

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ Al_2O_3 PARÇACIK TAKVİYELİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİYLE
ÜRETİMİ VE KURU AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Hüseyin AKTAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2007
ANKARA**

Hüseyin AKTAŞ tarafından hazırlanan ALÜMİNYUM MATRİSLİ Al_2O_3 PARÇACIK TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ VE KURU AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile MAKİNE EĞİTİMİ Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mahmut GÜLESİN

Üye : Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN

Üye : Prof. Dr. Mahmut İZCİLER

Üye : Prof. Dr. Cemil ÇETİNKAYA

Üye : Doç. Dr. Kadir KOCATEPE

Tarih : 07/09/2007

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

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hüseyin AKTAŞ

**ALÜMİNYUM MATRİSLİ Al_2O_3 PARÇACIK TAKVİYELİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİYLE
ÜRETİMİ VE KURUAŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Hüseyin AKTAŞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2007

ÖZET

Bu çalışmada parçacık takviyeli Al esaslı metal matrisli kompozitler (MMK) mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiştir. Takviye elemanı olarak Al_2O_3 parçacıkları kullanılmıştır. Üretilen kompozitlerde Al_2O_3 takviye elemanı oranları ağırlıkça % 5, 10 ve 15 olarak seçilmiştir. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen metal tozları 450 dev/dak hızla bilyeli dikey değirmende 1,5 ve 3,5 saat sürelerde karıştırılarak hazırlanmıştır. Mekanik alaşımlama sonrası Al- Al_2O_3 tozlar 650 MPa basınç altında preslenerek $\phi 10 \times 15$ mm boyutlarında blok numuneler üretilmiştir. Üretilen blok numuneler 600 °C'de 2 saat Ar atmosferi altında sinterlenmiştir. Kompozit numunelerin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop aracılığı ile yapılmış ve matris içindeki Al_2O_3 parçacıklarının dağılımı belirlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kompozitler; yoğunluk, porozite ve sertlik ölçümlerine tabi tutulmuştur. Bunun yanında üretilen Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin kuru sürtünme aşınma testleri pin-on-disk cihazında değişik yükleme şartlarında yapılmıştır. Aşınmış yüzeyler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş ve noktasal analizleri (EDAX) yapılmıştır. Yapılan deneylerde, MMK'de seramiğin tane boyutu küçüldükçe sertlik değerinin azaldığı, ağırlık kaybının arttığı görülmüştür. Fakat takviye oranının artması ile de sertlik değerleri artmış ağırlık kaybı azalmıştır. Yoğunluk, parçacık içeriğinin artmasıyla ve parçacık boyutunun artmasıyla artmıştır

fakat az miktarda da porozite oluştuğu gözlenmiştir. Buna ilaveten, SEM mikroskobu ile aşınmış yüzeylerin incelenmesi sonucu, matris malzemesinde oksidasyon ve kısmi kopmalar baskın iken, MMK'lerde plastik deformasyonun baskın olduğu grlmştir. Ayrıca MMK'lerde parçacık boyutu küçüldükçe plastik deformasyonun arttığı ve takviye oranı arttıka dzleşmenin çok az değiştiği gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 708.1.094

Anahtar Kelimeler : Al alaşım, Al₂O₃ parçacık, Mekanik alaşımlama, Toz metalurjisi, Metal matrisli kompozitler, Aşınma

Sayfa Sayısı : 102

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Yusuf şAHİN

**PRODUCTION OF Al₂O₃ PARTICLE REINFORCED ALUMINIUM
MATRIX COMPOSITES BY MECHANICAL ALLOY METHOD and
INVESTIGATION OF DRY WEAR BEHAVIOR**

(M. Sc. Thesis)

Hüseyin AKTAŞ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

September 2007

ABSTRACT

In this study, particle reinforced Al based metal matrix composites (MMC's) were produced by mechanical alloying (MA) technique. Al₂O₃ particles were used as reinforced material. In the produced composites, the ratio of the reinforcing material of Al₂O₃ particle was chosen as 5 %, 10 % and 15 % by weight ratio. The metal powders produced by MA methods were prepared by mixing in a vertical ball mill for 1,5 and 3,5 hours at a rotational speed of 450 rpm. Mechanical alloyed Al-Al₂O₃ powders were compacted at 650 MPa. These blocks were then sintered at 600 °C for 2 hours in a pipe type of sintering furnace under a control of argon gas. The microstructural investigation of the composite specimens were carried out and the distribution of Al₂O₃ particles in the matrix was determined. Density, porosity, hardness of produced samples were carried out. Moreover, dry sliding wear behavior of Al-Al₂O₃ composite was investigated by using pin-on-disk technique. Scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive X-ray (EDAX) analysis were used to characterize the worn surfaces of composites. The experimental results indicated that hardness decreased and weight loss increased with decreasing particle size. The weight loss also decreased significantly with increasing Al₂O₃ content in the composite because of its hardness. The density increased with increasing weight fraction and increasing size of particles, but it contained a little porosity. In

addition, scanning electron microscopic observations of the worn surfaces revealed that oxidation and partial delamination were predominant in the unreinforced alloy, while plastic deformation was predominant in composites. Furthermore, plastic deformation increased with decreasing particle content. However, there was little changes in smoothing mechanism with increasing Al_2O_3 content.

Science Code : 708.1.094

Key Words : Al alloy, Al_2O_3 particle, mechanical alloy, powder metallurgy, metal matrix composites, wear

Page Number : 102

Adviser : Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN

TEŞEKKÜR

Tez alıŐmalarım sırasında değerli yardım ve katkılarıyla beni ynlendiren Hocam Prof. Dr. Yusuf ŞAHİN'e teŐekkrlerimi sunarım.

alıŐmalarım boyunca bana zaman ayıran tavsiye ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet TÜRKER'e, Yrd. Doç. Dr. Can ÇINAR'a, Yrd. Doç. Dr. Kasım HABALI'ya, AraŐ. Gör. Volkan KILINLI'ya, AraŐ. Gör. Gökhan SUR'a, maddi manevi desteğiyle her zaman arkamda duran babama ve dualarıyla beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem ve müstakbel eŐim Dilek METİN'e teŐekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Özellikleri.....	4
2.1.1. Matris malzemesi ve özellikleri.....	6
2.1.2. Takviye elemanı ve özellikleri.....	7
2.2. Mekanik Alaşımlama.....	9
2.2.1. Mekanik alaşımlamanın avantajları.....	10
2.2.2. Mekanik alaşımlama işlemi.....	11
2.2.3. Mekanik alaşımlamada kullanılan öğütücü türleri.....	12
2.2.4. Mekanik alaşımlamada etkin parametreler.....	15
2.3. Metal Tozların Sinterlenmesi.....	21
2.3.1. Sinterleme teorisi.....	22
2.4. Aşınma.....	24
2.4.1. Aşınma Analizi.....	25

	Sayfa
2.4.2. Aşınma Mekanizmaları	26
3. LİTERATÜR TARAMASI.....	32
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
4.1. Giriş	40
4.2. Malzeme	40
4.3. Deneysel numunelerinin hazırlanışı.....	41
4.3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılacak toz karışımlarının hazırlanması	41
4.3.2. MA sonrası tozların preslenmesi ve sinterlenmesi.....	43
4.4. Deneysel Numunelerin Karakterizasyonu	45
4.4.1. Metalografik incelemeler	45
4.4.2. Yoğunluk ölçümleri ve porozitenin hesaplanması	45
4.4.3. Deneysel numunelerinin sertlik ölçümleri.....	46
4.4.4. Aşınma Deneysel Çalışmaları.....	46
4.4.5. SEM ve EDAX incelemeleri	48
5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA	49
5.1. Al ve Al ₂ O ₃ Tozlarının Parçacık Boyut Analizi.....	49
5.2. Al matris alaşımının ve Al ₂ O ₃ seramik tozlarının SEM incelemeleri	51
5.3. MA sonrası elde edilen toz kompozisyonlarının SEM incelemeleri.....	53
5.4. Metalografik İncelemeler	56
5.5. Yoğunluk Ölçümleri ve Porozitenin Hesaplanması	65
5.6. Kompozit Numunelerin Sertlik Değerlerinin Belirlenmesi.....	68
5.7. MMK'lerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi.....	69

Sayfa

5.7.1. Değişik yüklerin ve takviye elemanı oranının MMK'lerin aşınma davranışlarına etkisi.....	69
5.7.2. Alaşım süresinin ve takviye elemanı oranının MMK'lerin aşınma davranışlarına etkisi	72
5.7.3. Değişik Al ₂ O ₃ tane boyutunun MMK'lerin aşınma davranışlarına etkisi	73
5.8. MMK'lerin aşınmış yüzeylerinin SEM incelemeleri	76
5.8.1. 60 N yük altında aşınma testine tabi tutulan kompozitlerin SEM görüntüleri	76
5.8.2. 20 N yük altında aşınma testine tabi tutulan kompozitlerin SEM görüntüleri	83
5.9. EDAX Analizi	87
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	91
KAYNAKLAR	94
EKLER.....	100
EK-1 Farklı tane boyutu ve yüzde oranına sahip Al ₂ O ₃ takviyeli Al matrisli kompozitlerin değişik yükler altındaki aşınma miktarları.....	101
ÖZGEÇMİŞ	102

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kullanılan matris ve takviye sistemine göre bazı metal matrisli kompozitlerin potansiyel uygulama alanları.....	5
Çizelge 2.2. Saf alüminyumun önemli fiziksel özellikleri.....	7
Çizelge 2.3. Kompozitlerde kullanılan önemli takviye elemanlarının özellikleri	8
Çizelge 4.1. 2014 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi	40
Çizelge 4.2. 2014 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 4.3. Al ₂ O ₃ tozun mekanik özellikleri	40
Çizelge 4.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan mekanik alaşımlama şartları	42
Çizelge 4.5. İz çaplarına göre devir sayıları.....	47
Çizelge 5.1. Kompozit numunelerinin yoğunlukları ve porozite miktarları	67
Çizelge 5.2. Matris alaşımı ve kompozit numunelerin sertlik değerleri	69
Çizelge 5.3. Deney numunelerindeki oksijen yoğunluğu	87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Başlangıç tozları ve alaşımlamaya bağlı olarak deformasyon tavırları	11
Şekil 2.2. MA sırasında Bilye-Toz-Bilye çarpışması.....	12
Şekil 2.3. Öğütme şartlarında küçük partiküllerin kaynaklanma eğilimleri nedeni ile büyük partiküller oluşturması ve sonra kırılarak küçük partikül oluşumu	17
Şekil 2.4. Sinterleme sıcaklığının toz metal parçaların özellikleri üzerine etkisi	21
Şekil 2.5. İki küresel parçacığın sinterleme profili	22
Şekil 2.6. Sinterleme basamaklarına göre gözenek yapısındaki değişim.....	23
Şekil 2.7. Son sinterleme devresinde bir gözeneğin izole edilişi ve kapanması	24
Şekil 2.8. Abrasiv aşınma mekanizmaları.....	27
Şekil 2.9. Adhesiv aşınmada oluşan kaynak bağı	28
Şekil 2.10. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi.....	29
Şekil 2.11. Tribo-oksidasyon aşınmasının meydana gelişi	30
Şekil 4.1. Mekanik alaşımlama cihazı.....	42
Şekil 4.2. Toz karışımlarının preslenmesi.....	43
Şekil 4.3. Aşınma testi için gerekli numune boyutları.....	44
Şekil 4.4. Sinterlemede kullanılan deney düzeneği	44
Şekil 4.6. Aşınma deney cihazının şematik görünümü	47
Şekil 5.1. 2014 Al alaşım tozunun tane boyutu analizi sonucu	49
Şekil 5.2. 500 mesh Al ₂ O ₃ tozunun tane boyutu analizi sonucu.....	50
Şekil 5.3. 800 mesh Al ₂ O ₃ tozunun tane boyutu analizi sonucu.....	50
Şekil 5.4. 1200 mesh Al ₂ O ₃ tozunun tane boyutu analiz sonucu.....	50

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. Al ₂ O ₃ takviye oranının ve tane boyutunun yoğunluğa etkisi	66
Şekil 5.6. Al ₂ O ₃ takviye oranının ve tane boyutunun poroziteye etkisi	67
Şekil 5.7. Kompozitlerin takviye oranı ve tane boyutuna göre sertlik değişimi	68
Şekil 5.8. 15,99 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ içeren 3,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi	70
Şekil 5.9. 8,61 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ içeren 3,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi	71
Şekil 5.10. 3,01 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ içeren 3,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi.....	71
Şekil 5.11. 3,01 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ içeren 1,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi.....	72
Şekil 5.12. 3,01 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ seramikle takviyelendirilmiş MMK'lerde alaşımlama süresinin aşınma miktarına etkisi	73
Şekil 5.13. Ağırlıkça % 5 Al ₂ O ₃ içeren MMK'lerde seramik partiküllerinin tane boyutunun, farklı yük altında aşınma miktarı üzerindeki etkisi	74
Şekil 5.14. Ağırlıkça %10 Al ₂ O ₃ içeren MMK'lerde seramik partiküllerinin tane boyutunun, farklı yük altında aşınma miktarı üzerindeki etkisi	75
Şekil 5.15. Ağırlıkça %15 Al ₂ O ₃ içeren MMK'lerde seramik partiküllerinin tane boyutunun, farklı yük altında aşınma miktarı üzerindeki etkisi	75
Şekil 5.16. 2014 Al matris alaşımının EDAX analizi sonucu.....	88
Şekil 5.17. 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 15,99 µm tane boyutuna sahip % 10 Al ₂ O ₃ takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu	88
Şekil 5.18. 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 8,61 µm tane boyutuna sahip % 10 Al ₂ O ₃ takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu	89
Şekil 5.19. 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 3,01 µm tane boyutuna sahip % 10 Al ₂ O ₃ takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu	89

Şekil**Sayfa**

Şekil 5.20. 1,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 3,01 µm tane boyutuna sahip % 10 Al ₂ O ₃ takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu	90
--	----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. SPEX tipi karıştırıcı	13
Resim 2.2. Planeter tipi bilyeli değirmen.....	14
Resim 2.3. Atritör Tipi (dikey) Bilyeli Değirmen	14
Resim 4.1. JEOL JSM-5600 model taramalı elektron mikroskobu	48
Resim 5.1. 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşım tozunun SEM fotoğrafı.....	51
Resim 5.2. 15,99 µm tane boyutlu Al ₂ O ₃ seramik tozlarının SEM fotoğrafı.....	52
Resim 5.3. 8,61 µm tane boyutlu Al ₂ O ₃ seramik tozlarının SEM fotoğrafı.....	52
Resim 5.4. 3,01 µm tane boyutlu Al ₂ O ₃ seramik tozlarının SEM fotoğrafı.....	52
Resim 5.5. 3,5 saat MA yapılmış 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşım tozu	53
Resim 5.6. 3,5 saat MA yapılmış 15,99 µm boyutlu Al ₂ O ₃ içerikli toz kompozisyonu.....	54
Resim 5.7. 3,5 saat MA yapılmış 8,61 µm boyutlu Al ₂ O ₃ içerikli toz kompozisyonu.....	54
Resim 5.8. 3,5 saat MA yapılmış 3,01 µm boyutlu Al ₂ O ₃ içerikli toz kompozisyonu.....	55
Resim 5.9. 1,5 saat MA yapılmış 3,01 µm boyutlu Al ₂ O ₃ içerikli toz kompozisyonu.....	55
Resim 5.10. 1,5 saat MA yapılmış 2014 Alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüsü	56
Resim 5.11. 3,5 saat MA yapılmış 2014 Alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüsü	57
Resim 5.12. 3,5 saat MA yapılmış, 15,99 µm tane boyutlu %5 Al ₂ O ₃ takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	58
Resim 5.13. 3,5 saat MA yapılmış, 15,99 µm tane boyutlu %10 Al ₂ O ₃ takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	58

Resim	Sayfa
Resim 5.14. 3,5 saat MA yapılmış, 15,99 μm tane boyutlu %15 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	59
Resim 5.15. 3,5 saat MA yapılmış, 8,61 μm tane boyutlu %5 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	60
Resim 5.16. 3,5 saat MA yapılmış, 8,61 μm tane boyutlu %10 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	60
Resim 5.17. 3,5 saat MA yapılmış, 8,61 μm tane boyutlu %15 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	61
Resim 5.18. 3,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %5 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	62
Resim 5.19. 3,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %10 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	62
Resim 5.20. 3,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %15 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	63
Resim 5.21. 1,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %5 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	64
Resim 5.22. 1,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %10 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	64
Resim 5.23. 1,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %15 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü	65
Resim 5.24. 3,5 saat MA yapılmış 2014 Al matris alaşımının aşınmış yüzeyi.....	76
Resim 5.25. 1,5 saat MA yapılmış 2014 Al matris alaşımının aşınmış yüzeyi.....	77
Resim 5.26. Tane boyutu 15,99 μm olan % 5 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	77
Resim 5.27. Tane boyutu 15,99 μm olan %10 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	78
Resim 5.28. Tane boyutu 15,99 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	78
Resim 5.29. Tane boyutu 8,61 μm olan % 5 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	79

Resim	Sayfa
Resim 5.30. Tane boyutu 8,61 μm olan %10 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	79
Resim 5.31. Tane boyutu 8,61 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	79
Resim 5.32. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan % 5 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	80
Resim 5.33. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %10 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	80
Resim 5.34. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	81
Resim 5.35. 1,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan % 5 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	81
Resim 5.36. 1,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %10 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	82
Resim 5.37. 1,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %10 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi	82
Resim 5.38. 3,5 saat MA yapılmış 2014 Al matris alaşımının 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi	83
Resim 5.39. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 15,99 μm olan %5 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi.....	84
Resim 5.40. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 15,99 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi.....	84
Resim 5.41. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 8,61 μm olan %5 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi.....	85
Resim 5.42. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 8,61 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi.....	85
Resim 5.43. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %5 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi.....	86
Resim 5.44. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum oksit
Al₄C₃	Alüminyum karbür
Ar	Argon
B	Bor
Co	Kobalt
Cu	Bakır
Fe	Demir
Fe₃C	Demir karbür
H	Hidrojen
Mg	Magnezyum
Mo	Molibden
N	Azot
Ni	Nikel
Pb	Kurşun
Si	Silisyum
Si₃N₄	Silisyum nitrür
SiC	Silisyum karbür
Sn	Kalay
Ti	Titanyum
TiC	Titanyum karbür
TiCN	Titanyum karbonitrür
W	Wolfram
Y	Yitrium

Zn

Çinko

Zr

Zirkonyum

Kısaltmalar**Açıklama****AMK**

Alüminyum matrisli kompozit

BTO

Bilye toz oranı

G.Ü. T. E. F

Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi

İKK

İşlem kontrol kimyasalı

MA

Mekanik Alaşımlama

MMK

Metal matrisli kompozit

SEM

Tarama elektron mikroskobu

SPS

Spark plazma sinterleme

TEM

Geçirmeli elektron mikroskobu

XRD

X-ışınları difraktometresi

1. GİRİŞ

Teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler, geleneksel malzemelere oranla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanımını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle sürekli olarak gelişen bu teknolojik faaliyetler, beraberinde endüstriyel sanayinin temel maddesi olan malzemede de ilerlemeyi gerekli kılmıştır. Bu nedenden dolayı, malzeme bilimciler; doğal ve alaşım maddelerinden daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeleri araştırmaya yönelmiştir. Bu sayede diğer malzemelerden farklı olarak, üstün niteliklere sahip “Kompozit Malzemeler” adı altında yeni malzemeler üretilmiştir [1, 2, 3].

Kompozit malzemeler nispeten yeni bir alan olup, II. Dünya savaşı esnasında mevcut konvansiyonel malzemeler tek başlarına teknoloji karşısında belli ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmesi ile başlamış ve o zamandan beri de bu malzemeleri geliştirme faaliyetleri genişleyerek devam etmiştir. Bu gelişmeler için tahrik edici güç, malzemelerde yüksek dayanım/yoğunluk ve yüksek elastik modülü/yoğunluk oranı elde etmek olmuştur. Bu nedenle de spesifik uygulama alanlarında kullanımları hızla artmaktadır [4].

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bir kompozit malzeme bünyesinde; çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesi bulunmaktadır. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, wiskerler ve parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak, matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Buna ilaveten takviye elemanından istenen ve aranan özellikler; kompozitin yoğunluğunu düşürmek ve matrisin yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmektir. İstenen şartlar yerine getirilir ve uygulanırsa, hafif alaşımlara yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek özellikler kazandırmak, dayanımlarını arttırmak ve yoğunluklarını düşürmek mümkün olmaktadır [5].

Buradaki mekanik ve fiziksel özellikleri elde etmede uygun matris-takviye elemanı seçimi büyük rol oynar. Yükün, matristen takviye elemanına iletilmesi, ara yüzey bağı vasıtasıyla olmaktadır. Bu nedenle matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının güçlü olması gerekmektedir. Ara yüzey bağının güçlü olması da çiftlerin uyumuna ve matrisin ıslatabilirlik özelliğinin iyi olmasına bağlıdır. Ayrıca takviye elemanının matris içerisine homojen olarak dağılabilmesi, üretim tekniğinin yanında matris-takviye elemanı çiftinin seçimine bağlıdır [6].

Özellikle havacılık, otomotiv ve denizcilik sektöründe yüksek performanslı, hem hafif hem de dayanıklı, yüksek sıcaklıklarda kararlılık gibi özellikleri bünyesinde birleştirebilen malzemelere gereksinim vardır. İhtiyaçları karşılayabilmek için pratik ve deneysel amaçlı birçok çalışma yapılmıştır ve yapılmaktadır. Kullanılan metotların gelişmesiyle döküm gibi geleneksel metotların modifikasyonunun yanı sıra toz metalürjisi gibi yeni yöntemlerin kullanımı da giderek artmıştır. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş malzemelerin birçoğunu diğer geleneksel metotlarla üretmek hemen hemen imkansız ya da çok güçtür. Ancak kullanılan mekanik alaşımlama (MA) ve sonrası işlemler sayesinde teknolojik olarak çok önemli olan yeni malzeme türlerinin üretimleri gerçekleştirilmiştir [7].

Mekanik alaşımlama çarpışan bilyelerin arasında kalan toz partiküllerinin katmanlaşması, parçalanması, yeniden deforme olması, soğuk kaynaması ve partiküllerin kısa mesafelere difüzyonu gibi işlemlerin tekrarlanarak gerçekleştiği karmaşık bir toz üretim metodudur. 1966 yılında J. S. Benjamin tarafından geliştirilen mekanik alaşımlama, oksit ya da karbürlerle güçlendirilmiş alaşımların üretilmesinde kullanılır [1,2].

Mekanik alaşımlama yöntemi farklı değirmen (yatay titreşimli, atritör vb.) ve farklı bilyeler (seramik, metal ve türevleri) kullanılarak gerçekleştirilen yüksek enerjili bir kuru öğütme tekniği olarak adlandırılır [8]. Mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmiş kompozit malzemelerin birçoğu ergime noktalarına yakın sıcaklıklara kadar dayanımlarını koruyabilmektedirler [9]. Ayrıca korozyon direnci ve aşınmaya karşı dayanımları da bilinen alaşımlardan daha iyidir [10-11].

Genellikle, karıştırma veya öğütme işlemi, farklı boyutlara sahip tozlarla gerçekleştirilir ve böylece malzemelerin sinterleme ve presleme kabiliyetleri artırılır. Öğütme işlemi bir işlem kontrol kimyasalı (İKK) ilavesi ile veya ilave olmaksızın hemen her sisteme uygulanabilir. Ancak seçilen sisteme bağlı olarak karıştırıcının türü önemlidir. Endüstride yaygın olarak V tipi veya eksantrik karıştırıcılar kullanılırken karıştırma sırasında tane boyutu inceltilmesi, ön alaşımlama ve homojenizasyon gerekiyorsa yüksek hızlı değirmenler kullanılır. MA işlemi yapılırken kullanılacak parametrelerin etkinliği ve birbiri ile ilişkileri oldukça önemlidir. MA'nın yapıldığı kabın doluluk oranı, bilye toz oranı, öğütme süresi, öğütme hızı ve kullanılan atmosfer gibi pek çok etkenin optimizasyonu çok önemlidir. Malzemede elde edilmek istenilen özelliklere göre farklı işlem kontrol kimyasalları veya atmosfer kullanımı da MA işlemi sırasında söz konusudur.

MA sonrası elde edilen tozlar farklı metotlar kullanılarak şekillendirilirler. Arzu edilen alaşımlama işleminin ardından malzemeler presleme işlemine (tek yönlü presleme, çift yönlü presleme, sıcak presleme vb.) tabi tutularak şekillendirilir. Şekillendirme işleminden sonra sinterleme işlemine tabi tutulurlar. Bu aşamada yapılan sinterlemenin pek çok amacı vardır. Taneler arası bağların oluşması, yoğunluğun artması, gözeneklerin azalması ve bazen de ilave olarak kullanılan İKK'nın bünyeden uzaklaştırılması bunlardan birkaçıdır. Özelliklerin iyileştirilmesi için presleme sonrası sinterleme açık atmosferde yapılabileceği gibi malzemelerin özelliklerine bağlı olarak koruyucu atmosfer de kullanılabilir. Bu işlem için argon, azot, hidrojen ve oksijen gibi farklı gazlar kullanılabilir [7].

Bu çalışmada, Al matrisli Al_2O_3 parçacık takviyeli kompozitler Mekanik Alaşımlama yöntemiyle üretilmiştir. Farklı oranlardaki parçacık takviyesinin ve parçacık boyutunun kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bunun yanı sıra, üretilen MMK'lerde farklı deney şartlarında kuru aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınmış yüzeylerde oluşan mekanizmaları belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeleri ve zımparalanmış yüzeylerin EDAX (Noktasal) analizleri yapılmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Günümüz metal malzemelerinin birçok özellikleri gelişen teknolojinin ihtiyacına cevap veremeyince, daha üstün özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve bu konuda hızlı bir gelişme sürecine girilmiştir. Kompozit malzemeler klasik malzemelere göre çok daha hafif ve sağlamdırlar. Yapılan çalışmalar neticesinde, bu malzemelerin mekanik, kimyasal ve elektrik özelliklerinin iyileştirilmesi mümkün olmuştur. Kompozit malzemeler yaygın şekilde havacılık, deniz taşıtları, otomotiv, inşaat, askeri ve uzay teknolojisi alanlarında kullanılmaktadır [12, 13].

Metal matrisli kompozitler (MMK)'in özelliklerini iyileştirmek için metal matris içerisine güçlü seramik takviye elemanları eklenmektedir. En yaygın kullanılan takviye elemanları SiC, Al₂O₃ ve TiC fiberleri ve partikülleridir. Metallerin süneklik ve tokluğu, seramiklerin yüksek mukavemet ve yüksek elastikiyet modülü özellikleri ile birleştirilmeleri neticesinde son derece önemli mühendislik malzemeleri ortaya çıkmaktadır [14, 15].

2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler ve Özellikleri

Hafif, mukavemetli ve rijit malzemelere olan gereksinim metal matrisli kompozitlere olan ilgiyi artırmakta ve teknolojik gelişmelerle birlikte büyük ölçekte MMK kullanımını da artırmaktadır. MMK'lerde alüminyum, magnezyum, titanyum ve bunların alaşımları ile bazı süper alaşımlar matris malzemesi olarak kullanılırken, sürekli fiber, kısa fiber, wisker veya partikül şeklinde üretilen, örneğin bor, karbon, silisyum karbür ve alümina gibi seramikler veya çelik, tungsten gibi bazı teller takviye olarak kullanılmaktadır. MMK'lerde kompozit özellikleri, katkı ve matris alaşımlarının özelliklerine ve mikro yapı özellikleri gibi çeşitli etkenlere bağlıdır.

Metal matrisli kompozitler, yüksek elastik modülü, yüksek akma ve çekme dayanımları gibi mekanik özellikleri yüksek sıcaklık şartlarında da korunurken, göreceli düşük yoğunluk ve ısıl genleşme katsayısı, yüksek elektrik ve ısı iletimi gibi

istenilen şekilde ayarlanabilen fiziksel özelliklerinin yanında mükemmel sürtünme davranışı ve aşınma direnci gibi tribolojik özellikleri ile sönümlenme yeteneği ve çevresel etkilere direnç gibi özgün niteliklere sahiptir.

MMK'lerin mekanik özelliklerini metal matrisin cinsi, takviye malzemesinin cinsi, boyutu, boyut dağılımı, miktarı, üniform dağılması, kompozitin üretim yöntemi ve işlem parametreleri, mikro yapı içinde oluşan fazlar, matris ile katkının uyumluluğu, ek olarak termomekanik ve ısı işleme tabi tutulması gibi birçok etken MMK'lerin özelliklerinin belirlenmesinde rol oynar.

Sürekli fiber katkılı MMK'lerin çeşitli uygulama alanları ve bunlara uygun fiber, matris malzemesi ve üretim metotları Çizelge 2.1'de verilmiştir. Yüksek maliyetli sürekli fiber katkılı MMK'ler yüksek mukavemet ve ısı direnci gerektiren ancak maliyetin önemli olmadığı veya kaçınılmaz olarak katlanıldığı alanlarda (havacılık ve uzay endüstrisi ile enerji sektöründe özellikle nükleer santrallerde) uygulama olanağı bulmaktadır.

Çizelge 2.1. Kullanılan matris ve takviye sistemine göre bazı metal matrisli kompozitlerin potansiyel uygulama alanları [4].

Kompozit Türü	Uygulama Alanları	Bazı Ayırt Edici Özellikleri
Alüminyum-Grafit	Yataklar	Daha ucuz, daha hafif, kendi kendine yağlama, Cu, Pb, Sn, Zn tasarrufu
Alüminyum-Grafit, Alüminyum- α -Al ₂ O ₃ , Alüminyum-SiC/Al ₂ O ₃	Otomobil pistonları, silindir gömlekleri, biyel kolları	Aşınma direnci, soğuk çalıştırma, daha hafif, yakıt tasarrufu, gelişmiş etkinlik
Bakır-Grafit	Kaymalı elektriksel kontaklar	Mükemmel iletkenlik, yapışmama özellığı
Alüminyum-SiC	Turboşarj pervaneleri	Yüksek sıcaklık kullanımı
Alüminyum- Cam veya Karbon mikrobalonları	Turboşarj pervaneleri	Ultra hafif malzemeler
Magnezyum-Karbon fiber	Uzay yapıları için boru şeklindeki kompozitler	Sıfır ısıl genleşme, yüksek sıcaklık mukavemeti, iyi özgül mukavemet ve modül
Alüminyum-Zirkon, Alüminyum-SiC, Alüminyum- silika	Kesici takımlar, makine örtüleri, pervaneler	Sert, abrasiv aşınma dirençli malzemeler
Alüminyum-Kömür, Alüminyum-Kil	Düşük maliyetli ve düşük enerjili malzemeler	Sert, abrasiv aşınma dirençli malzemeler

2.1.1. Matris malzemesi ve özellikleri

Kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemesi düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlardır. Bu hafif metal alaşımları dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı tasarımlarında tercih edilmektedirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımının da çok yüksek olması diğer karakteristik özelliklerinden biridir. Genellikle metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde Al, Mg, Zn, Cu, Ti ve Ni gibi malzemeler ve bunların alaşımları matris olarak kullanılırken; silisyum karbür (SiC), bor (B), grafit, alüminyum oksit (Al_2O_3), wolfram (W) ve molibden (Mo) gibi değişik sürekli, kılcal kristalli veya parçacıklı elyaflar takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Ancak matris olarak yaygın bir şekilde kullanılan Al, Ti, Mg ve bunların alaşımlarıdır.

Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Al ve alüminyum alaşımları MMK'ler içerisinde en fazla pazar payına sahip malzeme gruplarını teşkil etmektedir [16]. Bunların etkin kullanım sebebi;

- Dayanım/özgül ağırlık oranının yüksek olması,
- Elektrik iletkenliği/özgül ağırlığının yüksek olması,
- Atmosfere ve diğer ortamlara karşı yüksek korozyon direncine sahip bulunmasından kaynaklanmaktadır [4].

Alüminyum matrisli kompozitler (AMK), literatürde; parçacık takviyeli, wisker veya süreksiz fiber takviyeli ve sürekli takviyeli alüminyum matrisli kompozitler olarak ele alınmaktadır.

Parçacık takviyeli MMK malzemelerin sürtünme davranışları hakkında da detaylı araştırmalar yapılmıştır. Özellikle otomobil motor pistonlarında, sürtünme katsayısının yüksek olmasının yakıt tüketimini artıracığı ifade edilmektedir [17]. Araştırmacıların büyük kısmı, metallere ilave edilen seramik parçacıklarının sürtünme katsayısını önemli ölçüde düşürdüğünü tespit ederken, çok az sayıdaki

araştırmacı bunun tersini savunmuştur [18, 19]. Saf alüminyumun önemli fiziksel özellikleri Çizelge 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Saf alüminyumun önemli fiziksel özellikleri [4].

Fiziksel Özellikler	Değerler
Özgöl ağırlığı (g/cm ³)	2,78
Ergime sıcaklığı (°C)	660
Elastik modülü (GPa)	66
Isıl genleşme katsayısı (1/K)	24.10 ⁻⁶
Isı iletim katsayısı (W/°K)	230

2.1.2. Takviye elemanı ve özellikleri

Kompozit malzemedeki bileşenlerden biri ‘‘Takviye Edici’’ faz olarak tanımlanır. Matris malzemesinin özelliklerini yükseltir ve iyileştirir. Genellikle takviye malzemeleri matris malzemesinden daha sert, mukavemetli ve rijittir.

Kompozitlerin mekanik özellikleri takviye elemanlarının şekilleri ve boyutlarının bir fonksiyonudur. Fiberler ve partiküller olmak üzere iki temel takviye elemanı grubu bulunmaktadır.

Partikül takviye elemanları malzeme içinde her yönde yaklaşık olarak eşit boyutlara sahiptirler. Takviye elemanları küresel, kübik, düzlemsel, tek tip ve farklı tip geometrilere olabilir. Partiküllerin malzeme içerisindeki dizilişleri, rastgele veya yönlendirilmiş olabilmektedir. Yönlendirilmiş partikül takviyesi ile belirli yönlerde güçlendirme, özel zorlanmalara karşı özel tasarımlar yapılabilirken, çok özellikli olmayan uygulamalar için rastgele dağılım söz konusu olabilmektedir.

Sürekli fiberlerle takviye edilmiş MMK’ler, mukavemet ve rijitliğin iyi bir karışımına sahiptirler. Bununla birlikte başta sürekli fiber ve üretim maliyeti olmak üzere bu sistemlerin maliyeti oldukça yüksektir [20].

Çizelge 2.3. Kompozitlerde kullanılan önemli takviye elemanlarının özellikleri [21]

Fiber Tipi	Çap (µm)	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)
Saffil (δ-Alümina)	3	3300	300	2,0
FP (α-Alümina)	20	3950	380	1,7
Silisyum Karbür	13	3200	390	2,0
Boron	100-200	2600	390	3,4
SiC Kaplı Boron	100-200	2600	400	2,9
Y. Modüllü Karbon	8	1950	358	2,2
Y. Dayanımlı Karbon	6,8	1800	235	2,6

Alüminyum Oksit

Alümina, kromd minareli şeklinde bulunur. Alüminyum oksit “alümina” elyaflar; prensip olarak metal matrisli kompozit malzemeler için kullanılır. Molar ağırlığı 101,94 ve yoğunluğu 3,986g/cm³ tür.

Alümina çeşitli formlarda bulunur. Bu formlardan α-Al₂O₃ en yoğun ve kararlı olanıdır. Du Pont tarafından üretilen ve ticari ismi FP olan α-alümina, ortalama 20 µm çapında sürekli olarak elde edilir. Bu çok kristalli elyaflar, % 99 saf alüminyum oksitten oluşur ve yaklaşık 900-1000 °C’ye kadar dayanımını korur [6, 22].

Alüminyum oksidin diğer bir formu ise whisker’dir. Buda α-alüminanın çok küçük uzatılmış kristalimsi şekli olup düzgün bir düzeye sahiptir. Yaklaşık 1650°C sıcaklığa 2 saat süre ile dayanabilmektedir. Bu şartlar seramik sinterleme ve metal dökümü sağlamak için yeterlidir. Vista Kimyasal A.Ş. tarafından çapı 0,5 µm den 30 µm ye kadar boy/çap oranı 3 ile 10 olan whisker üretilmiştir.

2.2. Mekanik Alaşımrama

Mekanik alaşımramanın sağlamış olduğu avantajlar neticesinde son yıllarda kullanım alanı oldukça genişlemiştir. MA genellikle homojen dağılımlı ısı veya kimyasal işlemlere başvurmadan gerçekleştirilen, bir katı hal reaksiyonudur. Klasik alaşımrama işlemleri sırasında karşılaşılan ergime problemleri, heterojenlik ve işlemler sırasında meydana gelen istenmeyen reaksiyonlar MA ile ortadan kaldırılabılır. Aynı zamanda ekonomik ve uygulama alanının geniş olması büyük avantajlar sağlar. Bunların başında modern ve birbiri ile karışamaz elementlerin karıştırılabilmesi gelir. Mekanik alaşımrama, tozların paslanmaz çelik kazanlarda sertleştirilmiş çelik bilyeler veya tungsten bilyeler ile istenilen sürelerde öğütülerek ve karıştırılarak yapılan bir alaşımrama işlemidir. Oksitlenmeye karşı öğütme sırasında genellikle argon gazı kullanılır. Eğer nitrüleme gibi bir işlem de varsa atmosfer olarak azot kullanılabilir. Eğer kullanılan tozlar yumuşak ise, İKK olarak %1-2 hacim oranında stearik asit ilavesi gerekebilir. Üretilecek tozun miktarına, toz boyutuna ve daha birçok parametreye göre üretilmiş değişik amaçlı MA değirmenleri vardır [8,23].

MA'nın tarihi gelişimi gözden geçirildiğinde, ihtiyaçların karşılanmasıyla teknolojinin paralel bir gelişim gösterdiği gözlenmiştir. 1966 yılında John BENJAMİN ve arkadaşları tarafından geliştirilen bir yöntemdir. MA sayesinde yüksek sıcaklık dayanımlı oksit parçacıklarıyla takviye edilmiş Ni bazlı süper alaşımlar üretilmiştir. Uygulama sonrasında elde edilen malzemelerle gaz türbinleri içinde arzu edilen özelliklerin sağlanması amaçlanmıştır. Aynı ekip, 1970'lerde farklı denemeler sonucunda bilyeli öğütme tekniği ile en uygun sonuçları almışlardır. Çünkü bu metot sayesinde partiküllerin yüksek deformasyonundan dolayı kırılması ve tekrar soğuk kaynaklanması işleminin ardışıklığı, ince partiküllerin üretilmesine imkân vermektedir. MA yönteminin gelişmesiyle birlikte kullanım alanları yaygınlaşmıştır. En başta bu gelişmenin öncü sektörleri havacılık sanayi ve otomotiv endüstrisi olmuştur [24].

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 alaşımında bulunmasına müsaade etmektedir. Alaşımlama için değirmene konan metal tozları yüksek hızda çarpışan bilyelerin arasında kalarak birbirine kaynamakta, kırılmakta ve tekrar kaynarak refrakter oksit partiküllerinin matris içerisinde homojen dağılımı sağlanmaktadır. Bu malzemeler yüksek sıcaklık performansını artırmak için özellikle uzay sanayi ve gaz türbini uygulamaları için geliştirilmiş olmalarına rağmen oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmuşlardır [25,26].

2.2.1. Mekanik alaşımlamanın avantajları

Mekanik alaşımlama yöntemi, deneysel ve üretim süreçleri olarak tüm ikili, üçlü ve çoklu sistemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu yüzden MA tekniği üretim ve ticari anlamda çeşitli avantajlar sunmaktadır [24]. Bu avantajlar şu şekilde sıralanabilir;

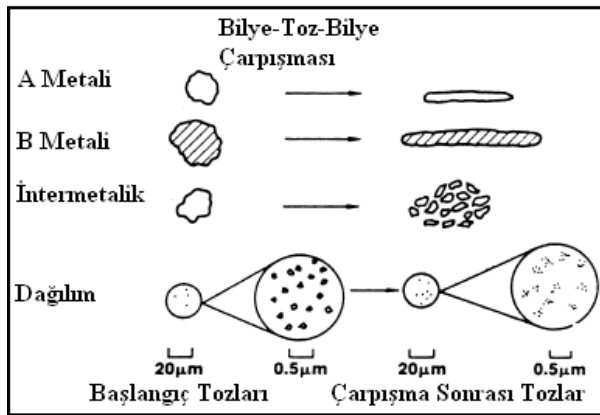
- MA işlemi, bir katı hal işlemi olmasından dolayı, normal ergitme teknikleriyle üretilmesi zor ve/veya olanaksız olan elementlerin (WC-Co gibi) üretilebilmesi,
- Birbiri içinde sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementlerin alaşımlanması,
- Oldukça farklı ergime sıcaklığına sahip malzemelerden intermetaliklerin üretilebilmesi,
- Katı-sıvı-gaz şeklinde alaşımlama sırasında oksit, nitrür ve karbürlerin takviye edilebilmesi,
- MA ile elde edilen tozların yapısında tamamen homojenlik sağlanabilmesi,
- Korozyon ve aşınma direnci yüksek, termal kararlılığı gelişmiş uygun malzeme üretilebilmesi,
- Bir seferde oldukça fazla miktarda tozun üretilebilmesi ve alaşımlanması,
- Sinterleme ile birlikte kritik sıcaklıklarda ısıl işlem imkanı sağlanması,
- Nano kristalli malzemelerin üretimine elverişlilik,

- İstenilen reaksiyonları oluşturması veya hızlandırması,
- Presleme ve sinterleme işlemleriyle %100'e yakın yoğunlukta parça üretilmesi.

2.2.2. Mekanik alaşımlama işlemi

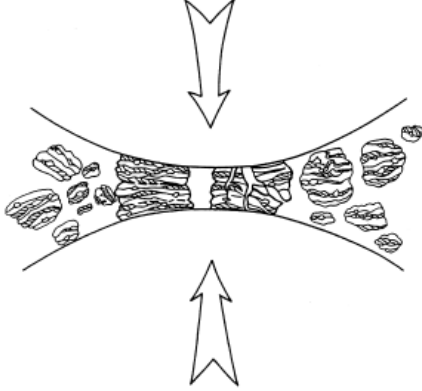
MA işlemi genellikle homojen dağılıma sahip, kontrollü ve oldukça ince tozlardan oluşan çoğunlukla bir katı hal reaksiyonu şeklinde gerçekleşen kuru ve yüksek enerjili öğütme işlemidir [27]. MA işlemi sırasında tozun ortalama boyutu, boyutsal dağılımı, şekli ve diğer yapısal özellikleri işlem sırasında kontrol edilir. MA işlemleri genellikle klasik yöntemlerin, kimyasal reaksiyonların veya ingot metalürjisi gibi metotların kullanımının yetersiz olduğu noktalarda oldukça iyi sonuçlar verir. MA yöntemi ile biri sünek, diğeri gevrek iki farklı malzemenin kırılma, kaynaklanma esasına dayalı ardışık tekrarlar şeklinde homojen ve ince bir yapısal bütünlük sağlaması amaçlanmıştır.

Oluşturulacak alaşım içerisinde metal ya da metal olmayan malzemelerin oranları belirlenir ve yüksek enerjili değirmene (değirmen tipi farklı olabilir) şarj edilir. Mekanik olarak alaşımlanacak tozları ve onların deformasyon karakteristikleri şematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Başlangıç tozları ve alaşımlamaya bağlı olarak deformasyon tavrı

Yüksek enerjili öğütme sırasında, 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 2.2’de bilyelerin çarpışması sonucu ezilen ve birbirine kaynayan tozlar görülmektedir.



Şekil 2.2. MA sırasında Bilye-Toz-Bilye çarpışması [24]

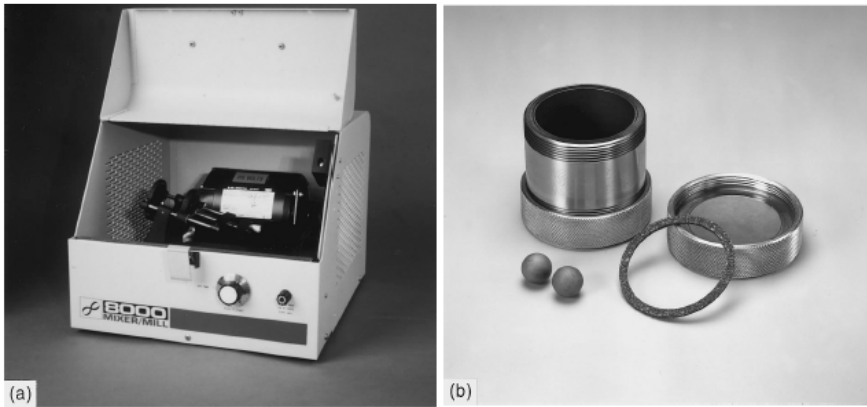
2.2.3. Mekanik alaşımlamada kullanılan öğütücü türleri

MA'nın önemli bir kısmını teşkil eden öğütme işlemi, tane boyutunu küçültme, harmanlama ve alaşımlama gibi evreleri kapsar. Bu aşamalarda amaca yönelik çok çeşitli öğütücüler kullanılır. Öğütücüler ve/veya değirmenler kapasiteleriyle, öğütme verimlilikleriyle, soğutma ve ısıtma gibi ek üniteleriyle farklılık gösterirler.

SPEX tipi çalkalayıcı değirmenler bir kerede yaklaşık 10-20 gr arasında toz öğütebilen laboratuvar çalışmaları amacı ile kullanılmaktadırlar. Sahip oldukları hazne, tozu ve öğütme bilyelerini tutar ve dakikada birkaç bin defa ileri-geri ve sağa-sola hareket ile çalışır. Haznenin her bir salınımıyla bilyeler tozlara çarpar ve haznedeki tozu hem öğütür hem de karıştırır. Bilyelerin vuruş kuvveti anormal büyüktür. Bu yüzden, bu değirmenler yüksek enerjili tür olarak düşünülebilir. En son tasarlanan değirmenler, öğütülen miktarı artırmak için tozu eşzamanlı olarak iki haznede öğütme imkânına sahiptirler. SPEX türü değirmenlerin yüksek enerjisinden kaynaklanan sıcaklık artışı ve koruyucu atmosfer karşılaşılan temel problemlerdir.

Bu tip MA cihazlarının yeni tiplerinde öğütme zamanını uzatmak için basınçlı soğutma kullanılmaktadır. Resim 2.1’de SPEX değirmen ve öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme seti görünmektedir.

MA deneylerini yapmak için diğer bir öğütücü de “planetary” bilyeli değirmendir (Resim 2.2). Bu değirmende birkaç yüz gram toz bir defada öğütülebilir. Bu değirmenler haznelarının gezegen gibi hareket etmesinden dolayı “planetary” ismini alırlar. Bunlar dönen bir destek diski üzerine yerleştirilirler ve kendi eksenleri etrafındaki hareketlerini, özel bir mekanizmadan alırlar. Kendi eksenleri etrafında dönen haznelar tarafından oluşan merkezkaç kuvveti ve dönen destek disk tarafından oluşturulan ilave kuvvetle beraber, hazne içinde öğütülen malzeme ve öğütme bilyelerine etki ederler. Hazne ve destek diski zıt yönlerde döndüğü için merkezkaç kuvvetler sırası ile benzer ve zıt yönde etkir. Bu öğütme, bilyelerinin haznenin iç duvarlarından aşağıya doğru kaymasına neden olur. Sürtünme etkisi, öğütülen malzeme ve öğütme bilyelerinin serbest kalıp hazne içerisinde, serbest dolaşması ve karşı duvara çarpmasıyla devam eder. Bu tür değirmendeki bilyelerin doğrusal hızı, SPEX değirmenlerinkinden daha fazla olsa bile, vuruş frekansı, SPEX değirmenlerinde çok daha fazladır. Bu yüzden, SPEX değirmenlere göre daha düşük enerjili değirmenler olarak düşünülebilir.

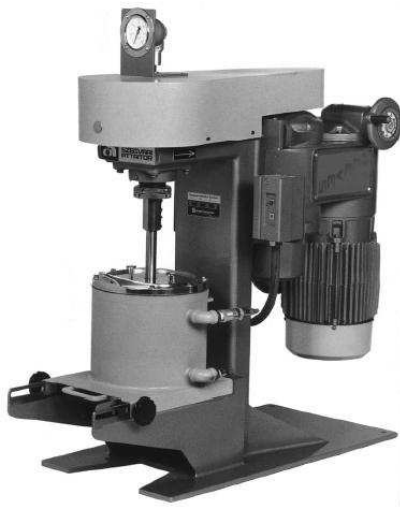


Resim 2.1. SPEX tipi karıştırıcı (a) SPEX bilyeli değirmen, (b) SPEX 8000 tipi karıştırıcının; öğütme kabı, kapak, conta ve bilyelerden oluşan öğütme seti [24]



Resim 2.2. Planeter tipi bilyeli değirmen [24]

Bir diğer MA değirmeni çeşidi olan atritör, içerisinde bir seri karıştırıcılar bulunan dikey bir silindirden oluşur. Biri diğerine dik yerleştirilen karıştırıcılar, kazan içerisindeki bilyelere enerji verir. Bilyelerin kazan (tank, hazne) duvarıyla, birbirleriyle ve karıştırıcı mil arasındaki çarpışmalarıyla toz boyutunun küçülmesine neden olur. Güçlü bir motor karıştırıcıyı çevirir ve bu çevrilen karıştırıcı da sabit silindir içerisindeki çelik bilyeleri ve tozları hareket ettirir. Atritörler, içerisinde bir seferde çok miktarda tozun (0,1 kg'dan 40 kg'a kadar) öğütülebildiği değirmenlerdir (Resim 2.3). MA işlemini farklı atmosferlerde yapmak mümkündür. Aynı zamanda, dış kazan etrafında dolaşan soğutma sıvısı yardımı ile işlem sırasında sıcaklığın kontrolü mümkündür.



Resim 2.3. Atritör Tipi (dikey) Bilyeli Değirmen [24]

Öğütme tankının paslanmaz çelik, alüminyum oksit, silisyum karbür, silisyum nitrür, zirkon, lastik ve poliüretanla kaplı paslanmaz çelikten olanları da mevcuttur.

2.2.4. Mekanik alaşımlamada etkin parametreler

Mekanik alaşımlama kompleks karmaşık bir işlemdir. Bu yüzden istenilen ürün fazını veya mikro yapıyı elde etmek için bazı değişkenlerin optimizasyonunu gerekir. Tozun son içeriğini etkileyen önemli parametrelerden bazıları şunlardır:

- Değirmen tipi
- Öğütme kazanı (tankı, kabı vb.)
- Öğütme hızı
- Öğütme zamanı
- Öğütücü malzemesi (bilyelerin) tipi ve boyutu
- Bilye-toz ağırlık oranı
- Kabın doldurma miktarı
- Öğütme atmosferi
- Öğütme sıcaklığı
- İşlem kontrol kimyasalı (İKK)'dır.

Bütün bu değişkenler birbirinden tamamen bağımsız değildirler. Örneğin, optimum öğütme zamanı değirmen tipine, öğütme elemanının boyutuna, öğütme sıcaklığına, bilyelerin tozla ağırlık oranına vb. bağlıdır. Malzemelerinin boyutu, öğütme sıcaklığı, bilye toz oranı vs. gibi parametrelerde büyük önem arz etmektedir. Bu parametreler ve alaşımlamaya etkileri aşağıda açıklanmıştır.

Değirmen tipi

Mekanik alaşımlama yapmak için çeşitli türde değirmenler kullanılmaktadır. Bu değirmenler; kapasitelerini, işlem hızlarını ve öğütme sıcaklığını değiştirerek işlemi kontrol etme ve tozların kirlenmesini azaltma kabiliyetlerine göre farklılık gösterir. Toz çeşidine, tozun miktarına ve gerekli olan son içeriğine bağlı olarak, uygun bir

değirmen seçilebilir. Özellikle, üretilecek tozun oksitlenme karakteristiğine bağlı olarak kullanılacak olan atmosferin seçimi çok önemlidir. Genellikle, SPEX türü karıştırıcı değirmenler fazla miktarda alaşımlanmış toz üretiminde kullanılırlar. Bundan başka, ticari ve farklı amaçlara yönelik değişik tasarımlı değirmenlerde bulunmaktadır [28].

Öğütme kazanı

Öğütme kazanı, MA uygulanacak malzeme için önemlidir. Çünkü öğütme elemanının haznenin iç duvarlarına çarpmasından dolayı bir kısım malzeme kopup tozun içerisine karışabilir. Bu, tozu kirletebilir veya kimyasal bileşimini değiştirebilir. Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC-Co çelik [29] ve rulman çeliği öğütme haznesi yapımında en çok kullanılan malzeme türlerindedir. Etkileşim durumuna bağlı olarak kaplama yapılmış kazanlarda kullanılmaktadır. Kazanın seçimi alaşımlanacak malzeme türüne göre değişebilir.

Öğütme hızı

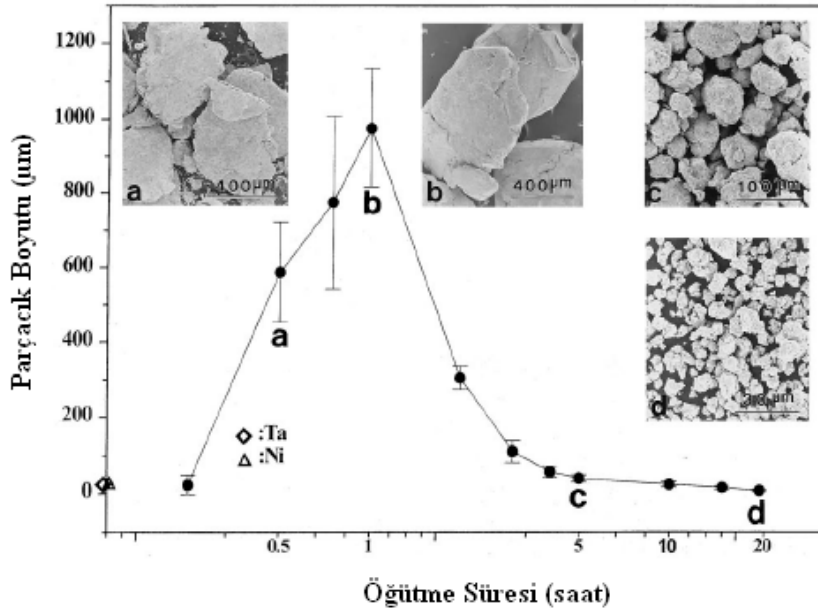
Mekanik alaşımlama işleminde en önemli etkenlerden biri öğütme hızıdır. Değirmen dönme hızı arttıkça toza aktarılan enerjinin daha fazla olacağı açıktır. Ancak, değirmen tasarımına bağlı olarak ulaşılabilecek maksimum hızda, belirli sınırlamalar vardır. Örneğin, geleneksel bilyeli değirmenlerde artan dönme hızına paralel olarak bilyeler haznenin iç duvarına yapışır ve darbe kuvveti oluşturmak için aşağı düşmezler. Bu yüzden, kullanılan maksimum hız kritik hızdan biraz az olmalıdır ki, bilyeler etkin biçimde çarpışma enerjisi oluşturmak için tepe yükseklikten aşağıya düşsünler veya çarpışma süreci etkin olabilsin [24].

Maksimum hıza diğer bir sınırlama da yüksek hızlarda haznenin sıcaklığının yüksek değerlere ulaşmasıdır. Ayrıca, oluşan yüksek sıcaklık tozu kirletebilir. Farklı tür değirmenlerde erişilen maksimum sıcaklıklar birbirinden çok farklıdır. Isının

olumsuz yönde etkilediği sistemlerde soğutma sıvısı olarak sistemin türüne bağlı olarak gaz veya sıvı kullanılabilir.

Öğütme zamanı

Öğütme zamanı en önemli parametredir. Normalde zaman, toz parçacıkları arasındaki kırılma ve soğuk kaynaklanmanın sabit duruma eriştiği an olarak seçilir. Kullanılan sistemin hızı arttıkça toz boyutu daha kısa sürede küçülür ve homojen bir dağılım elde edilir (Şekil 2.3). Gerekli MA/öğütme zamanı kullanılan değirmen tipine, öğütme yoğunluğuna, bilye-toz oranına ve öğütme sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bu zamanlar, yukarıdaki parametrelerin her bir kombinasyonu için ve her özel toz sistemi için belirlenmelidir. Fakat toz gereğinden fazla öğütülürse kirlenmenin artacağı ve bazı istenmeyen fazların oluşacağı bilinmelidir [30]. Bu yüzden tozun sadece gerekli miktarda öğütülmesi ve daha fazla öğütülmemesi istenir.



Şekil 2.3. Öğütme şartlarında küçük partiküllerin kaynaklanma eğilimleri nedeni ile büyük partiküller oluşturması ve sonra kırılarak küçük partiküllerin oluşumu [24]

Öğütme malzemeleri

Genellikle öğütme malzemeleri olarak sertleştirilmiş çelik, sertleştirilmiş kromlu çelik, takım çeliği, termperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC-Co ve rulman çeliği kullanılmaktadır. Bunların dışında özel amaçlı seramik esaslı bilye kullanımı da yaygındır. Bilyelerin, toz üzerine yeterli vuruş kuvveti oluşturabilmesi için yeterli büyüklükte olmaları gerekmektedir. Karışan tozun fazla kirlenmesini önlemek amacı ile öğütme haznesinin ve öğütme elemanının aynı malzemeden yapılmış olması istenir. Kullanılan bilyeler tek tip olabileceği gibi farklı boyutlara sahip bilyelerde olabilir. Bu durumda bilyelerin aynı miktarda enerjiye sahip olmaması söz konusudur. Bu işlem sadece büyük bilye çapından dolayı tozların belirli bir boyutun altına inmediği durumlarda kullanılabilir. Farklı boyuttaki bilyelerin kullanımının, enerji miktarını artırabileceği rapor edilmiştir [31]. Bilyelerin seçimi, genellikle alaşımlama yapılacak tozun yapısına ve kimyasal özelliklerine göre yapılmaktadır.

Bilye-Toz ağırlık oranı

Bilyelerin ağırlığının toz ağırlığına oranı (BTO), bazen dolun oranı olarak da adlandırılır. Bu parametre, öğütme işleminde önemli bir değişkendir. Bu birçok araştırmacı tarafından 1:1 gibi küçük değerlerden 220:1 gibi büyük değerlere kadar çeşitli oranlar kullanılmıştır. Genelde, (BTO) 10:1 oranı SPEX değirmen gibi küçük kapasiteli değirmenlerde tozun öğütülmesinde en çok kullanılan orandır. Fakat öğütme büyük kapasiteli, atritör benzeri bir değirmende gerçekleştirilirse, yüksek bir bilye-toz oranı olan 50:1 ya da daha yüksek 100:1 oranı da kullanılabilir. Bu oranın artması elde edilen toplam enerjiye bağlı olarak alaşımlama zamanını azaltırken, tozların kirlenmesi gibi olumsuz etkileri de hızlandırabilir.

Bilye-toz oranı ne kadar yüksek olursa gerekli zaman da o kadar kısa olur. Yüksek bilye-toz oranında, bilyelerin ağırlık oranındaki artıştan dolayı, birim zamandaki çarpışma sayısı artar ve sonuç olarak toz parçacıklara daha çok enerji iletilir. Bu yüzden alaşımlama daha çabuk gerçekleşir. Örneğin, bir toz karışımı SPEX değirmende 10:1 oranında 7 saat, 50:1 oranında 2 saat ve 100:1 oranında 1 saat

öğütüldüğünde elde edilmektedir. Yüksek bilye toz oranı, her birim zamanda çarpışmaların miktarını artırır ve sonuçta daha fazla enerjiyi toz partiküllerine transfer eder. Böylece alaşımlama daha hızlı olur [32].

Kazan doldurma miktarı

Bilyelerin ve toz parçacıklarının, öğütme kabı içinde serbestçe hareket etmesi için yeterli miktarda bir alanın olması, tozların üzerine etkiyen vurma kuvvetlerini artırır bu da sonuçta toz parçacıklarının alaşımlanmasını hızlandırır. Bu yüzden, haznenin toz ve bilyelerle doldurulma miktarı önemlidir. Bilyelerin ve tozun miktarı çok fazla ise, üretim hızı çok yavaşlar. Bilyelerin etrafta dolaşması için yeterli bir alan yoktur ve bu yüzden vurma enerjisi düşüktür. Kabin doluluk miktarının az ise, enerji artışından kaynaklanan kirlenme sorunları yaşanabilir. Genelde haznenin %50'si boş bırakılmaktadır [24].

Öğütme atmosferi

Öğütme atmosferi esas olarak tozun kirlenmesine etki eder. Bu yüzden, öğütme sırasında tankın, ya havası boşaltılmalıdır ya da argon ve helyum gibi asal gazlarla doldurulmalıdır. Yüksek saflıktaki argon oksitlenmeyi ve/veya tozun kirlenmesini engellemek için en yaygın kullanılan gazdır. Ayrıca, oksitlenmenin genelde azot atmosferinin varlığı ile engelleneceği veya minimize edileceği belirtilmiştir. Azotun metal tozlarıyla etkileştiği ve sonuç olarak bazı sistemlerde öğütme esnasında kirlenmeyi engelleyemediği görülmüştür.

Özel amaçlar için öğütme sırasında farklı atmosferler de kullanılmıştır. Nitrür oluşturmak için azot ve amonyak yaygın olarak kullanılmaktadır [33]. Hidrojen atmosferi ise hidrid üretmek için kullanılmıştır [34].

İşlem kontrol kimyasalları

MA işlemi, deformasyona bağlı kaynaklanma ve kırılma şeklinde gerçekleşir. Özellikle sünek tozların kaynaklanma ve sıvanma eğilimi yüksektir. Bu tozların kırılmaya olan direnci, incelmeyi geciktirir. MA sırasında ilave edilen kimyasallar sayesinde kaynaşmanın yanı sıra kırılma da etkin hale gelir. Kullanılan bu kimyasallar; gaz, sıvı ve katı halde olabilirler. İlave edilen kimyasallar genellikle kırılmayı hızlandırırken, yağ türevleri tozlar tarafından emilebilir. Genelde, ilave edilen miktar % 1,5 civarındadır. İlave edilen kimyasal, yapı içerisinde sürekli olarak kalabildiği gibi, işlem sonrası sinterleme gibi ilave işlemler sırasında bünyeden atılabilir.

Kullanılan işlem kontrol kimyasalı, MA sonrası elde edilecek tozun saflık derecesini doğrudan etkiler. Bu etki olumsuz sonuçlara neden olmuyorsa kimyasalın kullanımı işlem süresini kısaltırken, toz boyutunun küçülmesini hızlandırabilir. Aslında, kullanılan kimyasal, kompozisyonun bileşimini her ne kadar değiştiriyorsa da işlem süresini kısaltması kirlenme miktarını azaltmaktadır [35, 36].

Sıcaklığın etkisi

Öğütme sıcaklığı, öğütülen tozun içeriğinin kararlaştırılmasında bir diğer önemli parametredir. Üretilen son fazın, bir katı çözelti, intermetalik, nanoyapı veya bir amorf faz olmasında, bağımsız olarak alaşım fazlarının oluşumunda difüzyon işlemi etkin olduğundan, öğütme sıcaklığının alaşım sisteminde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

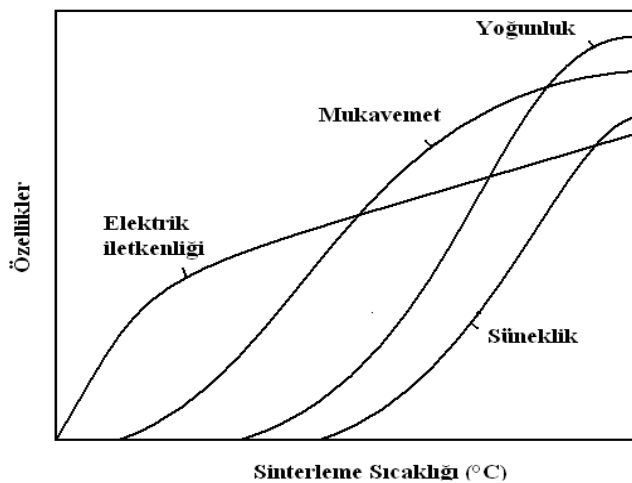
Genellikle MA işlemleri malzemenin türüne bağlı olarak oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda yapılmaktadır. Genellikle bu sıcaklığın sabit tutulmasında kazan çevresinde soğutucu gaz ya da sıvıların sirkülasyonu sağlanır. Aksi halde sıcaklık artışları hem aşırı miktarda aşınmalara hem de tozun kirlenmesine neden olabilir. MA sırasında ilave edilen İKK'larında ısı artışını engellediğine dair bilgilerde bulunmaktadır [8, 24].

2.3. Metal Tozların Sinterlenmesi

Kalıpta sıkıştırılmış toz kütleyi ergime sıcaklığının altında ısıtılarak difüzyon yolu ile kimyasal bağlanmasını sağlamak ve böylece gözenek miktarını düşürme işlemine tozların sinterlenmesi denir [37]. Sıkıştırılarak soğuk şekillendirilmiş tozlar çok yüksek basınçlarda sıkıştırılmamışlarsa, çok kırılgan olurlar. Hatta yüksek yoğunlukta sıkıştırılmış cisimler dahi, uygulanan küçük gerilimlere dayanamazlar [38]. Sinterleme sıcaklığı, tek bileşenli sistemlerde metalin ergime sıcaklığının 2/3'ü veya 4/5'i kadar alınır. Çok bileşenli sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı ergime derecesi düşük olan metalin altında tespit edilir. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi kısalır. Sinterleme süresi uzun tutulduğunda sıcaklığı düşük tutmak gerekir [37].

Sinterleme işlemi esnasında tozlarda, kimyasal değişme, boyutsal değişme, iç gerilimlerinin giderilmesi, toz değişimleri ve alaşımlama gibi etkiler meydana gelmektedir.

Şekil 2.4 mukavemetin ve diğer özelliklerin sinterleme sıcaklığı ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Şekildeki iletkenlik hariç, eğriler üç bölümden oluşmaktadır. Her eğrinin ilk bölümleri sinterleme sıcaklığına göre ya sabit kalmakta ya da yavaşça artmaktadır [38].



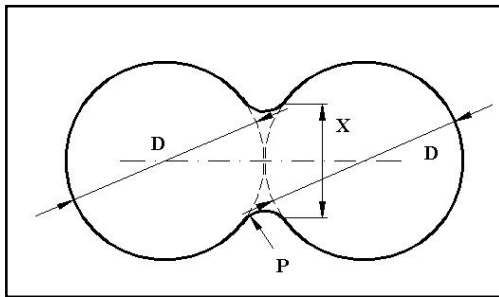
Şekil 2.4. Sinterleme sıcaklığının toz metal parçalarının özellikleri üzerine etkisi [38]

Bunu, az miktarda sinterleme sıcaklığının artmasıyla eğrilerin özelliklerinin çok hızlı değiştiği, ikinci bölge takip ediyor. Üçüncü bölgede bütün özelliklerin değerleri en üst seviyesine yaklaştığı görülüyor. Özellikle ikinci sinterleme bölgesi çok önemlidir. Bu bölgede farklı sıcaklıklarda gözlenen özelliklerde çok hızlı değişimler olmaktadır. Örneğin önemli bir boyutsal değişim olmadan mukavemette hissedilebilir artış meydana gelmektedir [39].

Sinterleme işleminde, toz taneciklerindeki boyutsal değişimler sonucunda toz özelliklerinde de değişimler olur. Preslenmiş toz parçalar sinterlendiğinde yüksek mukavemet kazanırlar. Mukavemette ve diğer özelliklerde sinterleme sıcaklığının artmasıyla iyileşmeler görülür [40].

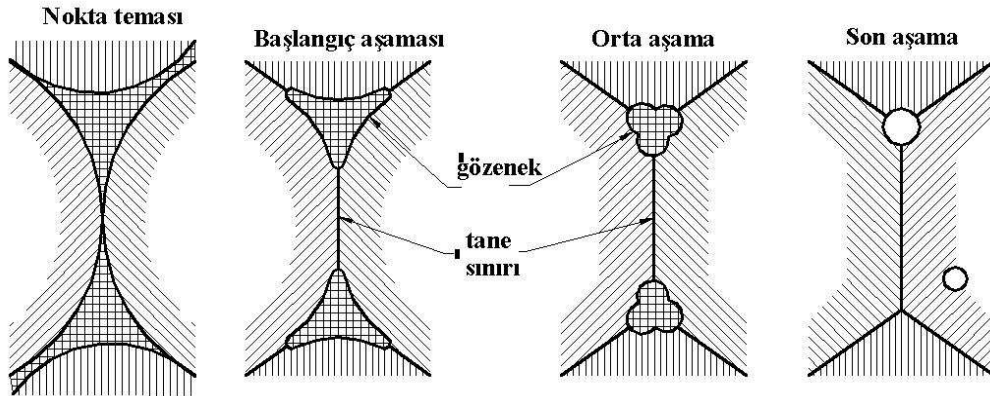
2.3.1. Sinterleme teorisi

Presleme işleminden sonra, küresel şekilli toz parçacıkları noktasal olarak temas halindedirler. Şekil 2.5’de iki küresel parçacığın sinterleme profili verilmiştir. Sinterleme işlemi sırasında, temas eden parçacıklar arasındaki bağlar kuvvetlenir ve kaynaklaşmalar oluşur. Sinterleme işleminde, parçacıklarda önce bir boyun büyümesi ve ilerleyen sinterleme zamanı ile gözeneklerde büzülme oluşur. Daha sonra, gözenek kanalları kapanarak gözenekler kapalı gözenek şekline dönüşürler. Şekil 2.6’da sinterleme işlemi sırasında parçacıklar arasındaki bağlarda ve gözeneklerdeki değişimler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.5. İki küresel parçacığın sinterleme profili

X=boyun çapı, D=küre/parçacık çapı, P=boyun yarıçapı

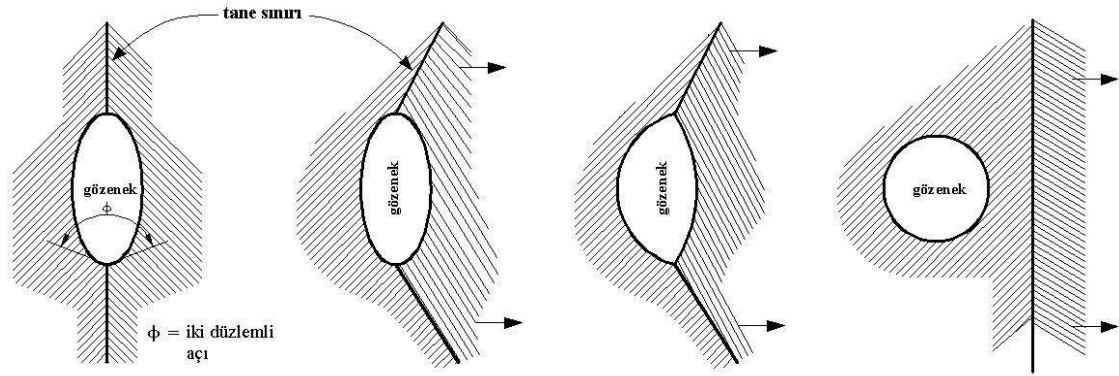


Şekil 2.6. Sinterleme basamaklarına göre gözenek yapısındaki değişim [41]

Sinterlemeyi etkileyen pek çok faktör vardır (Toz boyutu, sıcaklık, alaşım elementleri, ham yoğunluk, sinterleme atmosferi vb.). Sinterleme mekanizmasının etkin olabilmesinde en önemli etken preslenecek ve sinterlenecek tozların yüzeyinde oksit veya sinterlemeyi olumsuz etkileyecek tabakaların oluşmamasıdır. Eğer oksit tabakaları oluşmuşsa ve presleme sırasında kırılmamışsa sinterleme hiç olmaz ya da çok verimsiz gerçekleşir.

Ancak, sinterleme sonrası malzemenin mekanik ve tüm işlevsel özelliklerine en etkin sonuç parça içerisinde oluşan boşluk ya da gözenek miktarıdır. Her ne kadar bu oluşumlarda presleme basıncı ve malzemenin özellikleri etkinse de, sinterleme sonrası gözeneklilik miktarı da çok önemlidir. Sinterleme sırasında her ne kadar ebatlarda değişiklik istenmese de, boşlukların giderilmesi için katı transfer işlemlerinin olması beklenir. Bunlar; hacimsel difüzyon, tane sınırı difüzyonu, plastik akış ve sıvı akışı şeklindedir [7].

Sinterlemenin ileri aşamalarında toz sınırları kalkar ve tane büyümeye devam eder. Ancak büyümenin ileri safhalarında gözenekler tamamen tane içerisine hapis olur. Bu istenmeyen bir durumdur. Eğer sinterlenen numunede gözenek şekli dairesel hal almışsa sinterlemenin son aşamasına erişildiği anlaşılabilir. Bu son aşamada, hiçbir zaman % 100 yoğunluk elde edilmez (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Son sinterleme devresinde bir gözeneğin izole edilişi ve kapanması [41]

Sinterleme işleminde en önemli parametrelerden biri de sinterleme atmosferidir. Sinterleme için gerekli atmosfer prensip olarak parçaların ve fırının oksitlenmesini önlemek, yüzey oksitlerini indirgemek, fırında buharlaşan yağlayıcı gazları dışarı atmak ve demir karbon alaşımlarında olduğu gibi blok parçanın bileşimini kontrol etmek için kullanılır. Endüstride, genellikle oksitlenmeyi minimuma indirmek için koruyucu atmosfer olarak Ar, H veya N gazı kullanılır [40].

2.4. Aşınma

Dünyadaki hammadde ve enerji kaynaklarının sınırlı oluşu, enerji ve malzeme tasarrufu sağlamaya yönelik yapılan çalışmaların önemini arttırmaktadır. Bu yüzden eş çalışan sistemlerde sürtünme ve aşınmanın kontrol altına alınmasıyla ilgili çalışmaların önemi de her geçen gün artmaktadır.

DIN normunda “kullanılan malzemelerin yüzeylerinden, daha çok mekanik olarak etkileyen enerjiler ve mekanik etkenler ile küçük parçacıkların ayrılması sonucu oluşan istenmeyen şekil değişikliği” [42] olarak tarif edilen aşınmanın, zamanla yalnız bir malzeme kaybı sonucu istenmeyen şekil değişikliğinden ibaret olmadığı, hatta malzeme kaybı olmaksızın oluşan şekil değişikliğinin de aşınma kavramı içine girdiği anlaşılmıştır [43]. Tam tersine bazı durumlarda kontrollü olarak malzeme kaybının faydalı olacağı ve bu yüzden söz konusu malzeme kaybının aşınma kavramı içinde ele alınamayacağı vurgulanmıştır.

Yüzey bölgesindeki şekil değişikliği (plastik deformasyon), malzeme değişikliği (sürtünme oksidasyonu) veya mekanik etkenlerle parça ayrılması da aşınmanın türlerindedir.

Aşınma hızı ve sürtünme katsayısı bir malzeme özelliği değil, bir tribolojik sistem özelliğidir. Triboloji; birbiri üzerine kuvvet uygulayarak birbirine göre hareket halinde olan yüzeylerin ve bunlarla ilgili bilim ve tekniğin adıdır [43]. Bu sistem; sürtünme çifti, yükleme ve hareket şekilleri ile çevre faktörlerinden oluşan bir bütün halinde göz önüne alınması gereken bir sistemdir.

2.4.1. Aşınma analizi

Aşınmanın belirlenmesinde, tribolojik sistemi meydana getiren temel unsurların bilinmesi gerekmektedir. Bir tribolojik sistemde genel olarak bulunabilecek 6 temel unsurdan hepsi veya bazıları aşınma olayına iştirak edebilir. Bu unsurlar şunlardır:

Temel sürtünme elemanı:

Fiziksel/kimyasal özellikleri ve durumu, yüzey yapısı, şekli tamamen belirli ve aşınması özel ilgi ile incelenen katı cisimdir.

Karşı sürtünme elemanı:

Katı cisim, sıvı veya gaz olabilir. Karşı sürtünme elemanı ile temel sürtünme elemanı bir “aşınma çifti” oluştururlar.

Ara madde:

Temel sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar veya bunların karışımı şeklinde bir cisim bulunabilir. Mesela; yüzey arasına girmiş kum taneleri veya aşınma esnasında yüzeylerden kopan parçacıklar da ara madde olarak düşünülebilir.

Çevre:

Aşınma esnasında, kullanılan malzemenin özelliğine bağlı olarak, aşınma miktarının optimum değerde olabilmesi için ortam şartları uygun olmalıdır.

Yükleme:

Etki eden yükün (kuvvetin) büyüklüğü, şekli (statik, dinamik, darbeli, titreşimli vs.), doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemeyi meydana getirir.

Hareket:

Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma, yuvarlanma, çarpma vs.), büyüklüğü, doğrultusu ile verilen bir etkidir. Aşınmanın meydana gelmesinde aşınma miktarının belirlenmesinde hareket süresi belirli bir unsurdur. Bu faktörlerden birinin değişmesi aynı zamanda diğer faktörleri de değiştireceğinden sistem üzerinde kompleks bir etki doğacaktır.

2.4.2. Aşınma mekanizmaları

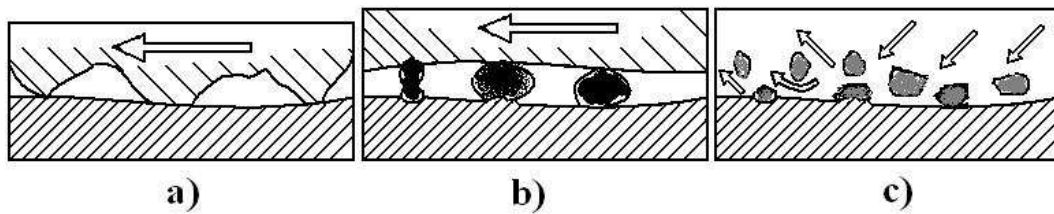
Aşınmanın meydana gelmesi ve sürekliliği için gerekli faktörlerin tribolojik sistem içerisinde yaptığı fiziksel ve kimyasal etkilerin iletilmesine göre altı çeşit aşınma mekanizması vardır [44, 45]. Bunlar;

- Abrasiv aşınma,
- Adhesiv aşınma,
- Yorulma aşınması,
- Difüzyon aşınması,
- Tribo-oksidasyon aşınması,
- Erozyon ve Kavitasyon aşınması.

Aşınma, hareketli makine parçalarının ömürlerini, performanslarını azaltan ve bu parçaların bozulmasına neden olan çok önemli bir faktördür. Bu nedenle, ekonomik açıdan aşınmanın neden olduğu kayıplar oldukça fazladır.

Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma; bir yüzeyin temas halinde bulunduğu diğer yüzeyden daha sert olduğu durumlarda veya temas bölgesinde sert taneciklerin bulunduğu durumlarda meydana gelir. Abrasiv aşınma, iki cisimli ve üç cisimli olmak üzere iki şekilde meydana gelir. İki cisimli abrasiv aşınma, sert ve pürüzlü bir yüzeyin kendisinden daha yumuşak malzeme ile temas ettiği durumda, kuvvet ve basıncın etkisi ile yumuşak malzeme yüzeyinde oluşan çizilme ve küçük parçacıkların kaldırılması sureti ile meydana gelen deformasyondur. Toprak işleme aletleri, eğeleme ve zımparalama işlemleri örnek olarak verilebilir. Üç elemanlı abrasiv aşınma ise, iki yüzey arasında kayma ve yuvarlanma hareketi yapabilen aşındırıcı taneciğin, yüzeyden malzeme kaldırmasıdır. Abrasiv aşınma mekanizmaları Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Abrasiv aşınma mekanizmaları a) İki elemanlı abrazyon, b) Üç elemanlı abrazyon c) Erozyon [46]

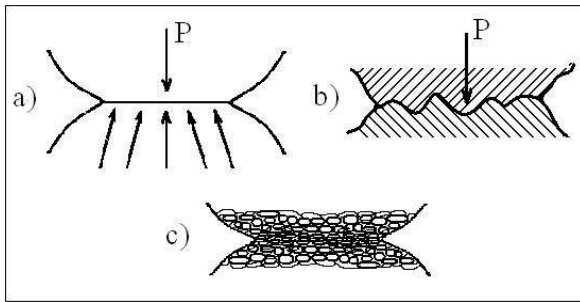
Adhesiv aşınma

Birbirleri ile temas halinde olan iki metalin yüzeylerinin, yüksek basınç ve meydana gelen sıcaklığın yükselmesi ile birlikte, metallerin yüzey kısımlarında kaynaklanma meydana gelir. Çalışma sırasında bu kaynaklar birbirinden ayrılırken, yüzeylerden

ufak parçalar kopar. Bu şekilde meydana gelen aşınma “*Adhesiv*” aşınma olarak adlandırılır [47].

En yaygın aşınma türü olan adhesiv aşınma, bir katı malzemenin diğeri üzerinde kaydığında ya da ona karşı baskı yaptığında meydana çıkar. Temas eden yüzeylerin aşınma eğilimi, iki malzemenin yüzey atomları arasında mevcut olan çekme kuvvetlerinden kaynaklanır. İki yüzey ister normal, ister teğetsel şekilde bir araya getirilip ayrılırsa, bu çekici kuvvetler malzemeyi bir yüzeyden diğerine çekmeye teşebbüs edecek şekilde etkir. Bu şekilde malzeme orijinal yüzeyinden uzaklaştırıldığında, bir adhesiv aşınma parçası meydana getirilmiş olur [48].

Adhesiv aşınma en çok, benzer kristal kafes yapılı malzemelerde görülür. Benzer kristal kafes yapısına sahip metallerin hareket ve sürtünmeleri nedeni ile sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynama daha kolaydır. Buradaki kaynamadan maksat malzemelerin yüksek sıcaklıktan dolayı birbirleri ile bağ oluşturmalarıdır. Şekil 2.9’da adhesiv aşınmadaki kaynak bağının oluşumu görülmektedir [49].

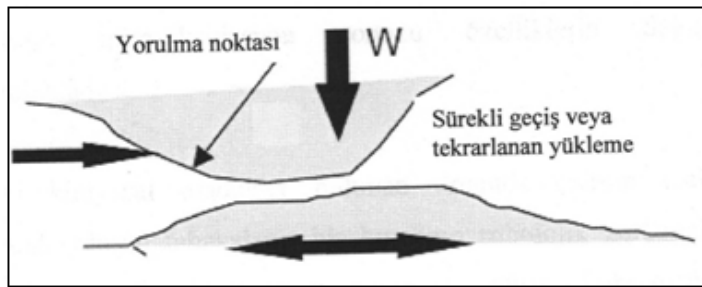


Şekil 2.9. Adhesiv aşınmada oluşan kaynak bağı [50] a) Temas etme b) Plastik deformasyon c) Kaynama

Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, sürtünme sırasında oluşan gerilimlerin kırılmaya neden olduğu aşınmadır. Sünek malzemelerde yüzeysel kırılma aşınması veya delaminasyon meydana gelir. Sürtünmenin olduğu bölgelerde plakalar oluşur. Gevrek malzemelerde kırılmalar, yüksek çekme gerilimlerinin olduğu bölgelerde meydana

gelir. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen büyüklüğü, zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi [51]

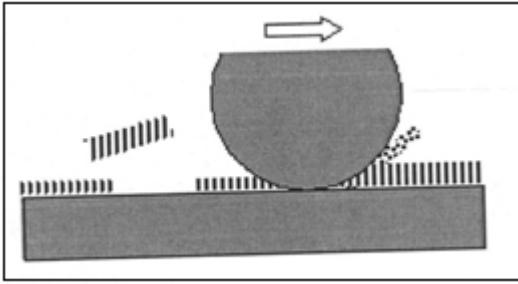
Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerde, plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi, yüzeyde küçük çukurların oluşmasına neden olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür [52].

Difüzyon aşınması

Difüzyon aşınmasında, yüzeylerin karşılıklı çalışması sırasında oluşan kimyasal olaylar daha etkili olmaktadır. Karşılıklı çalışan malzemelerin kimyasal özellikleri ve karşılıklı malzemeyle olan birleşme eğilimleri difüzyon aşınmasının oluşmasını sağlamaktadır. Karşılıklı çalışan malzemelerin sertliği bu aşınmada çok fazla etkili olmamaktadır. Malzemeler arasındaki metalürjik ilişki, asıl aşınma mekanizmasının büyüklüğünü tayin etmektedir. Mekanizma daha çok sıcaklığa bağlıdır ve bu sebeple yüzeyler arasında yüksek basınç ve yüksek kayma hızlarında daha fazla olmaktadır [53].

Tribo-oksidasyon aşınması

Tribo-oksidasyon aşınmasında, çalışma ortamı ile parçaların yüzeyleri arasındaki etkileşim önemli oynamaktadır. Tribo-oksidasyon aşınmasında, temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir. Daha sonra temas noktasında çatlak oluşur veya abrasiv etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar (Şekil 2.11) [54].



Şekil 2.11. Tribo-oksidasyon aşınmasının meydana gelişi

Korozif aşınma adı verilen tribo-oksidasyon aşınması durumunda, ana malzeme ile karşı malzeme arasındaki tribolojik zorlanmalardan dolayı meydana gelen kimyasal reaksiyon etkindir. Malzeme yüzeylerinin hava ile reaksiyona girerek oluşturduğu yüzey tabakaları aşınmayı azaltmasına rağmen bu yüzey tabakalarının tribo-oksidasyon sonucu özelliklerin değişmesi aşınmayı hızlandırmaktadır.

Tribo-oksidasyon aşınması, özellikle metalik malzeme yüzeylerinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu ise yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur.

Erozyon ve kavitasyon aşınması

Erozyon; ortam ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeni ile meydana gelen bozulma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasiv tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpması ile oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyonlar

meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur. Bunun sonucunda yüzey aşınır. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliğe çarpma açısının değeri, erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen en önemli faktörlerdir [44, 45].

Kavitasyon aşınması, izafi hareket halinde bulunan bir sıvı ile katı bir cismin arasında meydana gelir. Sıvı içerisinde bulunan zerreciklerin basıncı, buharlaşma basıncından daha küçük bir ortamdan geçerken zerreciklerin büyümesi ve patlamasıyla oluşan basınç dalgalarının katı cismin yüzeyine çarpması sonucu kavitasyon meydana gelir. Kavitasyon aşınması genellikle, su türbinleri, su pompaları ve buhar türbinlerinde görülür [49].

3. LİTERATÜR TARAMASI

Araştırmacılar MMK'lerin sahip oldukları özellikleri iyileştirmek ve üretim safhalarında karşılaşılan problemleri en aza indirmek için çalışmalarına devam etmektedirler. Bu çalışmaların neticesinde de yeni bir malzeme grubunun endüstriyel alanlardaki yerini daha hızlı bir şekilde alması mümkün olmaktadır. Araştırmacılar özellikle, MMK'lerin üretimi ve aşınma direncinin artırılması üzerinde yoğun çalışmalar yapmaktadır. Bu kapsamda da mekanik alaşımlama tekniği üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmaktadır. MMK'ler hakkında yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Corrochano ve arkadaşları, Tane boyutu 50 µm den daha küçük Al-Mg-Si alaşımı olan 6061 alüminyum matris tozlarına hacimce %10 Al₂O₃w takviye edilerek kompozitler üretmişlerdir. Bu malzemeler, planeter bilyeli değirmende 100 dev/dak ve 2,5 saat sürede hazırlanmıştır. Bilye toz oranı 7:1 olarak seçilmiştir. Böylelikle elde edilen malzeme ile 6061 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini karşılaştırma imkanı sağlanmıştır. Elde edilen kompozit numunelere gerilim testleri uygulanmıştır. Sonuçlar; yüksek mekanik özelliklere sahip kompozit malzemeler üretildiğini, ayrıca 6061 alüminyum alaşımının Al₂O₃ takviyesiyle güçlendirildiğini ortaya koymaktadır. Bu mekanik özelliklerin elde edilmesindeki en önemli unsur, 6061 alaşım matrisi ile Al₂O₃ takviyesi arasındaki güçlü yüzey bağlarına erişilmesidir [55].

Arik ve Türker, Mekanik alaşımlama ile üretilmiş Fe-Fe₃C kompozitlerin karakteristiklerini incelemişlerdir. Demir tozları içerisine ağırlıkça % 1 karbon karası eklenmiştir. Alaşımlama işlemi yüksek enerjili değirmende, Ar atmosferi altında sırası ile 2,5; 3,5 ve 5 saat süre ile yapılmıştır. Bilye toz oranı 8:1 seçilmiştir. Alaşımlanmış numuneler, 1000 MPa basınç altında preslenerek sırası ile 1125, 1150 ve 1175 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile Ar gazı geçirgenli tüp fırında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası, üretilen numunelerin optik mikroskop çalışmaları ile Fe₃C dönüşümü sinterleme durumu, yapılan çapraz kırılma testi ile de numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda alaşımlama süresinin

artması ile parçacık boyutlarının azaldığı görülmüştür. Artan presleme basıncı ile numunelerin yoğunlukları artmıştır. En fazla yoğunluk artışı saf Fe alaşımında görülmüştür. Sinterleme sıcaklığının artması ile yoğunluk doğru orantılı olarak artmıştır. Fe ve C arasındaki partikül transferi 1175 °C’de gerçekleşmiştir [56].

Şahin ve Özdin, SiCp ile takviyelendirilmiş kompozit numuneleri, farklı tane boyutlarındaki aşındırıcılar kullanılarak abrasiv aşınma deneyine tabi tutmuşlardır. Abrasiv aşınma deneyi pin-on-disk cihazında yapılmıştır. Kompozitin aşınma davranışları esnasında; uygulanan yük, kayma mesafesi ve parçacık boyutu dikkate alınmıştır. Elde edilen aşınma miktarlarına, faktöriyel dizayn yöntemi uygulanmıştır. Bu yapılan tasarım sonucunda, uygulanan yük ve aşındırıcı tane boyutunun artırılmasıyla aşınma miktarında artış gözlenmiştir. Kayma mesafesinin azaltılmasıyla da aşınma miktarı artmıştır. Ayrıca tüm kayma hızları için kompozitlerin tane boyutu arttıkça aşınma miktarları azalmıştır. Aşındırıcı tane boyutu ve uygulanan yükün alaşım matrisi üzerinde daha baskın olduğu gözlenmiştir [57].

Krasnowski ve Kulik, Mekanik alaşımlama yöntemiyle FeAl matrisli hacimce %50 %30 ve %10 TiC ile takviyelendirilmiş karışım tozlarını, sıcak presleme metoduyla birleştirilmiş ve TiC takviyeli nanokompozitler üretmişlerdir. Tozlar 1000°C sıcaklıkta ve 7.7 GPa basınç altında presleme işlemine tabi tutulmuştur. Presleme esnasında sıcaklığın ve basıncın yüksek değerlerde tane büyümesini engellediği görülmüştür. Üretilen numunelerin mikro sertliğinin, TiC oranına bağlı olarak 1363 ve 1608 HV0.2 değerleri arasında yükseldiği tespit edilmiştir. Elde edilen numunelerin yoğunluğu ideal değere %100 oranında ulaşmış ve porozite sıfır olarak gözlenmiştir [58].

Razavi ve arkadaşları, Pahalı olmayan ham materyallerden TiC üretilme olanağını araştırılmıştır. Ti parçacıkları ve siyah karbondan, yüksek enerjili bilyeli değirmende, 10:1 BTO’da ve farklı öğütme sürelerinde (0.5, 1.5, 3, 6, 9, 12, 15 ve 20 saat) TiC üretimi denenmiştir. XRD sonuçlarına göre; bütün işlenmiş materyaller, öğütme işleminin 15. saatinden sonraki sürelerde istenilen materyale dönüştürülmüştür.

Sonuç olarak, öğütme süresi arttıkça tozların çok iyi bir şekilde dağılımı elde edilmiştir [59].

Yin ve arkadaşları, Al, Fe ve Cu tozlarını, oda sıcaklığında sırası ile 5, 10, 20 ve 40 saat sürede planeter tipi alaşımlama cihazında alaşımlama işlemine tabi tutmuşlardır. Alaşımlama esnasında BTO 30:1 seçilmiş ve oksitlenmeyi engellemek için Ar atmosferi kullanılmıştır. Yağlayıcı olarak karışım içerisine etanol katılmıştır. Mekanik alaşımlanmış $Al_{70} Cu_{20} Fe_{10}$ tozlarının mikro yapıları ve sertlik davranışları XRD, TEM ve XAFS teknikleriyle araştırılmıştır. Sonuçlar, $Cu_9 Al_4$ bileşiğinin uzun süreli öğütme işlemiyle oluştuğunu gösterirken, Al_2Cu bileşiğinin kısa zamanlı öğütme işlemiyle oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca, kristalimsi yapıdaki $Al_{65} Cu_{20} Fe_{15}$ alaşımları yüksek sıcaklıkta oluşabilirken, Tetragonal yapıdaki $Al_{17} Cu_2 Fe$ bileşiği düşük sıcaklıkta oluşabildiği gözlenmiştir [60].

Arik ve arkadaşları, Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiş, Al- Al_4C_3 kompozitlerin kuru sürtünme aşınmalarını test etmişlerdir. Mekanik alaşımlama işlemi; 20 saat süre ile 450 dev/dak'da ve 6:1 BTO'da Ar atmosferinde yapılmıştır. Alaşımlama sonrası 650 MPa presleme basıncı uygulanarak blok numuneler elde edilmiştir. Üretilen numuneler 650 °C'de 20 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası % 92 yoğunlukta ve 314 HV sertlikte MMK'ler elde edilmiştir. Üretilen Al- Al_4C_3 kompozitlerin kuru sürtünme aşınma testleri pin-on-disk cihazında yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda kompozit numunelerde düşük yüklerde aşınma miktarı düşük, fakat yük arttıkça aşınma miktarında artış gözlenmiştir. Ayrıca, 50 N yükün üzerine çıktıktan sonra matris malzemesi ve takviye elemanı arasındaki yüzey bağı zayıflatacak sınırın üzerine çıktığı için aşınma miktarında ani bir artış gözlenmiştir [61].

Liu ve Liu, $Ti_{50}Al_{50}$ alaşım tozlarını mekanik alaşımlama yöntemi ile hazırlanmışlardır. Mekanik alaşımlama işleminde 10 mm çapında sertleştirilmiş çelik bilye kullanılmıştır. Bilye toz oranı 5:1 ve alaşımlama süreleri sırası ile 5, 10, 15 ve 20 saat olarak seçilmiştir. Mekanik alaşımlama işlemi yapılmış metal tozlar 30 MPa basınç altında ve 1100–1200°C sıcaklıklarda sıcak presleme işlemine tabi

tutulmuştur. Presleme sonucu elde edilen numuneler, spark plazma sinterleme (SPS) yöntemi ile Ar atmosferinde sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası üretilen malzemelerin Arşimet prensibine göre yoğunlukları ölçülmüştür. Üretilen numunelerin mikro sertlik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Numunelerin mikro yapı analizleri için SEM, TEM ve X-Ray teknikleri kullanılmıştır. Yapılan deneylerde; 15 saatlik alaşımlama süresi sonunda alüminyum ve titanyum arasında oluşan difüzyon sayesinde TiAl ve Ti₃Al bileşikleri elde edilmiştir. Al ile Ti arasında güçlü yüzey bağlarının oluştuğu gözlenmiştir. Plazma kıvılcım sinterleme yöntemi ile yapılan işlemde, optimum sıcaklık 1150 °C olarak belirlenmiştir [62].

Matsumoto ve arkadaşları, Mekanik alaşımlama yöntemi ile Ti, Zr ve Ni tozlarından alaşımlar üretmişlerdir. Mekanik alaşımlama işlemi planeter tipi değirmende yapılmıştır. Karışıma % 0,1-3 arasında yağlayıcı (Y) katılmıştır. Alaşımlanmış tozlar 500 MPa presleme basıncında preslenmiş ve 540 °C'de sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin yapısal incelemeleri yapılmıştır. Karışıma yağlayıcı malzeme eklenmesi ile amorf fazın arttığı gözlenmiştir. Üretilen kristal yapıya sahip malzemelerin vickers sertlik değerleri 6,9 GPa elde edilmiştir [63].

Gilman ve Nix, saf Al ve ALCOA 601 tozuna uyguladıkları 3 saat MA sonrasında oluşan Al₂O₃ ve Al₄C₃ parçacıklarının yapısal etkilerini incelemişlerdir. İşlem esnasında her iki alaşıma da % 1,5 oranında nopkowax ilave etmişlerdir. 690 MPa basınç altında soğuk olarak presledikleri tozları daha sonra 500°C 'de 327 MPa basınç altında sıcak olarak preslenmişlerdir. Yapılan TEM çalışmaları sonunda her iki malzemede de Al₂O₃ parçacıklarının yapı içerisinde homojen bir dağılım sergilediğini tespit edilmiştir. Wax ilave edilen malzemede oluşan oksitlerin daha yoğun olduğunu, yüksek büyütme oranlarında ise Al₄C₃ parçacıklarının da yapı içerisinde bulunduğunu tespit edilmiştir. Saf alüminyumda oluşan Al₄C₃ parçacıkların boyutları ortalama 7,7 nm iken ALCOA malzemesinde oluşan parçacıkların ortalama boyutunu 30 nm olduğu rapor edilmiştir. Katılan işlem kontrol kimyasalının hem alaşımlamayı hızlandırdığı hem de takviye parçacıklarının (Al₂O₃-Al₄C₃) oluşumunu artırdığını bildirmişlerdir. Oluşan parçacıklara paralel olarak sertlikteki artışı da tespit etmişlerdir [64].

Arsenault ve Wu; Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş SiC/Al kompozitlerle, sıvı metal karıştırma yöntemi ile üretilmiş SiC/Al kompozitleri karşılaştırmışlardır. Her iki yöntemde de takviye elemanlarının boyutu ve dağılımı aynı tutulmaya çalışılmıştır. Sıvı metal karıştırma yöntemi ile homojen bir parçacık dağılımı için gayret edilmişse de toz metalürjisi yöntemi ile üretilen kompozitlerdeki kadar homojen bir parçacık dağılımı elde edilememiştir. Dolayısı ile sıvı karıştırma döküm yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, toz metalürjisi ile üretilenler kadar iyi olmamıştır. Takviye elemanlarının boyutlarının küçük olduğu durumlarda her iki kompozitin mekanik özellikleri arasındaki fark % 3 düzeyinde olmuştur. Parçacık boyutu büyüdüğünde bu fark % 15'e kadar çıkmıştır [65].

Güldaş ve arkadaşları, Pim-disk tipi aşınma deney düzeneği aracılığı ile δ -Al₂O₃ elyaf içerikli çinko-alüminyum esaslı kompozitlerin aşınma davranışları farklı yükler altında, 0,8 m/sn sabit kayma hızında kuru sürtünmeli olarak incelemiş ve matris, elyaf içeriği ile elyaf doğrultularının etkilerini karşılaştırmışlardır. Deney sonuçları, aşınma oranının, Zn-Al (Zn-8) matrisine göre δ - Al₂O₃ elyaf takviyelendirilmesi ile azaldığını, artan yük ile de arttığını göstermiştir. Bununla birlikte deneyler, normal doğrultuda yönlendirilmiş kompozitlerin aşınma dirençleri, rastgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozitlerin aşınma dirençlerinden daha düşük olduğunu göstermiştir [66].

Purazrang ve arkadaşları, Kısa alümina fiberlerinin hacim oranlarının magnezyum alaşımlı kompozitlerin mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Elde edilen kompozitlerin, farklı sıcaklıklarda çekme ve kırılma tokluğu testleri yapmıştır. Ayrıca elektron mikroskobu ve optik mikroskopla kompozitlerin mikro yapılarını incelenmiştir. Matris malzemesi olarak AZ91 magnezyum alaşımı ve kısa δ -alümina fiberler kullanılmıştır. Metal matrisli kompozitler basınçlı infiltrasyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Kompozitin mikro yapısı incelendiğinde, takviye elemanı dağılımının hemen hemen iki boyutlu olduğu ve bazı fiberlerin infiltrasyon işlemi ile kırıldığı gözlenmiştir. Matris alaşımı ve alümina fiberler arasında yeterli ara yüzey bağı oluşmuştur. Sonuç olarak, takviye elemanının artması ile kompozitlerin çekme

mukavemetleri artmış, bununla beraber magnezyum alaşımı içerisinde fiberlerin eklenmesi matrisin kırılma dayanımına neden olmuştur [67].

Jiang ve arkadaşları, Al-Si alaşım ve hacimsel olarak % 5, 8, 12 ve 16 kısaca Al_2O_3 fiberle takviyelendirilmiş kompozitlerin kuru kayma aşınmasını araştırmışlardır. İnfiltrasyon yöntemiyle üretilmiş kompozitlerin aşınma özellikleri kıyaslanmıştır. Hem matris alaşımının hem de metal matris kompozitlerin; temas yüzey sıcaklığı, aşınma hacmi, sürtünme katsayısı farklı kayma aralıklarında ve 20- 150 N arasında farklı yükler altında ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar; Al-Si alaşımı içine ilave edilen Al_2O_3 fiberleri aşınma oranını düşürmüş ve artan yükte meydana gelen yoğunlaşmaya geçişi etkili bir şekilde sındırmıştır. Artan yükte temas yüzey sıcaklığı artmış ve 150 N'da 520 K'e ulaşmıştır. Aşınmış yüzeylerdeki SEM incelemesinde, Al_2O_3 fiberlerinin varlığının, yoğun aşınmaya geçişi engellediği gözlenmiştir [68].

Türker ve arkadaşları, Al ve SiC tozlardan mekanik alaşımlama tekniği ile daha küçük tane yapılı ve daha dayanıklı kompozit malzeme üretimini araştırmışlardır. Tozlar 1300 dev/dak da açık atmosferli ve su soğutmalı olarak 0.5, 1, 2.5, 5 ve 10 saat MA işlemine tabi tutulmuştur. Alaşımlama zamanı arttıkça toz boyutu küçülmüş ve sertlik artmıştır. Son olarak sertlik 62 HVN olmuştur. MA tekniği ile daha küçük tane yapılı, ince parçacık dağılımlı ve daha dayanıklı kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. İnce dağılımlı parçacıklarla kontrol edilen küçük tane yapısı yardımıyla sıcaklık dayanımında, toklukta, korozyon ve yorulma dayanımında iyileşmeler görülmüştür [69].

Bağcı, Mekanik alaşımlama ile üretilen Al- Al_4C_3 kompozit malzemede presleme basıncı ve sinterleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerine etkisini incelemiştir. Bu çalışmada, %2-4 oranlarında karbon karası ve alüminyum toz karışımı yüksek enerjili atritör içerisinde 20 saat süreyle mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. MA sonrası elde edilen tozlar farklı presleme basınçlarında preslenerek blok numuneler haline getirilmiştir. Daha sonra bütün numuneler 5 saat süreyle değişik sıcaklıklarda tüp fırında argon gazı ortamında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası numunelerin XRD analizleri yapılarak Al_4C_3 dönüşümü, SEM çalışmaları ile

numunelerin sinterlenebilme durumu, yapılan çapraz kırılma testi ve sertlik ölçümleri ile de numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen mekanik özelliklere göre optimum presleme basıncı 600 MPa ve sinterleme sıcaklığı ise 650 °C olarak belirlenmiştir [70].

Sümer, Mekanik alaşımlama ile üretilen Fe-Fe₃C kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini incelemiştir. % 1 karbon karası içeren saf demir tozu, yüksek enerjili bir atritör içerisinde 2,5; 3,5 ve 5 saat sürelerle mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra alaşımlanmış tozların parçacık boyutu, şekli ve sıkıştırılabilirliği karakterize edilmiştir. MA sonrası elde edilen tozlar 1000 Mpa presleme basıncı altında preslenerek blok numuneler elde edilmiştir. Daha sonra bütün numuneler 2 saat süreyle değişik sıcaklıklarda (1125, 1150, 1175 °C) tüp fırında argon gazı ortamında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası numunelerin, optik mikroskop çalışmaları ile Fe₃C dönüşümü sinterleme durumu, yapılan çapraz kırılma testi ile de numunelerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, blok parçaların çapraz kırılma mukavemeti ve mikro yapısı üzerinde MA süresi ve sinterleme sıcaklığının önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir [37].

Özkök, α -Si₃N₄ içeren alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve özelliklerini incelemiştir. Yapılan bu çalışmada toz metalürjisi üretim yöntemi kullanılarak, değişik oranlarda α -Si₃N₄ içeren alüminyum matrisli toz-metal kompozit malzeme üretilmiştir. Karışım tozların hazırlanmasında döner silindirde karıştırma ve yüksek enerjili atritörde alaşımlama şeklinde 2 farklı yöntem kullanılmıştır. Elde edilen karışım tozlardan 1000 MPa presleme basıncı altında standart çapraz kırılma numuneleri üretilmiştir. Presleme sonrası numuneler değişik sıcaklıklarda iki saat süre ile argon gazı ortamında tüp fırında sinterlenmiştir. Elde edilen sonuçlar; klasik karıştırma yöntemine göre, yüksek enerjili atritörde yapılan karıştırmayla, α -Si₃N₄ partiküllerin Al matris içerisinde dağılımının daha iyi sağlandığını göstermiştir. Sonuç olarak ta bu numunelerde daha yüksek sertlik ve mukavemet değerleri elde edilmiştir [71].

Ayas, Al₂O₃- TiC-TiCN kompozit malzemelerin üretim yöntemlerini incelemiştir. Al₂O₃ tozuna ağırlıkça farklı oranlarda TiC(titanyum karbür) ve TiCN (titanyum karbonitrür) ilave edilmiş ve elde edilen kompozisyonlar basınçsız ve gaz basınçlı olarak 2 farklı şekilde sinterlenmişlerdir. Sinterleme sonrası sertlik ve kırılma tokluğu özellikleri incelenmiş, ayrıca faz ve mikro yapısal karakterizasyonları x ışınları difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) teknikleri vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Her iki sinterleme yöntemlerinde sıcaklık artışı ile yoğunluğun yükseldiği tespit edilmiş, gaz basınçlı sinterleme yönteminde 1750 °C üzerinde yapının bozulduğu gözlenmiştir [72].

Kılınç ve arkadaşları, Titreşimli yatay atritör imalatını gerçekleştirmişler ve Al₂O₃ öğütme davranışını incelemiştir. 500, 700 ve 900 dev/dak dönme hızlarında olmak üzere üç farklı hızda çalışabilen; 3/2, 2 ve 3 litre değişebilir öğütme tankı kapasiteli, titreşimli yatay bir atritör tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu atritörle, Al₂O₃ tozları, 1:5, 1:10, 1:20 ve 1:40 toz/bilye ağırlık oranlarında 1, 5 ve 10 saat sürelerle öğütülmüştür. Atritörün Al₂O₃ öğütme davranışı, farklı öğütme süreleri ve toz/bilye oranları için araştırılmıştır. Öğütme süresinin artması ile tüm öğütme şartlarında toz boyutu küçülmüştür. Ancak 1:40 toz/bilye oranında 10 saat süreyle yapılan öğütme işlemindeki toplam dağılım eğrisinde 5 saate göre önemli bir değişim gözlenmemiş ve ortalama toz boyutları da sırasıyla 2,18 mm ve 2,29 mm olarak belirlenmiştir [73].

Şahin ve arkadaşları, Toz metalurjisi yöntemi ile SiCp takviyeli Al esaslı kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerde SiCp takviye oranları ağırlıkça %5, %10, %15, %20 olarak seçilmiştir. Bu karışımlar, 500 MPa ve 350 MPa basınçlarda preslenerek ve argon gazı atmosferinde 600 °C 30 dakika sinterleme işlemi uygulanarak kompozit numuneler üretilmiştir. Elde edilen kompozitlerin yoğunluk ve sertlik ölçümleri yapılmış, aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma testleri pim-on-disk düzeneğinde yapılmış, karşı aşındırıcı olarak 600 nolu SiC zımpara seçilmiştir. Aşınma testleri sonucunda presleme basıncı ve takviye oranının artışının kompozitlerin aşınma direncini iyileştirdiği gözlenmiştir [74].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Al matrisli Al_2O_3 parçacık takviyeli kompozitler mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilmiştir. Farklı oranlardaki parçacık takviyesinin ve parçacık boyutunun kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, aşınmış yüzeylerde oluşan mekanizmaları belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılmıştır.

4.2. Malzeme

Bu çalışmada kullanılan ETİAL-21 kodlu Al tozu, Almar Alüminyum firmasından temin edilmiş olup, matris malzemesi olarak kullanılmıştır. Al tozunun kimyasal bileşimi Çizelge 4.1’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 4.2’de verilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan Al_2O_3 tozu ise AKYOL TAŞ Sanayi ve Ticaret AŞ tarafından temin edilmiş ve özellikleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 2014 Alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

ALAŞIM	Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
ETİAL-21	0,26	0,75	4,94	0,46	0,58	<0,02	0,016	92,97

Çizelge 4.2. 2014 Alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

ALAŞIM	Temper	Boyut/Eti No	Sertlik (HV)
ETİAL-21	T-6	139	145

Çizelge 4.3. Al_2O_3 tozun mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm^3)	Ergime Sıcaklığı ($^{\circ}C$)	Isıl Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/C$)	Basma Mukavemeti (MPa)	Sertlik (H.V)	Elastik Modülü (10^3 MPa)
Al_2O_3	3.96	2050	9	3000	2000	390

4.3. Deney Numunelerinin Hazırlanışı

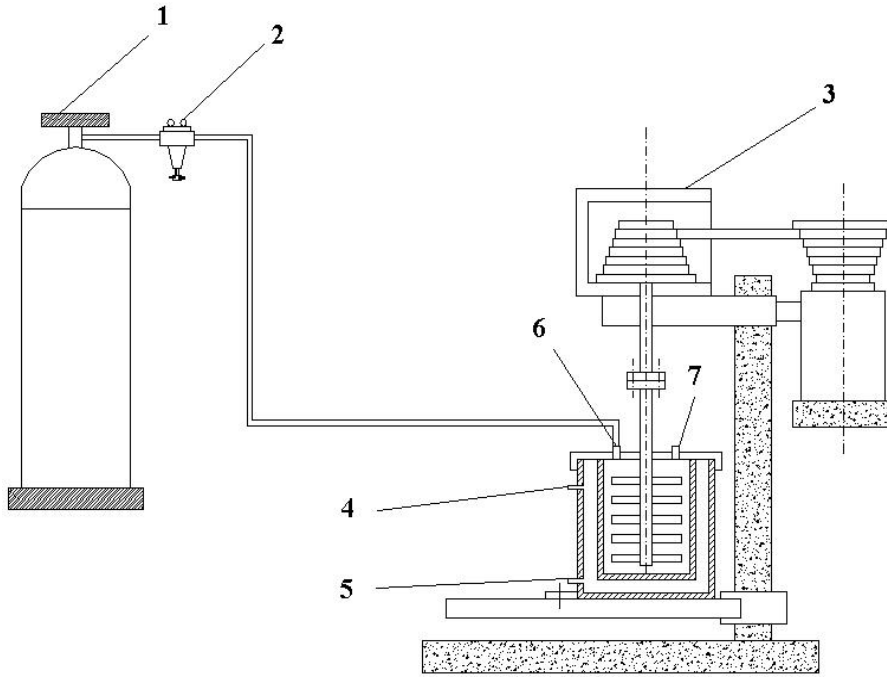
4.3.1. Deneylerde kullanılacak toz karışımlarının hazırlanması

Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarlarında toz tane boyut analizleri yapılarak deneylerde kullanılan Al ve Al_2O_3 tozlarının tane boyutları tespit edilmiştir. Daha sonra ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında Al_2O_3 seramik tanecikleri alüminyum tozları içerisine katılarak, 20 gr'lık toz karışımları hazırlanmıştır. Karışımlar 0,1 mg hassasiyetli elektronik terazi ile hazırlanmıştır.

Alaşımlama işlemi için hazırlanan karışım tozları, 750 cm^3 hacmindeki atritör silindir içerisine 10 mm çapında 400 gr çelik bilye ile birlikte şarj edilmiştir. Daha sonra toz karışımlarının içerisine, alaşımlama süresince alüminyum tozun silindir iç yüzeylerine, bilye yüzeylerine ve karıştırıcı kollara sıvanmasını önlemek ve tozların kırılmasını hızlandırmak amacı ile ağırlıkça % 2 oranında çinko stearat eklenmiştir.

Hazırlanan karışım tozları, 450 dev/dak'da dönen atritör içerisinde 1,5 ve 3,5 saat süre ile mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4.1). Alaşımlama süresince oksitlenmeyi ve istenmeyen fazların oluşmasını engellemek için atritör silindir içerisinden sürekli olarak argon gazı geçirilmiştir. Ayrıca mekanik alaşımlama süresince meydana gelecek sıcaklık artışını önlemek için atritör silindir, etrafından sürekli olarak su geçirilerek soğutma sağlanmıştır. Çizelge 4.4'de deneylerde kullanılan mekanik alaşımlama şartları görülmektedir.

Mekanik alaşımlama işlemi, G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Bilimi Anabilim Dalı laboratuvarlarında yapılmıştır.



Şekil 4.1. Mekanik alaşımlama cihazı

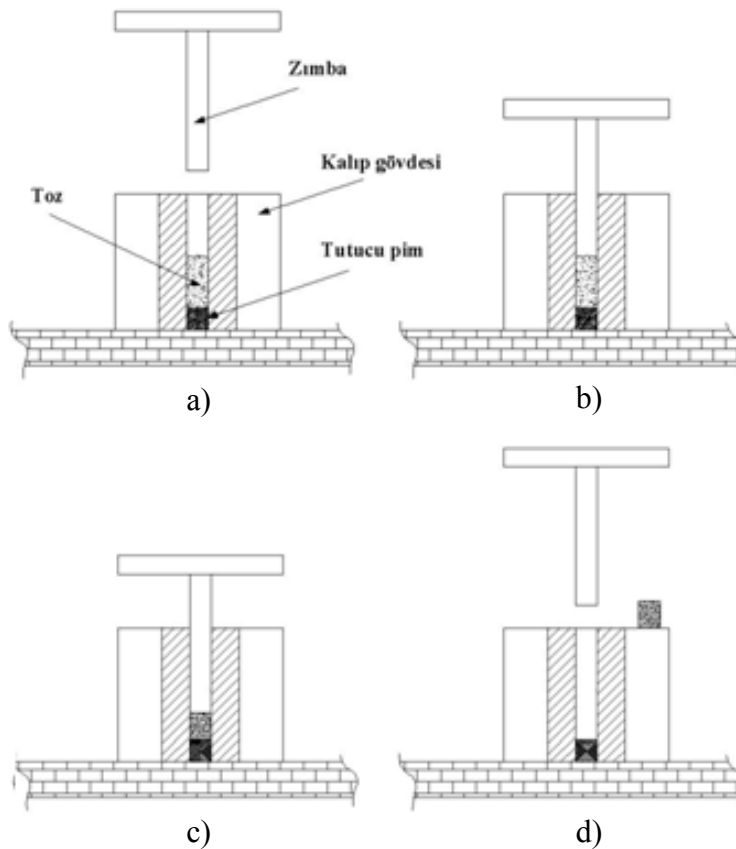
1.Argon tüpü 2. Manometre 3. Kayış-kasnak sistemi 4. Soğutma suyu girişi
5. Soğutma suyu çıkışı 6. Argon girişi 7. Argon çıkışı

Çizelge 4.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan mekanik alaşımlama şartları

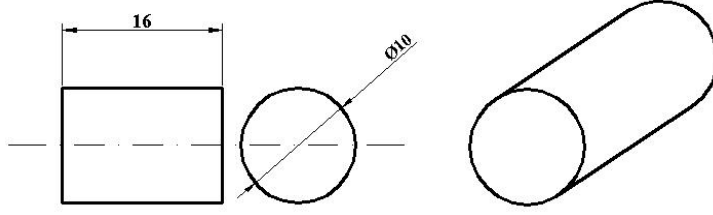
Deney No	Toz Karışımı	Tane Boyutu (μm)	Takviye Oranı (Ağırlıkça %)	MA Süresi (Saat)
1	2014 Al alaşımı	102,35	0	3,5
2			0	1,5
3	2014 Al + Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	102,35 - 15,99	5	3,5
4			10	
5			15	
6	2014 Al + Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	102,35 - 8,61	5	3,5
7			10	
8			15	
9	2014 Al + Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	102,35 - 3,01	5	3,5
10			10	
11			15	
12	2014 Al + Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	102,35 - 3,01	5	1,5
13			10	
14			15	

4.3.2. MA sonrası tozların preslenmesi ve sinterlenmesi

MA işlemine tabi tutulan tozlar daha sonra tek yönlü aksnel kalıpta blok parçalar haline getirilmek üzere presleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 4.2). Kalıp içerisine 4 gr karışım toz şarj edilerek ve 650 Mpa basınç altında sıkıştırılarak Şekil 4.3'de verilen boyutlarda numuneler elde edilmiştir. Farklı oranlarda ve boyutlarda Al_2O_3 içeren karışım tozlarının her birinden 5 adet numune preslenerek, 60 adet numune elde edilmiştir. Presleme esnasında; numunelerin yüzeylerinin bozuk olmasını ve zımbanın sıkışmasını engellemek için karışım tozu kalıp içerisine şarj edilmeden önce kalıp iç yüzeyleri ile zımba dış yüzeylerine etil alkol-çinko stearat karışımı sürülmüştür. Presleme işlemleri, G.Ü.T.E.F Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim Dalı laboratuvarlarında yapılmıştır.



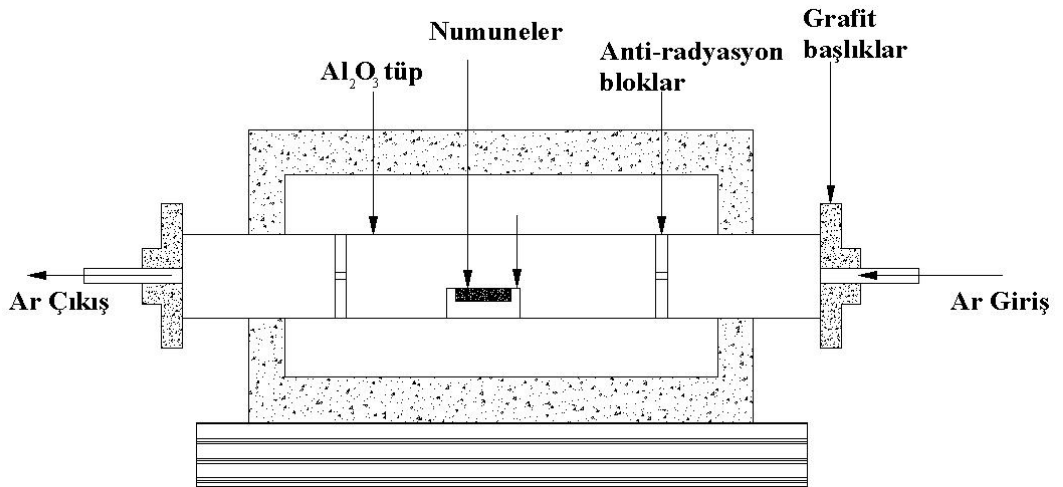
Şekil 4.2. Toz karışımlarının preslenmesi a) Tozların kalıba konması b) Kalıp içerisine zımbanın yerleştirilmesi c) Kalıp içerisinde tozların sıkıştırılması d) Blok parçaların kalıptan çıkartılması



Şekil 4.3. Aşınma testi için gerekli numune boyutları

Kalıpta sıkıştırılmış toz kütleleri ergime sıcaklığının altında ısıtılarak, difüzyon yolu ile kimyasal olarak bağlanmalarını sağlamak ve böylece gözenek miktarını düşürmek için atmosfer kontrollü tüp fırında 2 saat süre ile sinterlenmiştir. Blok numuneler grafit bir kayık içerisinde fırının merkezine yerleştirilmiştir. Daha sonra 10°C/dak ısınma hızı ile sinterleme sıcaklığı olarak belirlenen 600°C'ye kadar ısıtılmıştır. Fırın 600°C sıcaklığa eriştiğinde 2 saat süre ile bekletilerek sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterleme işlemi sona erdikten sonra fırın dakikada 5°C soğutulurak oda sıcaklığına kadar kontrollü olarak soğutulmuştur. Numunelerin sinterleme anında oksitlenmesini önlemek için ortamdan sürekli olarak argon gazı geçirilmiştir (Şekil 4.5).

Sinterleme işlemleri, G.Ü.T.E.F Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Bilimi Anabilim Dalı laboratuvarlarında yapılmıştır.



Şekil 4.4. Sinterlemede kullanılan deney düzeneği

4.4. Deney Numunelerin Karakterizasyonu

4.4.1. Metalografik incelemeler

Mekanik alaşımlanmış/öğütülmüş 2014 Al matris alaşımı ve Al₂O₃ seramik partikülleri ile takviyelendirilerek hazırlanmış tozlardan elde edilen numunelerin, seramik dağılımlarının homojenliğini ve gözeneklerin durumunun incelenmesi amacı ile metalografik incelemeler yapılmıştır. İncelemeler, G.Ü.T.E.F Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Bilimi Anabilim Dalı laboratuvarlarında Leica DM 4000 M markalı Optik Mikroskop cihazı kullanılarak yapılmıştır.

Metalografik işlemlerin yapılabilmesi için numuneler, sırası ile 220, 400, 600, 800 ve 1200 nolu zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra; 6 µm, 3 µm ve 1 µm'lik pastalar ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra numune yüzeyleri alkol ile temizlenmiştir. Bu işlemlerden sonra, numunelerin X50, X100, X200 ve X400 büyütme oranlarında metalografik incelemeleri yapılmıştır.

4.4.2. Yoğunluk ölçümleri ve porozitenin hesaplanması

Sinterleme sonrası elde edilen numunelerin yoğunluk (deneysel yoğunluk) ölçümleri, Arşimet prensibine göre çalışan, hassasiyeti 0,1 mg olan dijital terazide yapılmıştır. Ölçümler, G.Ü.T.E.F Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Anabilim Dalı laboratuvarlarında yapılmıştır. Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen, 2014 Al matris alaşımı ve Al₂O₃ seramik partikülleri ile takviyelendirilerek hazırlanmış tozlardan elde edilen numunelerin, teorik yoğunlukları seramik % ağırlık oranına bağlı olarak karışım kuralına göre hesaplanmıştır. Ayrıca malzemelerin porozite seviyeleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{porozite} = \frac{\rho_{\text{teorik}} - \rho_{\text{deneysel}}}{\rho_{\text{teorik}}} \times 100 \quad (4.1)$$

Formülde; % Porozite: Porozite miktarı, ρ_{teorik} : Teorik yoğunluk (gr/cm³), ρ_{deneysel} : Deneysel yoğunluk (gr/cm³) olarak alınmıştır.

4.4.3. Deney numunelerinin sertlik ölçümleri

MA yöntemi ile üretilmiş 2014 Al alaşımının ve farklı boyutlarda ve % oranlarında Al₂O₃ içeren MMK malzemelerin Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, G.Ü.T.E.F Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Bilimi Anabilim Dalı laboratuvarlarında Instron Wolpert DIATESTOR 7551 model sertlik cihazında yapılmıştır. Ölçümler esnasında numuneler üzerine 1 kg yük uygulanarak, her bir numune için 5 farklı ölçüm yapılmış ve ortalama değer sertlik değeri olarak alınmıştır.

4.4.4. Aşınma Deneyleleri

Kompozit numunelerin adhesiv aşınma deneyleleri, pim-disk türü cihaz ile kuru ortamda yapılmıştır (Şekil 4.6). Aşınma deneyleleri; 20, 40 ve 60 N yükler altında, 1 m/sn sabit hızda ve 3,6 km kayma mesafesinde yüzeyleri 0.15 µm hassasiyetinde taşlanmış sertliği 62 Rc olan Ç 5190 çelik diskler kullanılarak oda sıcaklığında yapılmıştır. Üretilen kompozit numunelerin aşınma miktarları, 0,1 mg ölçme hassasiyetine sahip elektronik terazide, deney öncesi ölçülen ağırlıkları ile deney sonrası ölçülen ağırlıkları arasındaki farkın hesaplanması ile tespit edilmiştir.

Aşınma deneyleyi; taşıyıcı kola istenen yükün uygulanması ve pens aracılığı ile bağlanan numunenin, dönen disk üzerinde kaydırılması yoluyla yapılmıştır. Yüzeyi taşlanmış bir disk üzerinde üç aşınma testi yapılabilmektedir. Disk yüzeyinde yapılan üç farklı aşınma testinde, farklı çevresel kayma yolu kullanıldığı için diskin her bir turunda alınan kayma mesafesi farklılık arz edecektir. Kayma hızını ve mesafesini sabit tutabilmek için, farklı çevresel kayma yollarında farklı devir sayılarının kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, disk üzerindeki kompozit numunenin temas çevresel kayma yolu çapı bilindiğinden her bir iz için ayrı ayrı devir sayıları hesaplanmıştır (Çizelge 4.5). Tezgâh devir sayısı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

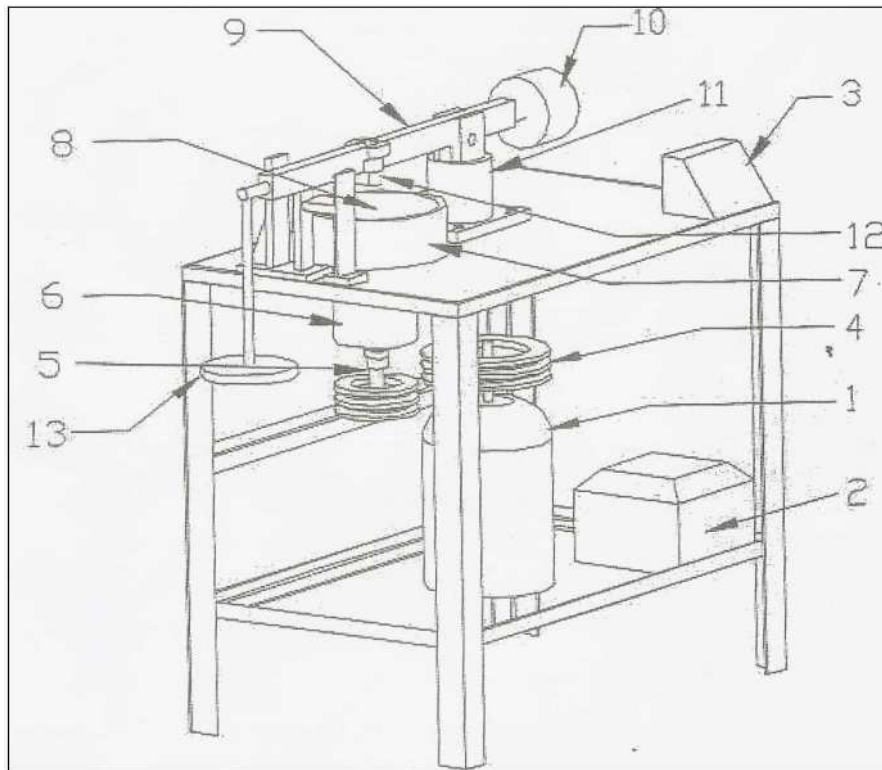
$$N = \frac{V \cdot 1000 \cdot 60}{D \cdot \pi} \quad (4.2)$$

Formülde; N: tezgah devir sayısı(dev/dak), V: Kayma hızı (m/sn), D: İz çapı (mm), olarak alınmıştır.

Çizelge 4.5. İz çaplarına göre devir sayıları

İz numarası	Çevresel Kayma Yolu Çapı (mm)	Devir sayısı (dev/dak.)
1	64	298
2	86	222
3	108	177

Deneyler esnasında devir sayılarının ölçümü elektronik takometre ile yapılmıştır. Kompozit numunelerin aşınma deneyleri, G.Ü.T.E.F Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı Üretim Anabilim Dalı laboratuvarlarında yapılmıştır.



Şekil 4.6. Aşınma deney cihazının şematik görünümü

1.Elektrik motoru, 2. Hız kontrol cihazı, 3. Hız kontrol paneli, 4. Kayış kasnak sistemi, 5. Mil, 6. Mil yatağı, 7. Koruyucu çanak, 8. Sertleştirilmiş disk, 9. Taşıyıcı kol, 10. Dengeleme ağırlığı, 11. Yatak, 12. Pens sıkma tertibatı, 13. Ağırlık

4.4.5. SEM ve EDAX incelemeleri

SEM ve EDAX incelemeleri Kırıkkale Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Laboratuvarlarında JEOL JSM-5600 model cihaz ile yapılmıştır. SEM incelemeleri 3 aşamadan oluşmaktadır.

- Deneylerde kullanılan 15,99 μm , 8,61 μm ve 3,01 μm tane boyutuna sahip Al_2O_3 seramik partiküllerinin tane boyutları ve parçacık geometrisini görebilmek için bu tozların incelenmesi,
- Mekanik alaşımlamanın; toz karışımlarının homojenliği, tane boyutu ve alaşımlanması üzerindeki etkisini belirlemek için MA sonrası elde edilen toz kompozisyonlarının incelenmesi,
- Aşınma deneyleri tamamlanan MMK'lerin yüzeylerde oluşan mekanizmaları belirlemek için aşınmış yüzeylerin incelenmesi.

Ayrıca, MMK'leri oluşturan elementlerin % oranlarının belirlenerek yüzey haritasının çıkarılabilmesi amacı ile EDAX incelemeleri de yapılmıştır.



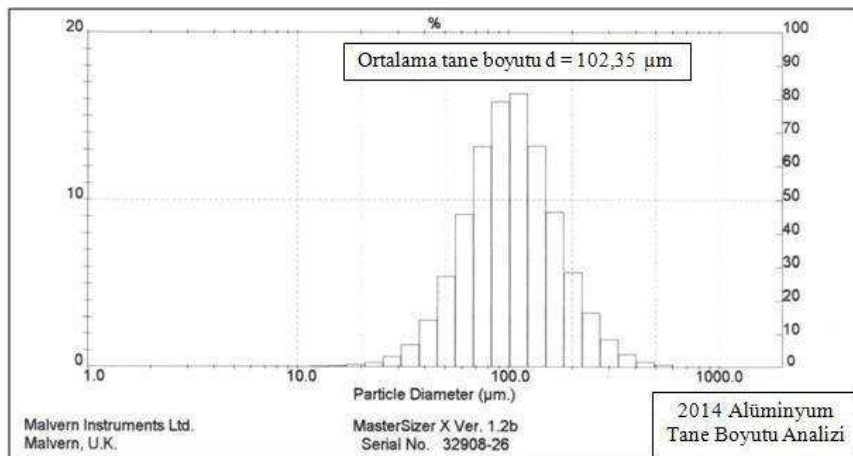
Resim 4.1. JEOL JSM-5600 model taramalı elektron mikroskobu

5. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

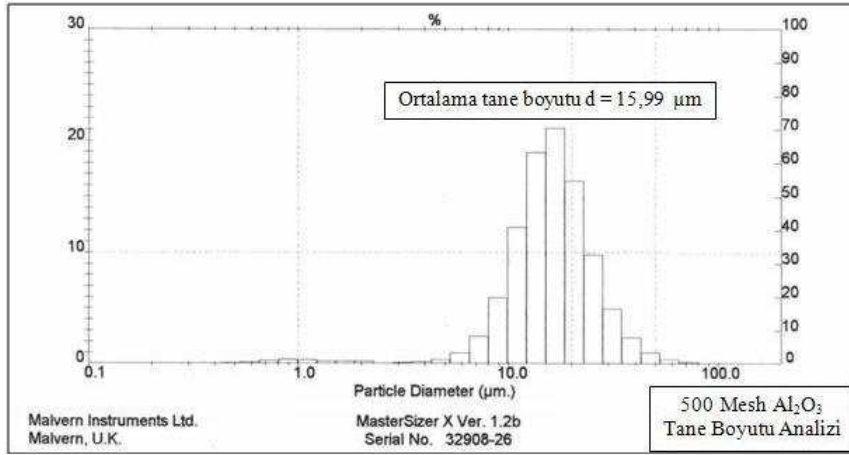
5.1. Al ve Al₂O₃ Tozlarının Parçacık Boyut Analizi

Malvern MasterSizer X Ver. 1.2b lazer parçacık boyutu ölçme cihazında, deneylerde matris malzemesi olarak kullanılan 2014 Al alaşımı ve takviye elemanı olarak kullanılan Al₂O₃ tozlarının tane boyutu analizleri yapılmıştır. Yapılan tane boyut analizinde, 2014 Al alaşımının tane boyutunun ortalama 102,35 µm; takviye elemanının tane boyutları ise sırayla 500 mesh için 15,99 µm, 800 mesh için 8,61 µm ve 1200 mesh için 3,1 µm olduğu belirlenmiştir.

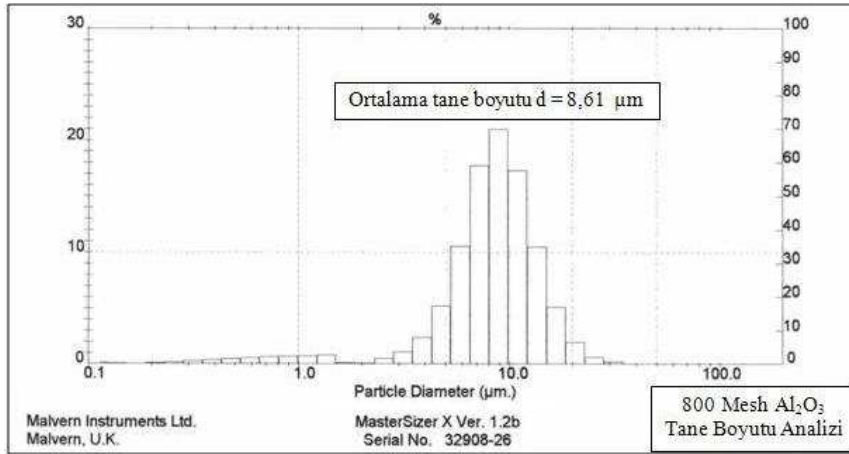
Toz boyutu analizlerinde elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de verilmiştir. Elde edilen grafiklerde yatay eksen, toz boyutunu; sağ düşey eksen, kümülatif toz yüzdesini; sol düşey eksen ise histogramda görülen toz boyutu aralıklarındaki toz yüzdesini ifade etmektedir.



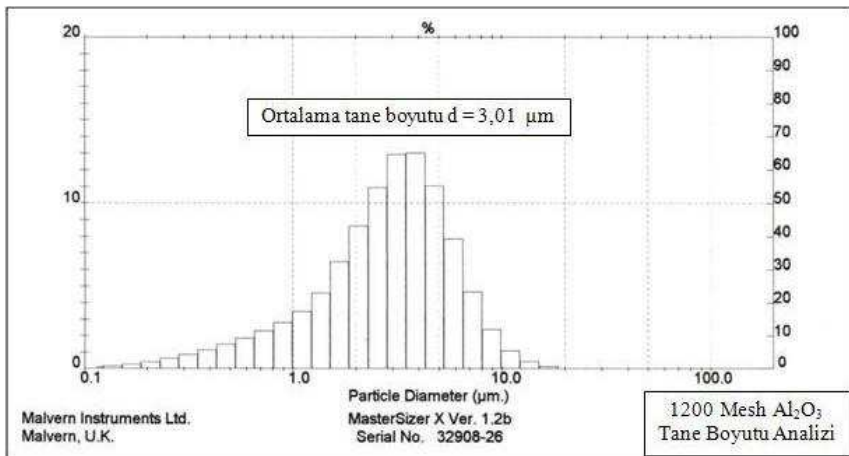
Şekil 5.1. 2014 Al alaşım tozunun tane boyutu analizi sonucu



Şekil 5.2. 500 mesh Al_2O_3 tozunun tane boyutu analizi sonucu



Şekil 5.3. 800 mesh Al_2O_3 tozunun tane boyutu analizi sonucu



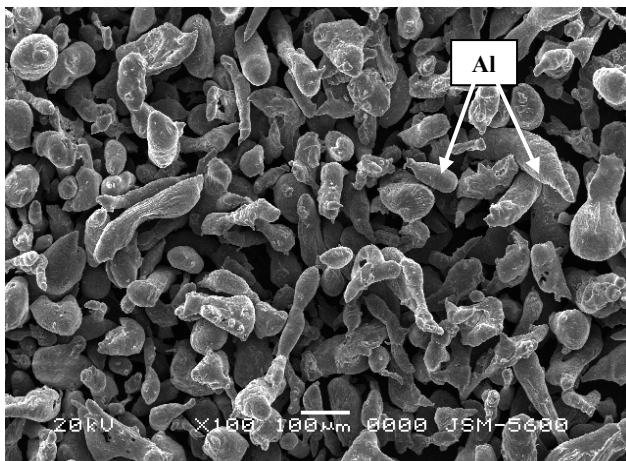
Şekil 5.4. 1200 mesh Al_2O_3 tozunun tane boyutu analizi sonucu

5.2. Al matris alaşımının ve Al₂O₃ seramik tozlarının SEM incelemeleri

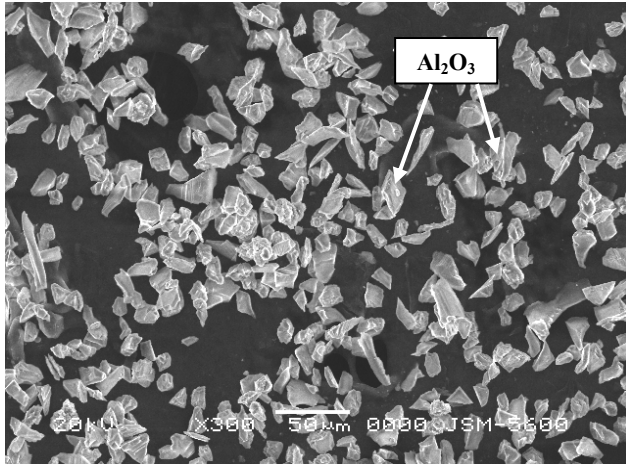
Deneylede matris malzemesi olarak kullanılan 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşımının ve takviye elemanı olarak kullanılan 15,99 µm, 8,61 µm ve 3,01 µm tane boyutuna sahip Al₂O₃ seramik partiküllerinin tane boyutlarını ve parçacık geometrisini görebilmek için bu tozların SEM incelemeleri yapılmış ve Resim 5.1, 5.2, 5.3 ve 5.4 elde edilmiştir.

Resimler incelendiğinde, Resim 5.1'de görülen 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşım tozunun tane boyutunun değişkenlik gösterdiği ancak ortalama boyutun lazer parçacık boyutu analizinde belirtilen değer civarında olduğu görülebilmektedir. Ayrıca toz tanelerinin şekillerinin farklılık gösterdiği genel olarak lifli yapıda olduğu görülmektedir.

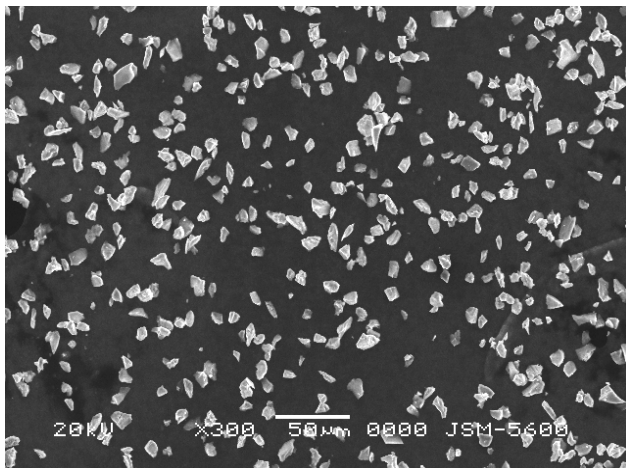
Resim 5.2, 5.3 ve 5.4 incelendiğinde genellikle Al₂O₃ seramik toz parçacıklarının üniform olup açılı dörtgen şekilli olduğu ve lifli olanlarında olduğu görülmektedir. Ayrıca Al₂O₃ seramik partiküllerinin boyutlarının da lazer parçacık boyutu analizindeki değerler civarında olduğu görülebilmektedir.



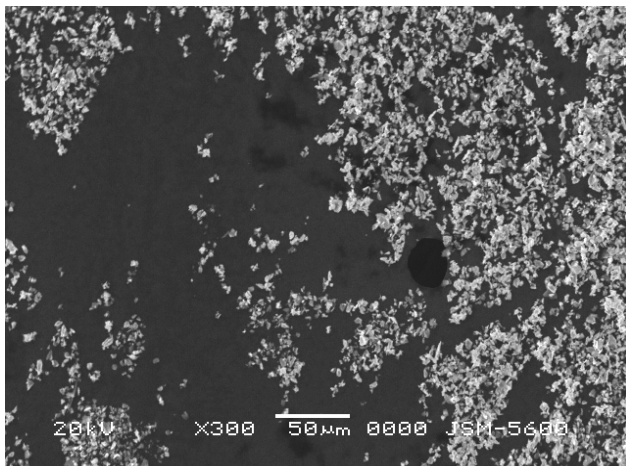
Resim 5.1. 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşım tozunun SEM fotoğrafı



Resim 5.2. 15,99 µm tane boyutlu Al₂O₃ seramik tozlarının SEM fotoğrafı



Resim 5.3. 8,61 µm tane boyutlu Al₂O₃ seramik tozlarının SEM fotoğrafı



Resim 5.4. 3,01 µm tane boyutlu Al₂O₃ seramik tozlarının SEM fotoğrafı

5.3. MA sonrası elde edilen toz kompozisyonlarının SEM incelemeleri

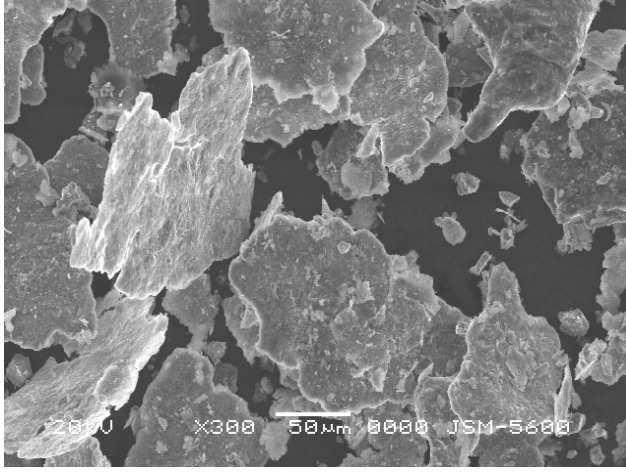
Mekanik alaşımlamanın; toz karışımlarının homojenliği, tane boyutu ve alaşımlanması üzerindeki etkisini belirlemek için MA sonrası elde edilen toz kompozisyonlarının SEM incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler, 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşım matrisi ile bu matrise ağırlıkça % 15 oranında takviye edilen farklı tane boyutundaki Al₂O₃ seramik tozlarının 1,5 ve 3,5 saat sürelerde MA yapılması sonucu elde edilen toz kompozisyonlarını kullanılarak yapılmıştır. İncelemeler sonucunda Resim 5.5-5.9 elde edilmiştir.

Resim 5.5’de 3,5 saat MA yapılmış 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşım tozu görülmektedir. Resim incelendiğinde, tozların MA sonrasında levhalaşarak ince tabakalar haline geldiği görülmektedir. Ayrıca MA etkisi ile levhalaşan ve kırılan toz tanelerinin farklı şekil ve boyutlara sahip olduğu görülmektedir.



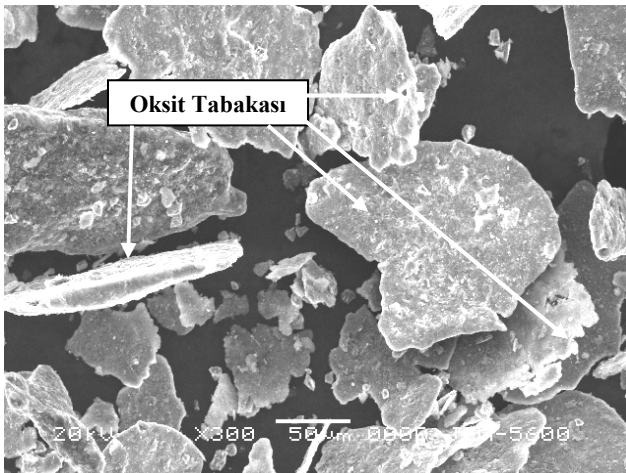
Resim 5.5. 3,5 saat MA yapılmış 102,35 µm tane boyutlu 2014 Al alaşım tozu

Resim 5.6’da 3,5 saat MA yapılmış 15,99 µm tane boyutlu Al₂O₃ seramik içerikli toz kompozisyonu görülmektedir. Resim incelendiğinde, kısmen tabakalı ve yuvarlak şekilli tozlar görülmektedir. Ayrıca tozların MA etkisiyle ince tabakalı hale geldiği görülmektedir.



Resim 5.6. 3,5saat MA yapılmış 15,99 µm boyutlu Al₂O₃ içerikli toz kompozisyonu

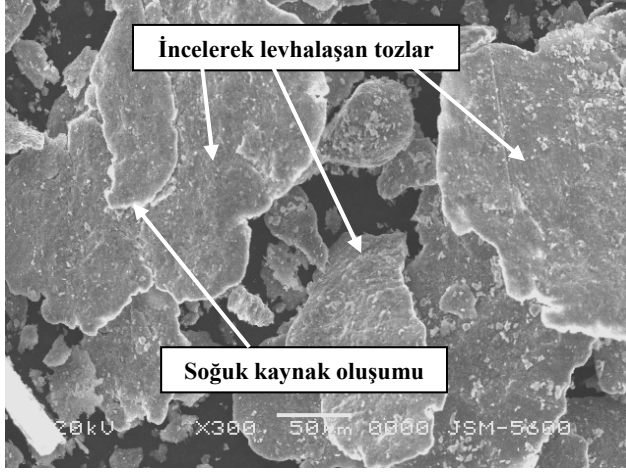
Resim 5.7’de 3,5 saat MA yapılmış 8,61 µm tane boyutlu Al₂O₃ seramik içerikli toz kompozisyonu görülmektedir. Resimde görüldüğü üzere, bu tozların bir kısmı lamelli, bir kısmı yuvarlak şekilli olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, MA sırasında ince tabakalı hale gelen toz tanelerinin boyutlarında farklılıkların olduğu ve bu toz kompozisyonlarında oksitlenmelerin meydana geldiği resimlerdeki beyaz kısımların fazlalığından anlaşılmaktadır.



Resim 5.7. 3,5 saat MA yapılmış 8,61 µm boyutlu Al₂O₃ içerikli toz kompozisyonu

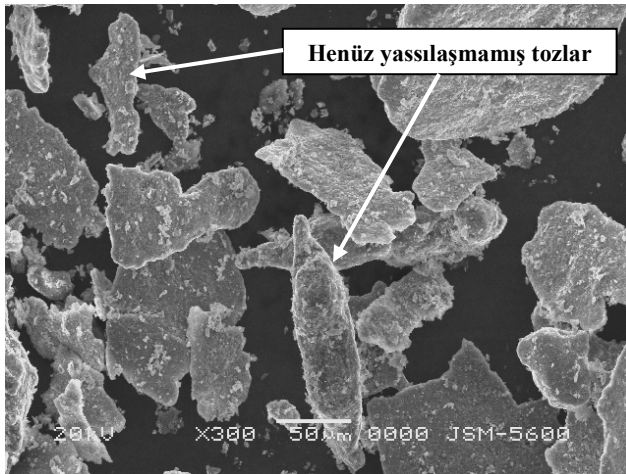
Resim 5.8’de ise 3,5 saat MA yapılmış 3,01 µm tane boyutlu Al₂O₃ seramik içerikli toz kompozisyonu görülmektedir. Resim incelendiğinde toz tane boyutlarının daha

da arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, seramik boyutlarının küçük değerlerde olmasından ötürü, yüksek enerjili alaşımlama esnasında bilyelerin çarpması ile matris alaşımlarının ince plaka hale gelmesidir.



Resim 5.8. 3,5 saat MA yapılmış 3,01 µm boyutlu Al₂O₃ içerikli toz kompozisyonu

Resim 5.9'da, Resim 5.8'de görünen toz kompozisyonu ile aynı özelliklere sahip fakat MA süresi 1,5 saat ile sınırlandırılmış toz kompozisyonu görülmektedir. Resimden anlaşılacağı üzere taneler 3,5 saat alaşımlanmış tozlar kadar yassılaşıp ince plakalar haline gelmemiş, lamelli bir görünüm oluşturmuştur.

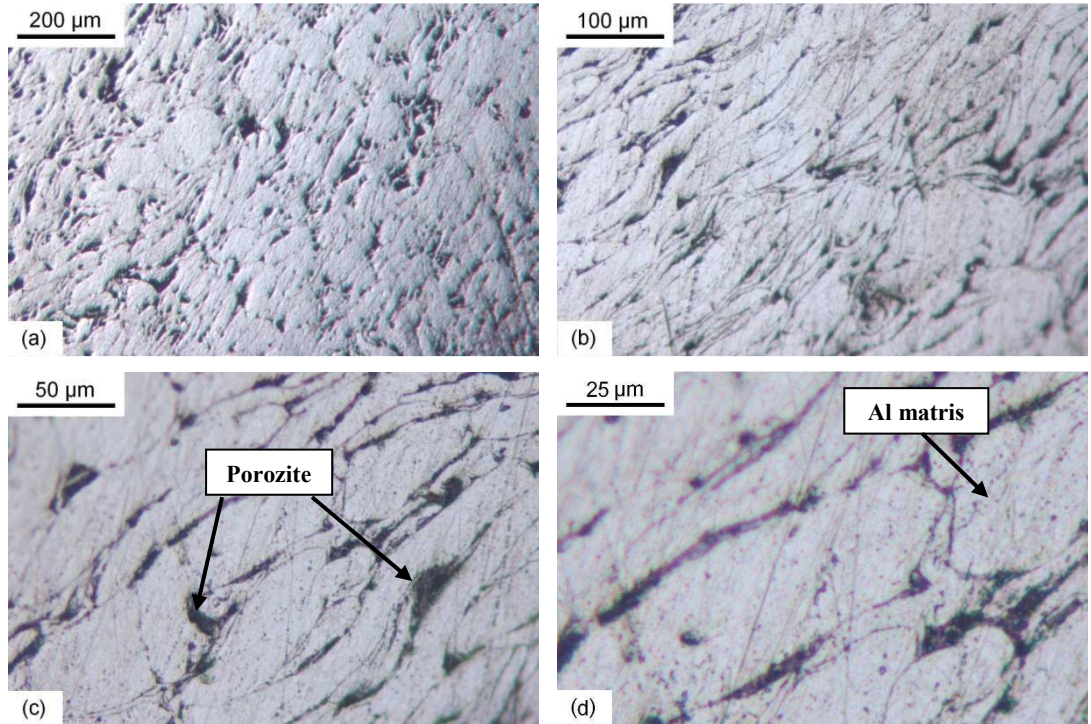


Resim 5.9. 1,5 saat MA yapılmış 3,01 µm boyutlu Al₂O₃ içerikli toz kompozisyonu

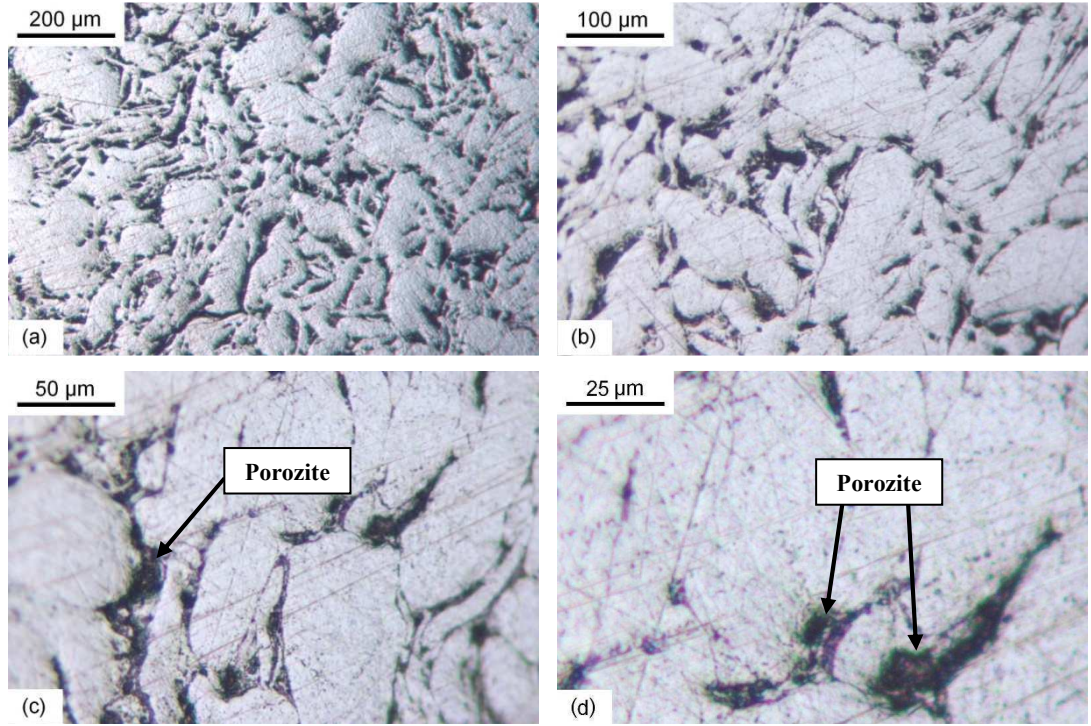
5.4. Metalografik İncelemeler

Mekanik alaşımlanmış/öğütülmüş 2014 Al matris alaşımı ve Al_2O_3 seramik partikülleri ile takviyelendirilerek hazırlanmış tozlardan elde edilen numunelerin, seramik dağılımlarının homojenliğini ve gözeneklerin durumunun incelenmesi amacı ile metalografik incelemeler yapılmıştır.

Resim 5.10 ve 5.11’de sırası ile 1,5 ve 3,5 saat MA işlemine tabi tutulmuş 2014 alüminyum tozları kullanılarak üretilmiş olan numunelerin farklı büyütme oranlarındaki optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir. Bu resimler incelendiğinde, Resim 5.10’da 1,5 saat MA yapılarak üretilen numunede; sinterleme esnasında malzemede dokusal olarak birleşmenin olduğu görülmektedir. Ancak fotoğrafta görüldüğü üzere malzemede; mekanik alaşımlama işlemi esnasında kirlenmeler oluşmuş ve poroziteye (gözeneklere) neden olmuştur. Resim 5.11’de 3,5 saat MA işlemine tabi tutularak üretilen numunede; MA süresinin uzun olmasından ötürü kirlenme sorunları artmış dolayısıyla porozite oranı da artmıştır.



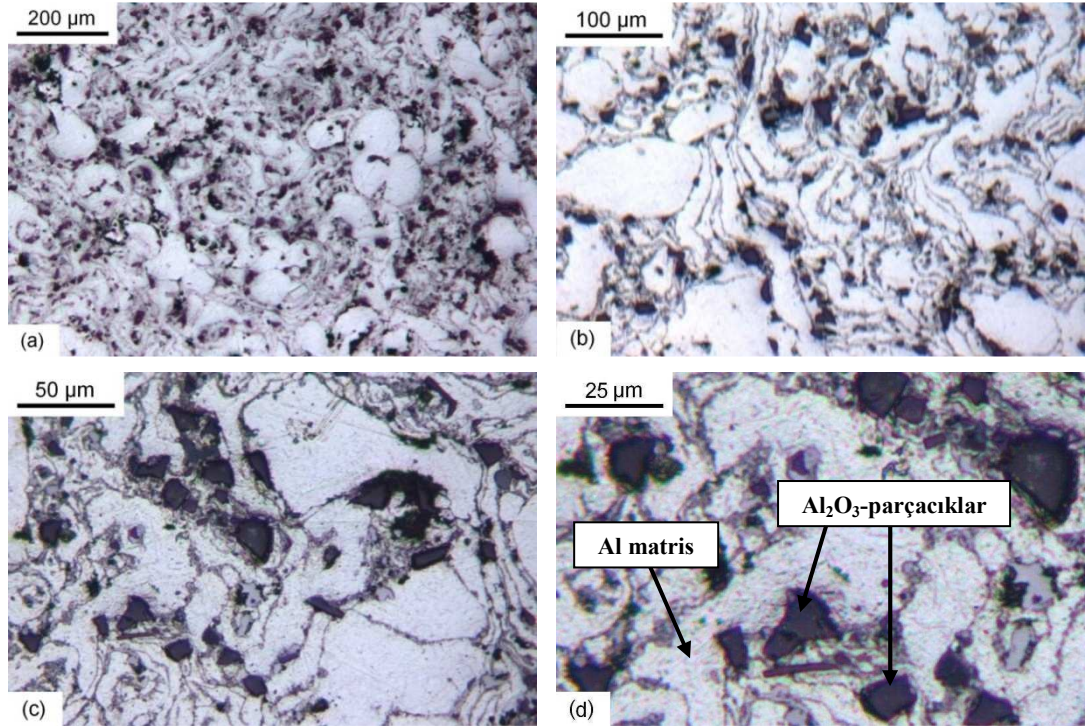
Resim 5.10. 1,5 saat MA yapılmış 2014 Alüminyum alaşımının optik mikroskop görüntüsü a) X50, b) X100 c) X200 d) X400



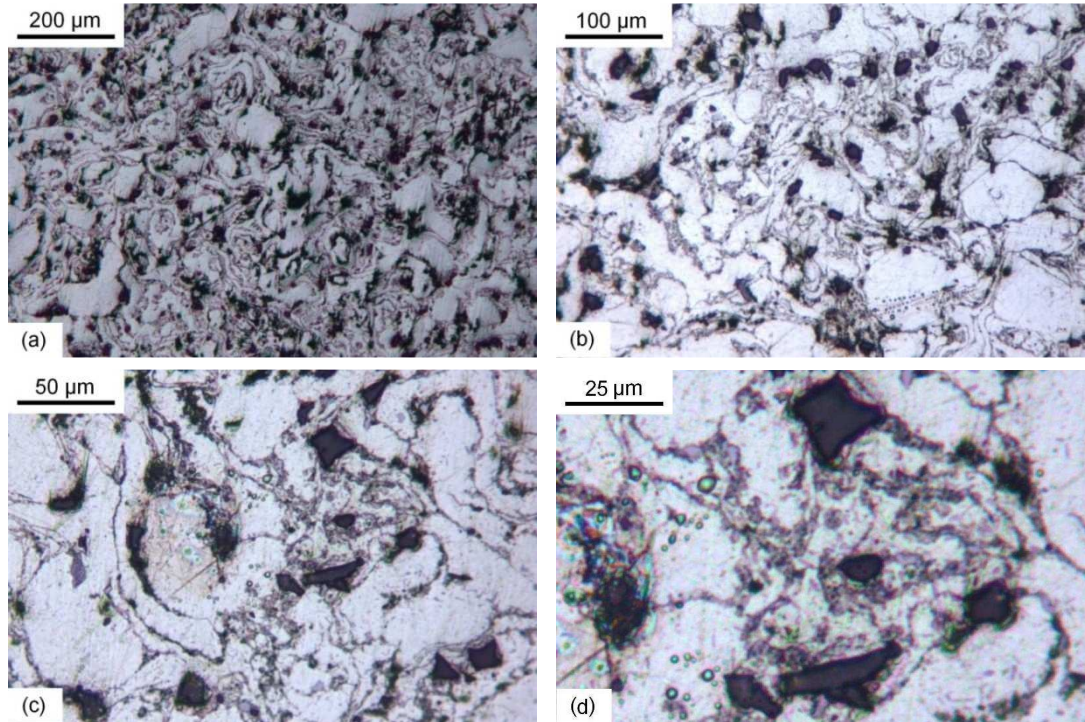
Resim 5.11. 3,5 saat MA yapılmış 2014 Alüminyum alaşımlarının optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400

Resim 5.12, 5.13 ve 5.14'de 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış, ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında 15,99 μm tane boyutunda Al_2O_3 seramik partiküllerle takviyelendirilmiş kompozitlerin farklı büyütme oranlarındaki optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir.

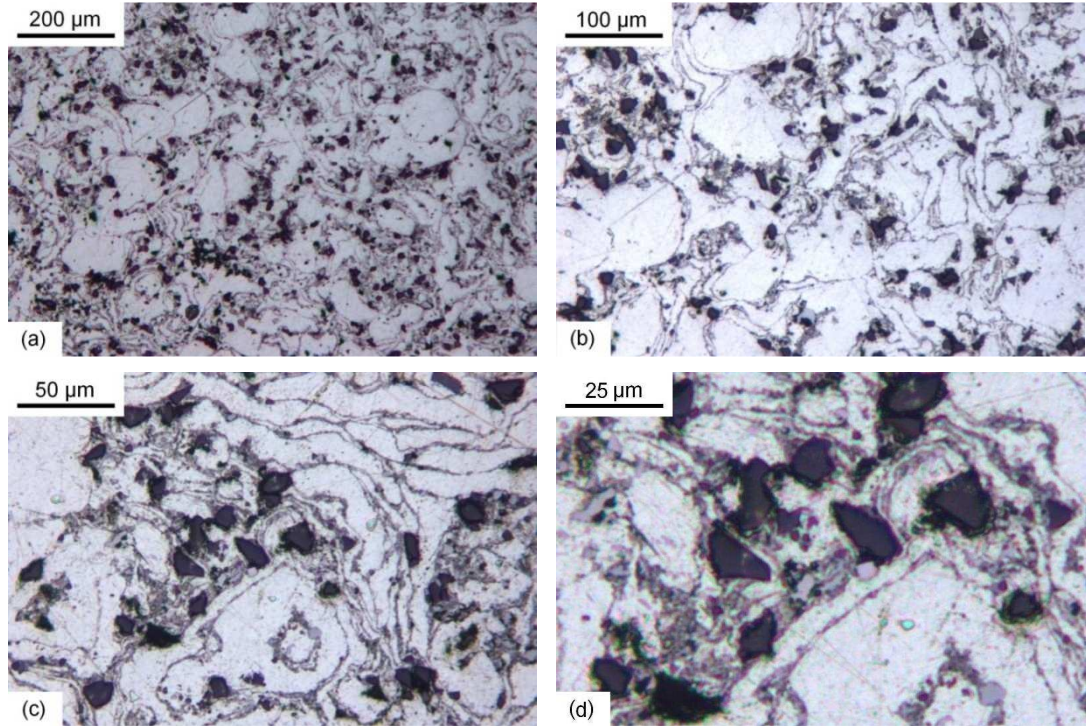
Resimlerde incelendiğinde; mekanik alaşımlama (öğütme/harmanlama) esnasında Al_2O_3 taneciklerinin tane boyutunun azaldığı ve Al tozları ile homojen bir şekilde dağılım meydana getirdiği görülmektedir. Resimler; sırası ile takviye elemanı oranı %5, %10 ve %15 olan numunelere aittir ve resimlerde takviye elemanı oranındaki bu artış gözlemlenmektedir. Kompozit numunelerde matris malzemesi ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağlarının arzu edilen düzeyde olduğu görülmektedir. Ayrıca farklı takviye oranlarına sahip numunelerde gözeneklerin azlığı ve dağılımın homojenliği göze çarpmaktadır.



Resim 5.12. 3,5 saat MA yapılmış, 15,99 µm tane boyutlu %5 Al₂O₃ takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



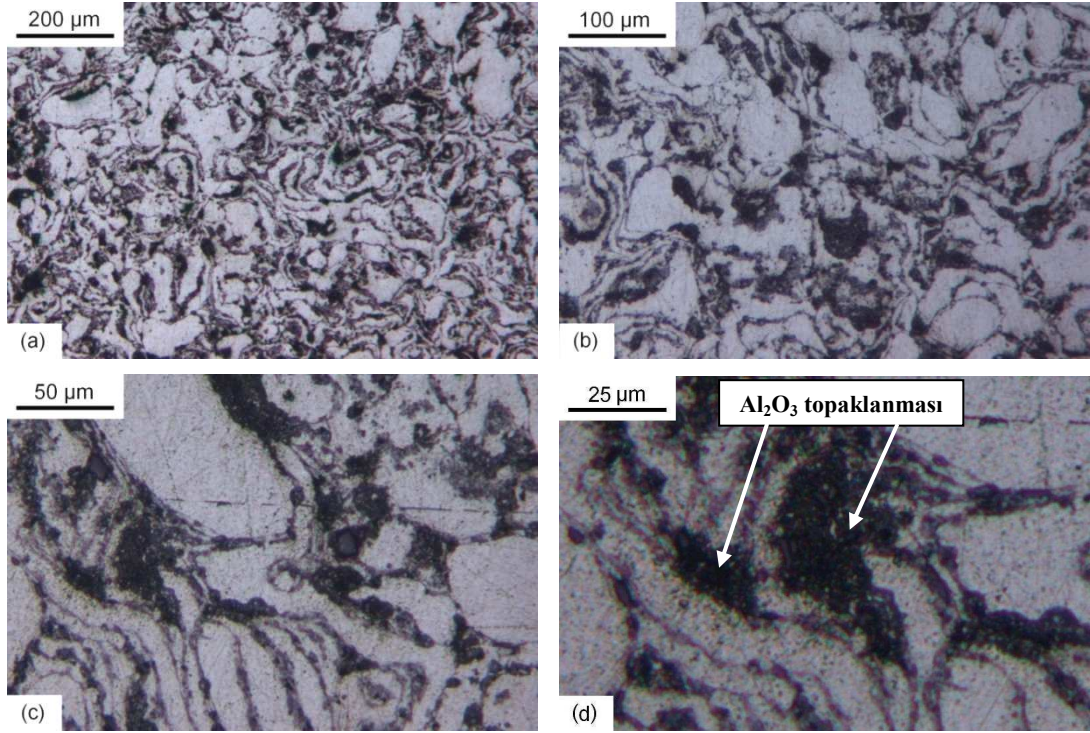
Resim 5.13. 3,5 saat MA yapılmış, 15,99 µm tane boyutlu %10 Al₂O₃ takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



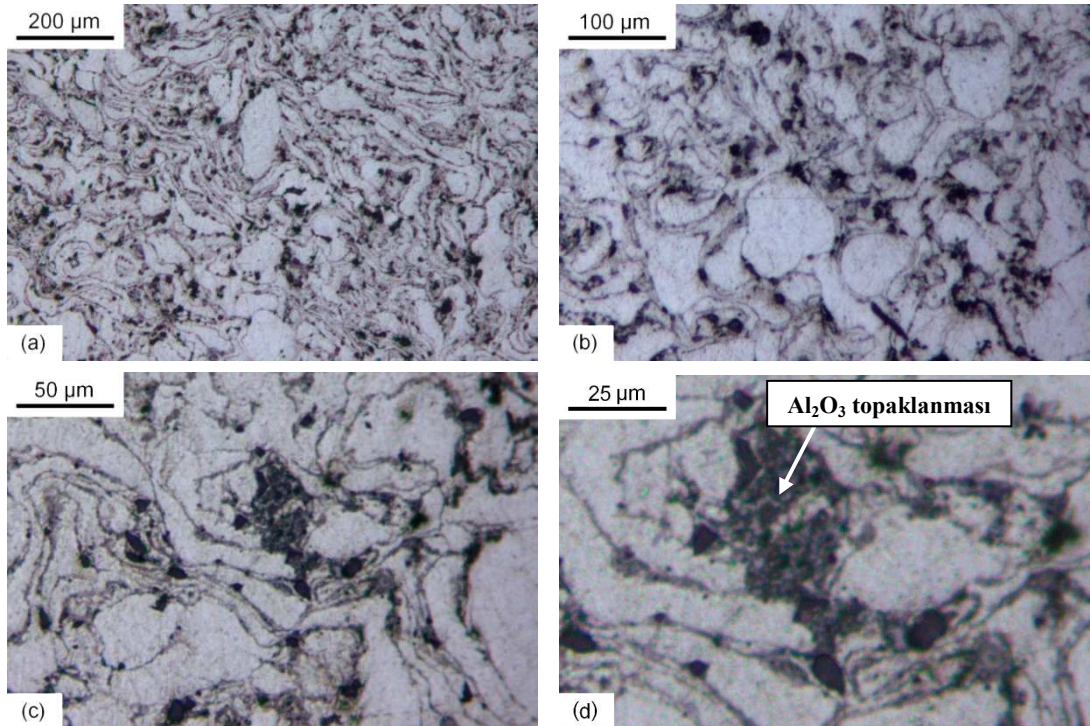
Resim 5.14. 3,5 saat MA yapılmış, 15,99 μm tane boyutlu %15 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400

Resim 5.15, 5.16 ve 5.17'de 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış, ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında 8,61 μm tane boyutunda Al_2O_3 seramik partiküllerle takviyelendirilmiş kompozitlerin farklı büyütme oranlarındaki optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir.

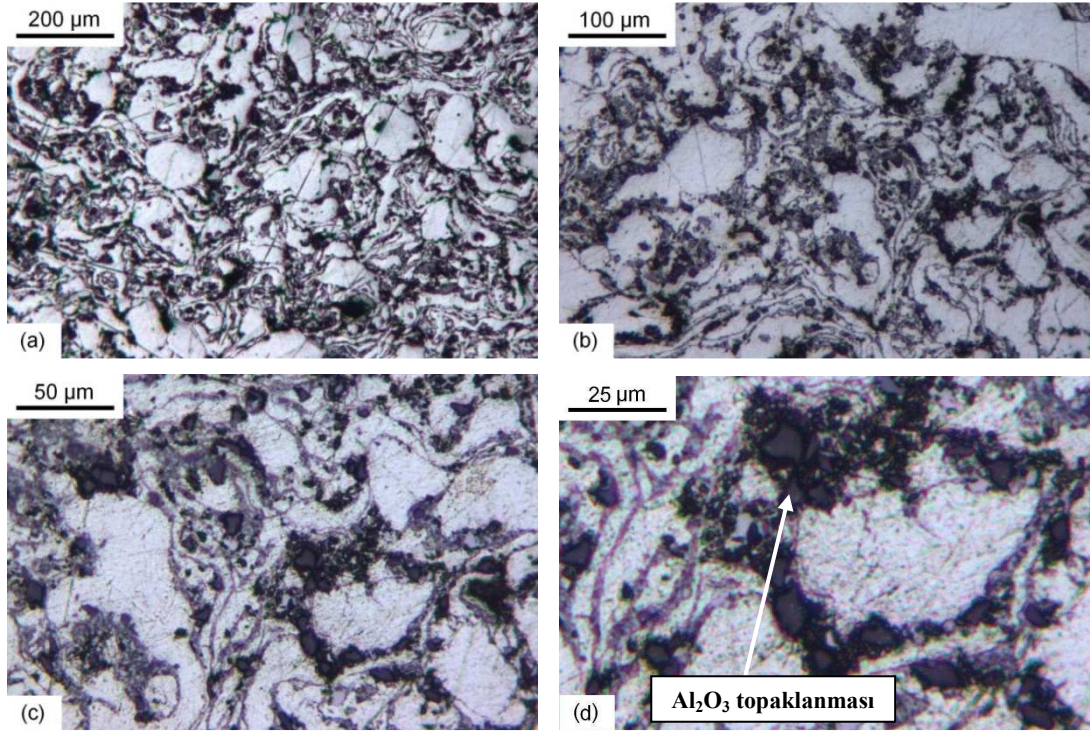
X50 büyütmeyle ait resimlerden görüldüğü gibi mekanik alaşımlamadan kaynaklanan öğütme esnasında Al_2O_3 taneciklerinin tane boyutu azalmış ve numunelerin mikro düzeyde matris-takviye elemanı çifti arasında homojen dağılım görüntüsü oluşmuştur. Resimler; sırası ile takviye elemanı oranı %5, %10 ve %15 olan numunelere aittir ve resimlerde takviye elemanı oranındaki bu artış gözlenebilmektedir. Ancak X100, X200 ve X400 büyütmeyle ait mikro yapı resimlerinden de anlaşılacağı gibi takviye elemanı partikülleri arasında topaklanmalar (yığılmalar) oluşmuştur, bu durum artan takviye elemanı % oranı ile artış göstermiştir. Bu istenmeyen bir durumdur; aşınma davranışları ve sertlik ölçümleri esnasında olumsuzluklar doğurmaktadır.



Resim 5.15. 3,5 saat MA yapılmış, 8,61 µm tane boyutlu %5 Al₂O₃ takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



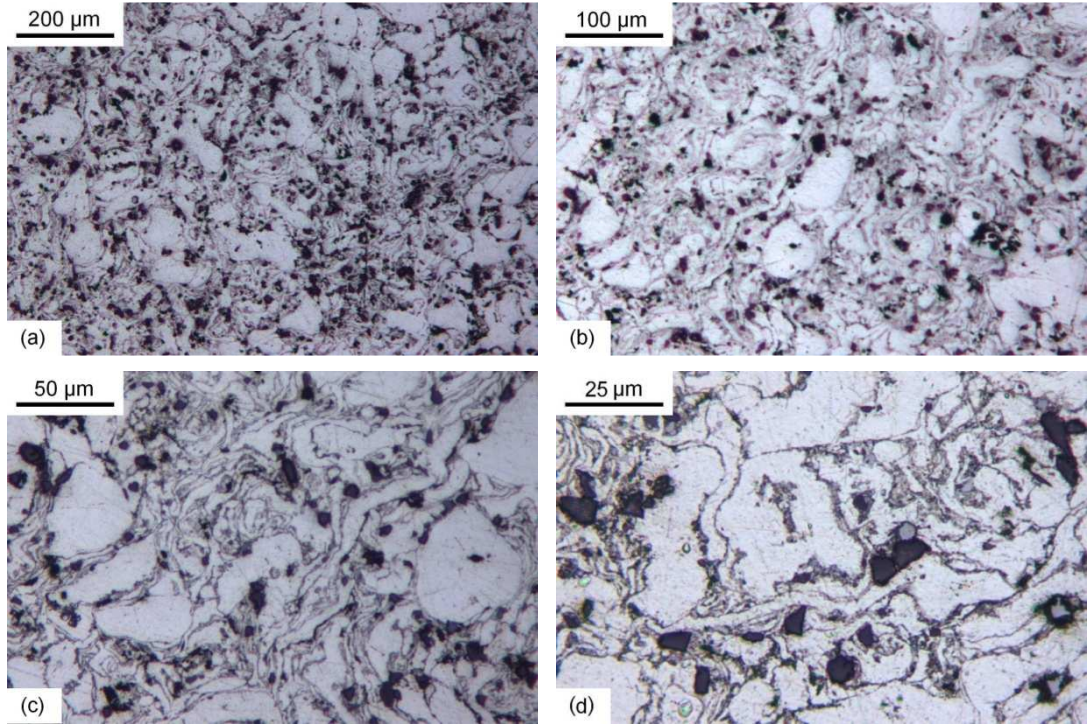
Resim 5.16. 3,5 saat MA yapılmış, 8,61 µm tane boyutlu %10 Al₂O₃ takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



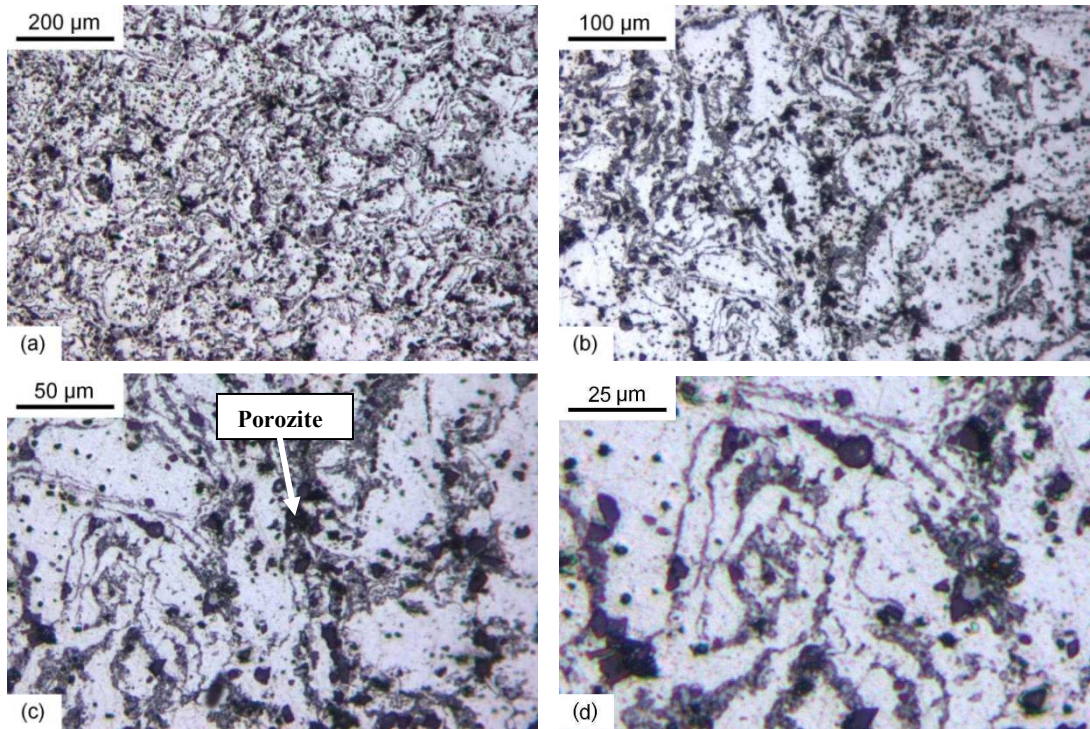
Resim 5.17. 3,5 saat MA yapılmış, 8,61 μm tane boyutlu %15 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400

Resim 5.18, 5.19 ve 5.20'de 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış, ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında 3,01 μm tane boyutunda Al_2O_3 seramik partiküllerle takviyelendirilmiş kompozitlerin farklı büyütme oranlarındaki optik mikroskop fotoğrafları görülmektedir.

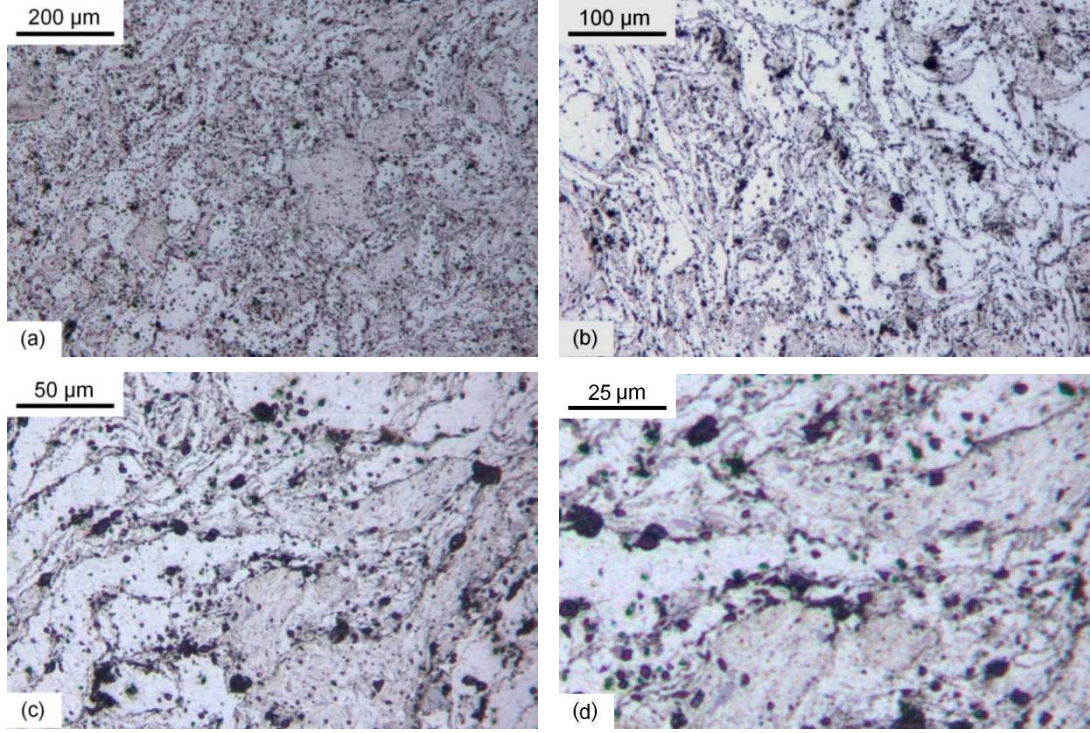
Resimler incelendiğinde, dağılımın homojen olduğu tespit edilebilmektedir. Resimler; sırası ile takviye elemanı oranı %5, %10 ve %15 olan numunelere aittir ve resimlerde takviye elemanı oranındaki bu artış gözlenebilmektedir. Kompozit malzemede seramik boyutlarının küçüklüğünden ötürü takviye-matris partikülleri arasındaki yüzey bağları daha iri taneli yapılara göre daha zayıf oluşmuştur. Bunun nedeni ise mekanik alaşımlama esnasında seramik tozlarının tane boyutlarının ufalanmasıyla hafiflemesi ve merkezkaç etkisiyle kazan cidarlarına yapışmasıdır. Buda takviye elemanının matris malzemesine saplanarak mukavemetli yapılar oluşturmasını ve matris malzemesinin Al_2O_3 partiküllerini çevrelemesini engellemiştir. Sertlik değerleri bu sonucu doğrulamaktadır.



Resim 5.18. 3,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %5 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



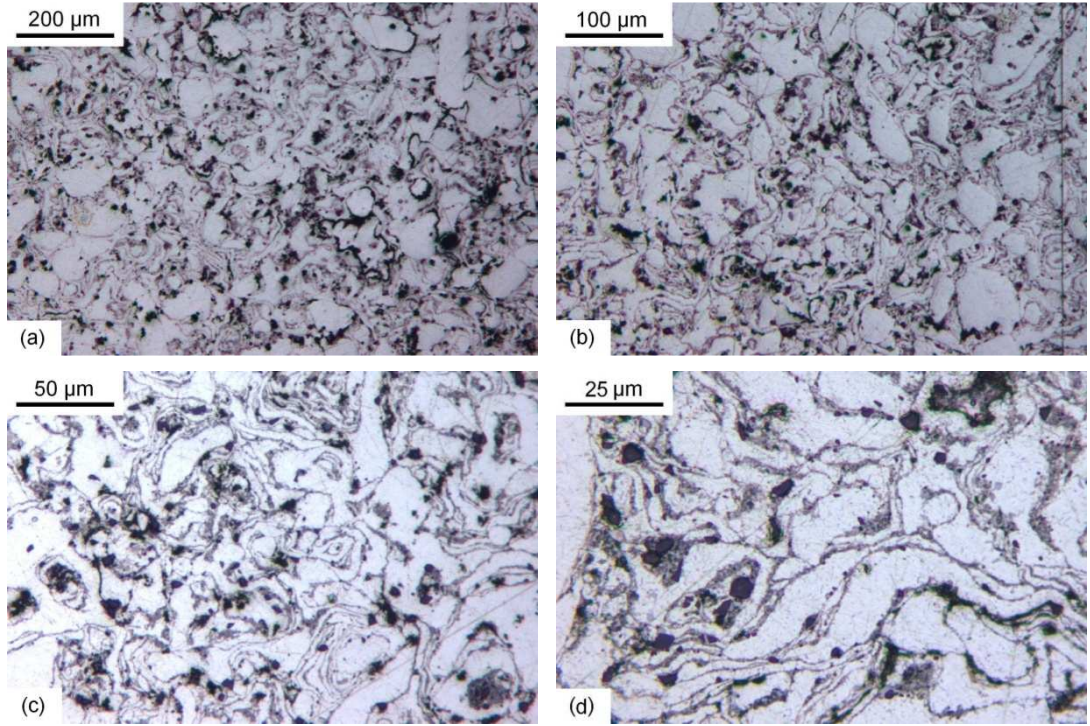
Resim 5.19. 3,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %10 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



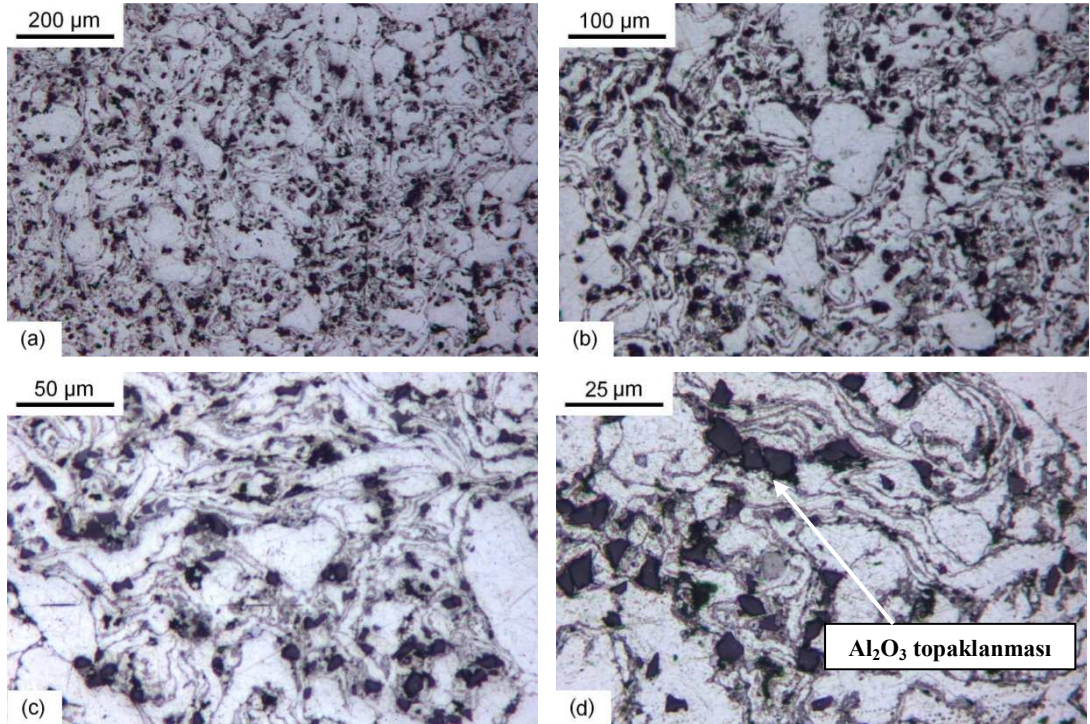
Resim 5.20. 3,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %15 Al_2O_3 takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400

Resim 5.21, 5.22 ve 5.23'de 1,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış, 3,01 μm tane boyutunda Al_2O_3 seramik partiküllerle, ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranında takviyelendirilmiş kompozitlerin farklı büyütme oranlarındaki mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.

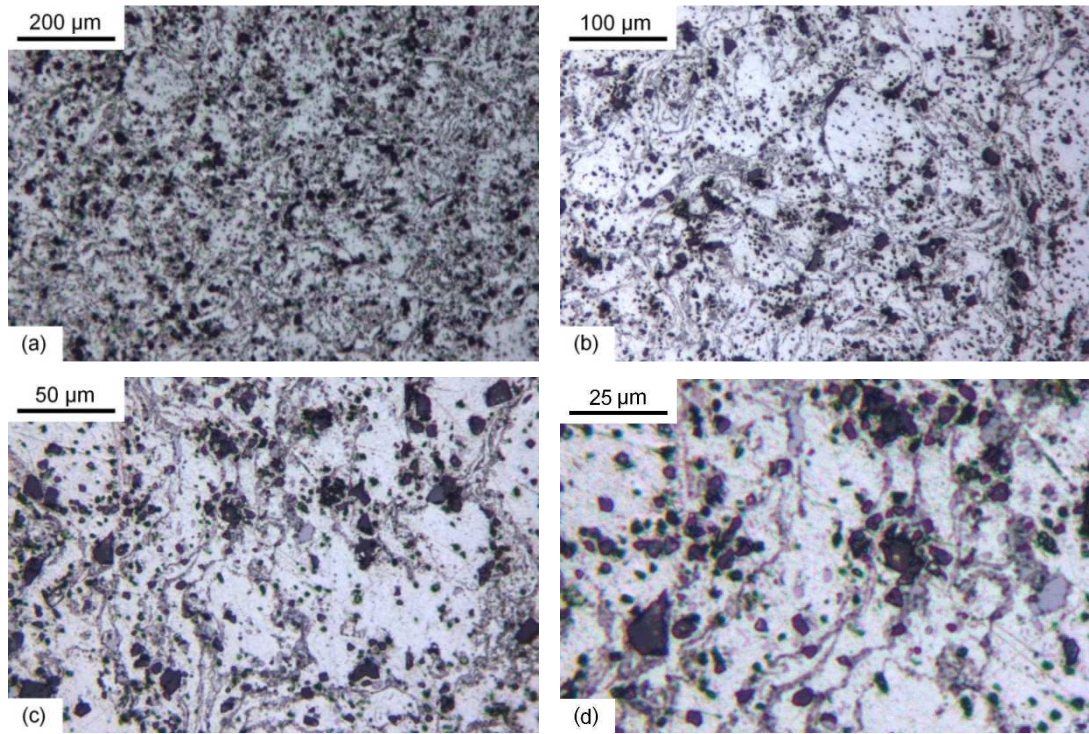
Resimler incelendiğinde görülmektedir ki, alaşımlama süresinin 1,5 saate düşmüş olmasından ötürü tane boyutları, 3,5 saat alaşımlama işlemine tabi tutulmuş numunelerinkinden daha büyüktür. Mekanik alaşımlama süresinin kısalığından ötürü, matris malzemesi ve seramikler yeteri kadar alaşımlama/öğütme/harmanlama yapılamamıştır. Bunun sonucu olarak, matris-takviye elemanı çifti arasında güçlü ara yüzey bağları oluşmamıştır. Alaşımlama süresinin azlığının olumlu tarafı ise malzeme bünyesinde oluşan kirlenmenin azlığıdır. Kirlenmenin az olmasında porozite oranının azalmasını sağlamaktadır. Toz gereğinden fazla öğütülürse kirlenmenin artacağı ve bazı istenmeyen fazların oluşacağı bilinmelidir [30].



Resim 5.21. 1,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %5 Al_2O_3 takiyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



Resim 5.22. 1,5 saat MA yapılmış, 3,01 μm tane boyutlu %10 Al_2O_3 takiyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400



Resim 5.23. 1,5 saat MA yapılmış, 3,01 µm tane boyutlu %15 Al₂O₃ takviyeli AMK'in optik mikroskop görüntüsü a) X50 b) X100 c) X200 d) X400

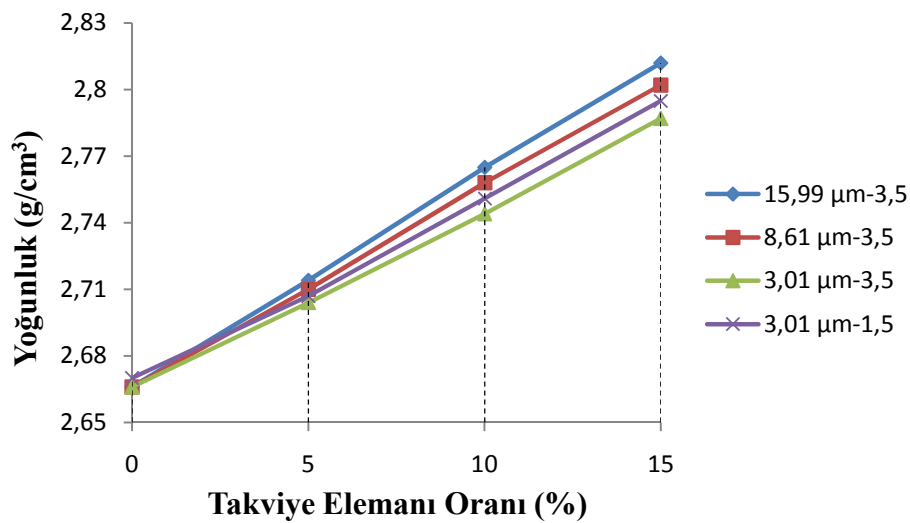
5.5. Yoğunluk Ölçümleri ve Porozitenin Hesaplanması

MA yöntemiyle 2014 alüminyum matris alaşımından ve Al₂O₃ seramik partikülleri ile takviyelendirilerek hazırlanmış tozlardan elde edilen numunelerin içerdikleri Al₂O₃ parçacık % ağırlık oranına bağlı olarak karışım kuralına göre hesaplanan teorik yoğunlukları ve Arşimet prensibine göre yoğunluk ölçümü yapan terazi ile ölçülen deneysel yoğunlukları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Ayrıca malzemelerin teorik ve deneysel yoğunluk farkından hesaplanan, içerdikleri porozite oranları da aynı çizelgede verilmiştir. Elde edilen veriler neticesinde % takviye oranının ve tane boyutunun yoğunluk üzerine etkisi Şekil 5.5'de, poroziteye etkisi de Şekil 5.6'da verilmiştir.

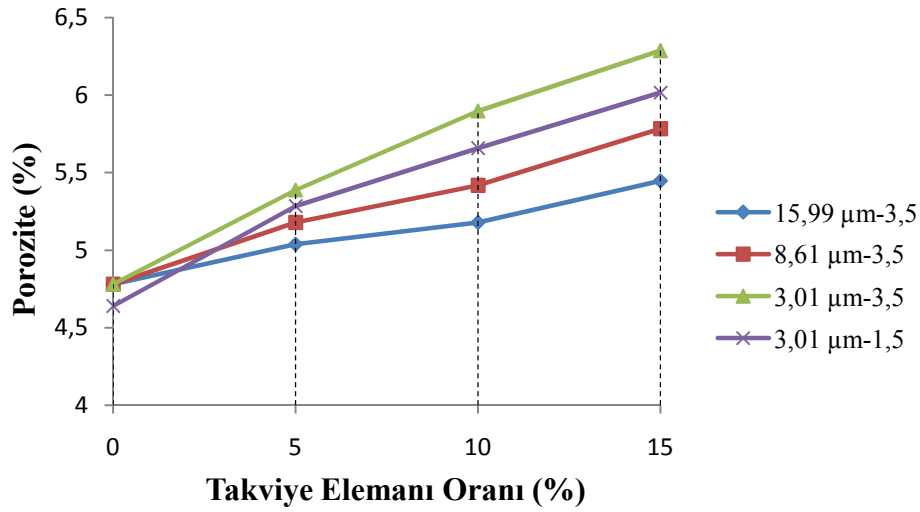
Şekil 5.5'de görüldüğü üzere, % takviye oranının ve tane boyutunun artması ile ölçülen deneysel yoğunluklarda da doğrusal bir artış olmuştur. Bu artışta, toz kütlesi halinde bulunan numunelerin sinterleme esnasında tanelerinin birleşme eğilimine

geçerek gözenekleri kapanması etkindir. Çizelge 5.1 incelendiğinde deneysel yoğunluk değerleri, teorik yoğunluk değerlerinden düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi deneysel şartlarda, hiçbir zaman %100 yoğunluk elde edilememesidir [41]. Takviye oranının artmasıyla yoğunluğun artmasının nedeni; takviye elemanının yoğunluğunun matris malzemesinin yoğunluğundan fazla olmasıdır. Tane boyutunun artması ile yoğunluk değerinin artmasının nedeni ise; tane boyutunun küçülmesi ile seramik tanelerinin arasındaki mesafenin azalması sonucu bu boşlukların matris malzemesi tarafından doldurulamaması ve buna bağlı olarak bu bölümlerde boşlukların oluşmasıdır.

Şekil 5.6'da görüldüğü üzere, takviye oranının artması ile porozite artmıştır. Çünkü takviye oranının artması ile teorik yoğunluk önemli derecede artmaktadır. Ancak deneysel olarak takviye elemanı oranının artmasıyla gözeneklerin oluşma olasılığının artmasından ötürü bu yoğunluk artışı teorik yoğunluk artışı kadar yüksek değerlerde olmamaktadır. Bu durumda iki yoğunluk farkından hesaplanan porozitenin artmasına neden olmaktadır. Aynı şekil incelendiğinde tane boyutunun azalmasıyla porozite artmıştır. Bunun sebebi ise; tane boyutu küçüldükçe teorik yoğunluğun sabit olması, ancak deneysel olarak yoğunluğun azalmasıdır. Bu sonuç bundan önce yapılan çalışmalarda da gözlenmiştir [75].



Şekil 5.5. Al₂O₃ takviye oranının ve tane boyutunun yoğunluğa etkisi



Şekil 5.6. Al₂O₃ takviye oranının ve tane boyutunun poroziteye etkisi

Çizelge 5.1. Kompozit numunelerinin yoğunlukları ve porozite miktarları

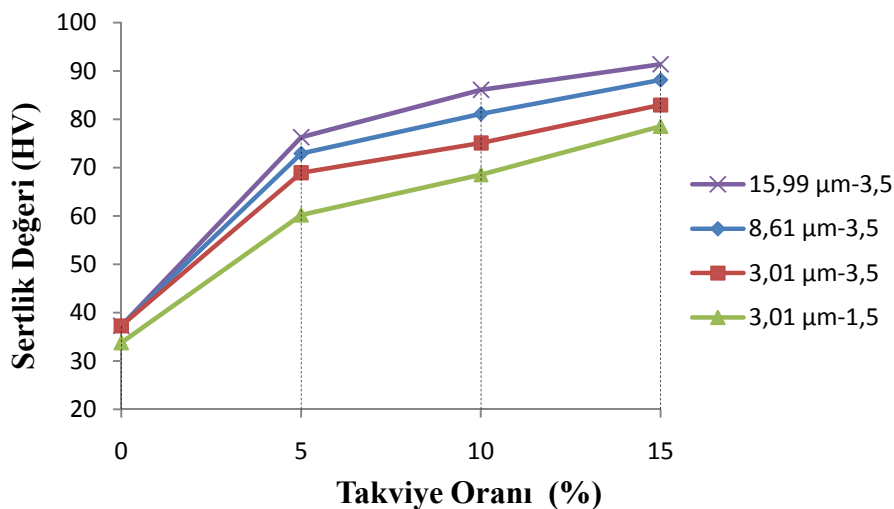
Malzeme Cinsi – MA Süresi (Saat)	Takviye Oranı (%)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	DeneySEL Yoğunluk (g/cm ³)	Porozite Seviyesi (%)
2014 Al alaşımı - 3,5	0	2,800	2,666	4,785
2014 Al alaşımı - 1,5	0	2,800	2,670	4,642
15,99 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK –3,5	5	2,858	2,714	5,038
	10	2,916	2,765	5,178
	15	2,974	2,812	5,447
8,61 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK –3,5	5	2,858	2,710	5,178
	10	2,916	2,758	5,418
	15	2,974	2,802	5,783
3,01 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK –3,5	5	2,858	2,704	5,388
	10	2,916	2,744	5,898
	15	2,974	2,787	6,287
3,01 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK –1,5	5	2,858	2,707	5,283
	10	2,916	2,751	5,658
	15	2,974	2,795	6,018

Şekiller incelendiğinde; 2014 alüminyum matris alaşımından elde edilen numuneler de ve 3,01 µm boyutlu Al₂O₃ içeren numunelerde MA süresinin artmasıyla birlikte yoğunluğun düştüğü ve porozite değerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni MA alaşımlama zamanının artması sonucu tane boyutlarının küçülmesi ve buna bağlı olarak gözeneklerin artmasıdır.

5.6. Kompozit Numunelerin Sertlik Değerlerinin Belirlenmesi

2014 Al matris alaşımının ve farklı tanecik boyutuna sahip Al_2O_3 takviyeli MMK'ların sertlik değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. MMK'ların tane boyutu ve takviye oranına göre sertlik değerlerindeki değişim Şekil 5.7'de görülmektedir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi saf Al alaşımının sertliği diğer MMK'lerin sertliğinden düşüktür. MA süresinin artması ile de sertlik değerlerinde artış göstermiştir. MA işlemi esnasında kazan içerisinde serbest hareket eden bilyelerin toz tanelerini sıkıştırması ve seramik partiküllerinin matris malzemesi içine bu yüksek enerjili çarpma sonucu gömmesi ile matris takviye elemanı arasında güçlü yüzey bağları oluşmaktadır. Buda yüksek sertlikte malzemelerin üretilmesine imkan sağlamaktadır.

Şekil 5.7'de seramik % oranının artması ile de numunelerin sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, numuneler içerisine katılan takviye elemanın sertlik değerinin matris alaşımından daha yüksek değerde olmasıdır. Matrisin sertliği 145 HV iken Al_2O_3 'ün 2000 HV'dir. Buna bağlı olarak takviye oranının artmasıyla numunelerin sertlik değerleride artmaktadır. Ayrıca, tane boyutlarının artması ile de sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunu sebebi ise büyük tane boyutlu kompozitlerde matris- takviye elemanı çifti arasında güçlü ara yüzey bağlarının kurulmasıdır. Daha önce yapılan, çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir [53].



Şekil 5.7. Kompozitlerin takviye oranı ve tane boyutuna göre sertlik değişimi

Çizelge 5.2. Matris alaşımı ve kompozit numunelerin sertlik değerleri

Malzeme Cinsi	Mekanik Alaşım Süresi (Saat)	Ağırlıkça Al ₂ O ₃ Takviye Oranı (%)	Sertlik Değeri (HV)
2014 Al alaşımı	3,5	0	37,32
2014 Al alaşımı	1,5	0	33,76
15,99 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	3,5	5	76,29
		10	86,11
		15	91,41
8,61 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	3,5	5	72,89
		10	81,14
		15	88,16
3,01 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	3,5	5	68,92
		10	75,08
		15	83,02
3,01 µm Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	1,5	5	60,19
		10	68,54
		15	78,53

5.7. MMK'lerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

1,5 ve 3,5 saat mekanik alaşımlama işlemi ile üretilen MMK'in aşınma davranışları incelenmiştir. Uygulanan yük, takviye elemanı tane boyutu ve mekanik alaşımlama sürelerinin kompozitlerin aşınma davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar EK 1'de görülmektedir.

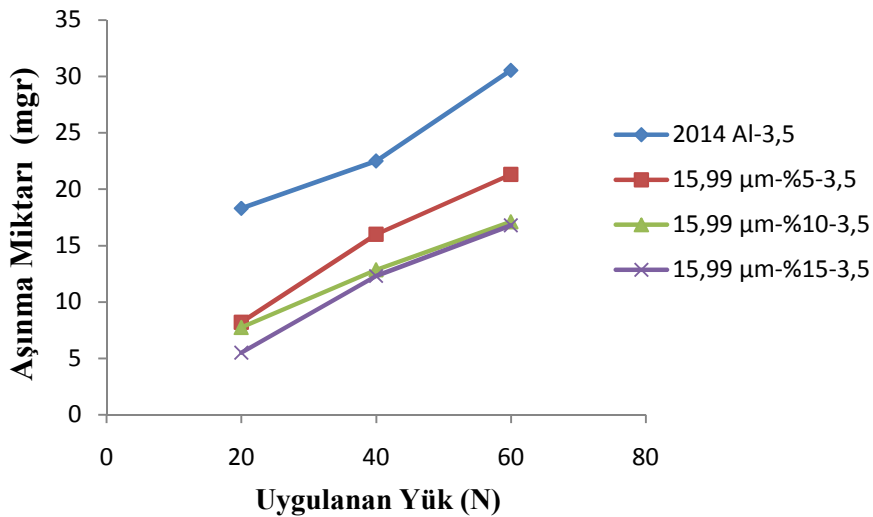
5.7.1. Değişik yüklerin ve takviye elemanı oranının MMK'lerin aşınma davranışlarına etkisi

Mekanik alaşımlama metodu ile üretilen kompozit numunelerin aşınma davranışlarını incelenirken, yükün adhesiv aşınma miktarı üzerinde etkisi araştırılmış ve Şekil 5.8, 5.9, 5.10 ve 5.11'deki grafikler elde edilmiştir. Şekiller incelendiğinde, matris malzemesi olan 2014 Al alaşımının, MMK'lere göre çok daha fazla oranda aşındığı görülmektedir. Bunun muhtemel sebebi, MMK içindeki matris alaşımından çok daha sert olan Al₂O₃ seramik parçacıklarının yerleştirilmesidir. Matris malzemesi olan 2014 Al alaşımının sertliği yaklaşık olarak 37 HV değerinde iken takviye

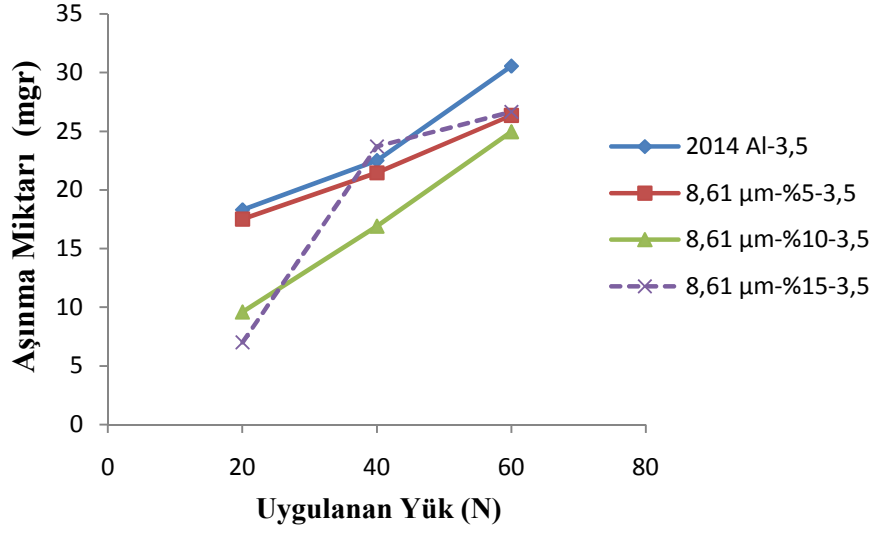
elemanı olarak kullanılan Al_2O_3 seramik parçacıklarının sertliği 2000 HV değerindedir. Buda MMK'ların sertliğinin ve aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır. Bu grafiklerde görüldüğü üzere aşınma testleri 20, 40 ve 60 N'luk yükler altında yapılmıştır.

Şekiller incelendiğinde yükün artmasıyla birlikte aşınma miktarının da arttığı gözlenmiştir. Bunun sebebi ise, yükün artması ile disk ile numunenin temas yüzeylerinde zorlanma artar. Zorlanmanın artması temas yüzeyinin sıcaklığını artırır. Sıcaklığın artmasında temas yüzeylerinde kaynaklanmaları attırır ve akabinde de bu kaynak tabakaları kırılır. Buda aşınma miktarının artmasına neden olur. Daha önceden yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar bulunmuş ve yük matris malzemesi ve takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağımlı zayıflatacak sınırın üzerine çıktığında aşınma miktarında ani artışların gözlemlendiği belirtilmiştir [57, 61, 66].

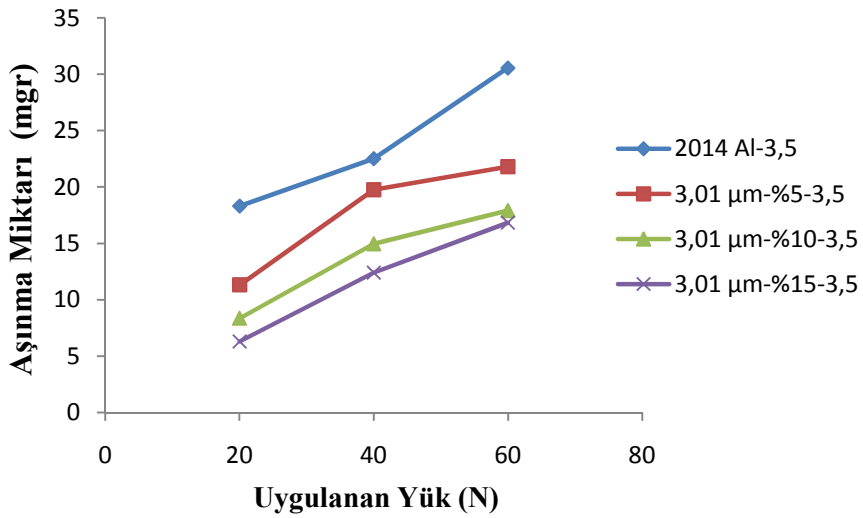
Kompozit numunelerde takviye elemanı olan Al_2O_3 seramiğin % ağırlık oranı arttıkça aşınma miktarının azaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeni matris malzemesine yerleştirilen kendisinden çok daha sert takviye elemanının % oranının artmasıdır. Benzer sonuçlar daha önceden yapılan çalışmalarda da bulunmuştur [74].



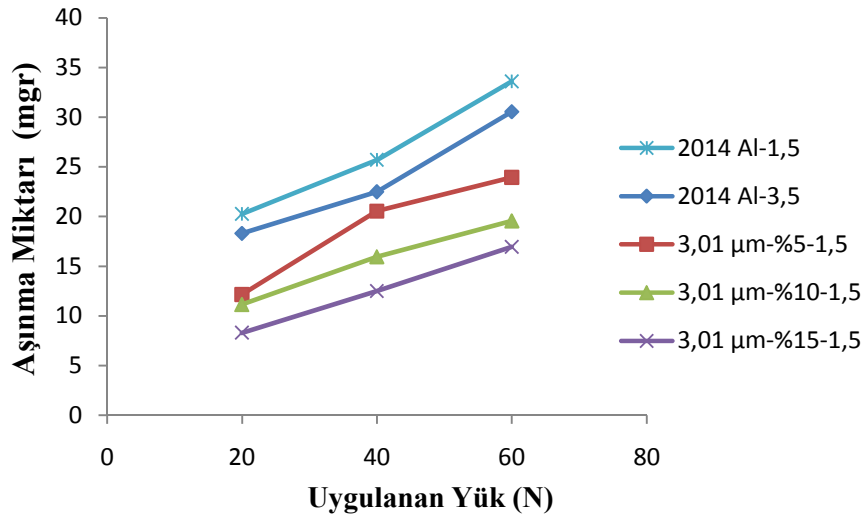
Şekil 5.8. 15,99 µm tane boyutuna sahip Al_2O_3 içeren 3,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi



Şekil 5.9. 8,61 µm tane boyutuna sahip Al_2O_3 içeren 3,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi



Şekil 5.10. 3,01 µm tane boyutuna sahip Al_2O_3 içeren 3,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi

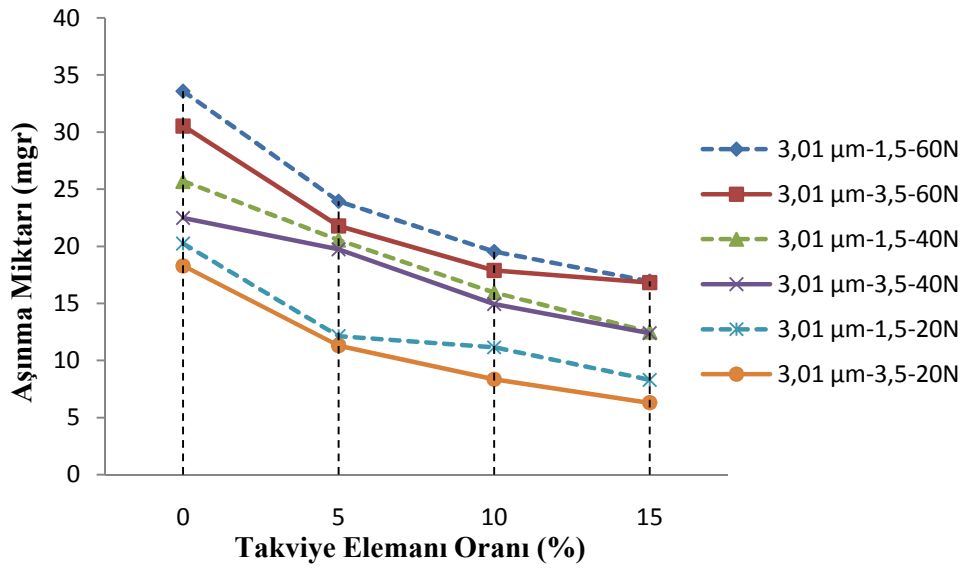


Şekil 5.11. 3,01 µm tane boyutuna sahip Al₂O₃ içeren 1,5 saat alaşımlanmış MMK'lerde değişik yüklerin ve takviye elemanı % oranının aşınma miktarına etkisi

5.7.2. Alaşımlama süresinin ve takviye elemanı oranının MMK'lerin aşınma davranışlarına etkisi

Kompozit numunelerin aşınma davranışlarını incelenirken, MA süresinin aşınma miktarı üzerinde etkisi araştırılmış ve Şekil 5.12'de verilen grafik elde edilmiştir. Bu araştırma yapılırken 3,01 µm tane boyutuna sahip 1,5 ve 3,5 saat olmak üzere farklı alaşımlama sürelerine tabi tutularak öğütülmüş/harmanlanmış, Al₂O₃ seramikle farklı oranlarında takviyelendirilmiş kompozit numuneler kullanılmıştır.

Şekil 5.12 incelendiğinde, değişik yükler altında değişik oranlarda takviyelendirilmiş numuneler üzerinde yapılan testlerde mekanik alaşımlama süresi arttıkça aşınma miktarında önemli azalmalar olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise; MA işlemi esnasında kazan içerisinde serbest hareket eden bilyelerin toz tanelerini sıkıştırması ve seramik partiküllerinin matris malzemesi içine bu yüksek enerjili çarpma sonucu gömmesi ile matris takviye elemanı arasında güçlü yüzey bağları oluşturmasıdır. Daha önceden yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiş, MA süresinin artması ile sertlik değerlerinin arttığı ve daha dayanıklı malzemelerin üretildiği belirtilmiştir [69].



Şekil 5.12. 3,01 µm tane boyutuna sahip Al₂O₃ seramikle takviyelendirilmiş MMK'lerde alaşımlama süresinin aşınma miktarına etkisi

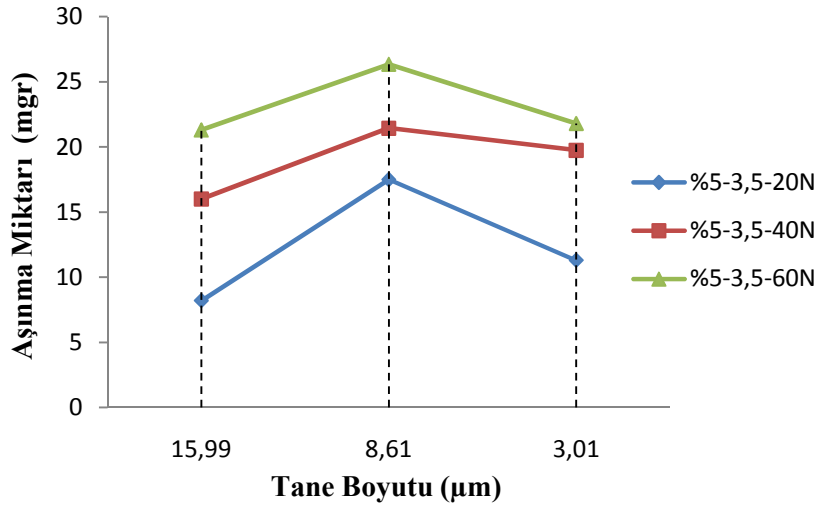
5.7.3. Değişik Al₂O₃ tane boyutunun MMK'lerin aşınma davranışlarına etkisi

3,5 saat mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuş 15,99 µm, 8,61 µm ve 3,01 µm tane boyutlarına sahip Al₂O₃ seramiklerle farklı oranlarda da takviyelendirilmiş kompozit malzemelerin; 20, 40 ve 60 N'luk yükler altındaki aşınma miktarlarının değişimi Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15'de görülmektedir.

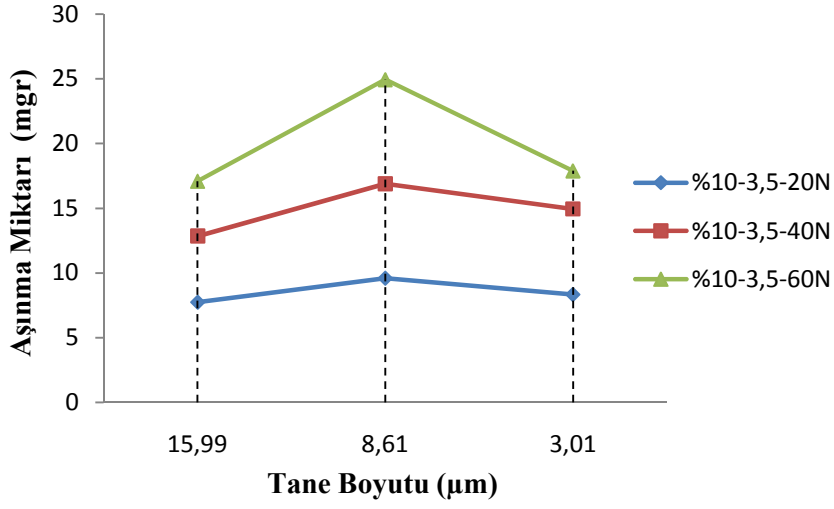
Şekiller incelendiğinde tanecik boyutu aynı olan numunelerin değişen takviye elemanı oranlarında ve farklı yükler altında benzer eğrileri oluşturduğu görülmektedir. Tane boyutu 15,99 µm olan numunelerde aşınmaya karşı direnç daha yüksek ve aşınma miktarı en düşük olduğu tespit edilmektedir.

Tane boyutu küçüldükçe aşınma miktarı artmıştır. Bunun yegane sebebi ise küçük tanelerin aşınma deneyleri esnasında uygulanan tahribata karşı direnç gösterememesi sonucu kopmasıdır. İri taneli yapılarda tanelerin yüzey alanının büyük olmasından ötürü uygulanan kuvvete karşı direnç gösterebilmektedir. Bundan önce yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar bulunmuş ve seramiklerin tane boyutu arttıkça aşınma miktarının azaldığı rapor edilmiştir [57].

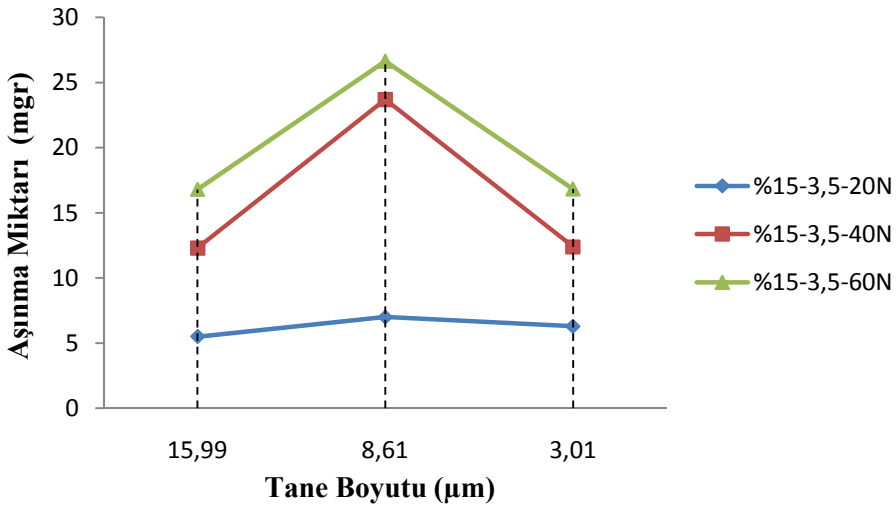
Şekiller incelendiğinde elde edilen diğer bir sonuç, 3,01 μm tane boyutunda Al_2O_3 içeren numunelerde aşınma miktarı, 15,99 μm tane boyutuna sahip numunelerden daha fazla ancak 8,61 μm tane boyutuna sahip numunelerden ise daha az olmasıdır. Bunun sebebi ise; 8,61 μm tane boyutunda Al_2O_3 içeren numunelerin üretilmesinde kullanılan tozların SEM incelemeleri yapıldığında anlaşılmıştır. Bu numunelere ait tozlarda, diğerlerinin üretiminde kullanılan tozlara göre çok daha fazla oksitlenme meydana gelmiştir (Resim 5.19). Toz tanelerini saran oksit tabakası presleme sırasında kırılmamışsa sinterlemenin çok verimsiz gerçekleşeceği daha önceden yapılan çalışmalarda belirtilmiştir [7]. Oluşan oksitlenmeden ötürü malzemede toz taneleri birleşerek mukavim bir yapı oluşturamamıştır. Ayrıca bu numuneye ait mikro yapı resimleri incelendiğinde seramik tanelerinde yığılmaların olduğu görülmektedir (Resim 5.6, 5.7 ve 5.8). Buda matris-takviye elemanı arasında güçlü ara yüzey bağlarının oluşmasını engellemiştir. Aşınma deneyleri esnasında bu yığılmalar koparak aşınma miktarını artırmıştır. Bu iki önemli faktörün bir araya gelmesi sonucu bu numunelerin aşınma miktarı diğer numunelerden fazla olmuştur.



Şekil 5.13. Ağırlıkça % 5 Al_2O_3 içeren MMK'lerde seramik partiküllerinin tane boyutunun, farklı yük altında aşınma miktarı üzerindeki etkisi



Şekil 5.14. Ağırlıkça % 10 Al₂O₃ içeren MMK'lerde seramik partiküllerinin tane boyutunun, farklı yük altında aşınma miktarı üzerindeki etkisi



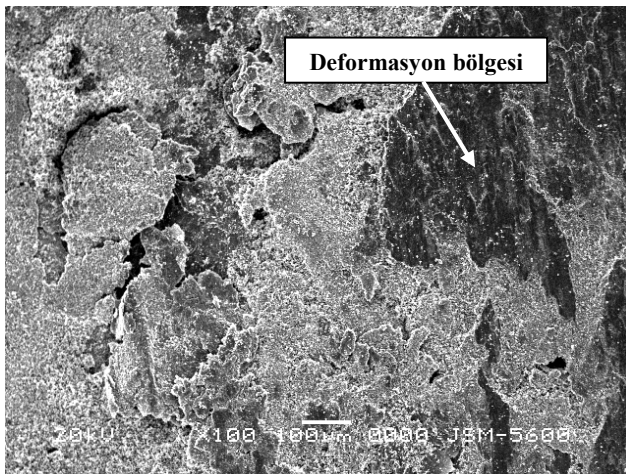
Şekil 5.15. Ağırlıkça % 15 Al₂O₃ içeren MMK'lerde seramik partiküllerinin tane boyutunun, farklı yük altında aşınma miktarı üzerindeki etkisi

5.8. MMK'lerin aşınmış yüzeylerinin SEM incelemeleri

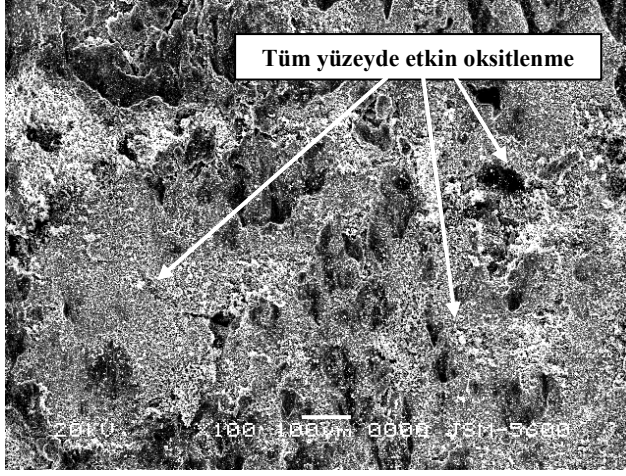
5.8.1. 60 N yük altında aşınma testine tabi tutulan kompozitlerin SEM görüntüleri

Aşınma deneyleri tamamlanan MMK'lerin yüzeylerde oluşan mekanizmaları belirlemek için aşınmış yüzeylerin SEM incelemeleri yapılmıştır.

Aşınma grafiklerinde gösterildiği gibi ana matris ile kompozitlerin aşınma miktarlarının farklı olduğu yapılan deney sonuçlarından anlaşılmıştır (EK 1). Bu olayın daha iyi anlaşılmasını sağlamak için Resim 5.24 matrisin aşınmış yüzeyi gösterilmiştir. Burada deneyler 1 m/s kayma hızında yapılmıştır. Bu resimde kayma yüzeyinde plastik deformasyon olduğu fakat oksidasyonun egemen olduğu gözlenmektedir. Bunun ağır yükleme sonucu olduğu sanılmaktadır. Bu deney 60 N yük altında yapılmıştır. MA süresi 3,5 saatten 1,5 saate düştüğünde ise Resim 5.25'de gösterildiği gibi daha homojen bir yüzey görünümü mevcuttur. Resim 5.24 ve Resim 5.25 karşılaştırıldığında, 3,5 saat alaşımlanmış numunenin yüzeyinde, siyah bölgelerde aşınmaya direnç gösterilen yapı görülmektedir. Resim 5.25'de görülen 1,5 saat alaşımlanmış numunede ise tüm yüzeyde aşınmanın egemen olduğu ve sonrasında bu bölgelerin oksitlenerek beyazlaştığı görünmektedir.



Resim 5.24. 3,5 saat MA yapılmış 2014 Al matris alaşımının aşınmış yüzeyi

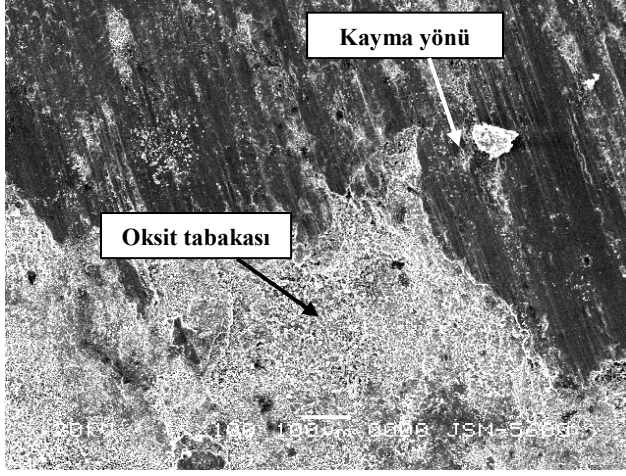


Resim 5.25. 1,5 saat MA yapılmış 2014 Al matris alaşımının aşınmış yüzeyi

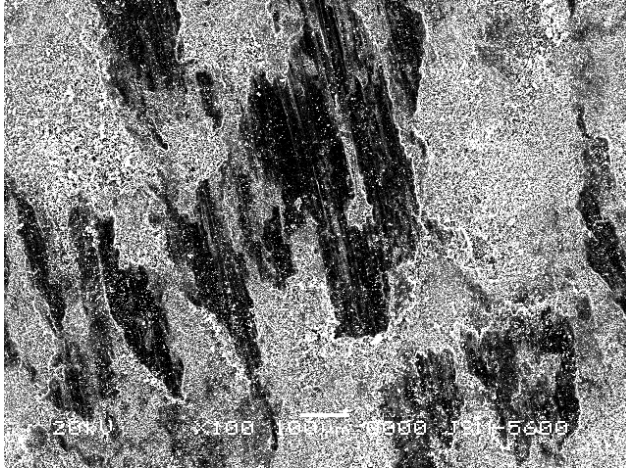
3,5 saat MA yapılmış 15,99 μm tane boyutlu Al_2O_3 seramik ile % 5, % 10 ve % 15 oranında takviyelendirilmiş kompozitler aynı şartlar altında aşınma deneyine tabi tutulmuş ve aşınma yüzeyleri sırasıyla Resim 5.26, 5.27 ve 5.28’de gösterilmiştir. Bu numunelerin aşınma yüzeylerine bakıldığında matrise göre daha düzgün ve daha ince abrasiv izleri olan yüzeyler görülmektedir. Ayrıca Al alaşımlarına göre siyah tabakaların arttığı görülmektedir. Buda seramik parçalarının takviyelendirilmesinden ileri gelmektedir. Takviyelendirme ile aşınma direnci daha yüksek malzemeler üretildiği bu siyah yani plastik deformasyona uğramış bölgelerin fazlalığından anlaşılmaktadır.



Resim 5.26. Tane boyutu 15,99 μm olan % 5 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi

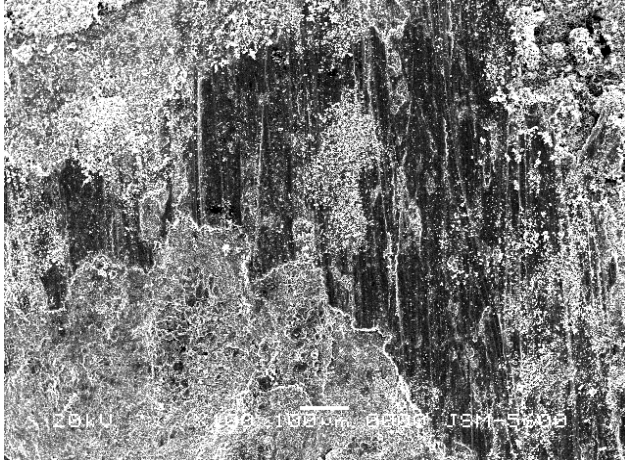


Resim 5.27. Tane boyutu 15,99 µm olan %10 Al₂O₃ içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi



Resim 5.28. Tane boyutu 15,99 µm olan %15 Al₂O₃ içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi

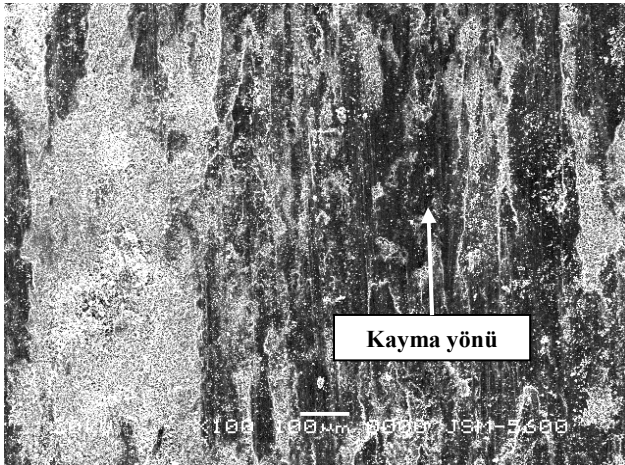
3,5 saat MA yapılmış 8,61 µm tane boyutlu Al₂O₃ seramik ile % 5, % 10 ve % 15 oranında takviyelendirilmiş kompozitler aynı şartlar altında aşınma deneyine tabi tutulmuş ve aşınma yüzeyleri sırasıyla Resim 5.29, 5.30 ve 5.31'de gösterilmiştir. Resimler incelendiğinde, aşınmış numunelerin benzer yüzey topografisine sahip olduğu fakat seramik % oranının azalması ile birlikte oksidasyonun egemen olduğu ve aşınmış bölgelerin arttığı görülmektedir. Çünkü yüzeyde daha fazla parçacık uflanmasının olduğu ve sürtünmenin etkisiyle yüzeyde derin ve geniş yivler oluştuğu görülebilmektedir.



Resim 5.29. Tane boyutu 8,61 μm olan % 5 Al₂O₃ içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi

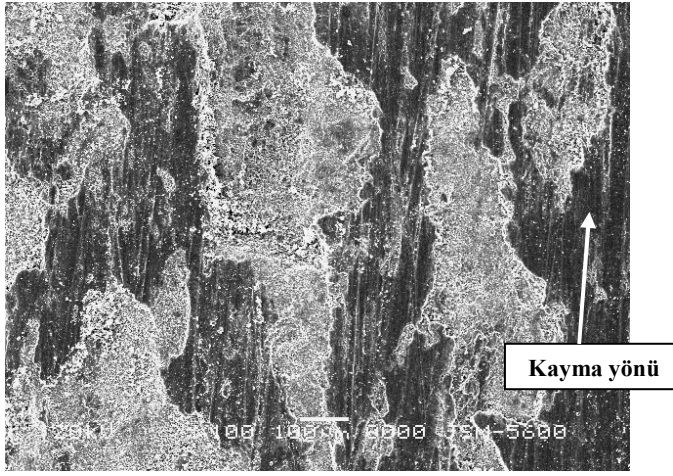


Resim 5.30. Tane boyutu 8,61 μm olan %10 Al₂O₃ içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi

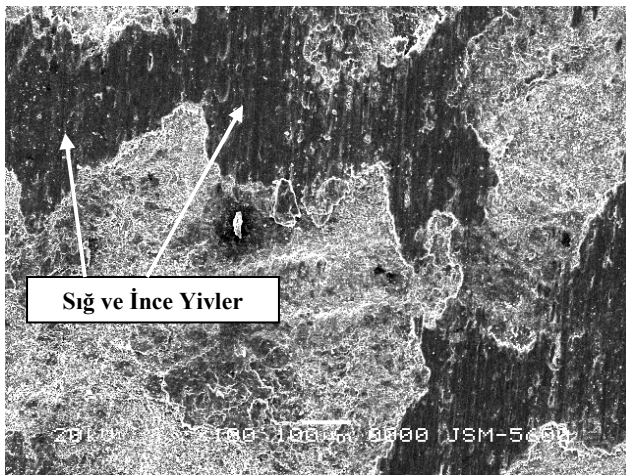


Resim 5.31. Tane boyutu 8,61 μm olan %15 Al₂O₃ içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi

Resim 5.32, 5.33 ve 5.34’de ise 3,5 saat MA yapılmış, sırasıyla % 5, % 10 ve % 15 oranında $3,01 \mu\text{m}$ tane boyutlu Al_2O_3 seramik ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aynı şartlar altındaki aşınma yüzeyleri gösterilmiştir. Resimler incelendiğinde parçacık içeriğinin artmasıyla plastik deformasyon bölgelerinin (siyah bölgeler) alanının arttığı yani aşınmaya karşı direncin arttığı görülmektedir. Buna bağlı olarak numunelerin aşınmış yüzeylerinde derin ve geniş yivlerin (abrasiv aşınma izleri) yerini parçacık içeriğinin artmasıyla birlikte sığ ve ince yivler almıştır.



Resim 5.32. 3,5 MA yapılmış tane boyutu $3,01 \mu\text{m}$ olan % 5 Al_2O_3 içeren MMK’nın aşınmış yüzeyi

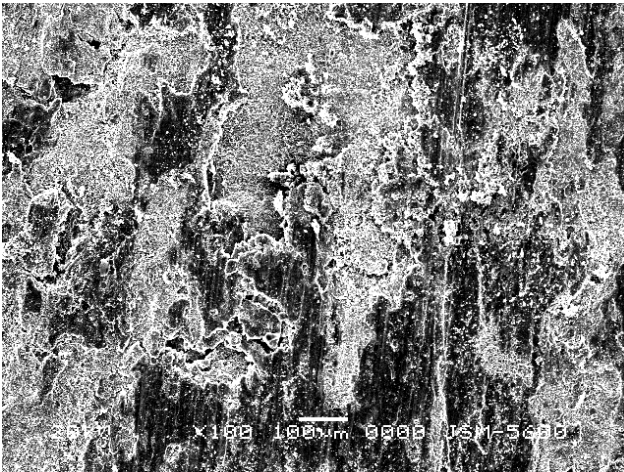


Resim 5.33. 3,5 MA yapılmış tane boyutu $3,01 \mu\text{m}$ olan %10 Al_2O_3 içeren MMK’nın aşınmış yüzeyi

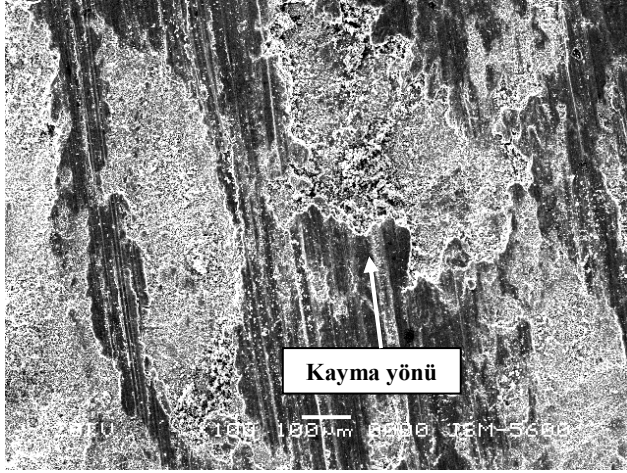


Resim 5.34. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi

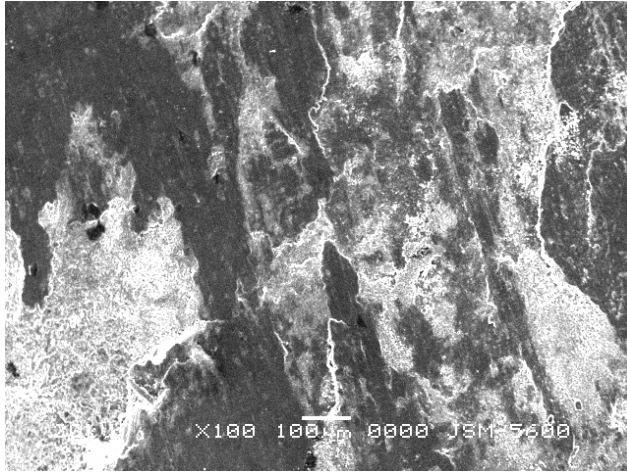
Resim 5.35, 5.36 ve 5.37'de ise 1,5 saat MA yapılmış, sırasıyla % 5, % 10 ve % 15 oranında 3,01 μm tane boyutlu Al_2O_3 seramik ile takviyelendirilmiş kompozitlerin aynı şartlar altındaki aşınma yüzeyleri gösterilmiştir. Resimler incelendiğinde parçacık oranının artmasıyla siyah bölgelerin artmasından anlaşıldığı üzere aşınmaya karşı direnç artmış ve plastik deformasyon artmıştır. Diğer bir ifade ile % takviye oranının azalmasıyla beyaz bölgelerin alanı artmış yani aşınma sonucu oksidasyon artmıştır.



Resim 5.35. 1,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan % 5 Al_2O_3 içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi



Resim 5.36. 1,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 µm olan %10 Al₂O₃ içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi



Resim 5.37. 1,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 µm olan %15 Al₂O₃ içeren MMK'nın aşınmış yüzeyi

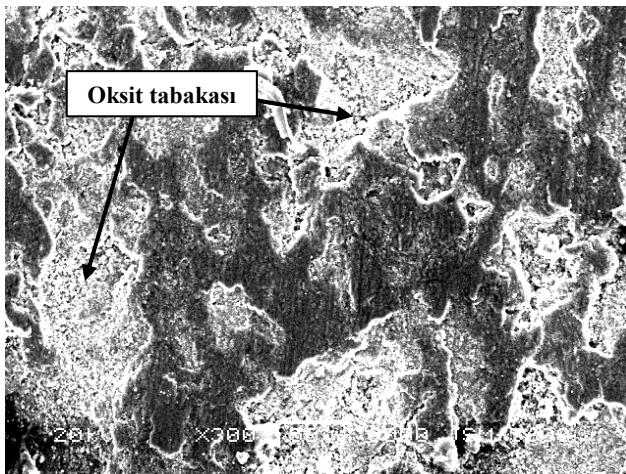
Bu resimlerden çıkan değer bir sonuç ise MA süresinin aşınma miktarı üzerindeki etkisidir. 3,5 saat MA yapılmış numunelere ait olan Resim 5.32, 5.33 ve 5.34'de ve 1,5 saat MA yapılmış numunelere ait Resim 5.35, 5.36 ve 5.37 karşılaştırıldığında; MA alaşımlama süresinin artmasıyla aşınmanın miktarının azalmıştır. Bu da beyaz bölgelerde oluşan oksit oluşumundan anlaşılabilir; yani takviye oranlarını baz alarak kıyas yaptığımızda 3,5 saat MA yapılmış numunelerin resimlerinde siyah bölgelerin fazlalığı, 1,5 saat MA yapılmış numunelerin resimlerinde de beyaz bölgelerin fazlalığı göze çarpmaktadır. Bu resimler aşınma miktarı üzerinde MA

süresinin etkisinin kıyaslandığı Şekil 5.12'deki verileri doğrulamaktadır. Şekil incelendiğinde, değişik yükler altında yapılan aşınma deneylerinde 3,5 saat MA yapılmış numunenin aşınma miktarının 1,5 saat MA yapılmış numuneden daha az olduğu görülmektedir.

5.8.2. 20 N yük altında aşınma testine tabi tutulan kompozitlerin SEM görüntüleri

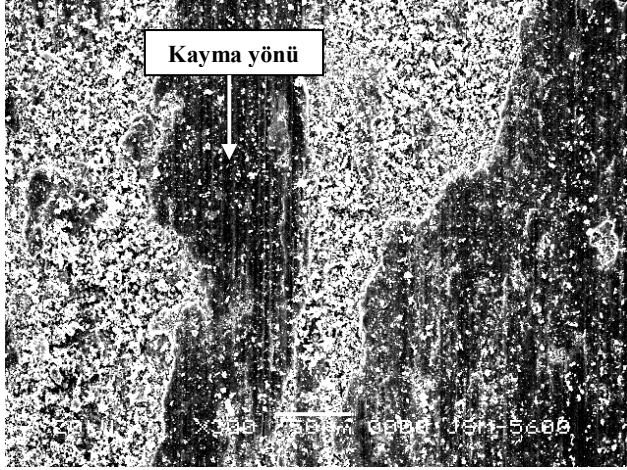
MA yöntemi ile üretilen 2014 Al alaşımının ve Al_2O_3 parçacıkların takviyesiyle güçlendirilmiş MMK'lerin, farklı yükler altındaki aşınmış yüzeylerinde oluşan mekanizmaları belirlemek amacı ile 20 N yük altında 3,6 km kayma mesafesinde, 1 m/sn sabit hız altında yapılan aşınma deneyleri sonucunda oluşan yüzeylerinin SEM incelemeleri yapılmıştır. SEM incelemeleri değerlendirildiğinde, büyük ve düşük yükler altındaki aşınma deneyleri sonucunda yüzeylerde oluşan mekanizmaların farklılık gösterdiği gözlenmiştir.

Resim 5.38'de 102,35 μm tane boyutuna sahip 3,5 saat MA yapılmış Al alaşımının 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi görülmektedir. Resim incelendiğinde, yüzeye oksit tabakasının hakim olduğu, bazı kraterlerin oluştuğu ve kısmi kopmaların meydana geldiği görülmektedir.

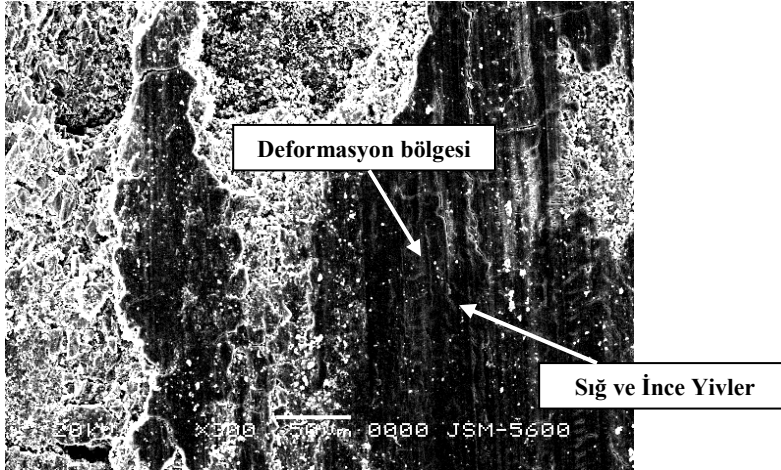


Resim 5.38. 3,5 saat MA yapılmış 2014 Al matris alaşımının 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi

Resim 5.39’da 15,99 μm tane boyutuna sahip 3,5 saat MA yapılmış % 5 Al_2O_3 içeren MMK’in ve Resim 5.40’da % 15 Al_2O_3 içeren MMK’in 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi görülmektedir. Resimler incelendiğinde takviye oranının artmasıyla oksit tabakasının azaldığı plastik deformasyona uğrayan bölgelerin arttığı görülmektedir.



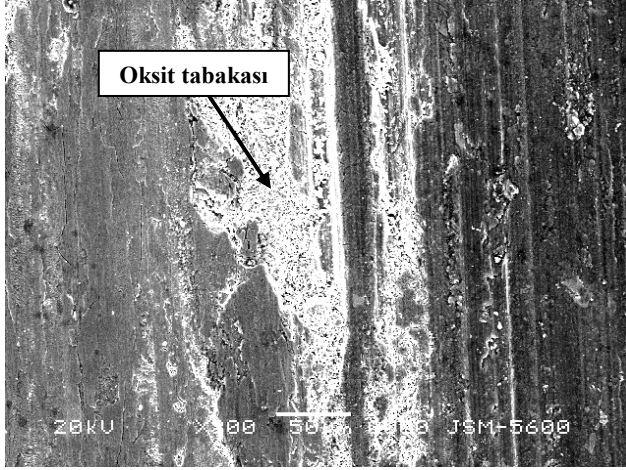
Resim 5.39. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 15,99 μm olan %5 Al_2O_3 içeren MMK’nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi



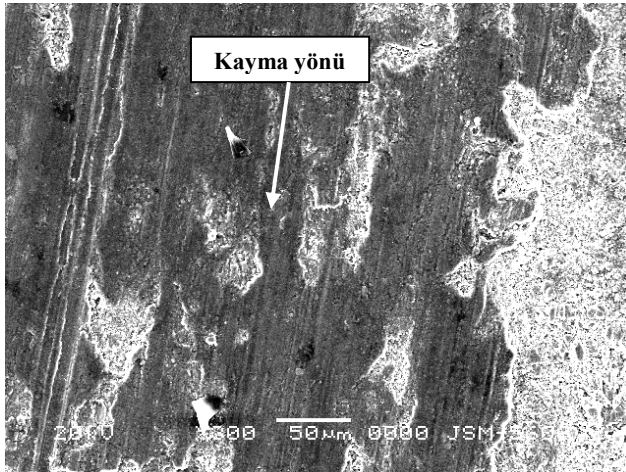
Resim 5.40. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 15,99 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK’nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi

Resim 5.41’de 8,61 μm tane boyutuna sahip 3,5 saat MA yapılmış % 5 Al_2O_3 içeren MMK’in ve Resim 5.42’de % 15 Al_2O_3 içeren MMK’in 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi görülmektedir. Resimler incelendiğinde matris malzemesinden üretilen

numuneye oranla oksit tabakalarının azaldığı ve daha düz bir yüzeyin oluştuğu görülmektedir. Aşınmış yüzeylerde abrasiv aşınma yivlerinin oluştuğu da görülebilmektedir.



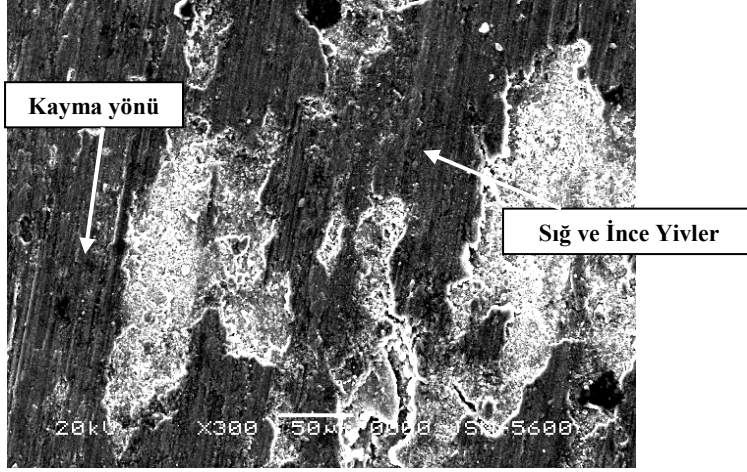
Resim 5.41. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 8,61 μm olan %5 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi



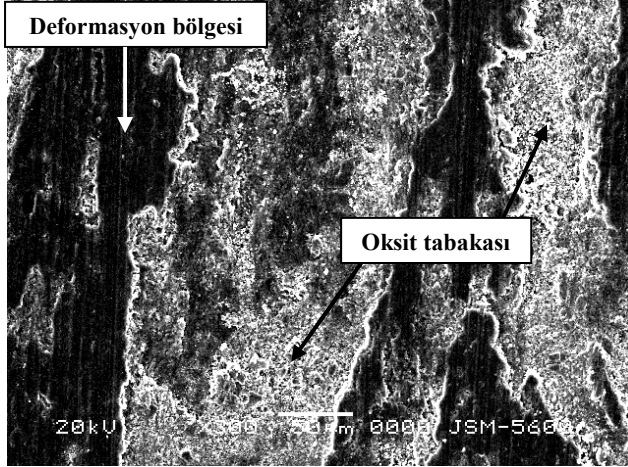
Resim 5.42. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 8,61 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi

Resim 5.43'de 3,01 μm tane boyutuna sahip 3,5 saat MA yapılmış % 5 Al_2O_3 içeren MMK'in ve Resim 5.44'de % 15 Al_2O_3 içeren MMK'in 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi görülmektedir. Resimler incelendiğinde malzemeler üzerinde oksidasyon ve plastik deformasyon bölgelerinin oluştuğu ve 20 N'luk yük altında yapılan testte

takviye oranının önemli bir etkiye sebep olmadığı görülmektedir. Buna ilave olarak malzeme yüzeyinde ince ve sığ yivlerinde oluştuğu tespit edilebilmektedir.



Resim 5.43. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %5 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi



Resim 5.44. 3,5 MA yapılmış tane boyutu 3,01 μm olan %15 Al_2O_3 içeren MMK'nın 20 N yük altındaki aşınmış yüzeyi

5.9. EDAX Analizi

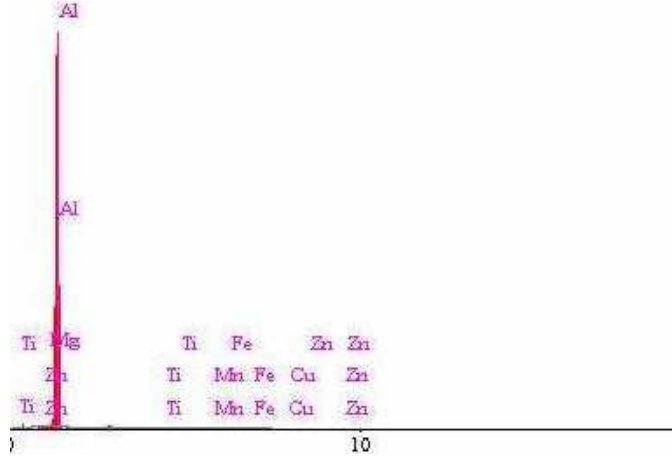
MA sonrası elde edilen numunelerin bileşimini oluşturan elementlerin belirlenmesi, MA ya da sinterleme esnasında deney numunelerinde oluşabilecek kirlilik ve oksitlenmeler araştırılması amacıyla, EDAX incelemeleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.16-5.20’de görülmektedir.

Şekiller incelendiğinde, MMK malzemelerde istenmeyen fazların ve sonuçları etkileyecek oranda oksitlenmenin oluşmadığı görülmektedir. EDAX incelemelerinde elde edilen değer bir netice ise elementlerin yüzeydeki yoğunluk değerleridir. Elde edilen oksijen yoğunluğu değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde takviye elemanın tane boyutunun artmasıyla oksijen yoğunluğunun artması görülmektedir. Matris elemanına bakıldığında ise, MMK’lere oranla çok daha az oksijen yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni ise, MMK’ların üretiminde takviye elemanı olarak Al_2O_3 kullanılmasıdır. Matris malzemesinden üretilen numunelerde Al_2O_3 olmadığı için oksijen yoğunluğunda buna bağlı olarak düşük değerlerde oluşmuştur.

Çizelge 5.3. Deney numunelerindeki oksijen yoğunluğu

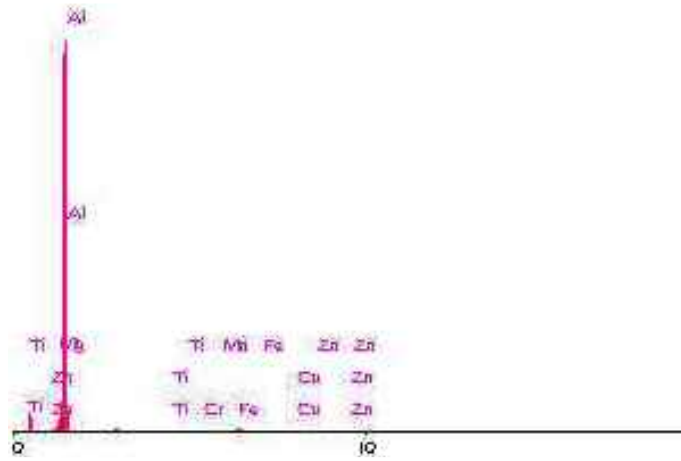
Deney Numunesi	Oksijen Yoğunluğu (c/s)
2014 Al matris alaşımı	9,5
3,01 μm Al_2O_3 takviyeli MMK	13,03
8,61 μm Al_2O_3 takviyeli MMK	25
15,99 μm Al_2O_3 takviyeli MMK	39,85

Şekil 5.16.’da 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış Al alaşımının EDAX analizi sonucu gösterilmiştir. Elementsel analize göre MMK’lerin, % 96,2 Al; % 0,82 Fe; % 0,676 Zn; % 0,52 Si ve % 0,49 Cu’dan oluştuğu gözlenmektedir.



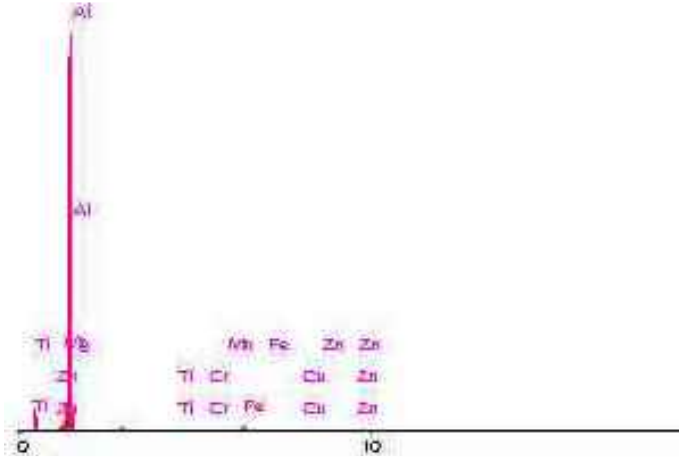
Şekil 5.16. 2014 Al matris alaşımının EDAX analizi sonucu

Şekil 5.17.'de 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 15,99 μm tane boyutuna sahip % 10 Al_2O_3 takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu gösterilmiştir. Elementsel analize göre MMK'in, % 91,7 Al; % 4,22 Fe; % 0,48 Zn; % 0,42 Si ve % 0,44 Cu'dan oluştuğu gözlenmektedir.



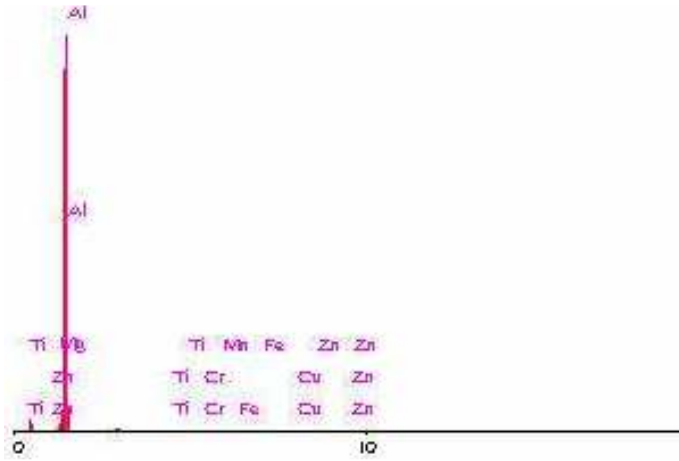
Şekil 5.17. 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 15,99 μm tane boyutuna sahip % 10 Al_2O_3 takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu

Şekil 5.18.'de 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 8,61 μm tane boyutuna sahip % 10 Al_2O_3 takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu gösterilmiştir. Elementsel analize göre MMK'in, % 91,9 Al; % 4,4 Fe; % 0,68 Zn; % 0,21 Si ve % 0,45 Cu'dan oluştuğu gözlenmektedir.



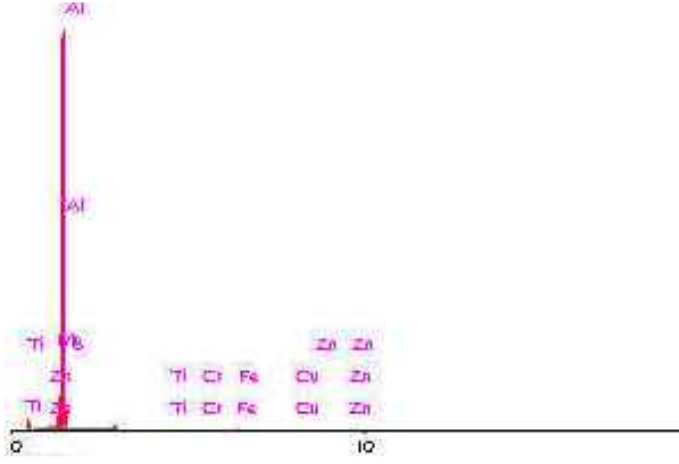
Şekil 5.18. 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 8,61 μm tane boyutuna sahip % 10 Al_2O_3 takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu

Şekil 5.19.'da 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 3,01 μm tane boyutuna sahip % 10 Al_2O_3 takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu gösterilmiştir. Bu elementsel analize göre MMK'in, % 95 Al; % 2,2 Fe; % 0,47 Zn; % 0,1 Si ve % 0,65 Cu'dan oluştuğu gözlenmektedir. Bu iki parçacık boyutu karşılaştırıldığında Al ve Fe içerikleri arasındaki farklar göze çarpmaktadır.



Şekil 5.19. 3,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 3,01 μm tane boyutuna sahip % 10 Al_2O_3 takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu

Şekil 5.20.'de 1,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 3,01 µm tane boyutuna sahip % 10 Al₂O₃ takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu gösterilmiştir. Elementsel analize göre MMK'in, % 93,5 Al; % 2,6 Fe; % 0,96 Zn; % 0,2 Si ve % 0,35 Cu'dan oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 5.20. 1,5 saat mekanik alaşımlama yapılmış 3,01 µm tane boyutuna sahip % 10 Al₂O₃ takviyeli MMK'in EDAX analizi sonucu

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada; Mekanik alaşımlama yöntemi uygulanarak 2014 Al alaşımına, ortalama tane boyutu 15,09 μm , 8,61 μm ve 3,01 μm olan Al_2O_3 parçacıklarının ağırlıkça % 5, 10 ve 15 oranlarında takviye edilmesi ile MMK malzemelerin üretimi yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin mikro yapı incelemeleri, yoğunluk, porozite ve sertlik ölçümleri, SEM ve EDAX analizleri yapılmıştır. Ayrıca üretilen numuneler kuru ortamda farklı yükler altında aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Üretilen MMK'lerin mikro yapı incelemelerinde en iyi dağılımın 15,99 μm tane boyutuna sahip Al_2O_3 içeren MMK malzemelerde olduğu görülmüştür. Tane boyutları küçüldükçe kompozit bünyesinde topaklanmaların çoğalarak gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir.
2. MMK malzemelerin yoğunlukları ölçüldüğünde ve buna bağlı olarak porozite seviyeleri hesaplandığında, takviye elemanı boyutunun artmasıyla yoğunluk değerlerinin arttığı, porozite değerlerinin düştüğü görülmüştür. Ancak, takviye elemanın ağırlıkça % oranının artmasıyla yoğunluk ve porozite değerleri artmıştır.
3. Üretilen MMK'lerin sertlik değerleri ölçüldüğünde, takviye elemanının % oranının artmasıyla ve seramik parçacıkların tane boyutlarının artmasıyla sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür. Ayrıca MA süresinin artması ile sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Sertlik değeri en yüksek, 15,99 μm tane boyutuna sahip Al_2O_3 içeren MMK malzemelerde ölçülürken, en düşük değer matris alaşımından üretilen numunede ölçülmüştür. MMK'in, matris alaşımının yaklaşık 2,5 katı sertlik değerine sahip olduğu belirlenmiştir.
4. Farklı yükler altında yapılan aşınma deneylerinde, Al matris alaşımından elde edilen numunelerin, MMK malzemelerden daha fazla aşındığı tespit edilmiştir. Yükün artması ile tüm numunelerde aşınma miktarında artış gözlenmiştir.

5. Takviye elemanın % oranının artmasıyla ve seramik parçacıkların tane boyutlarının artmasıyla aşınma miktarları azalmıştır. MA süresinin artmasıyla aşınma direnci daha yüksek MMK'ler üretilmiştir. Deneyler esnasında MA süresinin uzun olduğu numunelerde aşınma miktarının daha az olduğu görülmüştür.
6. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemelerde, Al_2O_3 tane boyutlarının lazer tane boyu analizlerinde elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği, toz parçacıklarının benzer geometriye sahip olduğu açılı dörtgen şekilli olduğu ve lifli olanlarında olduğu görülmüştür.
7. SEM ile MA yapılmış tozlar incelendiğinde de tozların yassılaşılarak ince plakalar halini aldığı soğuk kaynaklanmaların ve kırılmaların olduğu gözlenmiştir. Ayrıca toz tanelerinin büyüklüğünün farklı gösterdiği, bazılarının yuvarlak plakalar haline geldiği bazılarının da uzun lameller halini aldığı görülmüştür. Tozlarda yer yer oksit tabakalarının olduğu, 8,61 μm tane boyutuna sahip Al_2O_3 içeren toz kompozisyonunda oksitlenmenin en fazla olduğu görülmüştür.
8. Aşınmış yüzeylerin SEM incelemelerinde ise, plastik deformasyona ve oksitlenmeye maruz kalan bölgelerin olduğu görülmüştür. Ayrıca; MA süresinin, takviye elemanı tane boyutunun ve % oranının arasıyla oksitlenmiş bölgelerin azaldığı, plastik deformasyona uğrayarak aşınmaya direnç gösteren bölgelerin arttığı belirlenmiştir.
9. Yapılan EDAX analizlerinde ise, MMK'lerde istenmeyen fazların oluşmadığı ve matris malzemesi ile MMK'lerin oksijen içerikleri karşılaştırıldığında Al_2O_3 içeren MMK'lerin oksijen yoğunluğunun matris malzemesinden çok daha fazla olduğu anlaşılmıştır.

Bu konu ile ilgili bundan sonraki çalışmalarda şunlar yapılabilir:

1. Daha uzun MA sürelerinde ve yüksek devirlerde karışım hazırlanarak MMK'lerin mekanik özellikleri üzerindeki MA süresinin etkisi araştırılabilir.
2. Farklı seramikler ve farklı tane boyutları kullanılarak karışım oranları daha yüksek değerlere çıkarılarak MMK'ler üretilebilir.
3. Toz karışımları yüksek basınçlarda sıcak preslenerek porozite değerlerini düşürmek hedeflenebilir.
4. Al matris malzemesini MA işlemine tabi tutarken, koruyucu atmosfer olarak yüksek saflıkta oksijen kullanılabilir ve güçlü ara yüzey bağlarına sahip Al_2O_3 oluşumları denenebilir.
5. MA yapılmadan önce Al_2O_3 seramik parçacıkları üzerine kaplama yapılarak yeni MMK'ler üretilip deneyler yapılabilir.
6. Aynı oranlarda ve boyutlarda tozlar kullanılarak farklı kompozit üretim teknikleri (vorteks, infiltrasyon, ultrasonik) ile MMK'ler üretilebilir ve aşınma davranışları karşılaştırılabilir.
7. Üretilen numunelerin daha yüksek hızlarda aşınma deneylerine tabi tutulabilir.
8. Aşınma deneylerinin sonuçları baz alınarak matematiksel modelleme yapılabilir ve aşınma miktarı üzerinde etkin parametreler belirlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Çıtak, R., “Metalik Ba-Al Başlangıç tozlarının Düşük sıcaklıklarda Oksidasyonu ile Al Matrisli Kompozit Üretimi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 2-26 (1998).
2. Sur, G., “Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 3-42 (2002).
3. Acılar, M., “Al/SiC Kompozitlerin Vakum İnfiltrasyon Yöntemi ile Üretimi ve Aşınma Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 44-62 (2002).
4. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş, 1”, **Seçkin Kitabevi**, Ankara, 27, 55, 88-89 (2006).
5. Lubin, G., “Handbook of Composites”, **Van Nostrand Reinhold Co.**, 196 (1982).
6. Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş, 1”, **Gazi Kitabevi**, Ankara, 3, 52 (2000).
7. Bostan, B., “Alüminyum-Karbon Tozlarından Mekanik Alaşımlama ve Sonrası İşlemlerle Al₄C₃ Sentezlenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-35 (2003).
8. Hausner, H. H. and Smith, W. E., “Modern Development in Powder Metallurgy”, **Metal Powder Int. Fed.**, Princeton, 6: 1-4 (1973).
9. Ruhle, M. And Karlo, G., “Novel ODS superalloys manufacture and properties heat resistans materials”, **Proc. Of The First Int. Conf.**, USA, 23-26, 45-59 (1991).
10. Tyong, J. C., and Ma, Z. Y. “Microstrucal and mechanical characteristics of instu metal matrix composites”, **Met. Sci. And Eng. Reports.**, 29: 49-113 (2000).
11. Artz, E. And Schultz, L., “New materials by mechanical alloying techniques”, **Prited Verlag.**, Germany, 19-52, 129-142 (1988).
12. Tavman, İ. H., “Kompozit malzemelerin savunma sanayinde kullanımı”, **Savunma Sanayindeki Teknolojik Gelişmeler Sempozyumu**, Ankara, 5-6 (1997).
13. Ramesh, C. S., Anwar Khan, A. R., Rvikumar, N. And Savanprabhu, F., “Piediction of wear coefficient of Al6061-TiO₂ composites”, **Wear**, 259, 602-608 (2005).

14. Mondal, D. P. And Das, S., “High stress wear behaviour of aluminium hard particle composites: Effect experimental parameters, particle size and volume fraction”, *Tribology International*, 1-9 (2005).
15. Şahin, Y., “Elyaf takviyeli metal matrisli kompozitlerin aşınma ve sürtünme davranışlarının incelenmesi”, *7. Denizli Malzeme Sem.*, Denizli, 286-292 (1997).
16. Elliasson, J. And Sandström R., “Metal Matrix Composites, Key Engineering Materials”, *Trans Tech Pub.*, Switzerland, 104-107: 3-36 (1995).
17. Taya, M. and Arsenault R.J., “Metal Matrix Composites-Thermal and Mechanical Behaviour”, *Pergamon Press*, New York, 25-28 (1988).
18. Prasad, S. V. And Rohatgi, P. K. Tribological Properties of Alloy Partical Composites, *Journal of Met.*, 22-26 (1987).
19. Hosking, F. M., Portillo, F. F., Wunderlin, R., Mehrabian, R., “Composites of Aluminium Alloys: Fabrication and Wear Behaviour”, *Jour. Of Materials Science*, 17: 477-498 (1982).
20. Trumper, R. L., “Metal Matrix Composites-Applications and Prospects”, *Metals and Materials*, 3: 662-667 (1987).
21. Şahin, Y., “The mechanical and wear behaviour of SiC reinforced metal matrix composite” *Ph. D. Thesis, The University of Aston*, Birmigham, 28-31 (1994).
22. Yılmaz, A.T., “Al- Al₂O₃ Kompozit Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 20-21 (1997).
23. Fair, G. H. and Wood, J. U., “MA of iron-aluminium intermetallics”, *Powder Met.*, 36: 123-128 (1993).
24. Suryanarayana, C., “Mechanical alloying and milling”, *Progress in Materials Science*, 46: 1-184 (2001).
25. Kurt, A., “Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 8-35 (1992).
26. Arık, H., Turker, M., and Sarıtaş, S., “Investigation of the mechanical properties of Al₄C₃ reinforced aluminium based composites by mechanical alloying techniques”, *Proceedings of Powder Metallurgy World Congress*, 1713 (2000).
27. Schelleng, R. D., and Donachie, S. J., “Mechanical alloyed aluminum”, *Metal Powder Report*, 38: 357-359 (1983).

28. Suryanarayana, C., "Powder metal Technologies and applications", *Handbook, ASM Materials Park*, 7: 80-90 (1998).
29. Di, L. M. And Bakker, H. J., "Phase transformation of the compound V_3Ga induced by mechanical grinding", *Phsy. C: Condens. Matter.*, 3: 3427-3432 (1991).
30. Schaffer, G. B., and Mc Cormick, *Metall Transaction A*, 22: 2789 (1999).
31. Garliov, D., Hashimoto, H., Park, Y. H., and Sansoucy, R. J., "Advances in powder metallurgy, *Met. Pow. Inds. Fed.*, Priceton, 1, 6: 119-130 (1991).
32. Özyürek, D., "Mekanik Alaşım Yöntemi ile Titanyum Bazlı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Karakterizasyonu", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 21 (2002).
33. Calka, A. And Williams, J. S., "Synthesis of Nitrides by Mechanical Alloying" *Mater. Sci. Forum*, 88-90: 787-794 (1992).
34. Chen, Y. And Williams, J. S., "Hydriding Reactions Induced by Ball Milling", *Mater. Sci. Forum.*, 225-227: 881-888 (1996).
35. Lee, W., Kwan, S. I., *J. Alloys and Compounds*, 240: 9-193 (1996).
36. Hong, L. B., Bansal, C. And Fultz, B., *Nanostructured Mater*, 4: 949-56 (1994).
37. Sümer, M., "Mekanik Alaşım İle Üretilen Fe-Fe₃ Kompozit Malzemede Mekanik Özelliklerin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-21 (2003).
38. Sands, R. L., Shakspeare, C. R., "Powder Metallurgy" *Georgw Newnes Ltd.*, London, 40-95 (1966).
39. Göktaş, T., "Mekanik alaşım süresinin Al-Cu karışımı toz metal parçaların kırılma dayanımına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 42 (2005).
40. Akoral, E., " Toz Metalürjisi Yöntemi ile Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 43-48 (2003).
41. German, R. M., Powder Metallurgy Science, 2nd edition, *Metal Powder Industries Federation*, U.S.A., 58-64 (1994).
42. Kragelsky, I. V. Dobichin, M. N. Kombalov, V. S., "Friction and Wear- Calculation Methods", *Pergamon Pres*, Oxford, 5-20, 78 (1982).

43. Demirci, A.H., “Ötektoidalı Çeliklerin Yeni İmal Edilen Bir Sürtünme-Aşınma Deney Standında Isıl İşlemlere Bağlı Olarak Aşınma Davranışlarının İncelenmesi ve Optimizasyonu”, Doçentlik Tezi, *Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, İzmir, 8-44 (1982).
44. Kılınç, Y., “Yağlı sürtünme şartlarında çelik ince zırh yataklarında üretim tekniklerinin aşınma etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 1-25 (1993).
45. Odabaş, D., “Ötektoidalı Çeliklerin Kayma Sürtünmesi Aşınmasında Adhesiv Aşınma Katsayılarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 50-65 (1987).
46. Halling, J., “Principles of Tribology”, *MacMillan Press*, London, 214-219 (1975).
47. Toparlı, M., Şen, S. “Karbonlu çeliklerde aşınma”, *5. Denizli Malzeme Sempozyumu*, 448-453 (1993).
48. Kökden, M. U., “GGG 50 ve GGG 80 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin abrasiv aşınma davranışına östemperleme işleminin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 92-121 (1998).
49. Aslan, A., “Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 42-54 (2002).
50. Baydoğan, M., Çimenoglu, H., “The effect of austempering time on mechanical properties of a ductile irons”, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 30: 391-395 (2001).
51. Roberts, S., “Wear”, *Surface Engineering*, 1-23 (2002).
52. Çetin, M., “Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 103-106 (2005).
53. Özdin, K., “Alüminyum esaslı SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 19-21 (2006).
54. Kato, K., and Adachi, K., “Wear mechanisms”, Modern Tribology Handbook, editor; Bharat Bhushan, *CRN Press*, America, 273-299 (2001).
55. Corrochano, J., Cerecedo, C. Valcárcel, V., Liebllich, M., Guitián F., “Whiskers of Al₂O₃ as reinforcement of a powder metallurgical 6061 aluminium matrix composite”, *Materials Letters*, 1-3 (2007).

56. Arik, H., Turker, M., “Production and characterization of in situ Fe-Fe₃C composite produced by mechanical alloying”, *Materials and Design*, 28: 140-146 (2007).
57. Şahin, Y., Özdin, K., “A model for the abrasive wear behaviour of aluminium based composites”, *Materials and Design*, 1-6 (2007).
58. Krasnowski, M., Kulik, T., “Nanocrystalline FeAl matrix composites reinforced with TiC obtained by hot-pressing consolidation of mechanically alloyed powders”, *Intermetallics*, 1377-1383 (2007).
59. Razavi, M., Reza Rahimipour, M. R., Rajabi-Zamani, A. H., “Synthesis of nanocrystalline TiC powder from impure Ti chips via mechanical alloying”, *Journal of Alloys and Compounds*, 436: 142–145 (2007).
60. Yin, S., Bian, Q., Qian, L., Zhang A., “Formation of Al₇₀Cu₂₀Fe₁₀ icosahedral quasicrystal by mechanically alloyed method”, *Materials Science and Engineering, A* 465: 95–99 (2007).
61. Arik, H., Ozcatalbas, Y., Turker, M., “Dry sliding wear behavior of in situ Al-Al₄C₃ metal matrix composite produced by mechanical alloying technique”, *Materials and Design*, 27: 799-804 (2006).
62. Liu, Y., Liu, W., “Mechanical alloying and spark plasma sintering of the intermetallic compound Ti₅₀Al₅₀”, *Journal of Alloys and Compounds*, 440: 154–157 (2007).
63. Matsumoto A., Kobayashi, K., Nishio, T., Ozaki K., “Fabrication of Ti–Zr–Ni bulk quasicrystal by mechanical alloying and pulse current sintering”, *Journal of Alloys and Compounds*, 434-435: 315-318 (2007).
64. Gilman, P.S. and Nix, W. D., “The structure and properties of aluminium alloys produced by mechanical alloying: powder processing and resultant powder structures”, *Met. Trans. A.*, 12A: 813-823 (1981).
65. Arsenault, R. J. and ve Wu, S. B., “A comparison of PM vs. Melted SiC/Al composites”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 22: 767-772 (1998).
66. Güldeş, A., Şahin, Y. ve Dilipak, H., “Zn-Al esaslı metal matriksli kompozit malzemelerinin aşınma davranışlarının incelenmesi”, *Politeknik*, 3: 97-102 (2000).
67. Purazrang, K., Abachi, P. and Kainer, K. U., “Investigation of the mechanical behaviour of magnesium composites”, *Composites*, 25(4): 296-302 (1994).

68. Jiang, J. Q., Tan, R. S. and Ma, A. B., "Dry sliding wear behaviour of Al₂O₃-Al composites produced by centrifugal force infiltration", *Materials Science and Technology*, 12: 483-488 (1996).
69. Türker, M., Özdemir, A. T., Ögel, B. ve Yavuz, A., "Alüminyum-SiC Tozlarının Mekanik Alaşımlama Değirmeninde Öğütme Zamanının Kompozit Toz Yapısına Etkisinin Araştırılması", *Uluslar Arası Katımlı 2. Ulusal Toz Metalürjisi Konferansı*, Ankara, 425-431 (1999).
70. Bağcı, C., "Mekanik Alaşımlama İle Üretilen Al-Al₄C₃ kompozit Malzemede Presleme Basını Ve Sinterleme Sıcaklığının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-3 (2002).
71. Özkök, Ö., "α- Si₃N₄ İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-6 (2004).
72. Ayas, E., "Al₂O₃- TiC/TiCN Kompozit Malzemelerinin Üretim Yöntemleri", Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 1-2 (2003).
73. Kılınç, Y. ve Uslan, İ., "Titreşimli Yatay Atritör İmalatı ve Alumina Öğütme Davranışının İncelenmesi", *Proceedings of the 3rd International Powder Metallurgy Conference*, Ankara, 1075-1084 (2002).
74. Şahin, S., Özdemir, İ., ve Ünlü, B. S., "T/M Yöntemi İle Üretilmiş Al-SiCp Kompozitlerde Üretim Parametrelerinin Aşınma Davranışına Etkisi", *3rd International Powder Metallurgy Conference*, Gazi Üniversitesi, Ankara, 951-957 (2002).
75. Kök, M., "Metal Matrisli (Al₂O₃ takviyeli) Kompozit Malzemelerin Üretimi ve Seramik Takımlarla İşlenebilirliğinin Araştırılması" Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 1-15, 37-46 (2000).

EKLER

EK-1. Farklı tane boyutu ve yüzde oranına sahip Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozitlerin değişik yükler altındaki aşınma miktarları

Çizelge 1.1. Farklı tane boyutu ve yüzde oranına sahip Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozitlerin değişik yükler altındaki aşınma miktarları
(Aşınma miktarları mgr cinsinden verilmiştir)

MALZEME ÜRETİM PARAMETRELERİ			YÜKLEME ŞARTLARI (N)		
DENEY NUMUNESİ	Takviye Oranı (Ağırlıkça %)	MA Süresi (Saat)	20	40	60
2014 Al matris alaşımı	0	1,5	20,25	25,7	33,6
2014 Al matris alaşımı	0	3,5	18,3	22,5	30,55
15,99 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	5		8,2	16	21,3
	10	3,5	7,75	12,85	17,1
	15		5,5	12,3	16,8
8,61 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	5		17,5	21,45	26,35
	10	3,5	9,6	16,9	24,95
	15		7	23,7	26,65
3,01 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	5		11,3	19,75	21,8
	10	3,5	8,35	14,95	17,9
	15		7,29	11,34	15,53
3,01 µm tane boyutuna sahip Al ₂ O ₃ takviyeli MMK	5		12,15	20,55	23,95
	10	1,5	11,15	15,95	19,55
	15		8,3	12,5	16,95

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKTAŞ, Hüseyin
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 15.07.1981 İzmit
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (542) 458 04 81
 e-mail : haktass@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Kocaeli Üni./Makine Eğitimi Bölümü	2004
Lise	Kocaeli Teknik Lisesi	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-2007	Gazi Üniversitesi/Atatürk M.Y.O.	Öğretim Elemanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Şahin, Y., Aktaş, H., Özkan, S., KILIÇ, E.,“ Abrasive Wear Analysis of Austempered Ductile Iron Using Factorial Design”, *The 12th International Conference on Machine Design and Production*, Kuşadası, Turkey, (2006).