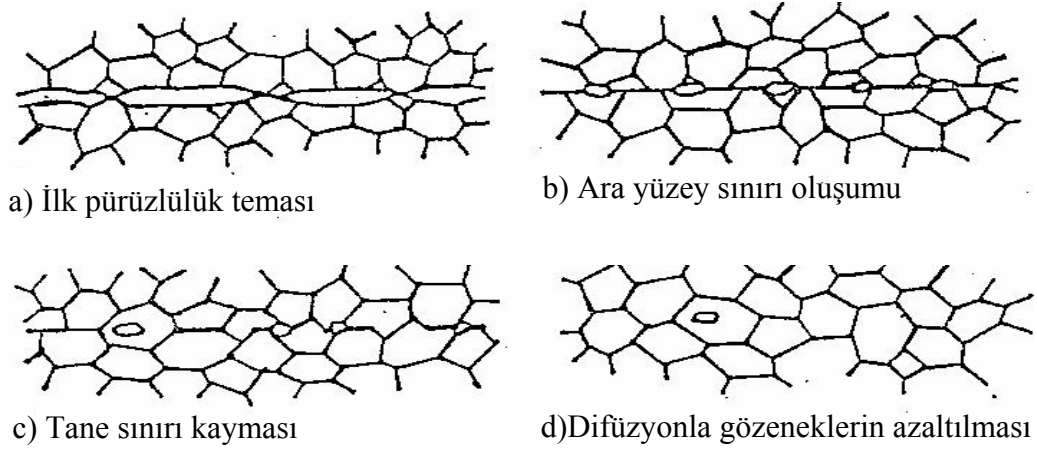
Günümüze kadar difüzyon kaynağı hakkında bir çok mekanizma ileri sürülmüştür. Şimdiye kadar açıklanan mekanizmaların ortak noktaları ışığında difüzyon kaynağı mekanizmasını aşağıdaki şekilde genelleştirmek mümkündür (66).

1. Yük altında plastik deformasyon
2. Sürünme deformasyonu
3. Difüzyon
4. Yeniden kristalleşme ve tane sınır gücü

Difüzyon kaynağının kullanım alanları genel mühendislik, havacılık ve uzay sanayi, savunma sanayi, nükleer sanayiler ve elektronik sanayi olarak sıralanabilir (79).

Difüzyon kaynağı ile ilgili ilk teori 1944' de Kinzel tarafından sunulmuştur. Daha sonra Gerken ve Owczarski birbirlerinininkiyle benzer olan bir model yapmışlardır.

Bir difüzyon kaynağı için üç aşamalı bir mekaniksel modelde kaynak oluşumu Şekil 9.1' de gösterildiği gibi tanımlanır.



Şekil 9.1. Difüzyon kaynağı için üç aşamalı mekaniksel model (66)

Kaynağın birinci aşamasında yüzeydeki pürüzlülüklerde akma ve sürünme mekanizmaları ile ara yüzeyde büyük bir alanda temas sağlanır ve birleşme genelde tane sınırlarında oluşur. Basıncın etkisi ile yüzeydeki oksit filmi kırılarak oksitlerin kırılmış olan noktalarından atom akışı başlar. İkinci aşamada difüzyonun etkisi deformasyondan daha önemlidir. Gözenekler bu aşamada tane sınırı difüzyonu neticesinde kaybolur ve bir kısmı da tane içinde oluşur. Bunların tane sınırının hareketsiz hale getirme etkisi azdır. Başlangıçta düz olan birleşme çizgisi üçlü noktalarda bir malzemenin diğerine birkaç mikron kadar nüfuz etmesi ile birleşme çizgisi eğilir. Birleşme sınırı hareket ederken geride kalan gözenekler tanelerin içerisinde kalır ve burada tane sınırı ile temaslarını kaybederler. Üçüncü aşama birleşmenin tamamlandığı, birleştirilecek malzemeler arasındaki atomik bağın tamamlandığı aşamadır. İkinci aşama sonunda tane sınırlarında yok edilmeyip tane içine taşınan gözenekler bu aşamada hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir. Yok edilmeyen gözenek miktarının oranı kaynak sıcaklığı ile ilgilidir (66, 76).

9.2. Difüzyon Kaynağına Tesir Eden Faktörler

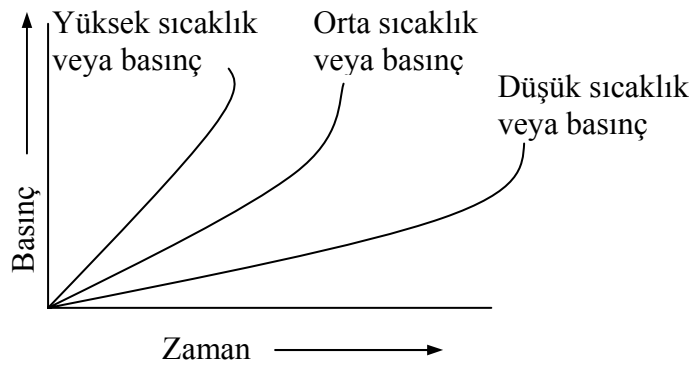
Difüzyon kaynağı; sıcaklık, basınç, zaman, yüzey pürüzlülüğü, kaynak atmosferi gibi kaynak şartlarının, tane boyutu, kristal yapı, atom yarıçapı, yeniden kristalleşme

sıcaklıkları, yüzey enerjileri gibi malzemelerin fiziksel, kimyasal özelliklerine ve farklı yada aynı cins malzeme olma gibi metalurjik özelliklerinin etkisi altındadır (66, 76, 80).

9.2.1. Kaynak sıcaklığı

Sürünme ve difüzyon mekanizmaları sıcaklığa bağlı olduklarından, sıcaklık difüzyon kaynağının en önemli parametresidir (67, 68, 71, 73).

Sıcaklık arttıkça ana malzemelerin akma gerilmeleri azalır. Böylece hem ilk plastik deformasyon, hem de yüzey pürüzlerinin sürünmesi kolaylaşır. Dolayısıyla kaynak için gerekli temas alanını elde etme süresi kısalmıştır Şekil 9.2' de uygulanan basınç ve sıcaklığın sürünme eğrisine tesiri görülmektedir.



Şekil 9.2. Sıcaklık ve uygulanan basıncın sürünme eğrisine etkisi (71)

Difüzyonun kinetik teorisi, difüzyon kaynağındaki sıcaklık etkisini sayısal olarak belirlemeyi sağlar. Difüzyon, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak şöyle verilir (70, 71, 73, 79).

$$D = D_0 \cdot \exp(-Q/RT) \quad [9.1]$$

D : T sıcaklığındaki difüzyon katsayısı

D_0 : Atomik titreşim frekans faktörü

Q : Aktivasyon enerjisi (J Mol^{-1})

R : Gaz sabiti $8,314 (\text{mol}^{-1} \text{K}^{-1})$

Sıcaklık, seçilen yüzey basıncında olabildiğince kısa sürede yüzey pürüzlülüğünün, yeteri kadar birbirine geçmesini sağlayacak malzeme temasını sağlarken malzemede biçim değişimi yaratmamalıdır, belirlenen süre içinde yeterli difüzyonu sağlayacak kadar yüksek olmalıdır. Ancak; dikkat edilmesi gereken bir nokta sıcaklığın, sıvı faz oluşumuna yol açan değerlere ulaşmamasıdır. Kaynak sıcaklığının belirlenmesinde, birleştirilecek çiftlerin metalurjik özellikleri, erime sıcaklıkları, difüzyon katsayıları, sıcakta dayanımları, akma davranışları da göz önünde bulundurulmalıdır. Kaynak sıcaklığının belirlenmesinde malzemenin erime sıcaklığı (T_M) baz alınır. Sıcaklık birleştirilecek çiftlerden düşük erime sıcaklığına sahip olana göre belirlenir (80).

Difüzyon kaynağında kullanılan sıcaklık genellikle $0,5 \times T_M$ (Ergime sıcaklığı) ve üzerinde alınmaktadır (7, 25, 29). Birçok metal ve alaşımları için en iyi difüzyon kaynağı $(0,6-0,8) T_M$ arası sıcaklıkta yapılabilmektedir. Bunun yanında $(0,5-0,9) T_M$ gibi geniş bir çalışma aralığında birleştirmeler yapan araştırmacılar bulunmaktadır. Son yıllardaki çalışmalardan, bir çok metal için bağlantı sıcaklığının $(0,2-0,4) T_M$ ' ye kadar düşürülebileceği sonucuna varılmaktadır (74).

9.2.2. Kaynak basıncı

Difüzyon kaynağında basınç, iki yüzey arasında teması ve difüzyon işlemini başlatmak üzere kimyasal bir potansiyel farkı üretmek için gereklidir. Yüzey oksitlerini kırmadan temas başlatmak mümkün değildir. Kaynak esnasında uygulanması gereken basınç, difüzyon kaynağına aşağıdaki şekillerde tesir eder.

- Çözülmesi mümkün olmayan yüzey oksitlerini kırar ve metalin metale temas alanını arttırır.
- Birleşecek yüzeylerin birbirlerine atomlar arası mesafede yaklaştırılarak, atomlar arası çekim kuvvetini faaliyete geçirir.
- Difüzyon için kimyasal potansiyel farkı meydana getirir.
- Yüzey pürüzlerinin plastik akmasına yardım eder.

Tüm bunların yanında uygulanan basıncın olumsuz tesirlere sebep olmaması için bazı hususlara dikkat edilmesi gerekir. Bu hususlar:

- Kaynak basıncı birleştirilecek parçaların plastik hacim deformasyonunu en aza indirmek için, akma gerilmesinin altında tutulur.
- Uygulanacak basınç izostatiktir. Araştırmacılar basıncın uygulanma hızını kaynak deformasyonu veya mukavemeti üzerinde önemli bir tesiri olmadığını bildirmişlerdir (2).
- Uygulanacak basınç, yüzey pürüzlerinin sürünme hızı ve plastik deformasyonunu arttıracak kadar büyük, kaynak edilecek parçaların makroskobik deformasyonuna yol açmayacak kadar düşük seçilmelidir.
- Günümüze kadar difüzyon kaynağında çeşitli malzemeler için uygulanan basınç değerleri 41 KPa ile 27 MPa arasındadır (2).

Kaynak esnasında uygulanan basınç, malzemelere göre değişik oranda uygulanır. Kurt (66), toz metalurjisi ile ürettiği bronz malzemeyi düşük karbonlu çelik ile difüzyon kaynağıyla birleştirmede 15 MPa, Yılmaz ve Çelik (81, 82) elektrolitik bakır ile östenitik paslanmaz çeliğin kaynağında 0,65-1,2 MPa kaynak basıncını kullanmışlardır. Bu tezin konusunu oluşturan alüminyum-silisyumnitrür kompozit malzemenin difüzyon kaynağında 2,5 MPa sabit basınç kullanılmıştır.

9.2.3. Kaynak süresi

Düzgün bir kaynak elde etmek için gerekli süre, sıcaklık ve basınca bağlıdır. Kaynak süresi basınç ve sıcaklık arttırılarak azaltılabilir. Kirli yüzeyler ve düşük sıcaklıklarda çalışıldığında süre uzatılmalıdır.

Sabit basınç ve sıcaklıkta birleştirme süresini uzatmanın bağlantı mukavemetini bir noktaya kadar arttırdığı araştırmacılar tarafından ortaya çıkarılmıştır. Metaller arası bileşiklerin meydana gelmesi, tane büyümesi, süperplastik şekil değiştirme performansı ve bağlantı mukavemeti süre arttıkça olumsuz bir şekilde

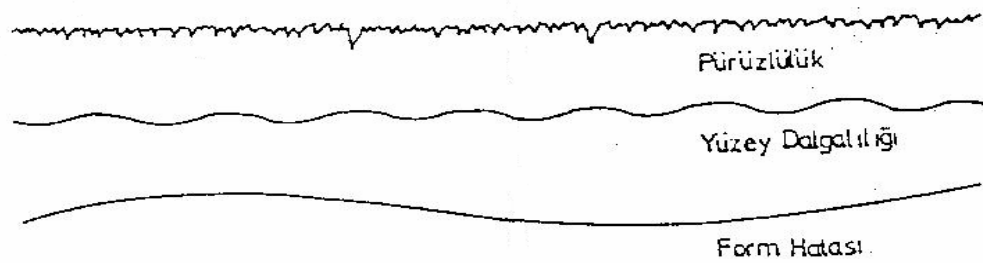
etkilenmektedir (2). Yapılan çalışmalarda kaynak yapıldıktan sonra vakum veya koruyucu gaz odasında kademeli soğutmanın difüzyon bağlantılı kaynaklamanın dayanımını ve tokluğunu artırdığı görülmüştür (74).

9.2.4. Yüzey şartları

Difüzyon kaynağının kalitesine tesir eden yüzey şartları şunlardır;

- a) Yüzey pürüzlülüğü,
- b) Yüzey filmleri,
- c) Yüzey aralıklarıdır.

Pürüzlülük yüzeyler arasında tam temasa ulaşmak için gereken süreyi etkiler. Pratikte bir metal, yükseklik ve dalga boyu küçük olan yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Difüzyon kaynağında, özellikle uzun dalga boyundaki pürüzler önemlidir (66). Çünkü bu durumda boşlukların yok edilmesi için, hem çok yönlü basınç uygulaması hem de uzun zamana gerek olacaktır. Çünkü difüzyon sıcaklık ve mesafeye bağlıdır. Haddelenmiş halde bilhassa ince levhalar, iyi bir yüzeye sahip olduklarından daha avantajlıdır. Yüzey pürüzleri birinci aşamada kalıntı gözeneklerin başlıca sorumlusudur. Pürüzlülük sıcaklık ve deformasyonla artar. Şekil 9.4'de yüzey kusurları gösterilmektedir.



Şekil 9.3. Yüzey kusurları (66)

9.2.5. Kaynak ortamı

Difüzyon kaynağında parça yüzeyleri ve ara kesitte oluşacak oksidasyonu önlemek için koruyucu bir atmosfer altında kaynak işlemini gerçekleştirmek gerekir. Bu amaçla ya vakum altında yada bir soy gaz atmosferinde kaynak işlemi gerçekleştirilir.

Soy gaz olarak argon, azot ve helyum gazlarından herhangi birisi kullanılabilir. Oksijen miktarını en aza indirmeye yardım eden hidrojenin indirgeyici bir atmosfer ortamı olduğu düşünülebilir. Ancak hidrojen, titanyum, zirkonyum, kolombiyum ve tantal alaşımlarında hidrat oluşturduğundan bu malzemelerin kaynağında tercih ve tavsiye edilmez (2).

Soy gazlar atmosferdeki oksijenin tesirini belli bir dereceye kadar azalttığından, kararlı oksitlere sahip metallerde vakum kullanılmaktadır, $1,3 \times 10^{-3}$ Pa' dan daha fazla bir vakum oksit filmlerinin çözünmesini sağlayabilmekte ise de uygulamada $1,3 \times 10^{-2}$ ile $1,3 \times 10^{-5}$ Pa' lık basınçlar altında difüzyon kaynağı yapılmaktadır (2).

9.2.6. Birleştirilecek malzemelerin tane boyutları ve mikro yapıları

Difüzyon kaynağına tesir eden birçok yapı vardır. Bunlar, mikro yapı, tane boyutu ve ilave metal (ara tabaka) kullanılması şeklinde sınıflandırılabilir.

Çift fazlı (α/β) titanyum alaşımları üzerinde yapılan araştırmalar farklı mikro yapıların, farklı sürünme hızına sahip olduğunu göstermiştir. Bu yapılar:

- 1.İnce taneli küre,
- 2.Lamelli,
- 3.Tabaka tipi olmak üzere üç grupta incelenir (2).

Difüzyon kaynağı için en ideal yapının ince taneli yapı olduğu tespit edilmiştir. Bu

yapı süperplastik alaşımlarda mevcuttur. Tabaka tipi yapıda tane sayısı arttıkça sürünme hızı azalmakta ve sonuçta ara kesitte boşluklar kalmaktadır. Lamelli yapı diğer iki yapı ile karşılaştırıldığında, daha düşük sürünme hızına sahip olduğu görülür. İki fazlı alaşımlar için, iki fazın oranı difüze olabilme ve sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek difüzyon hızına sahip fazın, düşük sürünme hızına sahip faza oranı, sıcaklığın tesiriyle arttıkça bağ oluşumu olumlu yönde etkilenmektedir.

Colva 1988, alüminyum ve bakır difüzyon kaynağı üzerinde çalışmış, katı halde birbiri içinde tamamen çözülmeyen bu metalleri, bilhassa intermetalik bileşiklerin ve ara fazın oluşması açısından inceleyerek başlangıçtaki mikro yapının, bu tür istenmeyen yapıların meydana gelmesinde etkili olduğunu göstermiştir.

Tane boyutunun hem kaynak esnasında, hem de kaynak sonrasında bağlantı mukavemeti açısından büyük önemi vardır. Kaynağın ilk aşamalarında boşluklar daha çok tane sınırıyla kesişir. Dolayısıyla boşluğu önlemek için birden çok tane sınırı etki eder (83). Atomlar bu tane sınırlarından boşluğa difüze olarak onu küçültürler.

Tane boyutu küçülüp, tane sayısı arttıkça, boşlukların difüzyonla doldurulması kolaylaşmakta ve ara kesitte kalması ihtimali azalmaktadır. Difüzyon kaynağında birleşme işlemini hızlandırmak, bağlantının mekanik özelliklerini geliştirmek veya birbirinden farklı metal, metal olmayan (seramik, cam, kompozit v.b.) malzemelerin kaynağında karşılıklı difüzyon oluşturmak için ara malzeme kullanılır (84).

Genel olarak ilave (ara) malzemenin kaynaktaki faydaları şunlardır (83);

- Mekanik bağ oluşturmak için ana metalde çözünme,
- Birbirinden farklı malzemelerin birleştirilmesi halinde intermetalik fazların oluşumunu önlemek,

- Ön ısıtma esnasında, yüksek sıcaklıklarda birleştirilecek yüzeyleri oksidasyona karşı korumak,
- Elektro-kaplama veya iyon kaplama ile malzemenin difüzyon özelliklerini geliştirmek,
- Düşük akma gerilmeli malzemelerde yada sıvılar ihtiva eden bölgeler oluşturarak, oksit filmlerinin bozulmasını sağlamak,
- Ara kesit boşluklarında, geçici sıvı fazlar oluşturarak yüzey pürüzlerinin olumsuz tesirlerini en aza indirmektir.

9.2.7. Difüzyon kaynağı yapılan malzemeler

Günümüzde difüzyon kaynağı çok sayıda ve değişik malzemeye farklı alanlarda ve amaçlarda geniş bir şekilde uygulanmaktadır. En başarılı ve yaygın uygulama titanyum alaşımlarında uçak yapımında görülmektedir (2). Son zamanlarda Ti-Alüminitler, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları, Ni esaslı alaşımlar, metal matrisleri kompozitler difüzyon kaynağıyla birleştirilmişlerdir (85). Diğer malzemelere uygulanmakla beraber, difüzyon kaynağının en çok kullanıldığı metal titanyumdur. Titanyum alaşımları ara malzemeye ihtiyaç göstermeden kolayca kaynak yapılabilir. Titanyumun difüzyon kaynağına elverişli olmasının sebebi kendi oksidi de dahil olmak üzere, yüzey atıklarının, yüksek sıcaklıklarda basınç uygulandığı zaman çözeltiye alabilme kabiliyetidir.

Titanyumu difüzyon kaynağı açısından kaynağa elverişli kılan diğer bu hususta yüzeyin temizlenmeye ihtiyaç göstermemesidir. Titanyumun ergime kaynağında özel önlemler alınması gerektiğinden, bu metalin difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi yaygındır. Süperplastik titanyum alaşımları 880 °C ile 940 °C sıcaklıklarda 0,6 ile 2 MPa basınç altında 3 saat içinde kolayca birleştirilebilmektedir.

Ti alaşımlarının difüzyon kaynağında kullanılan ara tabakalar, saf titanyumdan oluşmaktadır. Ti alaşımından mamul fan kanatçıklarının difüzyonla lehimlenmesinde ise Cu ve Ni ara tabakalar kullanılmaktadır, iri taneli titanyum alaşımları için, düşük

basınç altında ince taneli süperplastik bir Ti alaşımı ara tabaka olarak kullanıldığında dayanımı yüksek bir komşu metal elde edilmektedir (86).

Alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağı, inatçı yüzey oksitleri yüzünden güçleşmektedir. Bununla beraber, birleşme bölgesinde yüksek sıcaklık ve büyük ölçekli deformasyon uygulanmasının, inatçı oksit tabakalarını kırdığı ve yüzey kaplama yada ara tabaka kullanılması ile daha düşük basınç altında difüzyon kaynağı yapmanın kolaylaştığı tespit edilmiştir (2). Öte yandan, süperplastik alüminyum alaşımlarının ve Al-metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesi, yüksek mukavemetli difüzyon kaynağı ihtiyacını artırmaktadır (86).

Alüminyum ile metalürjik olarak uyum göstermeyen bakır arasında difüzyon kaynağı uygulanmıştır. Calvo ve diğerleri, Al ile Cu'ı difüzyon kaynağı ile 520 °C'lik sabit sıcaklıkta 15 dakikalık sürede 0,25 ile 1,60 MPa'lık basınçlarda birleştirerek en büyük problemin intermetalik bileşik ve ara fazlar olduğunu tespit etmişlerdir (87).

Ti alaşımları ile, paslanmaz çelik arasında yüksek mukavemetli katı hal difüzyon kaynağı gerçekleştirilmiştir. Ancak TiFe, TiFe₂, TiCr₂, Ti₂Ni gibi bileşiklerle ana metaller arasında intermetalik fazların oluşması sebebiyle bağlantının mukavemeti azalmaktadır (2). Kısa veya uzun fiberli, metal matrisli kompozitlerin seramikle ve metallerin seramikle difüzyon kaynağında büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Seramiklerin (Al₂O₃, SiC, Si₃N₄) difüzyon kaynağı, seramiklerin mükemmel korozyon ve aşınma dirençleri sebebiyle birçok ülkede çalışılmıştır. Bunların kaynağa elverişsiz yönleri ise, süneklik yetersizliği, kusursuz, hassasiyeti ve çok değişken olmalarıdır. Bunu için seramikle metallerin difüzyonla kaynağı çıkar yol olarak görülmektedir. Ayrıca tokluğu geliştirmek için de seramik matris / seramik fiberleri kompozitler üretmek gerekmektedir (86).

9.2.8. Difüzyon kaynağı teknikleri

Difüzyon kaynağı günümüzde iki maksatla yapılmaktadır. Bunlar:

1. Bilimsel çalışmalar için, (araştırma amacıyla)
2. Mevcut bir tekniği kullanarak bir parçayı üretmek içindir.

Bunlardan ilki teste tabii tutulabilecek difüzyon kaynağı tipleri geliştirilirken, ikincisi ile istenen elemanı elde etmek mümkündür. Birleştirilen malzemeler arasında ilave bir malzeme kullanıp kullanılmamasına göre difüzyon kaynağı:

1. Difüzyon lehimleme (Folyo kullanılan),
 - a. Tek ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme,
 - b. Birden çok ara tabaka kullanılan difüzyonla lehimleme,
2. Ani sıvı faz kaynağı
3. Direkt Difüzyon kaynağıdır (88).

Difüzyonla lehimlemede birleştirilecek yüzeyler arasına, ergime sıcaklığı ana malzemeninkinden daha düşük, levha şeklinde ilave bir malzeme yerleştirilir. Çok katlı ara tabakalar, hem termal gerilmeyi, hem de diğer gerilmeleri giderici ek bir etkiye de sahiptirler (88). Ani sıvı faz kaynağı, ilk safhasında hızlı ısıtma ile yüzeylerden biri yada her ikisinin basınç altında çok kısa bir süre için ergitilip hızla soğutulduğu bir difüzyon kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Hem difüzyon lehimleme, hem de difüzyon kaynağında yüzeylerin çok hassas bir şekilde işlenmiş olmaları gerekirken ani sıvı faz kaynağında 80 numara zımpara ile yada hassas tornalama ile işlenmesinin yeterli olduğu bilinmektedir.

Difüzyon kaynağı uygulama ortamına göre iki grupta incelenir:

- 1) Koruyucu gaz atmosferinde difüzyon kaynağı.
- 2) Vakum altında difüzyon kaynağıdır.

Endüstriyel amaçlarla uygulanan difüzyon kaynakları, küçük kütleli ve büyük kütleli parçalara uygulanan difüzyon kaynağı diye iki grupta incelenir. Büyük kütleli difüzyon kaynağı, kalın kesitli, işlenmiş parçaların mekanik olarak basınç altında

birleştirilmesi işlemidir. Japon araştırmacılar, Ti-6Al-4V alaşımından birçok uçak parçasını 10^{-3} Pa vakum altında, 900 °C sıcaklıkta, 2,94 MPa bir basınç uygulayarak 2 saatte kaynak etmişlerdir. Difüzyon kaynağı ile üretilen ağır parçalar malzeme kullanım ve masraflarını azaltmak üzere, karmaşık şekilli işlenmiş yada dövülmüş parçaların yerini almaktadırlar (86).

9.2.9. Difüzyon kaynağı uygulamaları

Difüzyon kaynağı birçok üstünlüklere sahip bir kaynak usulüdür. Kullanım alanları:

- Genel mühendislik,
- Havacılık ve uzay sanayi
- Savunma sanayi
- Nükleer sanayi
- Elektronik sanayi şeklinde sıralanabilir.

Genel mühendislik alanında difüzyon kaynağı, kaynak çatlaması ve gevrek metaller arası yapıların oluşması tehlikesinin bulunduğu durumlarda kullanılmaktadır. Difüzyon kaynağının özel avantajlar sunduğu bağlantı türleri, yüzey kaplama, difüzyon kaynağıyla bir defada birleştirilmesi mümkün karmaşık şekilli ve içi boş yapı elemanları, döküm ve dövme parçalarda difüzyon kaynağı şeklinde sıralanabilir. Difüzyon kaynağı havacılık sanayinde, daha ucuz, daha verimli, daha hafif ve difüzyona daha yatkın parçaların üretimini mümkün kılarak bu sanayinin gelişmesine yardımcı olmaktadır. Havacılık sanayinde difüzyon kaynağı, yüzey yüzeye yada kenar kenara temas eden bağlantıların üretiminde genellikle dövme ve geleneksel kaynak usullerinin yerine kullanılmaktadır. Havacılık sanayinde difüzyon kaynağı uygulamalarına aşağıdaki örnekler verilebilir.

Amerika'da aralarında Northrop, Rockwell, Douglas Aircraft gibi şirketlerin bulunduğu 12 firma, 1000-5000 tonluk presler kullanılarak, difüzyon kaynağı ve süperplastik şekillendirme ile Ti alaşımlarından F 15 füze yuvası, B1 bombardıman

uçağı için patlama lülesi (füze çıkış bölgesi), T-38 uçağı için ana iniş arka kapısı, rüzgar kanatçıkları imal etmişler ve maliyette % 40' lara varan tasarruf sağlamışlardır (89).

Amerikan Rhor şirketi, petek şeklinde dizayn edilmiş olan bir hava kanalını, difüzyon kaynağı ile, bir tek işlemle üretmeyi başarmıştır (83). İngiliz Rolls Royce şirketi, uçak türbin kanatlarını (Ti-alaşımı) "uyarılmış difüzyon kaynağı" adını verdiği Cu ve Ni' den mamul ara tabakaların, iki panel arasına, mikro işlemci kontrollü bir elektro-kaplama metoduyla yerleştirilip basınç altında ve vakumda, yine mikro işlemci kontrollü bir ısıtma işlemi ile birleştirilmesi bir yöntemle üretmiştir (90).

Difüzyon kaynağı ile piston, silindir blokları gibi hidrolik elemanlar da üretilmiştir. Burada amaç çeliklerin yüzeylerinin bronz ile kaplanarak, (% 80 Cu-% 10 Sn-% 10 Pb) ağırlıktan tasarruf sağlanmasıdır.

Difüzyon kaynağının silah sanayindeki uygulamalarında amaç ise, diğer tekniklerle daha ekonomik ve entegre olarak üretilemeyen yapı ve elemanları üretmektir. Mesela, hidrojen mevcudiyetinin problem olduğu, martenzitik yapıdaki kaynaklı bağlantılarda, geleneksel kaynak usulleri yerine difüzyon kaynağı uygulanmaktadır. Planör tip uçakların üretiminde, çelik ve alüminyumun difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi büyük kolaylıklar sağlamaktadır (83).

Nükleer endüstride difüzyon kaynağı çok yaygın olarak kullanılmakla beraber, Battelle' nin "Sıcak-İzostatik Difüzyon Kaynağı" küçük UO_2 levhacıklarıyla düz plaka tipi yakıt elemanları üretiminde kullanılmıştır. Amerikan ordusu için, seyyar güç reaktörlerinin, tüp şeklindeki paslanmaz çelik ve UO_2 'den oluşan yakıt elemanlarının üretimi de difüzyon kaynağıyla yapılmaktadır. Yine, sıcak izostatik difüzyon kaynağı ile alüminyum kaplanmış tüp şeklinde uranyum alaşımı yakıt elemanlarında üretilmiştir (2, 83). Bunların dışında bir başka reaktör için tek parça termoelektrik bir pompa elemanı, difüzyon kaynağı ile birleştirilmek suretiyle, imal edilmiştir. Nükleer güç reaktörlerinde yaşanan tip, alüminyum alaşımı ile 300 serisinden paslanmaz çelikler arasında tüp geçişi difüzyon kaynağı ile yapılmış, Fe-

Al intermetalik bileşikleri önlemek için kaynak bölgesinde tungsten kullanılmıştır (83).

Elektronik devre üreticileri, silikon parçadan entegre devre üretildikten sonra, cipin bir alt tabakaya bağlanması, cip ve devrelerin elektrikli iletken malzemelerle bağlanması gibi işlerde birçok birleşme tekniği kullanmaktadır. Mikro elektronik sanayinde, silikon ciplerin bakır veya Ni-Fe esaslı led çerçevesine bağlanmasında, ara tabaka olarak altın bir folyo kullanılarak, difüzyon kaynağı uygulanmaktadır (91).

Difüzyon kaynağı plastik sanayinde, ekstrüzyon hatlarında kullanılan basınca dayanıklı ve tam sızdırmaz, enjektörlerin üretiminde kullanılmaktadır. Son yıllarda difüzyon kaynağının uygulaması, referans ve kalibrasyon bloklarının üretimine de girmiştir. Özellikle hassasiyetin ve mukavemetin sağlanması amacıyla, farklı malzemelerin birleştirilmesi ile imal edilen, bileşik malzemeler, bu konularda difüzyon kaynağını üstün kılmaktadır. Elektrik alanında esnek elektrikli iletkenlerin, çok sayıda levhacığın birleştirilmesinden meydana gelen yapısı, uçların difüzyon kaynağıyla birleştirilmesi sonucu üretilebilmiştir. Bu konudaki diğer potansiyel uygulamalar; ısı değiştiricilerinin kaplanması ile gelişmiş malzemelerin metal matris kompozitlerle birleştirilmesidir (75).

10. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

10.1. Deneysel Çalışmalar ve Malzemeler

Bu çalışmada ECKART Dorn firmasından temin edilen, “ECKA alüminyum AS 91/S ” kodlu, % 99,9 saflıkta, gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilmiş, toz tane boyutu -200 μm olan Al tozu matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak kullanılan $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ tozu ise T&N TECHNOLOGY LTD firmasından temin edilmiş olup, özellikleri Çizelge 10.1’de verilmiştir.

Çizelge 10.1. $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ tozun özellikleri

Gösterimi	SN-E-10												
Morfoloji	Eşeksenli												
Parçacık Boyutu (μm)	0,1 ~ 0,3												
Yüzey Alanı (m ² /g)	10 ~ 14												
Kimyasal Analizi	<table><tr><td>N</td><td>> % 38,0</td><td>Fe</td><td>< 100 ppm</td></tr><tr><td>O</td><td>< % 2,0</td><td>Ca</td><td>< 50 ppm</td></tr><tr><td>C</td><td>< % 2,0</td><td>Al</td><td>< 50 ppm</td></tr></table>	N	> % 38,0	Fe	< 100 ppm	O	< % 2,0	Ca	< 50 ppm	C	< % 2,0	Al	< 50 ppm
N	> % 38,0	Fe	< 100 ppm										
O	< % 2,0	Ca	< 50 ppm										
C	< % 2,0	Al	< 50 ppm										
Kristalleşme Derecesi (%)	~100												
Faz Kompozisyonu	<table><tr><td>% 95 α Fazı</td></tr><tr><td>% 5 β Fazı</td></tr></table>	% 95 α Fazı	% 5 β Fazı										
% 95 α Fazı													
% 5 β Fazı													

Bu çalışmada kullanılan tozların tartımı, alaşımlandırılması, preslenmesi, sinterlenmesi, yoğunluk ölçümleri, mekanik testleri ve mikro yapı incelemeleri G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Laboratuvarlarında, toz tane boyut ölçümü, kompozit malzemenin ve kaynak bölgesinin sertlik ölçümü G.Ü. Müh. Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümünde, Difüzyon kaynak fırını Simav Teknik Eğitim Fakültesi’nden temin edilmiş olup, difüzyon kaynağı Turgay Ciner Çok Programlı Lisesi Metal İşleri Atölyesinde yapılmıştır. Kaynatılan numunelerin kesilmesi bir kesme aparatı ile G.Ü.T.E.F. Yapı Eğitimi Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır.

10.2. Mekanik Alaşımlama

Mekanik alaşımlama işlemi üç kategoride yapılmıştır. Bunlar;

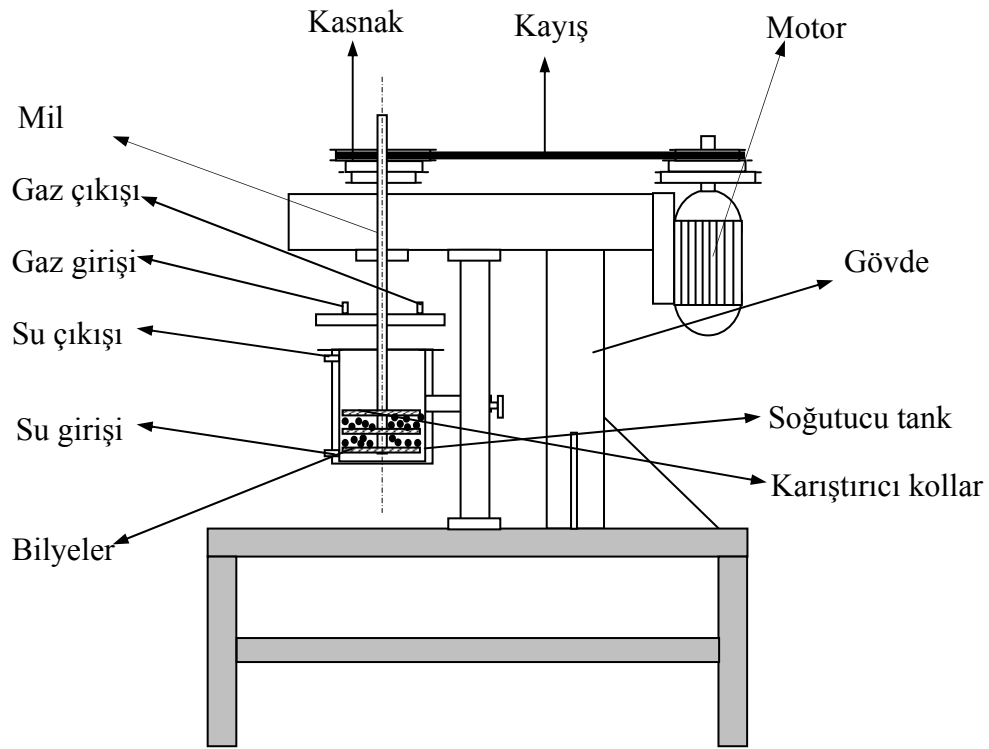
1. % 95 Al-% 5 Si_3N_4 (47,5 gr Al + 2,5 gr Si_3N_4)
2. % 90 Al-% 10 Si_3N_4 (45 gr Al + 5 gr Si_3N_4)
3. % 85 Al-% 15 Si_3N_4 (42,5 gr Al + 7,5 gr Si_3N_4)

Mekanik alaşımlama için öncelikle 1200 cm^3 hacmindeki atritör silindir içerisine, 10 mm çapında 500 gr çelik bilye doldurulmuştur. Daha sonra 50 gr karışım toz ve alaşımlama süresince alüminyum tozunun silindir iç yüzeylerine ve silindir içerisindeki bilyelere sıvanmasını önlemek amacıyla % 2 oranında Zn-Sterat atritör içerisine doldurulmuştur. Alaşımlama süresince alüminyumun oksitlenmesini önlemek için atritör silindir içerisinden sürekli olarak yüksek saflıkta argon gazı geçirilmek suretiyle ortam inert hale getirilmiştir. Mekanik alaşımlama süresince atritör silindirin sıcaklık artışını önlemek amacıyla etrafındaki su soğutma sistemiyle devamlı olarak soğutulmuştur. Hazırlanan karışım tozlar 2 saat süreyle, 450 dev/dk'lık devir ile dönen atritör içerisinde mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur.

Mekanik alaşımlama işleminin her seferinde 50 gr kompozit malzeme tozu elde edilmiştir ve toplam olarak her çalışma gurubu için 150'şer gram kompozit malzeme tozu üretilmiştir. Şekil 10.1'de mekanik alaşımlama düzeneği şematik olarak, Çizelge 10.2'de ise mekanik alaşımlama deney parametreleri verilmiştir.

Çizelge 10.2. Mekanik alaşımlama deney parametreleri

Numune	Al (g)	α - Si_3N_4 (g)	Yağlayıcı (g)	Bilye/ karışım toza oranı (Ağırlık olarak)	MA süresi (Saat)	MA Atm.	Atritörün dön. dev. (dev/dak)
1	47,5	2,5	1	10:1	2	Ar	450
2	45	5	1	10:1	2	Ar	450
3	42,5	7,5	1	10:1	2	Ar	450



Şekil 10.1. Mekanik alaşımlama düzeneği

10.3. MA Sonrası Elde Edilen Tozların Karakterizasyonu

10.3.1. Toz tane boyut ölçümü

Mekanik alaşımlama sonrası elde edilen $\text{Al} + \% 5 \text{Si}_3\text{N}_4$, $\text{Al} + \% 10 \text{Si}_3\text{N}_4$, ve $\text{Al} + \% 15 \text{Si}_3\text{N}_4$ karışımı tozlardan numuneler alınarak G.Ü. Müh. Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümünde, Malvern Mastersizer E Ver 1.2b, cihazı ile toz tane boyutu ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlerle mekanik alaşımlamaya bağlı olarak karışımı tozların toz tane boyutundaki değişimlere bakılmıştır.

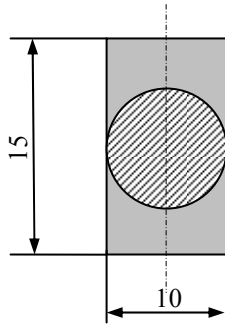
10.3.2. Metalografi incelemesi

Optik incelemeler için tozlar soğuk (polyester) gömme yapılmıştır. Polyester gömme işleminde, epoksi reçine, sertleştirici ve hızlandırıcıdan oluşan sıvı karışımın gömme

kalıbındaki numune üzerine dökülerek katılaşması sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler metalografik inceleme için sırasıyla 600, 800, 1000 ve 1200 zımpara ile zımparalanmıştır. Daha sonra zımparalanan numune yüzeyleri 6 μm Al_2O_3 pasta sürülen parlatma diskinde parlatılarak yüzeyler metalografik inceleme için hazır hale getirilmiştir. Parlatma sonrası numunelerin optik mikroskopta toz tane şekli incelenmiştir. Bu çalışma ile mekanik alaşımlama öncesi tozların orijinal parçacık morfolojilerinin mekanik alaşımlama ile ne şekilde değiştiği araştırılmıştır. Optik incelemeler ve değişik büyütmelerde çekilen resimler, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme Bilimi Eğitimi Anabilim Dalı Metalografi laboratuvarında bulunan Prior marka optik mikroskopta yapılmıştır.

10.4. Mekanik Alaşımlama Sonrası Tozların Preslenmesi

Mekanik alaşımlama sonrası elde edilen karışım tozlardan difüzyon kaynağı için gerekli boyutlarda numune Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Malzeme Bilimi Eğitimi Anabilim Dalı Metalografi laboratuvarında bulunan preste preslenerek elde edilmiştir (Şekil 10.2).

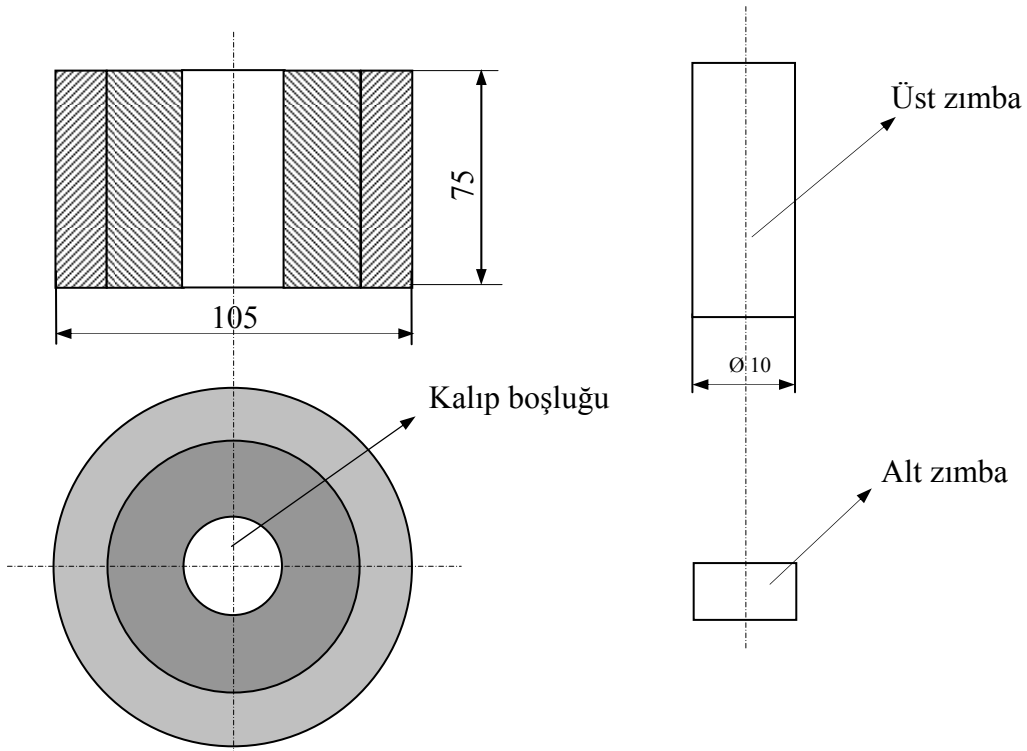


Şekil 10.2. Difüzyon kaynağı için hazırlanmış numune boyutları

Blok numuneler Şekil 10.3.'de görülen tek yönlü aksenal kalıpta 500 MPa (50 kg/mm^2) presleme basıncı altında ve 1,5 mm/dak yükleme hızında elde edilmiştir. Numunede katmanlaşma olmaması ve numunenin kalıptan kolayca alınabilmesi için

kalıp iç yüzeyleri ile alt ve üst zımba yüzeyleri Zn-Sterat + etil alkol karışımı ile yağlanmıştır.

Numune boyu en az 15 mm ve çapı 10 mm olacak şekilde kalıp içerisine konacak karışım toz miktarı hesaplanarak yaklaşık olarak 3,2 g olarak bulunmuştur



Şekil 10.3. Numunelerin üretiminde kullanılan kalıp ve zımbalar

10.4.1. Preslenen numunelerin ham yoğunluklarının ölçülmesi

Presleme sonrası numunelerin ham yoğunluk değerlerini belirlemek üzere, üretilen blok numunelerin 0,1 mg hassasiyetteki üzerinde yoğunluk kiti bulunan sartoryus marka terazide ham yoğunluk değerleri ölçülmüştür (Resim 10.1). Yoğunluk ölçme işleminde % 5 Si_3N_4 , %10 Si_3N_4 ve %15 Si_3N_4 içeren numunelerin her birinden üçer adet alınarak ham yoğunlukları ölçülmüş ve ortalama değerleri alınmıştır.

- Yoğunluk kitiyle ham yoğunluk ölçme

- Numunenin havadaki ağırlığı ölçülerek (W)
- Darası alınır (Numune üst kefedeki iken).
- Numune su içindeki alt kefeye konarak tartılır (G)
- Havadaki ağırlık sudaki ağırlığına bölünür ve suyun sıcaklığına göre katalogtan alınan katsayı (Rho) ile çarpılarak numunenin yoğunluğu bulunur.
- Bulunan yoğunluk değeri teorik yoğunluğa bölünerek gerçek yoğunluk bulunur.

$$Yoğ = \frac{W}{G} \times Rho (g/cm^3) \quad [10.1]$$

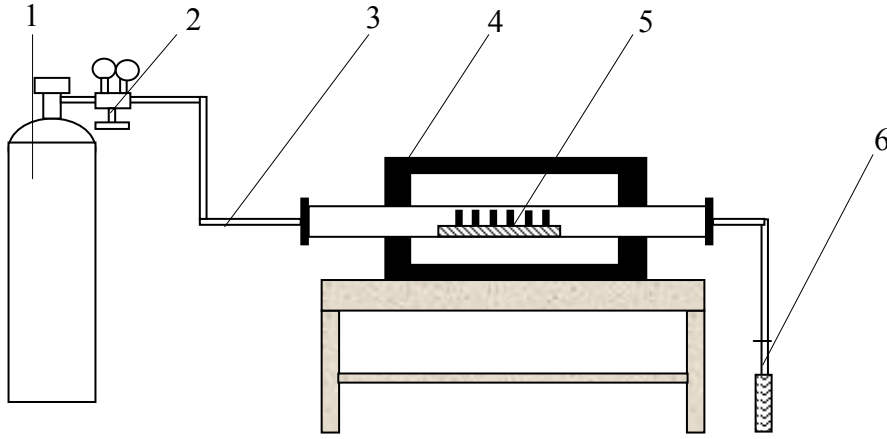


Resim 10.1 Hassas terazi

10. 5. Sinterleme

Presleme sonrası elde edilen blok parçalarda mukavemet artışını sağlamak ve yağlayıcıyı (Zn-sterat) uçurmak amacıyla numuneler önceden belirlenen 650 °C sıcaklıkta atmosfer kontrollü protherm PTF/16 Serisi tüp fırında 4 saat süreyle sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı her çalışma gurubu için sabit tutulmuştur. Fırın oda sıcaklığında iken blok numuneler grafit bir kayık içerisinde fırın merkezine

yerleştirilmiştir. Daha sonra fırın 5 °C /dak ısınma hızı ile sinterleme sıcaklığına kadar ısıtılmış, fırın sinterleme sıcaklığına geldiğinde bu sıcaklıkta 4 saat bekletilmiştir. Numunelerin oksitlenmesini önlemek amacıyla ortamdan sürekli olarak yüksek saflıkta argon gazı geçirilerek koruyucu ortamda sinterleme yapılmıştır.



Şekil 10.4. Sinterlemede kullanılan deney düzeneği; 1) Argon tüpü, 2) Manometre
3) Gaz taşıyıcı hortumlar, 4) Fırın gövdesi, 5) Numuneler, 6) Gaz çıkış kontrol kabı

10.5.1. Sinterlenmiş numunelerin yoğunluklarının ölçülmesi

Sinterleme sonrası her çalışma grubundan üçer adet numune seçilmiş ve bunların yoğunlukları ölçülerek ortalama değerleri alınmıştır. Yoğunluk ölçümleri ham yoğunluk ölçümünde olduğu gibi hesaplanmıştır. Sinterleme sonrası yoğunluk ölçümleri ile blok parçaların sinterleme öncesi ham yoğunluklarındaki değişimler belirlenmiştir.

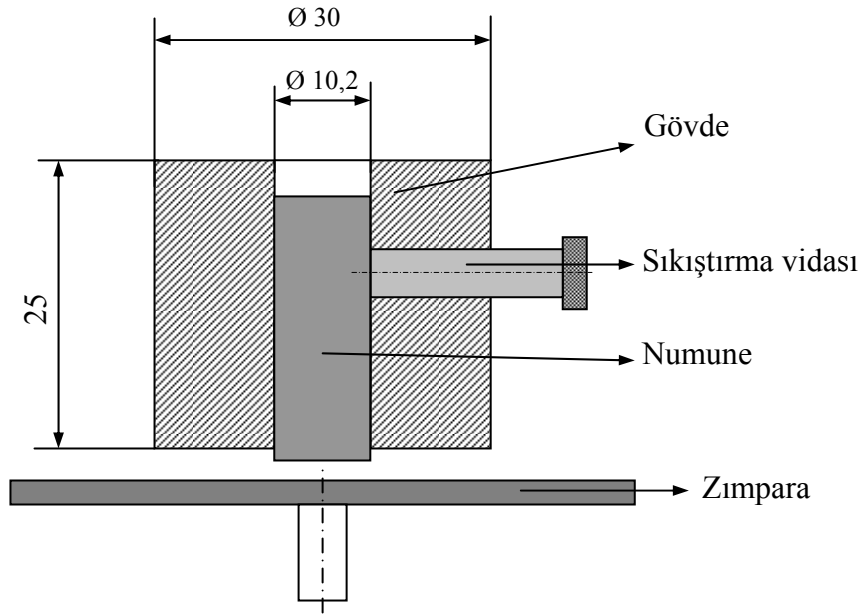
10.5.2. Sinterlenen numunenin optik mikroskopta yapısının incelenmesi

Sinterlenen blok numuneler optik incelemeler için soğuk (polyester) gömme yapılmıştır. Toz numunelerin optik mikroskop çalışmalarında olduğu gibi aynı

şekilde işlemlerden geçirilerek (Bkz. Sayfa 65), numunelerin optik mikroskopta değişik büyütme ölçeklerinde resimleri çekilerek mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

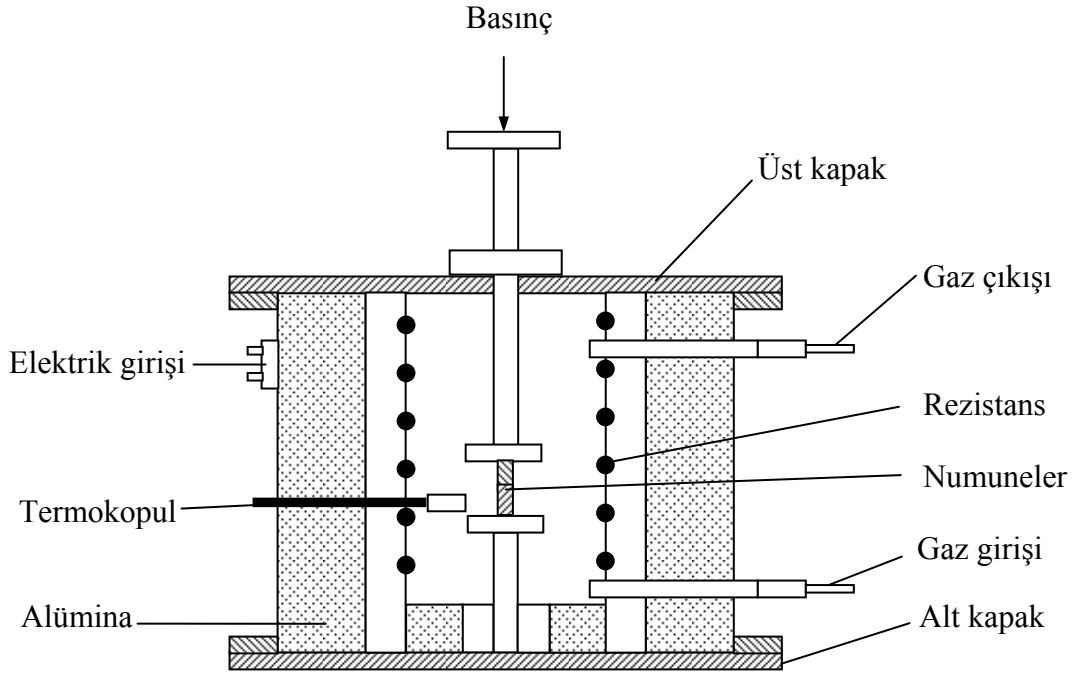
10.6. Kaynak Numunelerinin Hazırlanması ve Difüzyon Kaynağı

Numunelerin birbirine kaynak yapılacak yüzeyleri, sırasıyla 800, 1000, 1200 zımpara ile zımparalanmış, alkol ile temizlenmiş ve zaman geçirmeden difüzyon fırını içerisine yerleştirilmiştir. Difüzyon fırını içerisi öncelikle iki kez vakum yapılmış, daha sonra ortam argon gazı ile doldurulmuştur. Şekil 10.5’de kaynak yapılacak numunelerin yüzeyini hazırlamakta kullanılan aparatın kesit şekli görülmektedir.

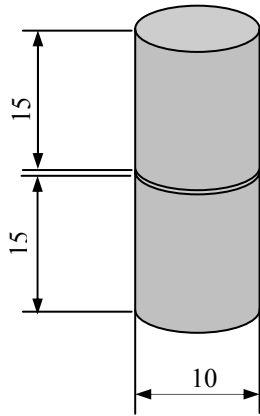


Şekil 10.5. Zımparalama aparatı

Difüzyon kaynağının en önemli üç parametresinin basınç, sıcaklık ve zaman olduğunu daha önce belirtmiştik. Bu çalışmada basınç sabit tutulmuş, sıcaklık ve zaman değiştirilmiştir. Kaynak işlemlerinde basınç 2,5 MPa, kaynak sıcaklığı 620°C, 630 °C ve 640 °C, kaynak süresi ise 60, 90 ve 120 dakika uygulanmıştır.



Şekil 10.6. Şematik olarak difüzyon kaynak fırını

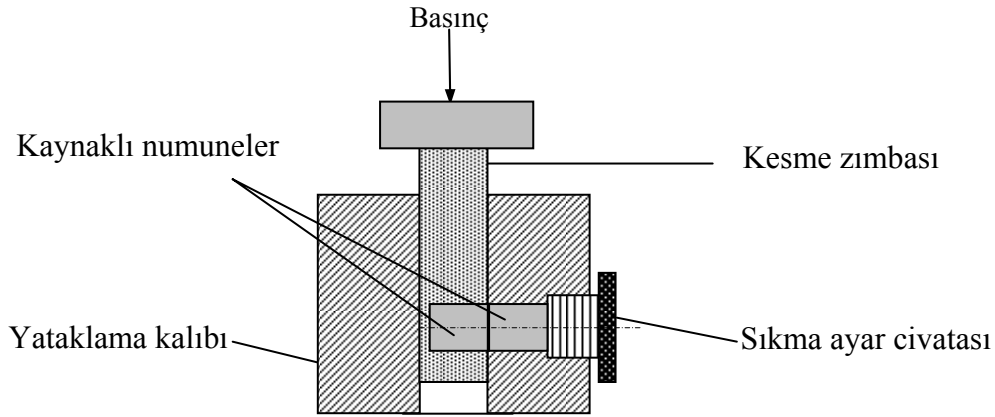


Şekil 10.7. Kaynak işlemi için hazırlanan numunelerin şematik görünümü

10.6.1. Kesme testi

Difüzyon kaynak işleminden sonra her numuneden üçer adet numune kesme kalıbı kullanılarak preste kesilmiştir. Kesme işlemi sırasında presin yükleme hızı 0,4 mm/dk olarak alınmıştır. Difüzyon kaynağı yapılan parçaların kesme uygulaması,

bir kesme aparatı ile (Şekil 10.8) G.Ü.T.E.F. Yapı Eğitimi Bölümü laboratuvarında yapılmıştır. Önce ana malzeme kesilmiş daha sonra kaynak numunesi kaynaklı birleştirme yerinden kesilmiştir.



Şekil 10.8. Numune kesme aparatı

10.6.2. Kaynak bölgesinin mikroyapı incelemesi

Kesme testi sonrası kesilen numune gruplarından birer adet kaynak yapılmış ancak kesilmemiş numune soğuk gömme ile kalıba alınmış ve kaynak bölgelerinden mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

10.6.3. Kompozit malzemenin ve kaynak bölgesinin sertlik ölçümü

% 5-10-15 Si_3N_4 ihtiva eden kompozit malzemenin ve 640 °C'de 120 dakika kaynatılan numunelerin kaynak bölgesi sertlik ölçümü, G.Ü. Müh. Mim. Fak. Makine Mühendisliği Bölümünde, BROOKS marka sertlik ölçme cihazı ile Rockwell A cinsinden yapılmıştır.

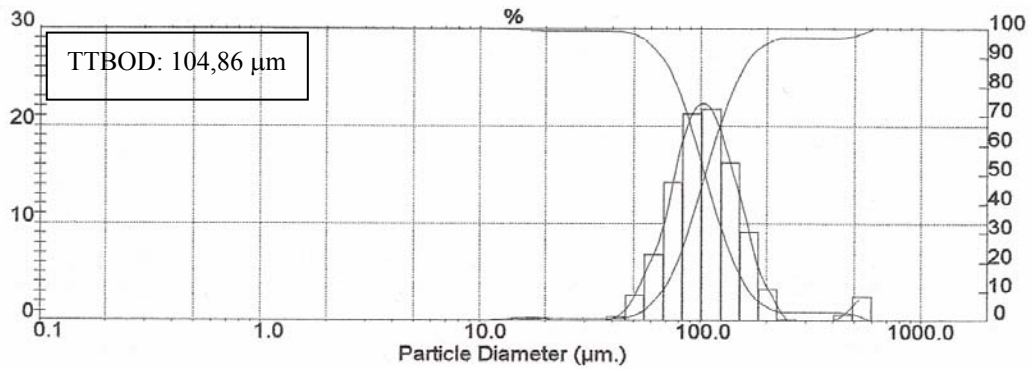
11. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

11.1. Toz Tane Boyutu

Mekanik alaşımlama sonrası elde edilen tozların toz tane boyut ölçümü sonuçlarında, mekanik alaşımlama sonucuna bağlı olarak toz tane boyutunun % 5 Si_3N_4 içeren karışımda toz tane boyutunda küçülme çok az miktarda meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak alüminyumun yumuşak bir yapıya sahip olması ve toz tanelerinin mekanik alaşımlama esnasında henüz yeterince pekleşme ve bölünmeye uğramadığını göstermektedir. Bu nedenle saf alüminyuma göre toz tane boyutunda çok küçük bir azalma olmuştur. % 10 ve % 15 Si_3N_4 içeren karışım numunelerde ise toz tane boyutunun önemli ölçüde küçüldüğü görülmüştür. Bunun nedeni olarak matris malzeme içerisinde bulunan Si_3N_4 tozu matris yapı içerisinde öğütücü görevi yaparak matris malzemenin pekleşme miktarına ve daha fazla parçalanıp küçülmesine katkı sağlamıştır.

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.00	2.38	0.00
2.38	0.00	2.90	0.00
2.90	0.00	3.53	0.00
3.53	0.00	4.30	0.00
4.30	0.00	5.24	0.00
5.24	0.00	6.39	0.00
6.39	0.00	7.78	0.00
7.78	0.00	9.48	0.00
9.48	0.07	11.55	0.07
11.55	0.17	14.08	0.24
14.08	0.27	17.15	0.52
17.15	0.29	20.90	0.81
20.90	0.00	25.46	0.81

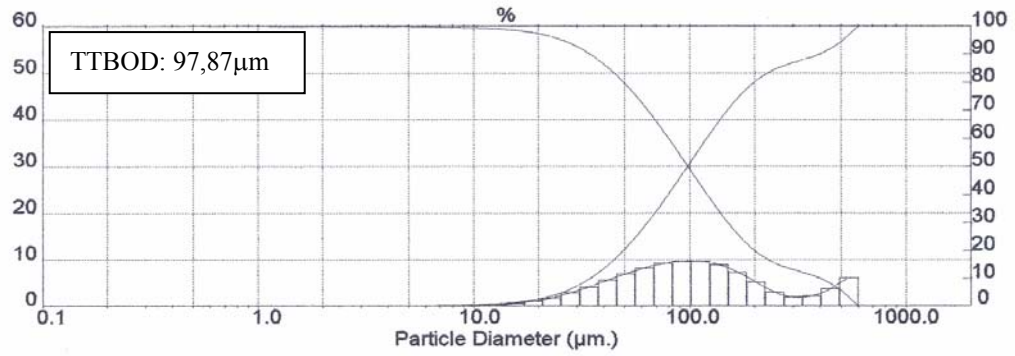
Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
25.46	0.00	31.01	0.81
31.01	0.00	37.79	0.81
37.79	0.42	46.03	1.24
46.03	2.64	56.09	3.88
56.09	6.87	68.33	10.75
68.33	14.23	83.26	24.98
83.26	21.22	101.44	46.20
101.44	21.71	123.59	67.91
123.59	16.26	150.57	84.16
150.57	9.18	183.44	93.35
183.44	3.30	223.51	96.65
223.51	0.20	272.31	96.85
272.31	0.00	331.77	96.85
331.77	0.00	404.21	96.85
404.21	0.66	492.47	97.52
492.47	2.48	600.00	100.00



Şekil 11.1. Saf Al toz tane boyutu dağılımı

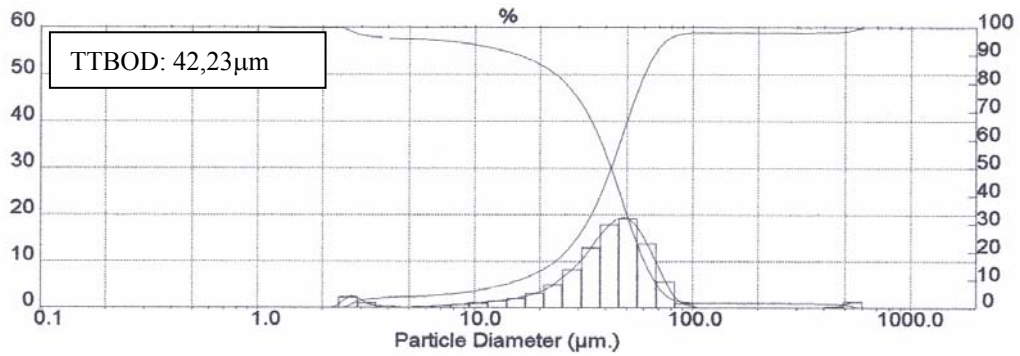
Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.00	2.38	0.00
2.38	0.00	2.90	0.00
2.90	0.04	3.53	0.04
3.53	0.07	4.30	0.10
4.30	0.08	5.24	0.19
5.24	0.11	6.39	0.29
6.39	0.13	7.78	0.42
7.78	0.16	9.48	0.57
9.48	0.23	11.55	0.80
11.55	0.38	14.08	1.18
14.08	0.66	17.15	1.84
17.15	1.16	20.90	3.00
20.90	1.91	25.46	4.91

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
25.46	2.94	31.01	7.85
31.01	4.21	37.79	12.06
37.79	5.60	46.03	17.66
46.03	6.99	56.09	24.65
56.09	8.25	68.33	32.90
68.33	9.20	83.26	42.10
83.26	9.66	101.44	51.76
101.44	9.60	123.59	61.36
123.59	8.91	150.57	70.27
150.57	7.35	183.44	77.62
183.44	5.14	223.51	82.76
223.51	3.09	272.31	85.85
272.31	2.04	331.77	87.89
331.77	2.28	404.21	90.17
404.21	3.79	492.47	93.96
492.47	6.04	600.00	100.00

Şekil 11.2. % 5 Si_3N_4 ihtiva eden tozun tane boyut dağılımı

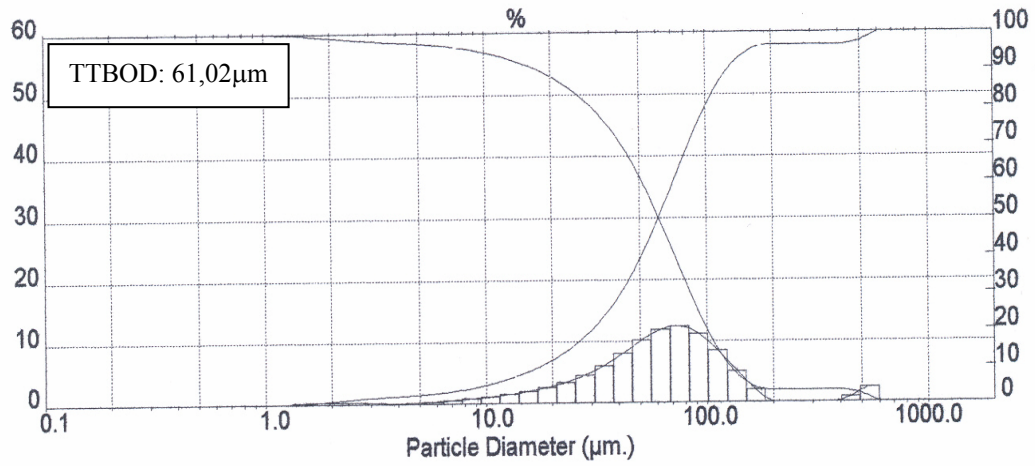
Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
0.50	0.00	1.32	0.00
1.32	0.00	1.60	0.00
1.60	0.00	1.95	0.00
1.95	0.03	2.38	0.03
2.38	2.35	2.90	2.37
2.90	1.13	3.53	3.50
3.53	0.47	4.30	3.97
4.30	0.19	5.24	4.17
5.24	0.33	6.39	4.50
6.39	0.59	7.78	5.09
7.78	0.85	9.48	5.93
9.48	1.18	11.55	7.12
11.55	1.58	14.08	8.69
14.08	2.17	17.15	10.86
17.15	3.18	20.90	14.05
20.90	5.05	25.46	19.10

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
25.46	8.28	31.01	27.38
31.01	13.00	37.79	40.38
37.79	17.88	46.03	58.26
46.03	19.22	56.09	77.48
56.09	13.88	68.33	91.37
68.33	5.68	83.26	97.05
83.26	1.06	101.44	98.11
101.44	0.02	123.59	98.13
123.59	0.00	150.57	98.13
150.57	0.00	183.44	98.13
183.44	0.00	223.51	98.13
223.51	0.00	272.31	98.13
272.31	0.00	331.77	98.13
331.77	0.05	404.21	98.18
404.21	0.34	492.47	98.51
492.47	1.49	600.00	100.00

Şekil 11.3. %10 Si_3N_4 ihtiva eden tozun tane boyut dağılımı

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
0.50	0.12	1.32	0.12
1.32	0.34	1.60	0.46
1.60	0.48	1.95	0.94
1.95	0.49	2.38	1.43
2.38	0.42	2.90	1.85
2.90	0.33	3.53	2.18
3.53	0.28	4.30	2.47
4.30	0.32	5.24	2.79
5.24	0.46	6.39	3.24
6.39	0.67	7.78	3.92
7.78	0.93	9.48	4.84
9.48	1.24	11.55	6.08
11.55	1.62	14.08	7.71
14.08	2.09	17.15	9.79
17.15	2.68	20.90	12.48
20.90	3.48	25.46	15.96

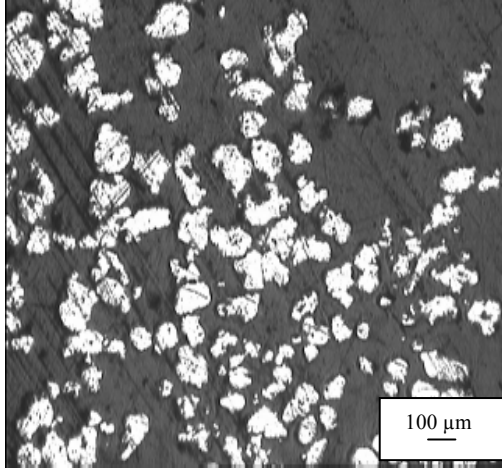
Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
25.46	4.61	31.01	20.57
31.01	6.15	37.79	26.71
37.79	8.11	46.03	34.83
46.03	10.23	56.09	45.06
56.09	11.95	68.33	57.01
68.33	12.47	83.26	69.47
83.26	11.22	101.44	80.70
101.44	8.49	123.59	89.18
123.59	5.14	150.57	94.32
150.57	2.13	183.44	96.45
183.44	0.07	223.51	96.52
223.51	0.00	272.31	96.52
272.31	0.00	331.77	96.52
331.77	0.02	404.21	96.53
404.21	0.99	492.47	97.52
492.47	2.48	600.00	100.00



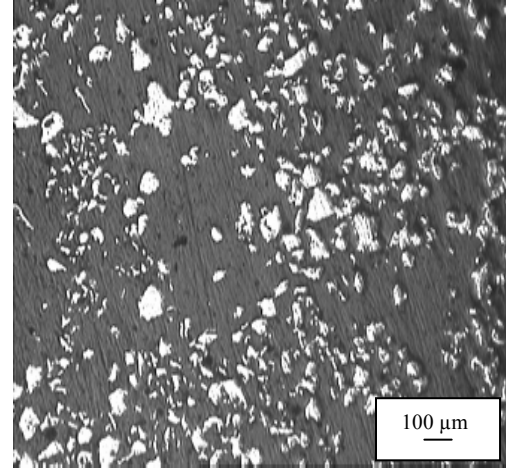
Şekil 11.4. % 15 Si₃N₄ ihtiva eden tozun tane boyut dağılımı

11.2. Tozların Morfolojisi

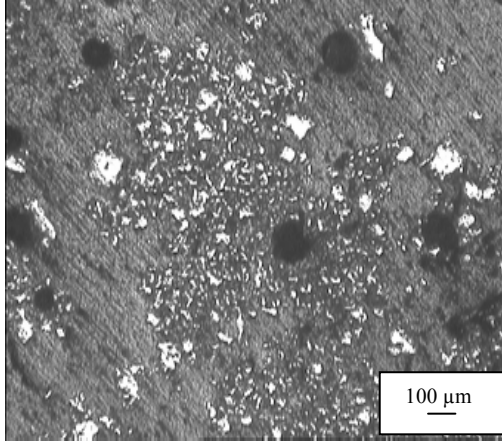
Optik mikroskop çalışması sonucu elde edilen toz tane resimleri aşağıda verilmiştir. Resimlerdeki toz tane boyut ve şekilleri, yukarıda verilen toz tane boyutu ölçümlerini destekler görüntüdedir. En küçük toz tane boyutu %10 Si₃N₄ içeren numunede elde edilirken %15 Si₃N₄ içeren numunede toz partiküllerinin birbirlerine yeniden kaynak olarak toplanması ile ortalama toz tane boyutu bir miktar artış göstermiştir. % 5 Si₃N₄ içeren numunede toz tane boyutunda çok az miktarda küçülme meydana gelmiştir. Bunun nedeni olarak da Si₃N₄ az miktarda olduğundan yeterli oranda soğuk kaynak, pekleşme ve kırılma meydana gelmemiştir.



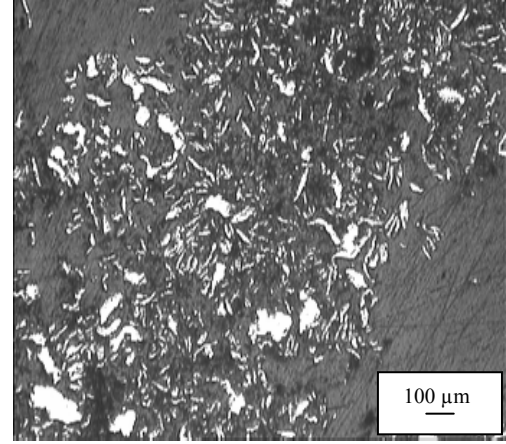
Resim 11.1. Saf Al toz tane şekli



Resim 11.2. Al-%5 Si₃N₄ toz tane boyutu görünümü



Resim 11.3. Al-%10 Si₃N₄toz tane boyutu görünümü



Resim 11.4. Al-%15 Si₃N₄toz tane boyutu görünümü

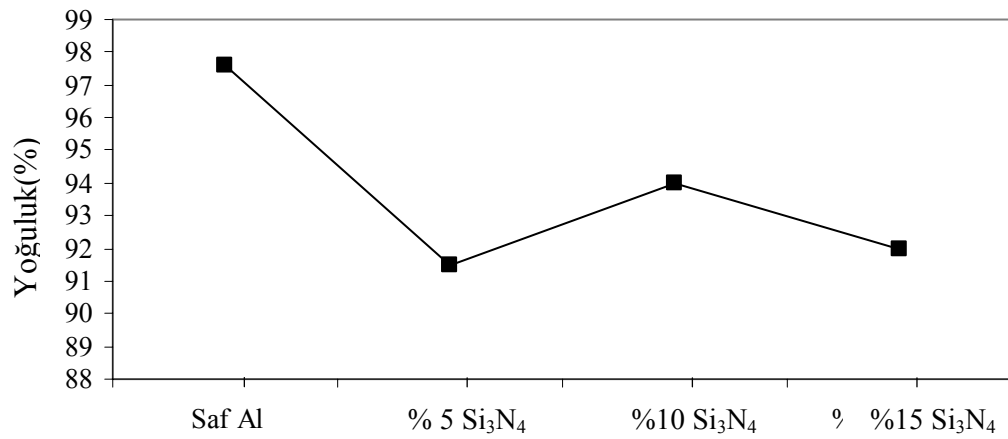
11.3. Presleme Sonrası Ham Yoğunluk

Üç farklı numune için presleme sonrası elde edilen ham yoğunluk sonuçları çizelge 11.1’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde uygulanan presleme basıncıyla yüksek miktarda yoğunluk elde edildiği görülmektedir. Yine çizelgede karışım tozlar içerisinde en yüksek yoğunluğa %10 Si₃N₄’içeren numunenin sahip olduğu

görülmektedir. Bunun en önemli nedeni bu numunenin toz tane boyutunun en küçük olmasındandır. Toz tane boyutu küçüldükçe elde edilen yoğunluk artmıştır. %15 Si_3N_4 içeren numunede ise toz tane boyutundaki ve pekleşmedeki artışa karşılık yoğunluğu %10 Si_3N_4 içeren numuneye göre bir miktar düşmüştür.

Çizelge 11.1. Presleme sonrası ham yoğunluk değerleri

Malzeme	Presleme Basıncı (MPa)	Ham Yoğunluk (%)	Ortalama Yoğunluk (%)
Saf Al	500	97	97,6
	"	98	
	"	98	
Al + % 5 Si_3N_4	"	90,5	91,5
	"	92	
	"	92	
Al + % 10 Si_3N_4	"	94	94
	"	94	
	"	94	
Al + % 15 Si_3N_4	"	92	92
	"	92	
	"	92	



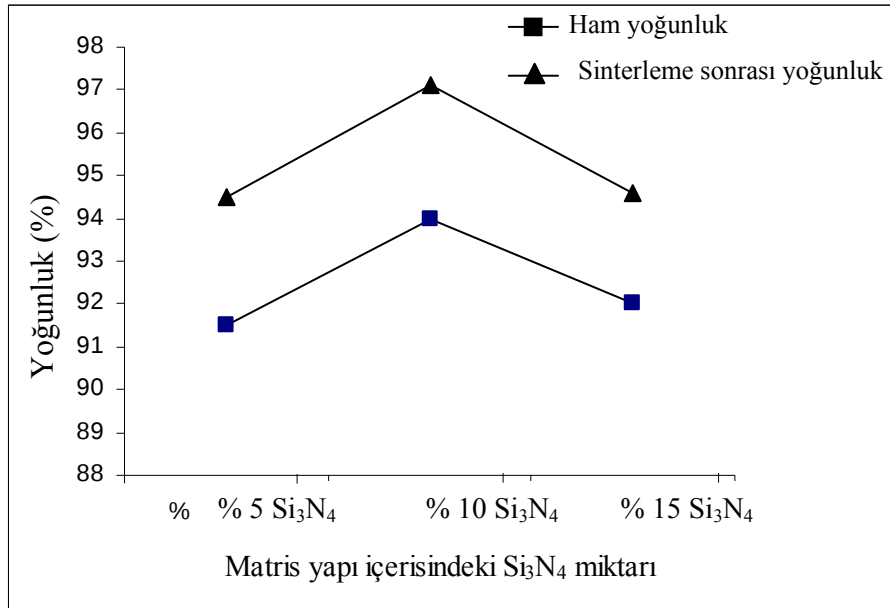
Şekil 11.5. Si_3N_4 miktarına bağlı olarak malzemenin ham yoğunluk değerlerindeki değişim

11.4. Sinterleme Sonrası Yoğunluk

Çizelge 11.2’de ham yoğunluk ve sinterleme sonrası yoğunluk değerleri verilmiştir. % 5 ve %10 Si_3N_4 içeren içeren kompozitin sinterleme sonrası yoğunluğu % 3,2; % 15 Si_3N_4 içeren kompozitin sinterleme sonrası yoğunluğu % 2,8 oranında arttığı belirlenmiştir. En fazla yoğunluk artışı % 5 ve % 10 Si_3N_4 içeren kompozit malzemede gözlenmiştir. Yoğunluk artışı ihtiva ettiği Si_3N_4 oranına göre değişim göstermiştir. Si_3N_4 miktarı arttıkça sinterleme sonrası yoğunluk artışında düşüş gözlemlenmiştir. Bunun nedeni sinterleme anında Si_3N_4 tozlarının sinterleşme yani alüminyum tozları arasındaki difüzyonu engelleyici etkisindendir.

Çizelge 11.2. Sinterleme Sonrası Yoğunluk

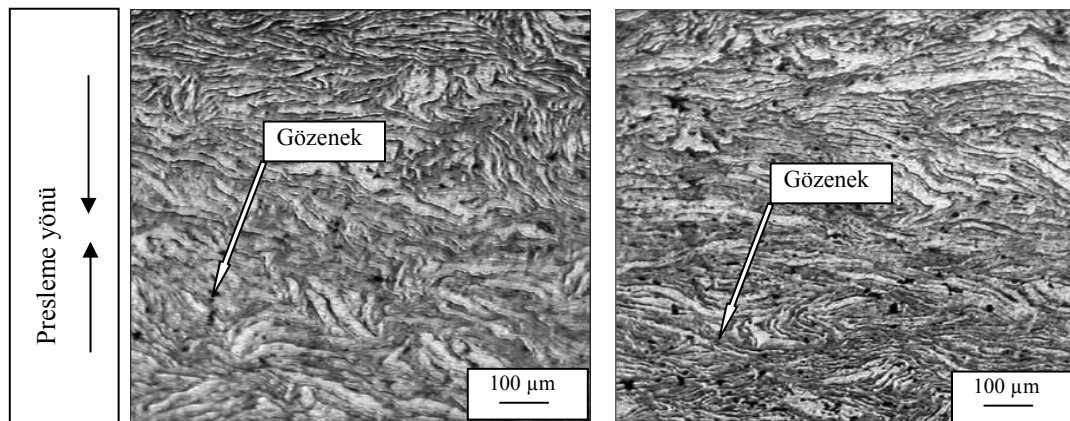
Kompozit	Presleme Basıncı (MPa)	Ham Yoğunluk (%)	Sinterleme Sıcaklığı (°C)	Sinterleme Sonrası Yoğunluk (%)	Ortalama (%)
Al+% 5 Si_3N_4	500	91,5	650	94,5	94,5
	"		"	95	
	"		"	94	
Al+% 10 Si_3N_4	"	94	"	97,1	97,1
	"		"	97,1	
	"		"	97,2	
Al+% 15 Si_3N_4	"	92	"	94,4	94,6
	"		"	95	
	"		"	94,5	



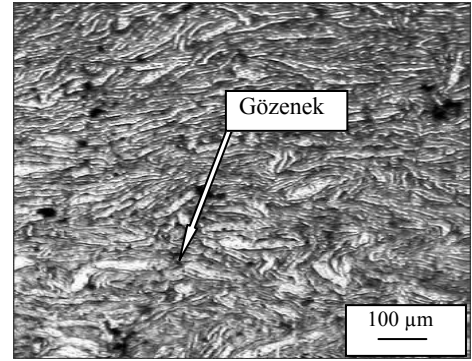
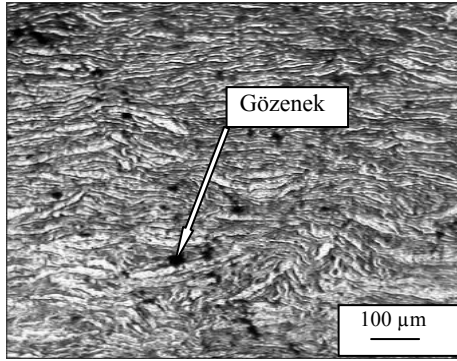
Şekil 11.6. Sinterleme sonrası yoğunluk ile ham yoğunluk arasındaki fark

11.5. Sinterlenmiş Numunelerin Mikroyapı İncelemesi

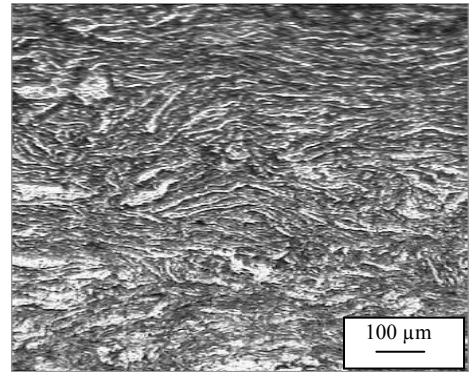
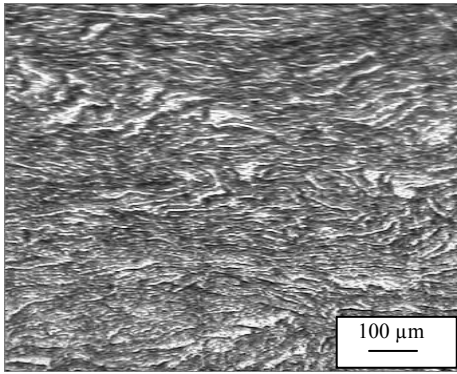
Sinterleme sonrası bütün kompozit numunelerde yeteri derecede sinterleşme olduğu görülmüştür. Ayrıca kompozit numunelerden alınan resimlerde presleme yönüne bağlı olarak bir yönlendirme olduğu görülmektedir.



Resim 11.5. Al- % 5 Si_3N_4 oranındaki ana kompozitin mikroyapısı görünümü



Resim 11.6. Al-%10 Si₃N₄ oranındaki ana kompozitin yapısal görünümü



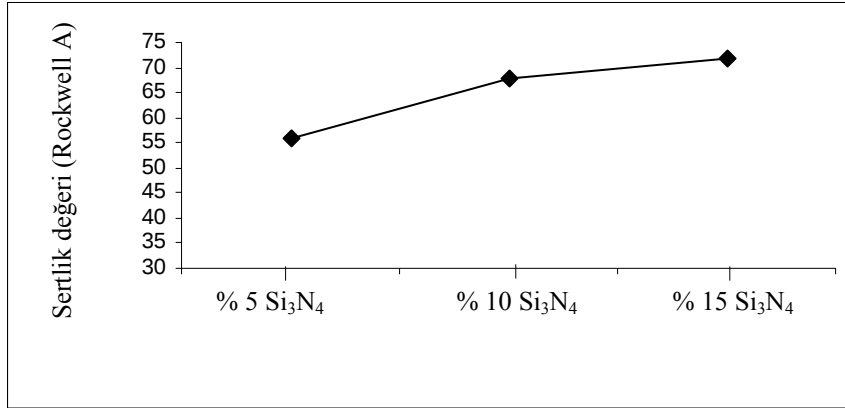
Resim 11.7. Al + %15 Si₃N₄ oranındaki ana kompozitin yapısal görünümü

11.6. Kompozit malzemenin ve kaynak bölgesinin sertlik ölçüm sonuçları

Üç farklı kategoride elde edilen kompozit malzemelerin sertlik sonuçları çizelge 11.3'de verilmiştir. Si₃N₄ miktarına bağlı olarak kompozit malzemenin sertlik değerinde değişimler olmuştur. Si₃N₄ miktarı arttıkça sertlik değerinde artış belirlenmiştir.

Çizelge 11.3. Kompozit malzemenin sertlik ölçüm sonuçları

Kompozit Malzeme	Sertlik değeri (Rockwell A)
% 5 Si ₃ N ₄	56
% 10 Si ₃ N ₄	68
% 15 Si ₃ N ₄	72

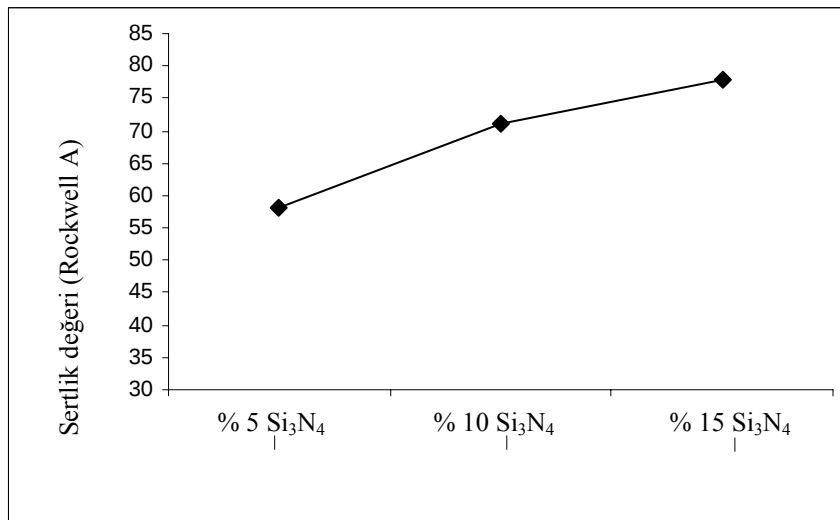


Şekil 11.7. Kompozit malzeme sertlik ölçüm grafiği

Difüzyon kaynağı sonrası kaynak bölgesinin sertliği, kompozit malzemenin sertliğine göre artı yönde bir değişkenlik göstermiştir. Ancak bu artış çok düşük bir miktarda meydana gelmiştir.

Çizelge 11.4. Kaynak bölgesi sertlik ölçüm sonuçları

Kaynak Bölgesi	Sertlik değeri (Rockwell A)
% 5 Si_3N_4	58
% 10 Si_3N_4	71
% 15 Si_3N_4	78



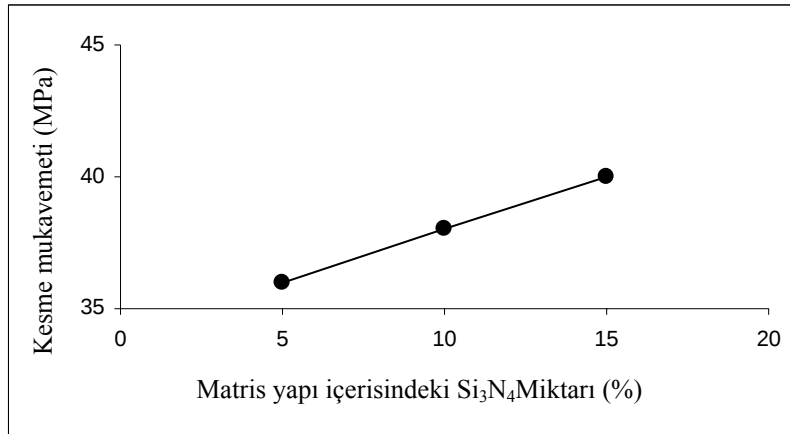
Şekil 11.8. 640 °C’de 120 dk kaynatılan numunelerin kaynak bölgesi sertlik ölçüm grafiği

11.7. Kesme Test Sonuçları

Kaynak için hazırlanan kompozit malzemelerin kesme sonuçları Çizelge 11.5’de verilmiştir. Bu kesme testi sonuçlarına göre ihtiva ettiği Si_3N_4 miktarına göre kesme kuvvetlerinde farklılıklar meydana gelmiştir. Kompozit içerisinde homojen dağılmış olan Si_3N_4 sert bir yapıya sahip olduğundan, kompozit içerisindeki oranı arttıkça kesme dayanımını olumlu şekilde etkilemiştir.

Çizelge 11.5. Kaynak için hazırlanan kompozit malzemelerin kesme testi sonuçları

Kompozit malzeme	Kesilme mukavemeti (MPa)
Al+% 5 Si_3N_4	36
Al+%10 Si_3N_4	38
Al+%15 Si_3N_4	40



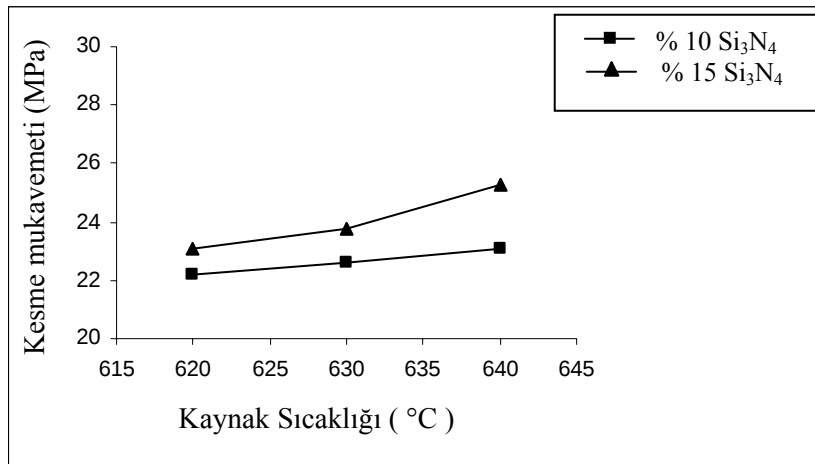
Şekil 11.9. Kaynak için hazırlanan kompozit malzemelerin kesme testi grafiği

Difüzyon kaynağı sonrasında kesme deneyinden elde edilen sonuçlara göre difüzyon kaynağında uygulanan süre arttığında kesme mukavemetinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak süre uzadığında difüzyonun daha iyi bir şekilde gerçekleşmesidir. Aynı zamanda Si_3N_4 miktarı arttıkça kesme mukavemetinde de artış belirlenmiştir. MA sonrası elde edilen kompozit malzemenin

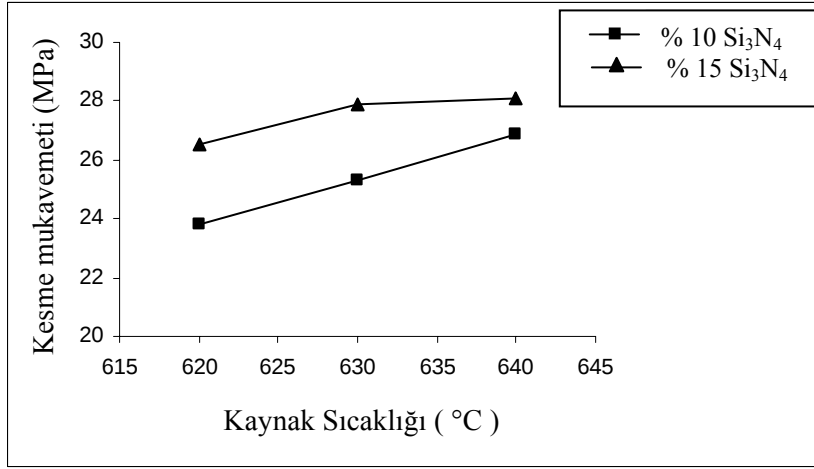
içerisine homojen olarak dağılmış Si_3N_4 'ün birleşme ara yüzeyinde kesme dayanımını etkilediği belirlenmiştir.

Çizelge 11.6. Numunelerin kaynak bölgesi kesme deneyi sonuçları

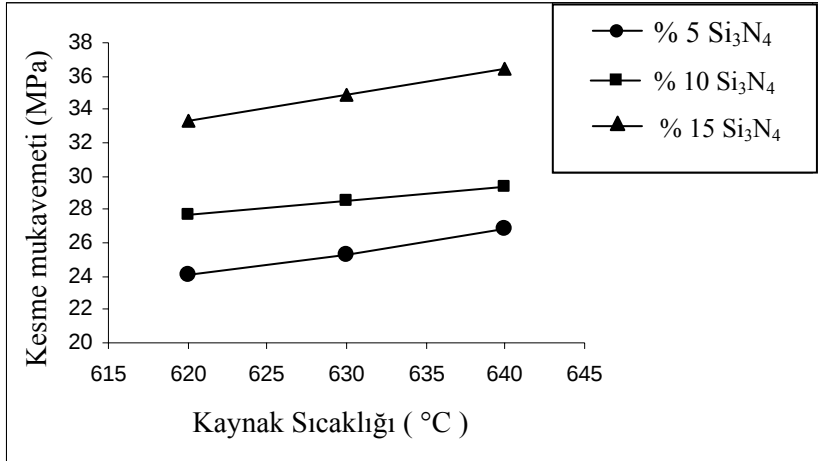
Numune	Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)	Basınç (MPa)	Kesilme mukavemeti (MPa)
%5 Si_3N_4	620	120	2,5	24,1
%5 Si_3N_4	630	120	2,5	25,3
%5 Si_3N_4	640	120	2,5	26,9
%10 Si_3N_4	620	60	2,5	22,2
%10 Si_3N_4	630	60	2,5	22,6
%10 Si_3N_4	640	60	2,5	23,1
%10 Si_3N_4	620	90	2,5	23,8
%10 Si_3N_4	630	90	2,5	25,3
%10 Si_3N_4	640	90	2,5	26,9
%10 Si_3N_4	620	120	2,5	27,7
%10 Si_3N_4	630	120	2,5	28,5
%10 Si_3N_4	640	120	2,5	29,3
%15 Si_3N_4	620	60	2,5	23,1
%15 Si_3N_4	630	60	2,5	23,8
%15 Si_3N_4	640	60	2,5	25,3
%15 Si_3N_4	620	90	2,5	26,5
%15 Si_3N_4	630	90	2,5	27,9
%15 Si_3N_4	640	90	2,5	28,1
%15 Si_3N_4	620	120	2,5	33,3
%15 Si_3N_4	630	120	2,5	34,9
%15 Si_3N_4	640	120	2,5	36,5



Şekil 11.10. Al + % 10 – 15 Si_3N_4 ihtiva eden kompozit malzemenin difüzyon kaynağı sonrası kesme testi grafiği (Süre : 60 dk)



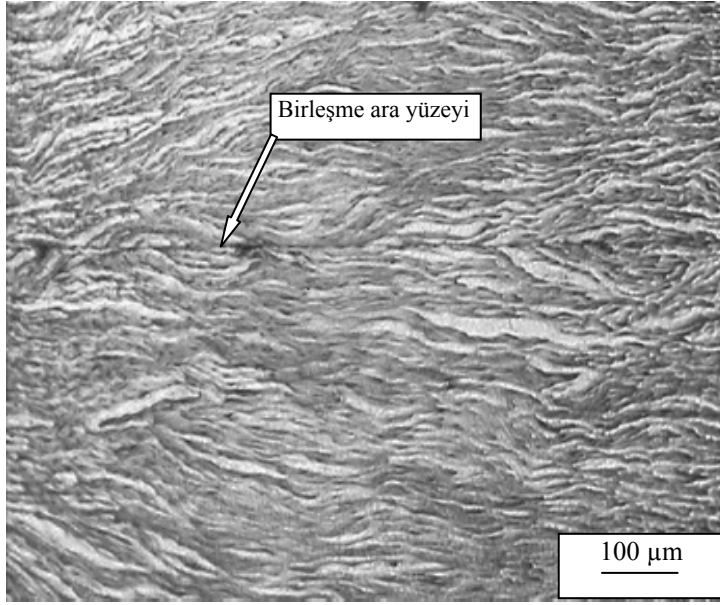
Şekil 11.11. Al + % 10 – 15 Si₃N₄ ihtiva eden kompozit malzemenin difüzyon kaynağı sonrası kesme testi grafiği (Süre : 90 dk)



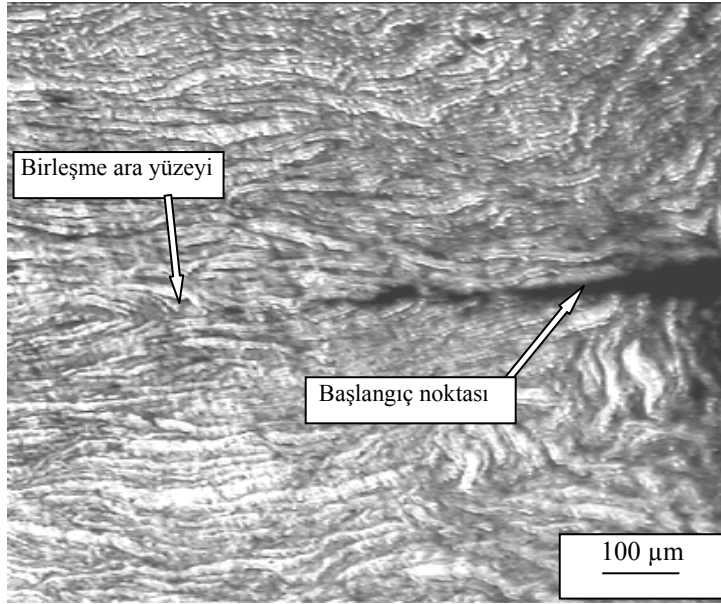
Şekil 11.12. Al + % 5 - 10 – 15 Si₃N₄ ihtiva eden kompozit malzemenin difüzyon kaynağı sonrası kesme testi grafiği (Süre : 120 dk)

11.8. Kaynak Bölgesinin Mikroyapı İncelemeleri

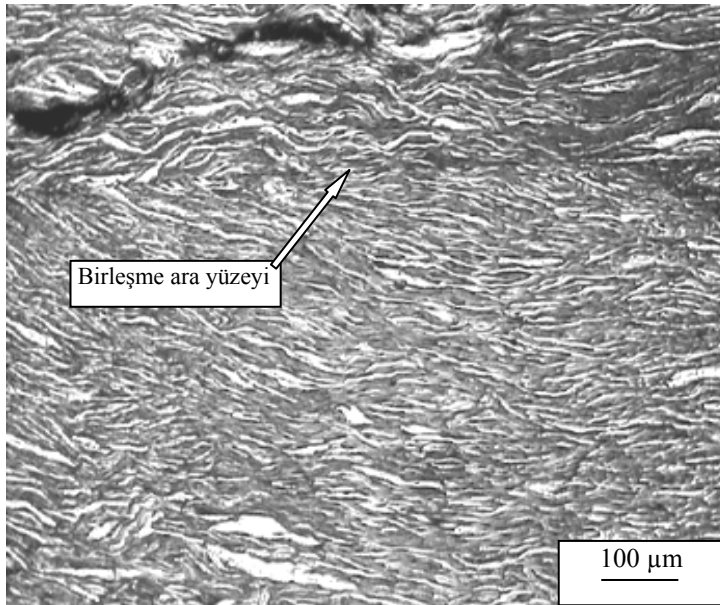
Optik mikroskop çalışması sonucu çekilen kaynak bölgesi resimleri, aşağıda verilmiştir. Bazı resimlerde kaynak bölgesindeki birleşme çizgisi görülmekle beraber 640 °C ve 120 dk'lık parametrede yapılan kaynak çizgileri belirgin değildir. Bunun nedeni olarak yüksek sıcaklık ve zamana göre arayüzeyde daha iyi difüzyon olduğu düşünülmektedir. Kaynak ara yüzeylerinin başlangıç kısımlarında yüzey hazırlama sırasında oluşan yüzey dalgalılığı birleşmeyi olumsuz etkilemiş ve buna bağlı olarak bu hatalar çentik etkisi yaparak kesme mukavemetini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir.



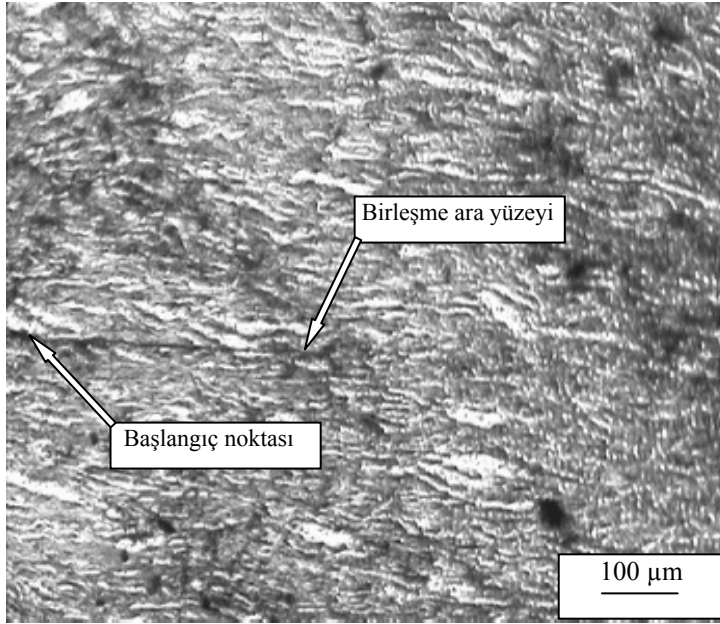
Resim 11.8. %5 Si₃N₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C'de 60 dk)



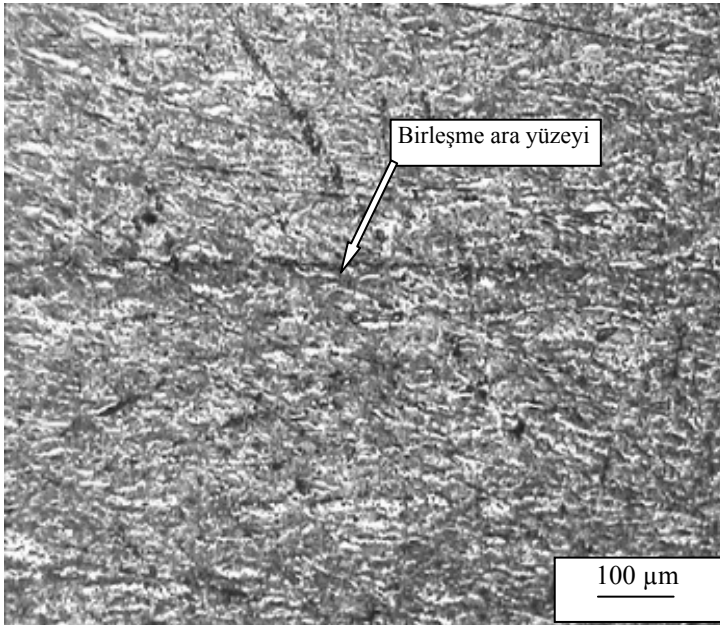
Resim 11.9. %5 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 120 dk)



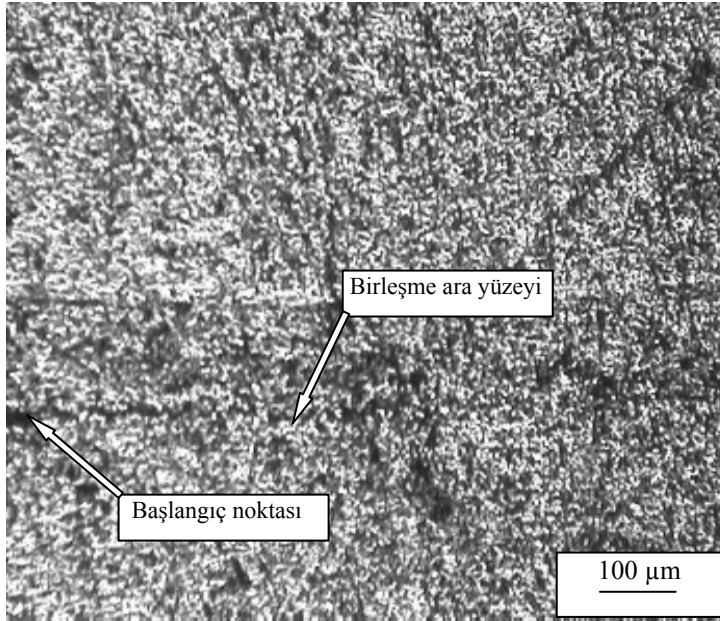
Resim 11.10. %10 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 60 dk)



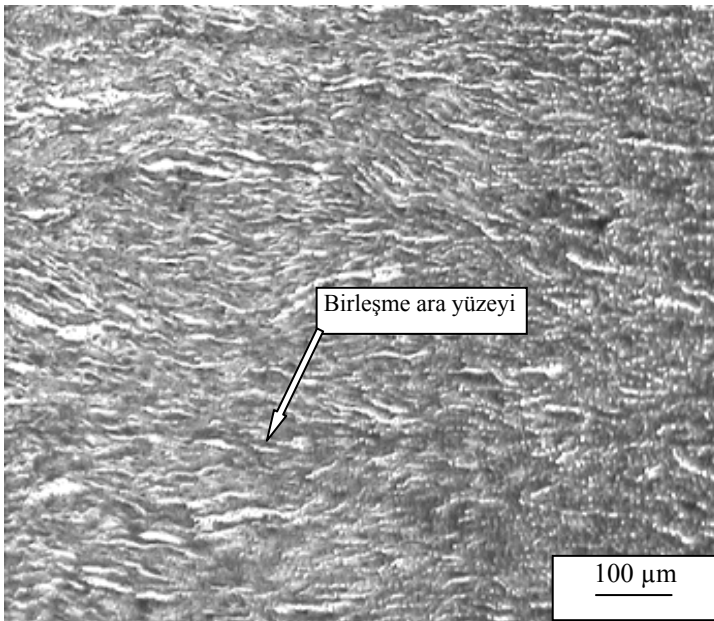
Resim 11.11. %10 Si₃N₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 120 dk)



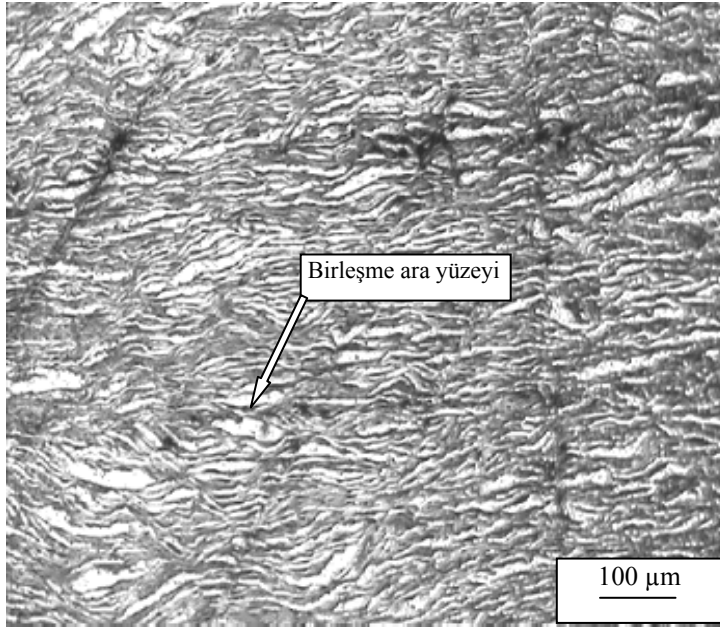
Resim 11.12. %10 Si₃N₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 60 dk)



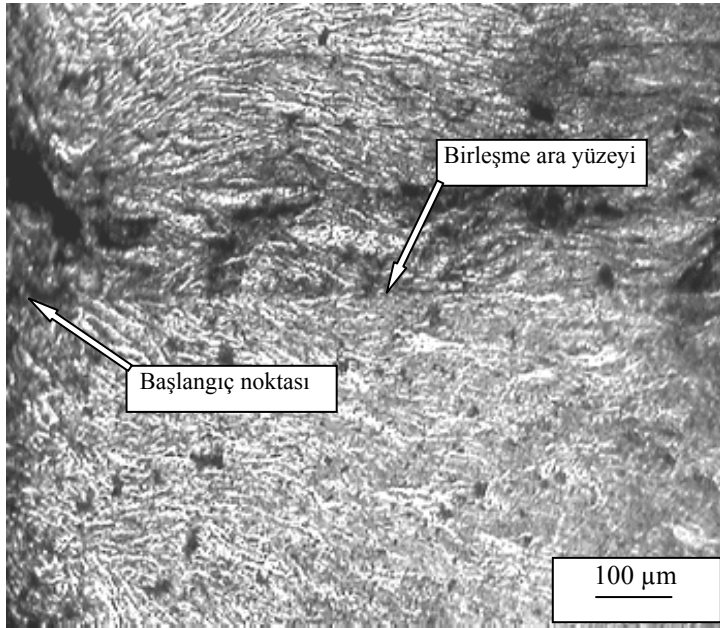
Resim 11.13. %10 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 120 dk)



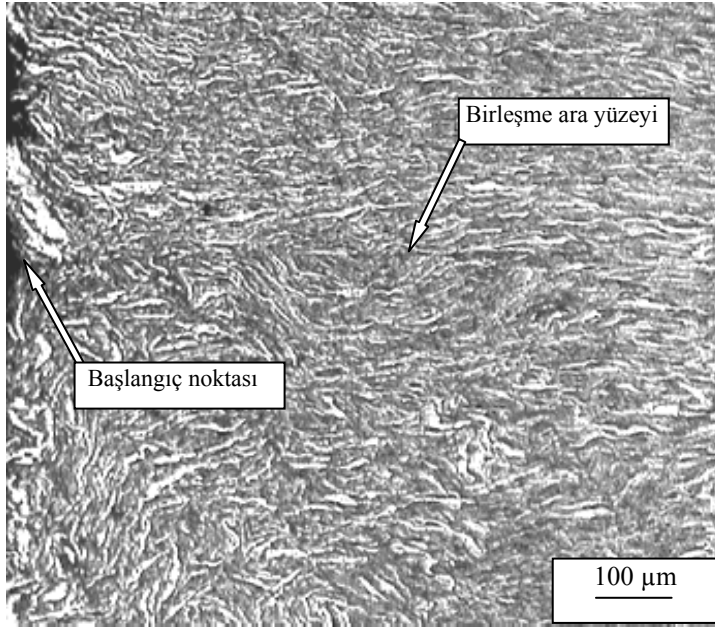
Resim 11.14. %10 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 60 dk)



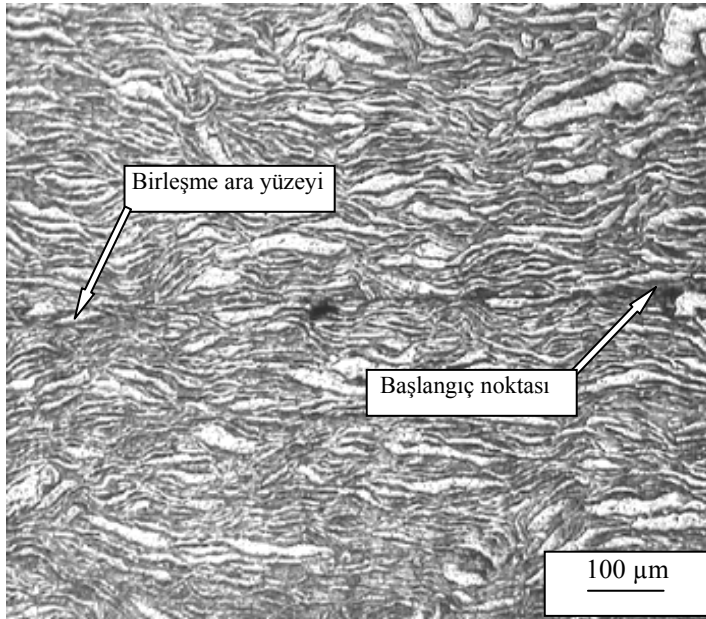
Resim 11.15. %10 Si₃N₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 120 dk)



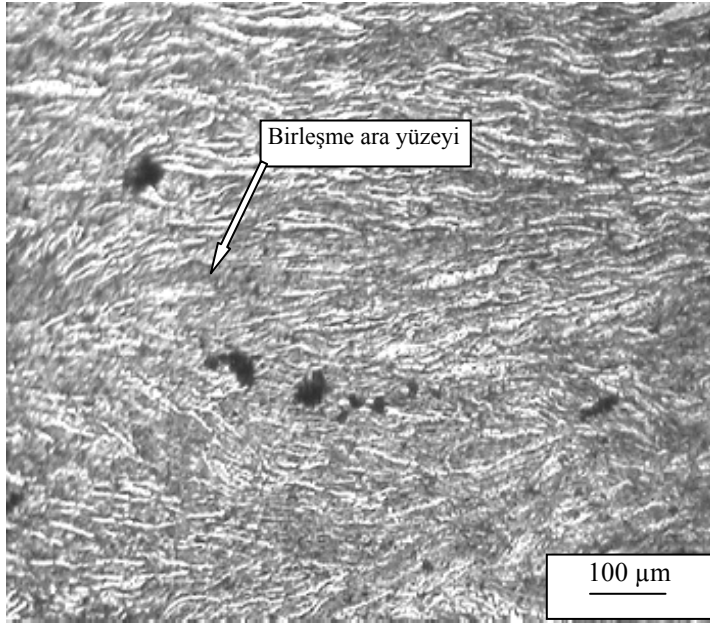
Resim 11.16. %15 Si₃N₄ içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 60 dk)



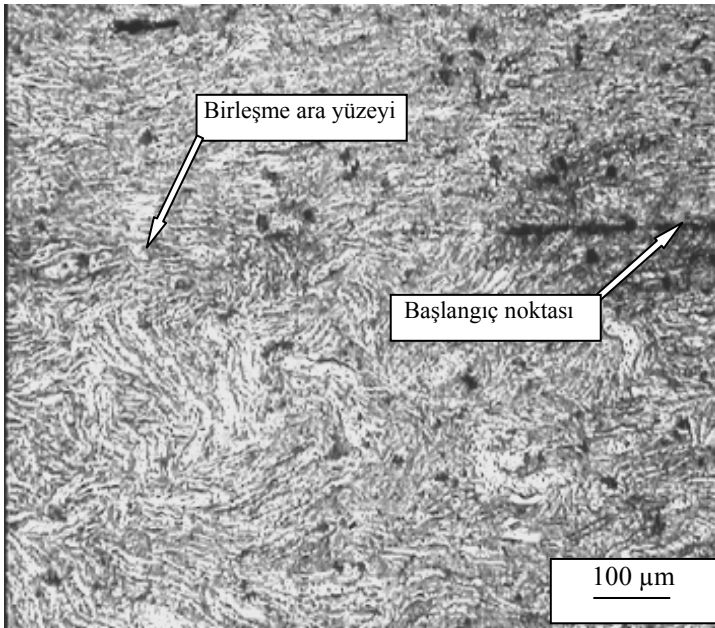
Resim 11.17. %15 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (620 °C’de 120 dk)



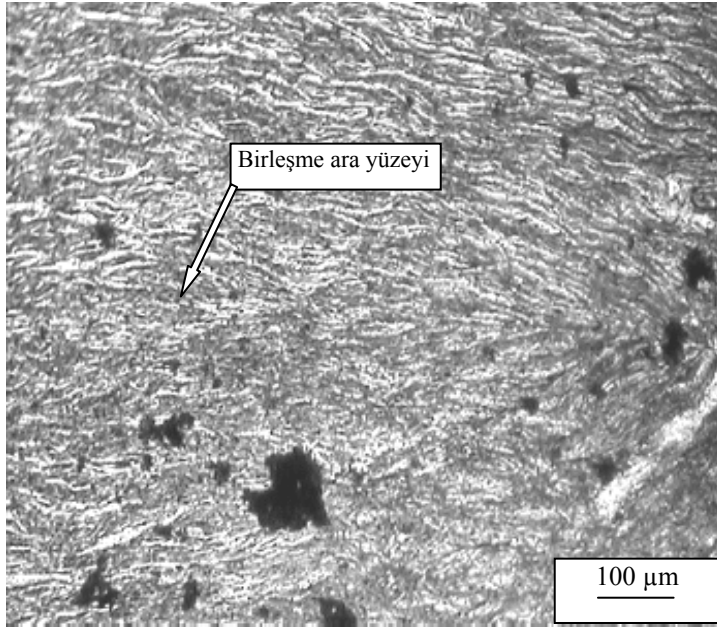
Resim 11.18. %15 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 60 dk)



Resim 11.19. %15 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (630 °C’de 120 dk)



Resim 11.20. %15 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzeyinin optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 60 dk)



Resim 11.21. %15 Si_3N_4 içeren kompozitin kaynak ara yüzünün optik mikroskopta görünümü (640 °C’de 120 dk)

12. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada Al esaslı α -Si₃N₄ içeren kompozit malzeme üretimi ve bu malzemenin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi konusunda elde edilen önemli sonuçlar ve bu konuda daha sonraki çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir.

1. 2 saat MA ile kompozit malzemedede homojen bir yapı elde edilmiştir.
2. Bu çalışmada, maksimum kesme mukavemeti için ideal kaynak sıcaklığı 640 °C, kaynak süresi 2 saat ve α -Si₃N₄ miktarı ağırlıkça %15 olarak belirlenmiştir.
3. Bundan sonra bu kompozit malzemenin difüzyon kaynağı konusunda yapılacak çalışmalarında kaynak parametreleri ve toz karışım oranları değiştirilebilir.
4. Numune kaynak yüzeylerinde bulunan oksit, yağ, yüzey pürüzlülüğü gibi olumsuzlukları gidermek ve kaynak edilecek iki yüzeyi birbirine daha hassas alıştırma işlemi için numune yüzeyleri otomatik olarak bir makinede hazırlanabilir.

KAYNAKLAR

1. Arık, H., Özkök, Ö., “Si₃N₄ Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, **IV. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı**, Sakarya, 762-773, (2005).
2. Salehi, M. T., “Isostatic Diffusion Bonding of Some Superplastic Alloys”. Ph.D. Thesis, **UMIST**. Manchester, 58-65, (1990).
3. SUR, G., “Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 12-28, (2002).
4. Fischer, U., Verlag Europa-Lehrmittel, **Nourney, Vollmer GmbH & Co**, (1992).
5. Acılar, M., “Al/SiC kompozitlerin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretimi ve aşınma davranışlarının araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 35, 37(2002).
6. Berghezan, A., “Basic design concepts and specific methods for the fabrication of metal-matrix composite materials”, **Advances in Composite Materials**, 43-52, (1978).
7. Bağcı, C., “Mekanik alaşımlama ile üretilen Al-Al₄C₃ kompozit malzeme presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerine etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-8, (2002).
8. İnternet, <http://www.maden.org.tr/yeni3/yayinlar/raporlar/aluminyumraporu.htm> (2005).
9. Rahman, M., Ramakrishna, S., J.R.S. and Tan, D.C.G. “Machinability study of carbon fiber reinforced composite”, **Journal of Materials Processing Technology**, 89-90, 292-297, (1999).
10. Şahin Y., and Murphy, S., “Friction and wear behaviour of unidirectional boron fibre-reinforced aluminium alloy”, **7 th. International Machine Design and Production Conference**, 333-342, METU, Ankara, 11-13, (1996).
11. Önel, K., “Süreksiz SiC katkılı alüminyum matrisli kompozitler”, **Metalurji Dergisi**, Ankara, 46-53, (1995).
12. Hiçyılmaz, N., Aydın, Ş., Sarıtaş, S., “Toz metalurjisi ile üretilmiş alüminyum esaslı tanecikli kompozitlerin mekanik özellikleri”, **Uluslararası Katılımlı 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı**, Ankara, 621-629, (1999).

13. Işıker, V., Ögel, B., “Al – SiC kompozitlerinin üretiminde yatay bilyalı değirmen kullanımı ve parçacık dağılımına etkisi”, **1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı**, Ankara, 377-385, (1996).
14. Çöçen, Ü., Önel, K. and Özdemir, İ., “Microstructures and age hardenability of Al-5%Si-0,2 %Mg based composites reinforced with particulate SiC”, **Composites Science and Technology**, 139-147, (1997).
15. El-Gallab, M. and Sklad, M., “Machining of Al/SiC particulate metal matrix composites, Part 1: Tool Performance”, **Journal of Materials Processing Technology**, 83, 151-158, (1998).
16. Candan, E., Ahlatçı, H., Çimenoglu, H., “Abrasive wear behaviour of Al - SiC composites produced by pressure infiltration technique”, **Wear**, 133-138, (2001).
17. Durman, M., Akbulut, H., Yılmaz, F., “Saffil (δ - Al_2O_3) fiber takviyeli alüminyum – silisyum metal matris kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi”, **7. Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, Ankara, 1141-1154, (2004).
18. Hampshire, S., Nitride Ceramics, Edited by Chan, R.W., Hassen, P., Kramer, E.J., **Materials Science and Technology**, Ireland, 11, 121-168, (1993).
19. Geçkinli, A. E., “İleri Teknoloji Malzemeleri”, **İTÜ Matbaası**, İstanbul, 92-131, (1992).
20. Arık, H., “Sepiolitten Karbo-Termal İndirgeme ve Nitrürleme Yoluyla Silisyum Nitrür (Si_3N_4) Seramik Tozu Üretimi Parametrelerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (1996).
21. Arık, H., Sarıtaş, S., “Silisyum nitrür tipi seramiklerin üretilmesi ve mekanik özellikleri”, **1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı**, Ankara, 247-263, (1996).
22. Mukerji, J., “Nitride ceramics, Chemistry of Advanced Materials”, Edited by C.N.R. Rao, **Bachwell Sci., Pub.**, Oxford, 36.43, (1993).
23. Ziegler, G., Heinrich, J., Wötting, G., “Review relationships between processing, microstructure and properties of dense and reaction-bonded silicon nitride”, **Journal of Materials Science**, Köln, Germany, 22: 3041- 3086, (1987).
24. Weiss, J., “Silicon nitride ceramics”, **Ann. Rev. Materials Sci**, Stuttgart, Germany, 11: 381-399, (1981).
25. Arık, H., “Sialon Tipi Aşınmaya Dayanıklı Sert Metallerin Özelliklerinin Araştırılması”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 9-15, (1993).

26. Jack, K. H., “Review sialon and related nitrogen ceramics”, *Journal of Materials Science*, 11: 1135-1158, (1976).
27. Davis, R. F., Carter, C. H., “Review of creep in silicon nitride and silicon carbide”, *Edvanded Ceramics*, North Carolina, USA, 95-122, (1988).
28. Sago, A. S., Newkirk, J. W., and Brasell, G. M., *Rapid Mechanical Alloying For Metal Powder Production*, Adv. In PM, 11-3, (1997).
29. Weeber, AW., Bakker H., de Boer FR., *Europhys lett*, 2: 445-448, (1986).
30. Sago, A. S., Newkirk, J. W., and Brasell, G. M., *Metal Injection Molding of Mechanically Alloyed Advanced Materials*, Adv, İn PM, 5-93, (1998).
31. UYGUR, E., “Toz Metalurjisi Ekonomik Üretim Tekniği”, *1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı*, Ankara, 447- 484, (1996).
32. Türker, M., “Parçacık takviyeli kompozit tozların mekanik alaşımlama metodu ile üretimi ve birleştirme teknikleri”, *Metalurji*, 112: 32-37, (1998).
33. Fischer, J.J., Weber. J.H., “Mechanical alloying spreads its wings”, *Advances Materials and Processes*, 10, 43-50, (1990).
34. Türker, M., “Mekanik Alaşımlama”, *Metalurji*, 5-7, (1995).
35. Gilman, P.S., Nix, W.D., “The structure and properties of aluminum alloys produced by mechanical alloying powder processing and resultant powder structures”, *Metallurgical Transactions A*, 12A: 813-823, (1981).
36. Benjamin, J.S., Volin, T.E., “The mechanism of mechanical alloying”, *Metallurgical Transactions*, 5: 1929-1933, (1974).
37. Orban, R.L., “Nano crystalline materials processing by mechanical alloying an overviev”, *1. National PM Conference*, Ankara, 171-189, (1996).
38. Benjamin, J.S., “New materials by mechanical alloying techniques”, *Aluminum Campany of America*, Pennsylvania, U.S.A, 3-37, (1988).
39. Kılınç. Y., “Demir bazlı süper alaşımların mekanik alaşımlama metodu ile üretilmesi ve özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 23-28, (1999).
40. Sarıtaş, S., Toz Metalurjisi, *Mühendis ve Makine*, 36, 421, Ankara, (1994).

41. Kurt, A., Türker, M., Sarıtaş, S., “Toz metalurjisi metodu ile üretilmiş bakır yataklarının aşınma özellikleri”, **1. Ulusal Toz Metalurji Konferansı**, Ankara, 419- 427, (1996).
42. Kurt, A., “Toz Metal Yatak Malzemelerin Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (1992).
43. Karataş, Ç., Toz Enjeksiyon Kalıplamada Kurşun, Demir, Alümina Tozlarının Basılabilirliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 36-45, (1992).
44. Gurganus, T. B., “Aluminum powder applications”, **Advanced Materials and Processes**, 148: 57-58, (1995).
45. Sarıtaş, S., "Toz Metallurjisi", **Makina Mühendisliği El Kitabı**, 2: 64-82, (1994).
46. Sarıtaş, S., “Çelik toz dövmeçilik” **ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi**, Ankara, 3: 1-26, (1985).
47. Global P/M Report, **Gorham Advanced Materials Institute**, Maine, A.B.D, (1990).
48. Sarıtaş, S., “Açılış Konuşması” **1.Ulusal Toz Metallurjisi Konferansı**, Ankara, (1996).
49. Özbilen, S., **Toz Metalurjisi Yüksek Lisans Ders Notları**, Ankara, (1997).
50. Uslan, İ., “Atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimi”, **Türk Toz Metalurjisi Derneği Haber Bülteni**, 15, (2000).
51. Karataş, Ç., “Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışım Reolojisi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 52-54, Ankara, (1997).
52. Uslan, İ., Sarıtaş, S., “Gaz atomize alüminyum tozlarında soğuma hızının toz boyutu ile değişiminin araştırılması”, **2. National PM Conference**, Ankara, 399-407, (1999).
53. İnternet, <http://www.turkcadcaml.net/rapor/otoinsa/sinterleme.html> (2005).
54. German, R. M., “Powder Metallurgy Science”, **Metal Powder Industries Federation, Princeton**, N J, 56-68, (1994).
55. German, R. M., “Liquid Phase Sintering”, **Plenum Press**, NewYork, 23-26, (1985).

56. German, R. M., "Sintering Theory and Practice", *The Pennsylvania State University*, Awiley-Interscience Publication, Pennsylvania, 75- 83, (1996).
57. ERDOĞAN, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", *Nobel Yayınevi*, Ankara, 2: 36-45, (1999).
58. ONARAN, K., "Malzeme Bilimi", *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 56-58, (1993).
59. İnternet, <http://www.watchtower.org/library/g/2000/1/22/article02.htm> (2005).
60. Lindross, V. K., and Talvitie, M. J., "Recent advances in metal matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 53, 273-284, (1995).
61. Ralph, B., Yuen, H. C., and Lee, W. B., "The processing of metal matrix composites an overview", *Journal of Materials Processing Technology*, 63: 339-353, (1997).
62. Sur, G., "Alüminyum esaslı kompozitlerin üretimi ve işlenebilirliğinin incelenmesi". Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 12-28, (2002).
63. Akbulut, H., Durman, M., ve Yılmaz. F., "SiC parçacık takviyeli Al-Si Metal matris kompozitlerin üretimi ve özelliklerinin incelenmesi", *7.Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, Ankara, 2: 1183-1194, (1993).
64. Tekin, A., "Malzemelerin elektronik özellikleri", *İTÜ Kimya Metalürji Fakültesi Basımı*, İstanbul, 40-51, (1987).
65. Bargel, H.J., Schulzw, G., Çev: Güleç, S., Aran, A., "Malzeme Bilgisi", *Tubitak Yayınları*, Gebze, 76, (1985-1987).
66. Kurt, A., "Toz metalden üretilen bronz yatağın düşük karbonlu çeliğe difüzyon kaynağı ile birleştirilmesi", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1996).
67. Tekin, A., "Çelik ve Isıl işlemleri", *İ.T.Ü.*, İstanbul, 22-236, (1987).
68. Çelik, S., "Koruyucu gaz altında saf alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı şartlarının belirlenmesi", Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 14-25, 47, (1996).
69. Buytoz, S., "Alüminyum matrisli Al₂O₃ takviyeli kompozit malzemelerin katı hal birleştirme teknikleri ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 35-50, (1999).

70. Oğuz, B., "Sert Lehimleme", **Oerlikon Yayınları**, İstanbul, 50-60, (1988).
71. Askeland, D.R., Çev: Erdoğan, M., "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", **Nobel Yayın Dağıtım**, Ankara, 1: 40, 51, 76-80, 120, 288, (1998).
72. Green, A., "Materials science on CD-Rom : an interactive learning tool for students" **Chapman and Hall**, London, 83-93, (1998).
73. Güleç, Ş., Aran A., "Malzeme Bilgisi 1" **I.T.Ü.**, İstanbul, 34-40, (1993).
74. Kazakov, N.F., Kuznetsov, B.V., "Diffusion Bonding Of Materials" (Translated from Russian), **Pergamon Pres**, London, 211-215 (1985).
75. Spanswick, O.S., "Diffusion Bonding-Engineering Applications", **Production Engineer**, 45-46, (1989).
76. Lancaster, J.F., "Metallurgy of welding", **Allen and Unwin Ltd.**, London, 675-684, (1987).
77. Murray, W., Mahoney and Cliff, C., "Fundamentals of Diffusion Bonding", **ASM Handbook**, 6: 156-159, (1993).
78. Anık, S., "Kaynak Tekniği El Kitabı", **Gedik Holding Yayını**, İst., 1-20, (1991).
79. Owczarski, W.A., Paulonis, D.F., "Application of Diffusion Welding in The USA", **Welding Journal**, 6, 22-23, (1981).
80. Aydın, M., "SiC parçacık takviyeli 7075 alüminyum alaşım matrisli kompozit malzemelerin difüzyon kaynağı" Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 11- 44, (2003).
81. Yılmaz, O., Çelik, H., "Difüzyon kaynağı ile birleştirilen Cu- paslanmaz çelik ikilisinde teorik difüzyon dağılımı ve EDAX ile tespit edilen sonuçların karşılaştırılması" 10, **International Metallurgy and Materials Congress**, İstanbul, 1291-1295, (2000).
82. Yılmaz, O., Çelik, H., "Difüzyon kaynağı ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik ve elektrolitik bakırda kaynak bölgesinin incelenmesi" **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Mühendislik Dergisi**, 11: 179-187, (1999).
83. Guo, Z. X., "Diffusion Bonding of Superplastic Materials" Yüksek Lisans Tezi, **UMIST**, Manchester. 48-55, (1985).
84. Lancaster, J.F., "Metallurgy of Welding", **Allen and Unwin Ltd.**, London. 55, (1987).

85. Ostyn, K. M., "Diffusion Bonding", *Proc. of Int. Conf. Sis*, Cranfield. 183, (1987).
86. Partridge, G. P., "Diffusion bonding of metals", *Agard 168. Nato Yayınları*, Essex, 123-126, (1989).
87. Colva, F. A., "Special Features of the Formation of the Diffusion Bonded Joints between", *Aluminium. Journal of Materials Science*, 28: 2273-2280, 4152-4159, (1988).
88. Zhang, Y. C., "Nakagawa, H., Proposal of New Bonding Technique - Instantaneous Liquid Phase Bonding", *Trans. of J. W. R*, 1, 16, 17-29, (1987).
89. Williamson, J. R., "Superplastic Forming Diffusion Bonding of Titanium", *Proc. of the 1st. Int. Conf. Materials in Aerospace*, 10817: 373-394, (1986).
90. Fitzpatrick, G. A., Broughton, T., "Diffusion Bonding of Aeroengine Components", *Defence Science Journal*, 38: 477- 485, (1988).
91. Riches, S. T., "Microjoining for Electronics", *Production Engineer*, 46, (1989).

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim Okan ERDEN, 1971 yılında Adana’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adana’ da tamamladı. 1989 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal İşleri Bölümüne öğrenci olarak girdi. 1993 yılında bu fakülteden mezun oldu ve 1994 yılında teknik öğretmen olarak göreve başladı.

Halen Ankara iline bağlı Nallıhan-Çayırhan beldesi Turgay Ciner Çok Programlı Lisesinde Metal İşleri Bölüm Şefi olarak görev yapan İbrahim Okan ERDEN evli ve bir çocuk babasıdır.